

Tối ưu vị trí và dung lượng siêu tụ điện lắp đặt cho các tuyến đường sắt đô thị dựa trên nguyên lý tham lam

Optimization of supercapacitor's location and capacity in the urban railway lines based on greedy principle

Trần Văn Khôi*, Đặng Việt Phúc

Trường Đại học Giao thông vận tải

*Email liên hệ: tvkhoi.ktd@utc.edu.vn

Tóm tắt:

Sử dụng thiết bị tích trữ năng lượng là giải pháp hiệu quả giúp nâng cao hiệu suất năng lượng cho các tuyến đường sắt đô thị. Hai trong số các tham số quan trọng là vị trí và dung lượng của thiết bị tích trữ sẽ quyết định hiệu quả của toàn hệ thống. Bài báo này trình bày một thuật toán là sự kết hợp của nguyên lý tham lam và nguyên lý truy hồi để xác định vị trí cũng như dung lượng tối ưu của các trạm tích trữ siêu tụ dọc theo đường ray để cực đại hóa lợi ích kinh tế. Thuật toán đề xuất được kiểm nghiệm trên một mô hình mô phỏng được xây dựng dựa theo số liệu của tuyến đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng lắp đặt một cách tối ưu các trạm tích trữ năng lượng sẽ làm tăng hiệu quả năng lượng tối đa, góp phần tăng trưởng lợi ích kinh tế, và giảm được các đỉnh tải từ đó sẽ giảm sự dao động điện áp giúp nâng cao chất lượng điện năng của toàn hệ thống.

Từ khóa: Tối ưu hóa; siêu tụ điện; giao thông đường sắt đô thị; hệ thống tích trữ năng lượng; hiệu quả năng lượng; thuật toán tham lam.

Abstract:

Using energy storage equipment is an effective solution to improve energy efficiency for urban railway lines. Two of the important parameters are the location and capacity of the storage device that will determine the efficiency of the power supply system. This paper presents an algorithm that combines the greed principle and the retrieval principle to determine the optimal location and capacity of supercapacitor storage stations along the track to maximize the economic benefits. The proposed algorithm is tested on a simulation model built based on the data of the Cat Linh - Ha Dong urban railway line. The simulation results show that the optimal installation of energy storage stations will increase maximum energy efficiency to contribute to economic growth and reduce the load peaks that will be reducing voltage fluctuations.

Keywords: Optimization; supercapacitor; urban railway; energy storage system; energy efficiency; regenerative braking; greedy algorithm.

1. Giới thiệu

Sử dụng năng lượng hiệu quả đang là một vấn đề rất được quan tâm. Hệ thống đường sắt tiêu tốn năng lượng rất lớn, do đó việc tối ưu hóa hiệu quả sử dụng năng lượng đã và đang nhận được rất nhiều sự quan tâm của các nhà khai thác đường sắt và các nhà nghiên cứu. Trong lĩnh vực này, các kỹ sư và các nhà khoa học đang tập trung vào các giải pháp và các kỹ thuật

nhằm đạt được hiệu quả năng lượng cao hơn [1]. Một trong các giải pháp được đặc biệt quan tâm, đó là thu hồi năng lượng được sản sinh từ các đoàn tàu trong quá trình hãm [2]. Với trọng tải lớn, khoảng cách giữa các ga ngắn nên năng lượng điện được sản sinh ra trong quá trình hãm là rất lớn, ước chừng khoảng 53% tổng năng lượng tiêu thụ của cả đoàn tàu trong quá trình vận hành. Xem xét hiệu suất truyền động và

