Transport and Communications Science Journal, Vol 70, Issue 4 (10/2019), 264-278

Transport and Communications Science Journal

OPTIMAL PLANNING OF SUBSTATIONS ON URBAN RAILWAY POWER SUPPLY SYSTEMS USING INTEGER LINEAR PROGRAMMING

Tran Van Khoi[1*], Nguyen Duc Khuong[1]

[1]*University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam.*

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article
Received: 26/08/2019
Revised: 23/09/2019
Accepted: 24/09/2019
Published online: 16/12/2019
https://doi.org/10.25073/tcsj.70.4.14
[*] *Corresponding author*
Email: tvkhoi.ktd@utc.edu.vn; Tel: 0971385813

Abstract. Optimal location and capacity of substations play an important role in the railway power system that not only ensures the safety and reliability in operation process but also significantly affects on the total cost of railway power supply system. This paper proposes a new method to solve the problem of optimal substation planning in the urban railway systems. On the basis of a fixed load model converted to the moving load of the train, the proposed method improves the linear programming to find the minimum number of substations and their optimal locations for minimizing the total cost as well as the power loss of the railway power supply system. The simulation on a test system base on the data of Cat Linh - Ha Dong railway system was tested for evaluating the effect of the proposed approach. The simulated results showed that the proposed method is flexible and feasible in solving the substation planning problem for railway electrification systems which can be used as a solution to the pre-planning stage as well as in the detailed design for urban railway systems.

Keywords: traction substation, traction power supply, railway electrification, optimal planning, integer linear programming (LP).

© 2019 University of Transport and Communications

Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải

QUY HOẠCH TỐI ƯU VỊ TRÍ TRẠM ĐIỆN KÉO TRONG HỆ THỐNG CUNG CẤP ĐIỆN ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ SỬ DỤNG THUẬT TOÁN QUY HOẠCH NGUYÊN

Trần Văn Khôi[1*], Nguyễn Đức Khương[1]

[1]*Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội.*

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Công trình khoa học
Ngày nhận bài: 26/08/2019
Ngày nhận bài sửa: 23/09/2019
Ngày chấp nhận đăng: 24/09/2019
Ngày xuất bản Online: 16/12/2019
https://doi.org/10.25073/tcsj.70.4.14
[*] *Tác giả liên hệ*
Email: tvkhoi.ktd@utc.edu.vn; Tel: 0971385813

Tóm tắt. Vị trí và dung lượng trạm điện kéo có ảnh hưởng quan trọng trong các hệ thống cung cấp điện giao thông. Nó không chỉ đảm bảo vấn đề an toàn và tính liên tục trong vận hành mà còn ảnh hưởng quyết định tới chi phí đầu tư xây dựng ban đầu cũng như chi phí vận hành trong giai đoạn khai thác. Bài báo này đề xuất một phương pháp mới để lựa chọn vị trí tối ưu của các trạm điện kéo trong các hệ thống giao thông điện đô thị. Phương pháp đề xuất dựa trên mô hình chuyển hóa phụ tải đoàn tàu di chuyển sang mô hình các phụ tải cố định, từ đó áp dụng thuật toán quy hoạch nguyên để tối ưu hóa số lượng trạm điện kéo và xác định vị trí các trạm với mục tiêu tối thiểu hóa tổng chi phí đầu tư xây dựng và chi phí vận hành trạm cũng như tổn thất công suất trên toàn tuyến trong quá trình vận hành khai thác. Phương pháp đề xuất được kiểm tra và hiệu chỉnh trên một hệ thống mô phỏng dựa trên số liệu tuyến đường sắt Cát Linh-Hà Đông. Kết quả mô phỏng đã chứng minh tính khả thi và tính linh hoạt của phương pháp đề xuất, qua đó có thể được sử dụng là một giải pháp áp dụng trong giai đoạn lập kế hoạch sơ bộ cũng như trong giai đoạn thiết kế chi tiết cho hệ thống giao thông điện đô thị.

Từ khóa: trạm điện kéo, cung cấp điện giao thông, giao thông điện đường sắt, quy hoạch tuyến tính nguyên (ILP).

© 2019 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các hệ thống giao thông điện đường sắt, hệ thống cung cấp điện có một vai trò quan trọng. Một hệ thống cung cấp điện được thiết kế tối ưu không chỉ đảm bảo cho quá trình vận hành một cách an toàn, liên tục mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến chi phí đầu tư xây dựng cũng như chi phí vận hành khai thác và bảo dưỡng sau này. Áp dụng các kỹ thuật tối ưu để xây dựng các phương án thiết kế hệ thống cung cấp điện cho các hệ thống giao thông điện đường sắt đô thị là vấn đề thu hút nhiều sự quan tâm của các kỹ sư cũng như các nhà nghiên cứu, trong đó có việc quy hoạch tối ưu vị trí trạm điện kéo (TĐK) và phân vùng cấp điện của từng trạm trên dọc tuyến đường.

Tác giả Laszlo De Koranyi [1] đề xuất hai phương án bố trí trạm điện kéo. Phương án thứ nhất là đặt các TĐK ngay tại vị trí các nhà ga, và phương án thứ hai là đặt vị trí các TĐK ở vị trí giữa hai nhà ga. Tác giả quan niệm rằng tại vị trí các nhà ga các đoàn tàu thực hiện quá trình khởi động do đó mức tiêu thụ công suất là lớn nhất; ngoài ra vấn đề bảo dưỡng, sửa chữa trạm sẽ trở nên tiện dụng hơn khi trạm được bố trí ở các vị trí khác cách xa nhà ga. Với hai phương án bố trí này, tác giả cũng mặc định mỗi trạm sẽ cung cấp điện cho phạm vi hai nhà ga, điều này có thể dẫn tới một kết quả không tối ưu trong số lượng cũng như dung lượng trạm. Tiếp tục phát triển phương pháp của Koranyi, Brenna [2] đã bổ sung thêm một số các tham số khác như đường cong đặc tính đoàn tàu, các tham số địa hình của đường ray (profile) cũng như tập tính của tài xế lái tàu để tính toán dòng điện phụ tải đoàn tàu phục vụ cho vấn đề lựa chọn dung lượng trạm điện kéo.

Kneschke [3] đề xuất một phương pháp đơn giản để xác định khoảng cách giữa các TĐK trong hệ thống cung cấp điện giao thông cả đô thị lẫn đường dài. Phương pháp của Kneschke áp dụng tính toán cho từng cấu hình cung cấp điện riêng lẻ. Tuy nhiên phương pháp này chỉ quan tâm tới công suất danh định của đoàn tàu và số lượng đoàn tàu trên tuyến mà không xem xét đến sự biến đổi công suất của đoàn tàu khi di chuyển dọc tuyến đường trong quá trình vận hành.