năng lượng tiêu tốn cho hệ thống hãm cơ thì ước tính năng lượng tái sinh có thể thu hồi được chiếm khoảng 22% - 40% tổng năng lượng tiêu thụ của đoàn tàu trong quá trình vận hành [3]. Lắp đặt các hệ thống tích trữ năng lượng (ESS) để lưu trữ năng lượng dư thừa trong quá trình hãm và cấp trả lại ray tiếp xúc khi cần thiết là một giải pháp hiệu quả cho vấn đề này. Tùy thuộc vào vị trí lắp đặt thiết bị tích trữ, có thể lắp ở trên đoàn tàu (onboard), hoặc lắp đặt tại các vị trí dọc đường ray (stationary). So sánh với kiểu lắp đặt trên đoàn tàu, kiểu lắp đặt dọc đường ray không bị giới hạn bởi không gian lắp đặt, trọng lượng thiết bị, có khả năng trao đổi với tất cả các đoàn tàu trên tuyến đường; tuy nhiên tổn hao truyền dẫn sẽ lớn hơn và hiệu quả tùy thuộc vào vị trí. Do vậy vấn đề cần quan tâm là vị trí lắp đặt thiết bị tích trữ sao cho hiệu quả năng lượng đạt được là cao nhất [4].

Một hệ thống tích trữ năng lượng không chỉ giảm được mức năng lượng tiêu thụ mà còn giúp giảm các giá trị đỉnh công suất và giảm sự dao động của điện áp lưới tiếp xúc, từ đó cũng sẽ làm giảm mức độ tổn hao trên lưới tiếp xúc. Các đoàn tàu đô thị với gia tốc hãm khoảng $0,5 \text{ (m/s}^2\text{)} - 1,4 \text{ (m/s}^2\text{)}$ thường phát ra dòng điện hãm tức thời rất cao trong quá trình hãm. Khoảng thời gian hãm cũng thường khá ngắn 10 (s) - 15 (s), bởi vậy mật độ công suất tái sinh là rất lớn. Để thu hồi công suất tái sinh hiệu quả cần thiết bị lưu trữ có khả năng làm việc với dòng điện lớn trong khoảng thời gian ngắn, và siêu tụ điện là một thiết bị phù hợp đáp ứng được các yêu cầu này. Với các đặc tính đặc biệt như tuổi thọ cao, khả năng nạp xả nhanh, điện trở trong nhỏ, mật độ công suất cao và phương pháp nạp xả đơn giản, siêu tụ điện rất phù hợp ứng dụng để thu hồi năng lượng tái sinh trong các tuyến đường sắt đô thị [5].

Triển khai hệ thống tích trữ năng lượng dọc đường ray, trước tiên cần xác định được vị trí và dung lượng của các trạm tích trữ, và vấn đề này thường được xem là tối ưu với mục tiêu cực đại lợi ích kinh tế trong khi vẫn đảm bảo các tiêu chí kỹ thuật. Đã có nhiều giải pháp được đề

xuất. Trong công trình nghiên cứu [6], các tác giả đã đề xuất một giải pháp dựa trên kết quả phân tích dòng điện tái sinh tại các nhà ga để tính toán năng lượng tái sinh hàng năm. Từ đó xác định dung lượng siêu tụ phù hợp đảm bảo an toàn khi làm việc với dòng điện tái sinh và thu hồi hiệu quả năng lượng tái sinh. Với mục tiêu đạt được hiệu quả năng lượng cao nhất đồng thời đảm bảo sự ổn định điện áp lưới tiếp xúc, Wang cùng các cộng sự [7] đã áp dụng một phương pháp tối ưu vị trí và dung lượng của siêu tụ điện dựa trên thuật toán di truyền đã được cải tiến. Phương pháp đề xuất trong bài báo được kiểm nghiệm trên một tuyến metro của Trung quốc. Kết quả trong báo cáo khi sử dụng phương pháp đã đề xuất ước lượng tiết kiệm được 4.88% tổng năng lượng tiêu thụ với chi phí đầu tư lắp đặt toàn hệ thống tích trữ là 3,5 triệu USD. Trong một nghiên cứu khác, Ratniyomchai [8] tập trung vào một tiêu chuẩn để xác định vị trí và dung lượng phù hợp nhất của thiết bị tích trữ, nhằm tối thiểu hóa tổng năng lượng tiêu thụ và tổng tổn hao năng lượng. Kết quả nghiên cứu xác nhận rằng dung lượng của thiết bị tích trữ đạt mức tối thiểu khi vị trí gần với trạm điện kéo trong mỗi phân đoạn cấp điện.

Tiếp đến, một phương pháp tối ưu được kết hợp bởi thuật toán di truyền và công cụ mô phỏng hệ thống cung cấp điện đường sắt đô thị được đưa ra bởi Xia [9], phương pháp này có thể xác định được chiến lược quản lý năng lượng tốt nhất đồng thời với vị trí và dung lượng của hệ thống tích trữ năng lượng. Liên quan đến dự án thiết kế hệ thống tích trữ năng lượng sử dụng siêu tụ cho các tuyến metro, Calderaro [5] [10] áp dụng thuật toán tìm kiếm heuristic với việc xem xét tích hợp cả vị trí và dung lượng của siêu tụ vào một biến tham số. Thuật toán tìm kiếm được xây dựng dựa trên nguyên lý của thuật toán bầy đàn.

Gần đây, các phương pháp mới và các mô hình đối tượng mới vẫn tiếp tục được quan tâm với mục tiêu cải thiện độ chính xác và hiệu quả. Lamedica [11] phát triển một công cụ phần

mềm sử dụng thuật toán PSO, trong đó cải biên hàm mục tiêu tính toán giá trị kinh tế cho toàn bộ hệ thống trong tuyến đường. Trong khi đó, David [12] đề xuất một mô hình trong đó áp dụng thuật toán tối ưu trên một công cụ mô phỏng đường sắt thực tế.

Bài báo cũng tập trung vào vấn đề xác định dung lượng và vị trí tối ưu của thiết bị tích trữ năng lượng siêu tụ cho các tuyến đường sắt đô thị. Với vị trí của thiết bị tích trữ được xem xét đặt tại các ga hoặc tại trạm điện kéo, một thuật toán mới được đề xuất bằng sự kết hợp của hai nguyên lý là nguyên lý tham lam và nguyên lý truy hồi. Cơ chế tham lam dựa trên chỉ số kinh tế để xác định và loại bỏ vị trí kém hiệu quả nhất khi triển khai trạm tích trữ năng lượng. Sau khi đã xác định được vị trí khả thi để triển khai trạm tích trữ thì áp dụng nguyên lý truy hồi để tối ưu dung lượng của các trạm với mục tiêu tối thiểu hóa hàm chi phí. Trên cơ sở hàm chi phí cho các phương án triển khai trạm tích trữ đã được xác định, phương án tối ưu là hàm chi phí nhỏ nhất.

2. Mô hình mạch điện hệ thống cung cấp điện cho tuyến đường sắt đô thị

Hệ thống mạch điện cung cấp năng lượng điện kéo cho giao thông đường sắt đô thị được cấu thành bởi các trạm điện kéo, lưới tiếp xúc (rail tiếp xúc), phụ tải đoàn tàu, hệ thống hồi lưu gồm ray chạy tàu và đường dây nối từ ray chạy tàu về trạm điện kéo. Trạm điện kéo nhận năng lượng từ lưới trung áp sau đó chỉnh lưu thành dòng điện một chiều dẫn qua hệ thống lưới tiếp xúc (rail tiếp xúc) cấp cho các đoàn tàu. Dòng điện hồi lưu từ các đoàn tàu được dẫn qua ray chạy tàu, đường dây hồi lưu trở về trạm điện kéo. Trên cơ sở về mô hình mạch điện, trạm điện kéo được mô hình hóa thành các nguồn cung cấp một chiều với điện áp không đổi; đoàn tàu sẽ được mô hình hóa thành các nguồn dòng