Trong công trình nghiên cứu của mình, White [4] đã đưa ra khuyến nghị về khoảng cách kinh tế nhất giữa các TĐK trong hệ thống giao thông điện một chiều tương ứng với mức điện áp sử dụng: với điện áp 750 (V) thì khoảng cách tối ưu giữa các trạm sẽ là 5-6 km; khi điện áp là 1500 (V) thì khoảng cách là 8-13 km; và khoảng cách là 20-30 km cho hệ thống sử dụng điện áp 3000 (V). Tuy vậy, với dải phạm vi khuyến nghị còn khá rộng thì vẫn khá khó khăn để có thể lựa chọn được các vị trí trạm là kinh tế nhất.

Một quá trình tối ưu tổng tổn hao năng lượng dựa trên việc phân chia đồng đều mật độ công suất tiêu thụ phân bố dọc tuyến đường được đề xuất bởi Nguyen X. H. Viet và các cộng sự [5]. Với việc phân chia đồng đều mật độ công suất trên các phân đoạn cấp điện, quá trình tối ưu sẽ chỉ phụ thuộc vào việc tìm vị trí tối ưu cho TĐK tại phân đoạn đầu tiên trên cơ sở đã lựa chọn số lượng phân đoạn cấp điện trên toàn tuyến.

Gonzalez và Manzanedo [6] xây dựng mối quan hệ giữa công suất yêu cầu và khoảng

cách cấp điện từ trạm trong phạm vi tổn thất điện áp cho phép. Trong phương pháp này tác giả lựa chọn công suất yêu cầu để tính toán là giá trị lớn nhất trong các thời điểm dọc tuyến đường, vị trí trạm đầu tiên được lựa chọn cách điểm xuất phát của tuyến đường bằng một khoảng cách mà tổn thất điện áp trên khoảng cách đó bằng giá trị tổn thất điện áp tiêu chuẩn lớn nhất cho phép. Vị trí các trạm tiếp theo sẽ được tính toán theo nguyên tắc tương tự từ điểm cuối cùng được cấp điện của trạm trước đó. Kết quả thu được là tập các vị trí trạm đảm bảo được giá trị điện áp dọc tuyến đường trong phạm vi tiêu chuẩn, tuy nhiên nó chưa phải là các vị trí tối ưu bởi vì công suất tiêu thụ là biến đổi phân bố dọc theo đường ray.

Thuật toán di truyền được Pereira và các cộng sự [7] áp dụng để tìm vị trí tối ưu của các trạm chỉnh lưu trên hệ thống cung cấp điện giao thông một chiều. Với nguyên tắc là phân phối đều phụ tải tiêu thụ cho các trạm điện kéo, các tác giả đã đề xuất hàm mục tiêu là tổng của các sai lệch công suất tiêu thụ lớn nhất giữa các trạm và sai lệch năng lượng tiêu thụ giữa các trạm. Trong phương pháp này, số lượng trạm đã được lựa chọn trước khi thực hiện quá trình tối ưu hóa, do đó bản chất của phương pháp chỉ là tối ưu phân vùng cấp điện cho các trạm dựa trên nguyên tắc phân chia đồng đều phụ tải tiêu thụ. Cùng mục tiêu và cũng áp dụng thuật toán di truyền các tác giả của bài báo [8] sử dụng mô hình load flow để phân chia công suất phụ tải trong quá trình tối ưu. Xét về quá trình thực hiện là khác biệt so với Pereira, tuy nhiên bản chất của phương pháp thì là giống nhau, và quan trọng hơn nữa là số lượng trạm vẫn phải được xác định trước khi thực hiện quá trình tối ưu.

Chen và Jiang [9] áp dụng thuật toán bầy đàn để tìm vị trí tối ưu của các trạm cũng như vị trí phân đoạn cấp điện cho từng trạm với mục tiêu tối thiểu hóa tổn thất năng lượng trên toàn tuyến. Các tác giả đã sử dụng mô hình cấp điện một phía (một trạm cấp điện cho một phân đoạn) để tính toán tổn thất công suất trên đường ray và mạng tiếp xúc khi đoàn tàu di chuyển trong phạm vi phân đoạn cấp điện của trạm, từ đó xây dựng mối quan hệ tương quan giữa tổn thất năng lượng trong phạm vi phân đoạn với vị trí đặt trạm. Thuật toán bầy đàn sau đó được áp dụng để tối thiểu hóa tổn thất năng lượng trên toàn tuyến, từ đó tìm ra vị trí tối ưu của trạm và vị trí tối ưu để phân tách phạm vi cấp điện giữa các trạm. Cũng giống như các phương pháp trong [7, 8], phương pháp đề xuất của Chen vẫn phải lựa chọn số lượng TĐK trước khi thực hiện quá trình tối ưu.

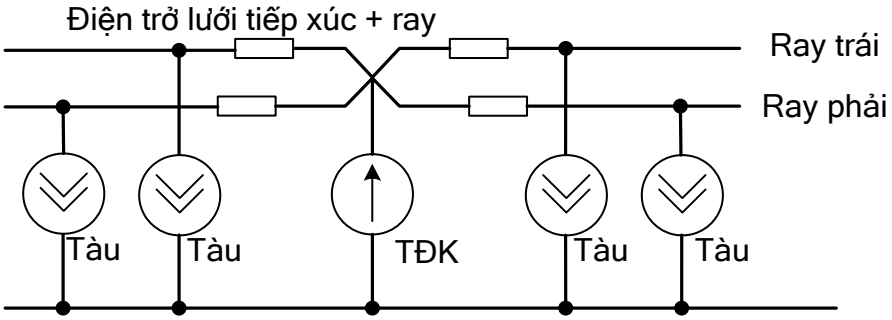
Mục đích của quy hoạch tối ưu hệ thống cung cấp điện giao thông là xác định được số lượng trạm tối thiểu, vị trí tối ưu của trạm, phân vùng cấp điện của từng trạm và dung lượng của từng trạm. Mục tiêu có thể dẫn tới là tối thiểu chi phí đầu tư, chi phí vận hành, chi phí bảo dưỡng sửa chữa; tối thiểu hóa tổn hao năng lượng,…Để thực hiện được sẽ cần các thông số để xác định được công suất tiêu thụ hoặc dòng điện phụ tải đoàn tàu phân bố trên từng vị trí tuyến đường trong từng thời điểm di chuyển. Với đặc điểm là phụ tải di chuyển, do vậy sẽ rất khó khăn để xây dựng được mô hình toán học chính xác cho hệ thống cung cấp điện giao thông để phục vụ cho việc áp dụng các kỹ thuật tối ưu. Như trong các nghiên cứu đã công bố ở trên, các tác giả hầu như hoặc là giả định phụ tải không đổi, hoặc là phải cố định số lượng trạm để xây dựng được các mô hình toán học xác định trước khi có thể áp dụng được các thuật toán tối ưu.

Bài báo này đề xuất một phương pháp thực hiện quá trình tối ưu dựa trên mô hình biến nhị phân để giải bài toán quy hoạch tối ưu hệ thống cung cấp điện giao thông. Trong mô hình biến nhị phân không cần các giả định giống như trong các nghiên cứu trước, phụ tải đoàn tàu được tính toán theo từng vị trí di chuyển dọc tuyến, số lượng trạm cũng là một biến số được tối ưu hóa. Do vậy sử dụng mô hình biến nhị phân, bài toán tối ưu sẽ được giải quyết triệt để. Trong bài báo này vị trí đặt trạm dọc theo tuyến đường được chọn là các biến nhị phân, phạm vi cấp điện ứng với từng vị trí đặt trạm sẽ được xác định để thỏa mãn chất lượng điện áp theo tiêu chuẩn IEC 60850. Quá trình tối ưu thực hiện trong 2 giai đoạn: giai đoạn 1 cải tiến thuật toán quy hoạch nguyên tối ưu số lượng trạm để tối thiểu hóa tổng chi phí đầu tư và vận hành; giai đoạn 2 tối ưu vị trí trạm và phân vùng cấp điện để tối thiểu hóa tổng tổn thất công suất trên toàn tuyến. Sau khi có được vị trí trạm và phạm vi cấp điện của từng trạm, dung lượng trạm sẽ được tính toán. Phương pháp đề xuất được kiểm nghiệm trên 1 hệ thống mô phỏng dựa trên số liệu cơ bản của tuyến Cát Linh-Hà Đông.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Mô hình hệ thống cung cấp điện giao thông một chiều

Hệ thống cung cấp điện giao thông một chiều bao gồm trạm điện kéo; lưới tiếp xúc (ray tiếp xúc); phụ tải đoàn tàu; ray chạy tàu và đường dây hồi lưu dòng điện. Chu trình dòng điện bắt đầu từ TĐK (đã được chỉnh lưu) dẫn qua mạng tiếp xúc tới đoàn tàu tiêu thụ. Thông qua đường ray và đường hồi lưu dòng điện sẽ quay về TĐK khép kín chu trình của dòng điện. Trên quan điểm mô hình mạch điện, TĐK được mô tả bằng nguồn cung cấp 1 chiều; đoàn tàu được mô tả bằng một nguồn dòng có giá trị biến đổi; còn lưới tiếp xúc và đường ray được mô tả bằng các điện trở phân bố. Một cách tổng quan mô hình mạch mô tả 1 phân đoạn cấp điện theo [10] sẽ được mô tả như hình 1.



Hình 1. *Mô hình một phân đoạn cấp điện của TĐK.*

2.2. Mô hình dòng điện đoàn tàu phân bố dọc tuyến đường

Dòng điện đoàn tàu tiêu thụ là tham số được sử dụng xét điều kiện ràng buộc về tổn thất điện áp theo tiêu chuẩn IEC 60850 cho vấn đề lựa chọn khoảng cách giữa các trạm cũng như phân vùng cấp điện cho từng trạm, sau đó sẽ được sử dụng để tính toán dung lượng trạm. Để tính toán được dòng điện ta cần các số liệu cơ bản của đoàn tàu, số lượng đoàn tàu, biểu đồ chạy tàu, profile của tuyến đường, cơ bản có thể tính theo công thức:

$$I(x) = \frac{P(x)}{V_{dc}} = \frac{F(x).v(x)}{V_{dc}} \quad (1)$$

trong đó:

v(x) là vận tốc đoàn tàu tại mỗi vị trí *x* trên toàn tuyến đường. Vận tốc sẽ được tính toán dựa vào biểu đồ chạy tàu, profile tuyến đường, giới hạn tốc độ lớn nhất, giới hạn gia tốc lớn nhất;

F(x) là lực kéo đoàn tàu tại mỗi vị trí *x* trên toàn tuyến đường. Lực kéo sẽ bao gồm lực kéo bản thân đoàn tàu trong các giai đoạn gia tốc, tốc độ không đổi và giảm tốc; lực cản do độ cong; lực cản do độ dốc;

P(x) là công suất đoàn tàu tại mỗi vị trí *x* trên toàn tuyến đường;

V_{dc} là điện áp định mức trên lưới tiếp xúc.

2.3. Ảnh hưởng của vị trí TĐK đến tổn hao công suất, sụt áp và chi phí đầu tư cũng như chi phí vận hành, bảo dưỡng trạm

Vị trí của TĐK sẽ có ảnh hưởng trực tiếp tới tổn hao công suất trên lưới tiếp xúc và đường dây hồi lưu. Từ mô hình trên hình 1, công suất tổn thất có thể được tính theo công thức:

$$\Delta P = \sum_{x=x_0}^{x_c} r_0.|x - x_s|.I^2(x) \quad (2)$$

trong đó:

r_0 là điện trở của lưới tiếp xúc và ray tính trên 1 km;

x_0, x_c là tọa độ đầu và cuối trong phạm vi cấp điện của trạm S;

x_s là tọa độ của trạm S;

I(x) là giá trị dòng điện đoàn tàu tại mỗi vị trí tọa độ *x*.

Có thể nhận thấy rằng bố trí trạm tại vị trí gần các điểm tải lớn sẽ giảm được tổn thất công suất, do vậy giảm tổn hao năng lượng trong quá trình vận hành, qua đó góp phần giảm chi phí năng lượng vận hành.

Tương tự như tổn thất công suất, tổn thất điện áp trên lưới tiếp xúc cũng phụ thuộc vào vị trí tương quan giữa trạm và các điểm tải lớn. Tổn thất điện áp có thể được tính theo công thức:

$$\Delta V(x) = r_0.|x - x_s|.I(x) \quad (3)$$

Ngoài ra, vị trí TĐK cũng có ảnh hưởng trực tiếp tới chi phí đầu tư xây dựng cũng như chi phí vận hành, bảo dưỡng, sửa chữa. Chi phí này là không cố định, nó phụ thuộc vào từng công trình; trong đó có thể kể đến những tham số có ảnh hưởng lớn như giải phóng mặt bằng,

quy hoạch kiến trúc - kinh tế - chính trị, tổn hao năng lượng trong quá trình vận hành, vị trí tương quan với các trạm biến áp chính, vị trí tương quan với nhà ga,…Dựa theo đề xuất của các tác giả trong [11] và [12], tổng quan chi phí có thể tính toán theo công thức:

$$C(x) = C_0(x) + \sum_{n=1}^{ny} CE_n(x) + \sum_{n=1}^{ny} CV_n(x) \quad (4)$$

trong đó:

C là tổng chi phí của trạm khi đặt tại vị trí x;

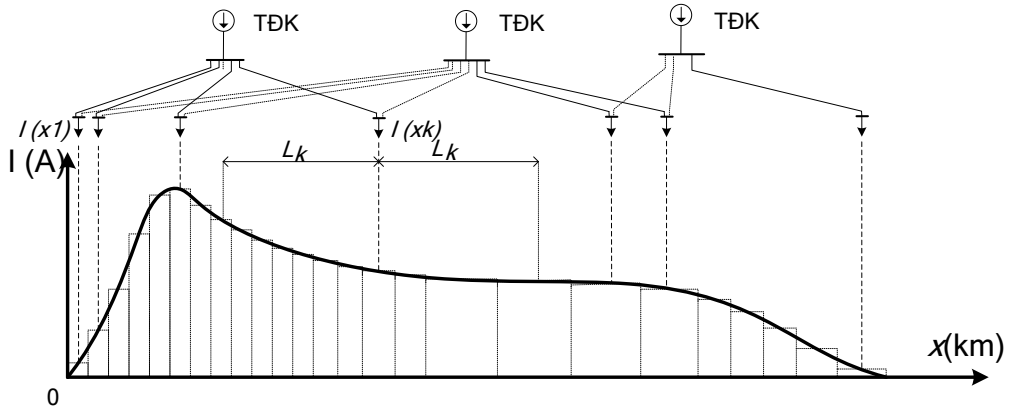
C_0 là chi phí đầu tư xây dựng. Chi phí này bao gồm chi phí của các thiết bị trong trạm và cáp trung áp nối từ trạm tới trạm biến áp chính, chi phí xây dựng trạm, chi phí giải phóng mặt bằng;

CE là chi phí tổn hao năng lượng trong trạm trong thời gian vận hành một năm; ny là số năm vận hành trong tính toán;

CV là chi phí vận hành trạm trong thời gian một năm. Chi phí này bao gồm cả bảo dưỡng, sửa chữa và thay thế định kỳ.

2.4. Cơ sở phương pháp luận

Như trong các nghiên cứu trước, thông thường các thông số tổn thất điện áp, tổn thất công suất và phân đoạn cấp điện được tính toán dựa vào vị trí của trạm điện kéo. Ngoài ra, để mô hình hóa được hệ thống cấp điện cũng cần phải có nguồn xác định, phụ tải xác định và các thông số đường dây; do vậy vị trí trạm sẽ được sử dụng làm căn cứ cho việc xây dựng mô hình và tính toán các tham số khác. Tuy nhiên, do phụ tải đoàn tàu có dạng di chuyển và vị trí của TĐK là tham số chưa xác định nên nếu sử dụng vị trí trạm làm căn cứ thì sẽ có vô số mô hình mạch tương ứng với số tổ hợp vị trí của tải và vị trí của nguồn. Nếu coi phụ tải đoàn tàu bao gồm n phụ tải phân bố dọc trên tuyến đường (n đủ lớn), n phụ tải này sẽ có hệ số đồng thời bằng không, tức là trong 1 thời điểm chỉ có 1 phụ tải được cấp điện; từ đó sẽ có thể chuyển đổi phụ tải di chuyển thành mô hình phụ tải cố định như minh họa trên Hình 2.



Hình 2. *Phân chia khoảng cách phụ tải đoàn tàu.*

Từ mô hình phân chia phụ tải trên, tương ứng với mỗi phụ tải, ta sẽ xác định được phạm vi bố trí TĐK theo tiêu chuẩn tổn thất điện áp cho phép như công thức sau:

$$L_k = \frac{\Delta V_{cp} + r_0.L_h \sum_{i=0}^{m} i.I(x_k + i.L_h)}{r_0 \sum_{i=0}^{m} I(x_k + i.L_h)} \quad (5)$$

trong đó: ΔV_{cp} là tổn thất điện áp cho phép; r_0 là điện trở của lưới tiếp xúc và ray trên 1 km; $I(x_k)$ là dòng điện tại vị trí x_k ; L_h là khoảng cách giữa 2 đoàn tàu liền kề; m là số đoàn tàu trong phân vùng từ điểm tải đang xét tới vị trí TĐK; và x_s là vị trí của trạm điện kéo.

Để đảm bảo chất lượng điện áp cấp cho phụ tải tại vị trí x_k , vị trí x_s của TĐK cần thỏa mãn điều kiện:

$$|x_s - x_k| \le L_k \quad (6)$$

Khi vấn đề quy hoạch tối ưu các TĐK coi vị trí của các TĐK là các biến thì điều kiện ràng buộc mô tả bởi (6) có dạng là một bất đẳng thức tuyến tính, đây là cơ sở để có thể tìm được vị trí chính xác của các TĐK khi áp dụng các thuật toán tối ưu.

3. QUY HOẠCH TỐI ƯU VỊ TRÍ TRẠM ĐIỆN KÉO

3.1. Hàm mục tiêu và điều kiện ràng buộc

Quy hoạch tối ưu vị trí TĐK là quá trình xác định số lượng tối thiểu các TĐK và vị trí các trạm để tối thiểu hóa chi phí hoặc tổn hao năng lượng. Mục tiêu trong bài báo này là tối thiểu hóa tổng chi phí của hệ thống trạm, hàm mục tiêu được mô tả như biểu thức:

$$\min \sum_{x=x_0}^{x_n} C_x.y_x \quad (7)$$

$$Subject\ \text{to}\quad A.y_x \ge b$$

trong đó:

n là tổng số vị trí có thể bố trí trạm trên tuyến đường;

C_x là chi phí khi trạm đặt tại vị trí x. C_x được tính theo công thức (4);

y_x là biến nhị phân, trong đó y_x =1 khi trạm được đặt tại vị trí x, và ngược lại y_x =0 khi trạm không được đặt tại vị trí x.

A là ma trận điều kiện kích cỡ nxn, trong đó các phần tử được xác định theo tiêu chuẩn tổn thất điện áp cho phép.

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad |x_s - x_k| \le L_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{8}$$

b là véc tơ xác định điều kiện vận hành kích cỡ *nx1*, $b_i = 1$ xét cho trường hợp vận hành bình thường; $b_i = 2$ xét cho trường hợp 1 trạm bị sự cố.

3.2. Thuật toán đề xuất xác định vị trí trạm điện kéo

Với hàm mục tiêu và các điều kiện ràng buộc tuyến tính như mô tả bởi các biểu thức thì thuật toán quy hoạch tuyến tính nguyên (ILP) có thể áp dụng rất phù hợp và hiệu quả, tuy vậy bản thân thuật toán quy hoạch tuyến tính chỉ tìm 1 phương án tối ưu, khi điều kiện tối ưu thỏa mãn, quá trình tìm kiếm sẽ kết thúc. Trong bài báo này tác giả thực hiện cải tiến điều kiện dừng của thuật toán quy hoạch tuyến tính ban đầu, từ đó sẽ tiến hành tìm hết toàn bộ các phương án tối ưu trong giai đoạn 1. Sau khi có tập các phương án tối ưu, trong giai đoạn 2 một thuật toán nhỏ được xây dựng để tính tổng công suất tổn hao trên lưới tiếp xúc và đường ray cho từng phương án, và phương án được chọn sau cùng là phương án có tổng tổn thất công suất nhỏ nhất. Trình tự thực hiện thuật toán được mô tả theo các bước như sau:

Bước 1: Nhập các thông số của đoàn tàu, biểu đồ chạy tàu, profile tuyến đường, điện áp lưới tiếp xúc, điện trở đơn vị của lưới tiếp xúc và đường ray, tổn thất điện áp cho phép

Bước 2: Tính toán véc tơ tốc độ, véc tơ lực, véc tơ công suất và véc tơ dòng điện tương ứng cho n vị trí trên dọc tuyến đường.

Bước 3: Xây dựng véc tơ chi phí C, ma trận A và véc tơ b.

Bước 4: Tìm tất cả các phương án tối ưu của hàm mục tiêu mô tả tại (7) theo thuật toán ILP.

Bước 5: Tính tổn thất công suất cho từng phương án

Phân đoạn cấp điện cho từng trạm theo tiêu chí cân bằng tổn thất điện áp. Điểm phân tách sẽ có giá trị tổn thất như nhau khi được cấp điện từ 2 trạm liền kề.

Tính tổn thất công suất trên toàn tuyến theo công thức (2).

So sánh và lựa chọn phương án có tổng tổn thất nhỏ nhất.

Bước 6: Hiển thị số lượng trạm, vị trí trạm, vị trí điểm phân tách phân đoạn cấp điện của mỗi trạm.

3.3. Kết quả mô phỏng

Để kiểm nghiệm phương pháp đề xuất, một mô hình đoàn tàu được xây dựng dựa theo số liệu của tuyến đường sắt Cát Linh-Hà Đông được tham khảo trong tài liệu dự án Cát Linh-Hà Đông [13]. Số liệu của một tuyến cụ thể có ý nghĩa để tính toán ra các thông số cụ thể, nó không làm mất đi tính tổng quát của thuật toán đề xuất để giải bài toán quy hoạch tối ưu vị trí

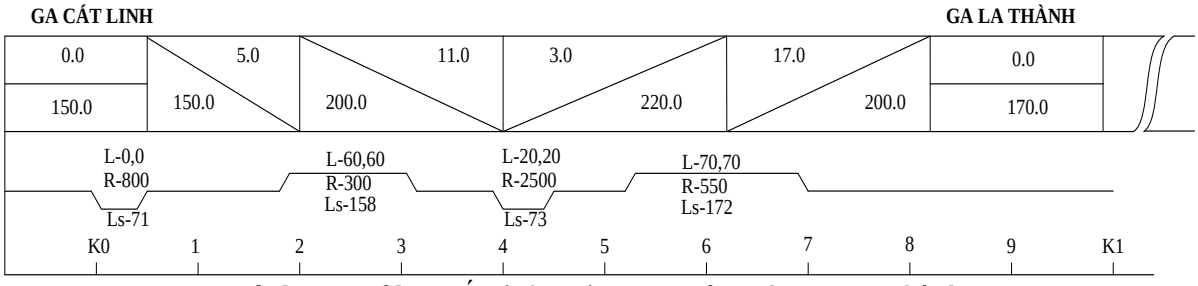
TĐK cho bất kỳ tuyến đường sắt đô thị nào. Các thông số cơ bản của đoàn tàu được liệt kê trong bảng 1 và profile tuyến đường được mô tả như trên hình 3. Thời gian chạy tàu được tổng kết trong bảng 2.

Bảng 1. *Thông số cơ bản của đoàn tàu.*

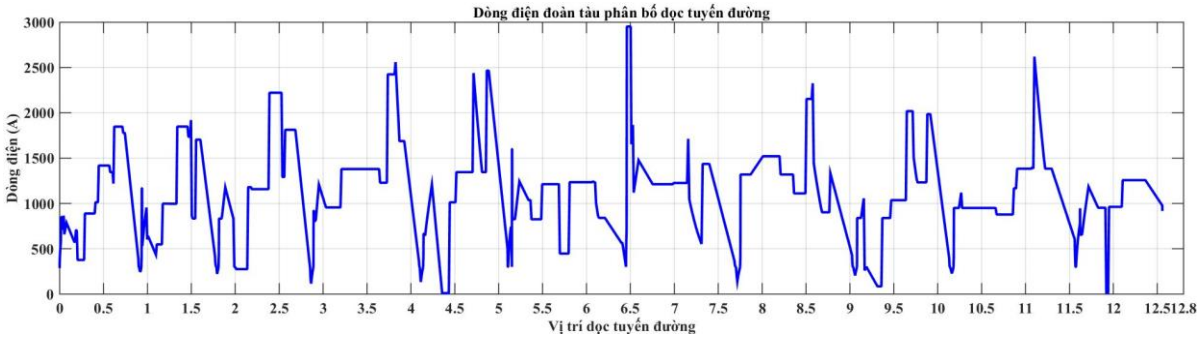
Thông số	Đơn vị	Giá trị
Điện áp định mức lưới tiếp xúc	V	750
Tốc độ cho phép tối đa	Km/h	80
Gia tốc cho phép tối đa	m/s^2	1.4
Số toa động cơ	Toa	2
Số toa không động cơ	Toa	2
Khối lượng toa xe động cơ	Kg	25000
Khối lượng toa xe không động cơ	Kg	20000
Số lượng hành khách (60 kg/hành khách)	Hành khách	1000
Tổng số lượng đoàn tàu	Đoàn tàu	13

Bảng 2. *Thời gian chạy tàu giữa các ga.*

Từ ga	Đến ga	Chiều dài (m)	Thời gian (s)	Từ ga	Đến ga	Chiều dài (m)	Thời gian (s)
C. Linh	L.Thành	931	88	Y.Nghĩa	V. Khê	1032	80
L. Thành	T. Hà	902.5	78	V. Khê	L.Khê	1428	101
T. Hà	Láng	1075	91	L.Khê	H.Đông	1110	84
Láng	T. Đình	1249	103	H.Đông	V.Quán	1323	97
T. Đình	VĐ3	1009	79	V.Quán	P.Khoang	1122	85
VĐ3	P.Khoang	1480	104	P.Khoang	VĐ3	1480	106
P.Khoang	V.Quán	1122	86	VĐ3	T. Đình	1009	78
V.Quán	H.Đông	1323	97	T. Đình	Láng	1249	104
H.Đông	L.Khê	1110	84	Láng	T. Hà	1075	88
L.Khê	V. Khê	1428	101	T. Hà	L.Thành	902.5	79
V.Khê	Y.Nghĩa	1032	81	L.Thành	C. Linh	931	83



Hình 3*. Profile tuyến đường đoạn ga Cát Linh – ga La Thành.*



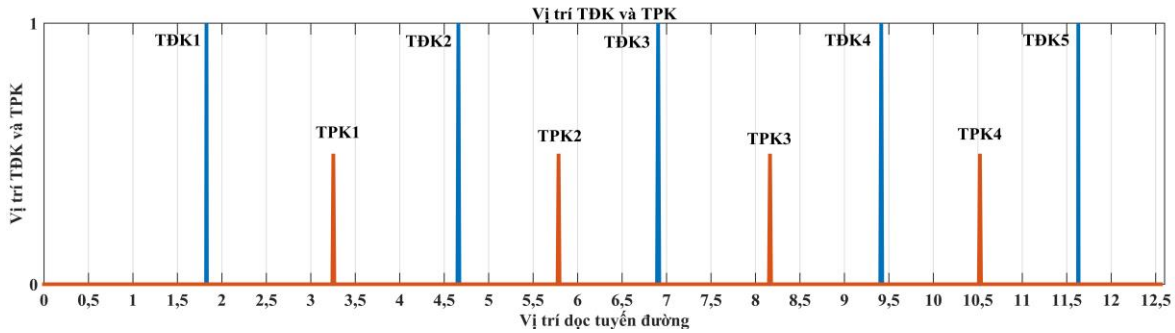
Hình 4. *Dòng điện phân bố dọc tuyến đường.*

Dựa vào các thông số đoàn tàu, thông số tuyến đường và thời gian chạy tàu, dòng điện đoàn tàu phân bố trên từng điểm của tuyến đường được tính và mô tả như trên hình 4.

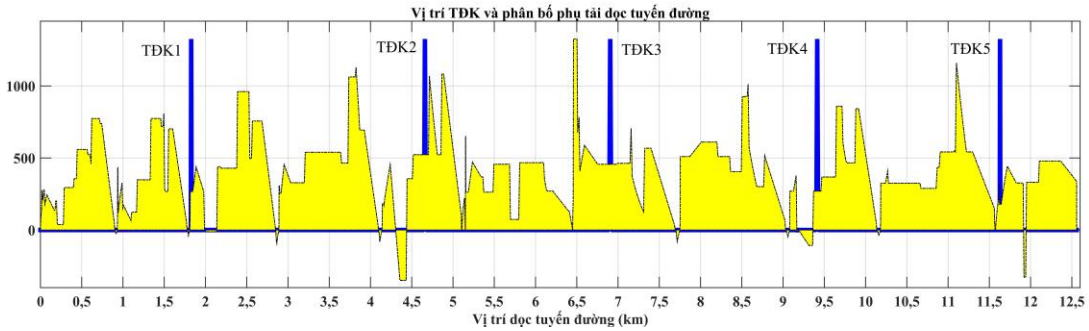
Với véc tơ dòng phụ tải đã xác định được, dựa trên cơ sở phân đoạn khoảng cách tải với sai lệch lớn nhất 500(W), bước thời gian 1(s), tổn thất điện áp cho phép không vượt quá 200 (V), và để đơn giản hóa trong trường hợp mô phỏng coi chi phí xây dựng và chi phí vận hành của trạm tại các vị trí là như nhau; áp dụng thuật toán đề xuất xác định được số lượng trạm tối thiểu là 5 trạm, và vị trí trạm điện kéo phân bố trên tuyến như minh họa trên Hình 5, trạm thứ nhất có vị trí tại: *x1*=1.8267(km), còn các trạm thứ 2, 3, 4 và 5 tương ứng được đặt tại các vị trí *x2*= 4.6594(km), *x3*= 6.9054(km), *x4*= 9.4141(km), *x5*= 11.6297(km). Vị trí phân tách vùng cấp điện (TPK) cho từng trạm sẽ là *TPK1*=3.2531(km), *TPK2*=5.7858(km), *TPK3*=8.1632(km), *TPK4*=10.5238(km).

Hình 6 mô tả sự tương quan giữa phân bố của phụ tải dọc tuyến đường và sự phân bố của các TĐK cấp điện cho toàn tuyến. Với mục tiêu tối thiểu tổn thất công suất trên lưới, do vậy các TĐK có xu hướng nằm tại vị trí trung tâm phụ tải của phân đoạn cấp điện.

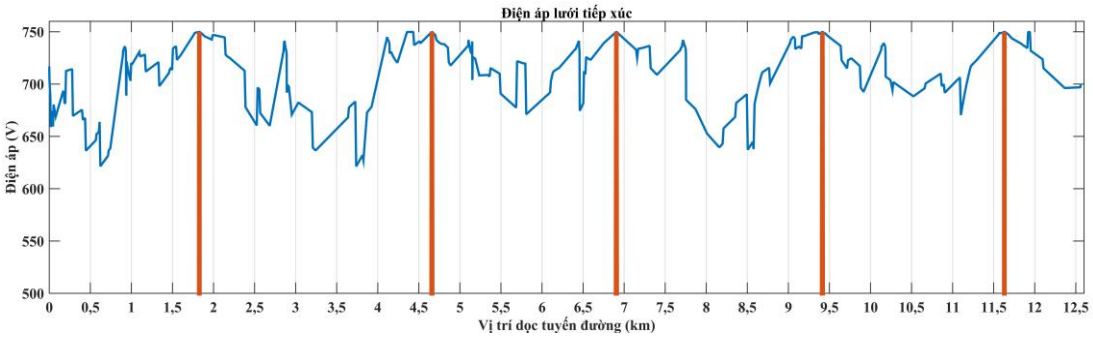
Sau khi xác định được vị trí trạm, phân vùng cấp điện được tính dựa trên nguyên tắc cân bằng tổn thất điện áp, tức là điểm phân chia sẽ có tổn thất điện áp như nhau khi cấp điện từ 2 trạm liền kề. Tiếp đó, điện áp lưới tiếp xúc trên dọc tuyến cũng sẽ được xác định. Hình 7 mô tả điện áp trên lưới tiếp xúc tại mỗi điểm dọc tuyến đường với phương án bố trí 5 TĐK như đã xác định được ở trên. Tổn thất điện áp lớn nhất là 193.02 (V) trên cơ sở tổn thất điện áp cho phép 200 (V).



Hình 5. *Vị trí TĐK và TPK.*



Hình 6. *Tương quan vị trí TĐK và tâm phụ tải.*



Hình 7. *Điện áp lưới tiếp xúc.*

Một yếu tố cũng quyết định tới tính khả thi và độ tin cậy của thuật toán đề xuất đó chính là nguyên tắc phân chia khoảng cách tải và độ phân giải phân chia. Với mục tiêu đảm bảo duy trì được sự phân bố đúng đặc tính tải, trong bài báo này mỗi khoảng cách điểm tải được phân chia dựa trên 2 nguyên tắc: nguyên tắc thứ nhất là sai lệch tải lớn nhất cho phép được áp dụng cho các tình huống khởi động, lên dốc, xuống dốc, thay đổi tốc độ; nguyên tắc thứ 2 là khoảng cách tải được tính theo bước thời gian, sẽ áp dụng cho các tình huống tốc độ không đổi hoặc phụ tải có sự biến đổi ít. Dựa trên 2 nguyên tắc này thì khoảng cách tải sẽ phụ thuộc vào giá trị phụ tải và độ biến thiên giá trị phụ tải, trong đó ưu tiên phân chia theo độ biến thiên giá trị phụ tải trước. Từ đó với giá trị sai lệch phụ tải mong muốn cho trước và bước thời gian sẽ xác định được tổng số vị trí tải phân bố dọc tuyến. Bảng 3 trình bày các số liệu trong quy hoạch trạm và tổng số lượng vị trí phụ tải phân chia trên tuyến với sai lệch tải mong muốn trong mỗi khoảng cách tải là 500 (W) và các bước thời gian tương ứng là 1 (s), 1.2 (s), và 1.5 (s) trong 3 trường hợp với 3 dải giá trị tổn thất điện áp mong muốn là 180-250 (V), 140-180 (V), và 110-140 (V). Từ số liệu trên bảng minh họa, có thể nhận thấy rằng số lượng trạm tối thiểu và tổn thất điện áp lớn nhất trên lưới không chênh lệch nhiều khi tổng số vị trí phụ tải thay đổi. Tuy nhiên, vị trí TĐK bị thay đổi nhiều (khoảng 10 – 500 m) theo tổng số vị trí phụ tải. Điều này chứng tỏ rằng vị trí TĐK bị ảnh hưởng không chỉ bởi giá trị tổn thất điện áp cho phép mà còn bị ảnh hưởng bởi số lượng điểm chia. Do vậy, sự phân chia cần đảm bảo phản ánh đúng đặc tính tải thì sẽ quyết định đến độ chính xác của kết quả, và số điểm chia càng nhiều sẽ càng chính xác. Tuy vậy, số lượng vị trí sẽ ảnh hưởng trực tiếp tới khối lượng tính

toán và tốc độ thực hiện thuật toán. Xét trong phạm vi đường sắt đô thị, chiều dài mỗi tuyến thông thường khoảng 10 – 25(km), tốc độ trung bình khoảng 40 (km/h), gia tốc lớn nhất khoảng 1.4 (m/s^2), theo nguyên tắc phân chia đã đề xuất có thể phân thành tối đa 2000 - 3000 điểm tải hoàn toàn có khả năng thực hiện được trên các máy tính cấu hình trung bình hiện nay (trong bài báo này tác giả sử dụng Matlab R15a-32bit trên máy tính labtop Dell core i-3, 1.7Ghz, Ram 2Gb; khi đó thời gian thực hiện thuật toán cho trường hợp bước thời gian 1(s) tương ứng với 937 điểm tải chỉ mất tổng cộng 0.360038 giây).

Bảng 3. *Vị trí trạm và số lượng tải.*

Tổn thất điện áp cho phép (V)	Tổng số vị trí PT	Số lượng trạm	Vị trí tối ưu của các TĐK (km)	Vị trí điểm phân tách TPK (km)
180-250	937	5	1.7705 4.4321 6.5807 9.1256 11.6297	3.1101 5.5069 7.858 10.4624
	778	5	1.6085 4.5425 6.7839 9.3740 11.6262	3.0881 5.672 8.09 10.5041
	626	5	1.6026 4.4646 6.5691 9.3473 11.6140	3.0386 5.5181 8.0156 10.4931
140-180	937	6	1.2911 2.8917 4.4105 7.0572 9.0843 11.0149	2.0945 3.6603 5.7412 8.0806 10.1309
	778	6	1.5384 2.6697 4.2176 6.7839 9.0571 11.1819	2.1134 3.4446 5.5114 8.0192 10.1305
	626	6	1.2230 3.1376 5.1086 6.9433 9.0688 11.614	2.1893 4.1296 6.0368 8.0156 10.4747
110-140	937	7	0.7332 2.8917 4.3672 6.45 8.3875 9.9153 11.6224	1.8131 3.6383 5.4177 7.6860 9.1580 10.7694
	778	7	0.9416 3.0353 4.3737 6.7688 8.5717 10.18 11.1819	1.9996 3.7087 5.5783 7.6865 9.3874 10.6957
	626	7	0.9039 2.8506 4.3672 6.4719 8.7063 9.4809 11.614	1.8865 3.6163 5.4344 7.6862 9.0952 10.5483

Bảng 4 trình bày vị trí quy hoạch tối ưu các TĐK theo giá trị tổn thất điện áp cho phép. Từ số liệu trên bảng có thể khẳng định với giá trị tổn thất điện áp càng nhỏ thì số lượng TĐK yêu cầu càng cao, và tương ứng khi đó giá trị tổn thất công suất trên lưới tiếp xúc và mạch hồi lưu sẽ càng thấp. Với các con số được tính toán cụ thể trên bảng cũng sẽ là cơ sở để các nhà đầu tư có thể ước lượng được chi phí đầu tư trạm và chi phí tổn hao năng lượng trong vận hành, từ đó có được những tính toán để lựa chọn tối ưu giữa chi phí đầu tư, chi phí vận hành và chất lượng điện năng của hệ thống cung cấp điện.

Bảng 4. *Số lượng trạm, vị trí trạm theo tổn thất điện áp cho phép.*

Tổn thất điện áp CP (V)	Số lượng TĐK	Vị trí tối ưu của các TĐK (km)	Tổn thất công suất (W)
180-250	5	1.7705 4.4321 6.5807 9.1256 11.6297	4.7548e+07
140-180	6	1.291 2.8917 4.41 7.0572 9.0843 11.0149	3.6214e+07
110-140	7	0.7332 2.8917 4.3672 6.4503 8.3875 9.9153 11.6224	2.6869e+07
90-110	8	1.1938 2.3895 3.5943 4.6594 6.5807 8.3875 10.2329 11.5647	2.0848e+07

Trong ví dụ mô phỏng, các thông số của đoàn tàu, thông số tuyến đường và thời gian chạy tàu đều có thể xác định được trước khi xây dựng phương án cấp điện và thiết kế hệ thống cung cấp điện cho tuyến. Bên cạnh đó các thông số tối ưu chỉ phụ thuộc vào giá trị tổn thất cho phép mà không chịu ràng buộc bởi các điều kiện giả định khác giống như các nghiên cứu đã công bố. Còn vấn đề ước lượng chi phí đầu tư xây dựng và chi phí vận hành trạm nếu gặp khó khăn, có thể sử dụng giả định chi phí này giống nhau trên mọi vị trí, khi đó vấn đề quy hoạch tối ưu vị trí trí TĐK sẽ trở thành vấn đề tìm số lượng tối thiểu TĐK và phân vùng cấp điện của từng trạm để tối thiểu hóa tổng tổn thất công suất trên lưới tiếp xúc và mạch hồi lưu giống như mục tiêu của các nghiên cứu trước.

Thông qua ví dụ mô phỏng, phương pháp đề xuất đã cung cấp một cái nhìn hệ thống trong vấn đề quy hoạch tối ưu vị trí TĐK trong các hệ thống cung cấp điện giao thông đô thị, sự ảnh hưởng của số lượng và vị trí trạm điện kéo đến vấn đề chất lượng điện năng cũng như chi phí đầu tư và vận hành hệ thống. Kết quả mô phỏng minh chứng tính khả thi và tính linh hoạt của phương pháp đề xuất, qua đó có thể được sử dụng là một giải pháp áp dụng trong giai đoạn lập kế hoạch sơ bộ cũng như trong giai đoạn thiết kế chi tiết cho hệ thống giao thông điện đô thị.

4. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày một phương pháp mới để giải quyết vấn đề quy hoạch tối ưu vị trí các TĐK trong các hệ thống giao thông điện đô thị. Phương pháp đề xuất dựa trên cơ sở phân chia mô hình phụ tải di động của đoàn tàu thành mô hình nhiều phụ tải cố định phân bố dọc tuyến đường, từ đó áp dụng phương pháp ILP cải tiến để xác định số lượng tối thiểu TĐK và vị trí tối ưu của các trạm cũng như phân vùng cấp điện cho từng trạm. Kết quả mô phỏng đã chứng minh tính khả thi và tính linh hoạt của phương pháp khi áp dụng trong quy hoạch và xây dựng hệ thống cung cấp điện cho các tuyến giao thông điện đô thị.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. L.D. Koranyi, Design of DC Power Supply for Rapid Transit Systems, IEEE Transactions on Industry and General Applications, IGA-1 (1965) 123 - 130. https://doi.org/10.1109/TIGA.1965.4180525

[2]. M. Brenna et al., New simulation algorithm for electric transportation supply system sizing, in 43rd International Universities Power Engineering Conference, Padova, Italy, 2008. https://doi.org/10.1109/UPEC.2008.4651679

[3]. T. A. Kneschke, Simple Method for Determination of Substation Spacing for AC and DC Electrification Systems, IEEE Transactions on Industry Applications, IA-22 (1986) 763 - 780. https://doi.org/10.1109/TIA.1986.4504789

[4]. R.D. White, AC/DC railway electrification and protection, IET 13th Professional Development Course on Electric Traction Systems, London, UK, 2014. DOI: 10.1049/cp.2014.1439

[5]. N.X.H. Viet, H.-S. Song, K. Nam, Locating power supplies on a personal rapid transit system to minimize system losses, IEEE Transactions on Industry Applications, 40 (2004) 1671 - 1677. https://doi.org/10.1109/TIA.2004.836310

[6]. D. Gonzalez, F. Manzanedo, Optimal design of a D.C. railway power supply system, in 2008 IEEE Canada Electric Power Conference, Vancouver, BC, Canada, 2008. https://doi.org/10.1109/EPC.2008.4763335

[7]. F.H. Pereira, C.L. Pires, S.I. Nabeta, Optimal placement of rectifier substations on DC traction systems, IET Electrical Systems in Transportation, 4 (2014) 62-69.

[8]. Tobing, T.L., et al., Rectifier substation optimum position on DC traction systems, in 4th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), Sanur, Indonesia, 2017. https://doi.org/10.1109/ICEVT.2017.8323548

[9]. C. Hongwei, J. Quanyuan, Optimization Design of Elctrified Railway Traction Substation and Installation of Capacity, Journal of Power Systems and Automation, 28 (2016) 104-110.

[10].C.J., B. Mellitt, N.B. Rambukwella, CAE for the electrical design of urban rail transit systems, in Conference of Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Mass Transit Systems, 173-193, 1987.

[11].H.-J. Chuang, W.-J. Liao, Optimal Expansion Planning of MRT Traction Substations by Using Immune Algorithm, in Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Materials for Science and Engineering, Tainan, Taiwan, 2016. https://doi.org/10.1109/ICAMSE.2016.7840285

[12].M. Soler et al., Lifecycle vs element costs: a new approach to optimize the power sypply system design, International Journal of Transport Development and Integration, 1 (2017) 481-490.

[13].Dự án thiết kế xây dựng tuyến đường sắt đô thị Hà Nội - Tuyến Cát Linh - Hà Đông, phần 2 Tổng hợp, quyển 2 Quản lý vận hành và khai thác chạy tàu, 2014.