điện có trị số biến thiên theo vị trí dọc tuyến đường. Còn lưới tiếp xúc và ray chạy được mô hình bằng các phần tử điện trở tập trung. Mô hình cơ bản của một hệ thống cung cấp năng lượng giao thông đô thị được minh họa trên hình 1. Đoàn tàu khi mô hình hóa là nguồn dòng điện sẽ tiêu thụ công suất khi đoàn tàu tăng tốc và sẽ phát ra công suất trong giai đoạn hãm. Công suất đoàn tàu có thể được ước lượng tương ứng với một tốc độ cụ thể để khắc phục các trở lực gây ra bởi quán tính, ma sát, độ dốc, đường cong, động lực học không khí. Xem xét cả những tổn hao năng lượng trên hệ thống và công suất của hệ thống phụ trợ trên tàu, công suất đoàn tàu có thể được xác định theo như công thức (1).

$$P_r(t) = \begin{cases} \frac{F_k(t) * v(t)}{\eta_k} + P_{phu} \\ -F_h(t) * v(t) * \eta_h + P_{phu} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

$v(t)$: Tốc độ đoàn tàu, được xác định theo đường cong tốc độ chạy tàu;

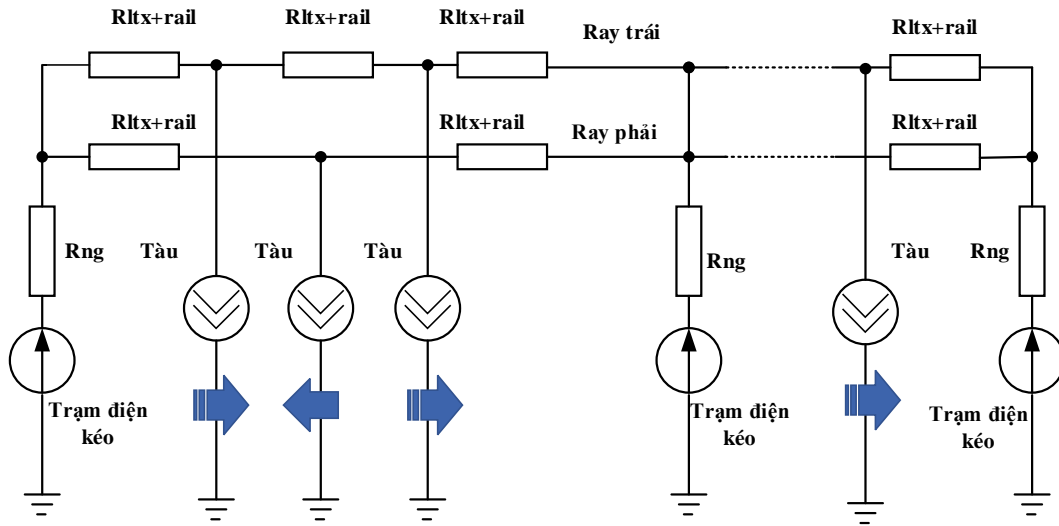
$F_k(t)$: Lực kéo đoàn tàu, được xác định tương ứng với vận tốc làm việc theo đường đặc tính lực kéo – tốc độ. Nếu không có đường đặc tính thì lực kéo có thể ước lượng theo công thức kinh nghiệm;

$F_h(t)$: Lực hãm đoàn tàu, được xác định tương ứng với tốc độ từ đường đặc tính hãm của đầu máy. Nếu không có đặc tính thì lực hãm cũng có thể được ước lượng thông qua công thức kinh nghiệm;

η_k : Hiệu suất năng lượng trong chế độ kéo, bao gồm hiệu suất hộp giảm tốc, hiệu suất động cơ điện kéo và hiệu suất của các bộ biến đổi năng lượng;

η_h : Hiệu suất năng lượng trong chế độ hãm;

P_{phu} : Công suất yêu cầu cho hệ thống phụ trợ trên tàu.



Hình 1. Mô hình cung cấp năng lượng một phân đoạn tuyến đường sắt đô thị.

Trạm điện kéo được mô hình là các nguồn áp một chiều lý tưởng. Công suất nguồn phát ra tương ứng với nhu cầu tiêu dùng của phụ tải đoàn tàu trong mạng điện, và bị giới hạn bởi dung lượng của trạm điện kéo. Trong mạng điện dòng điện một chiều, đường dây tiếp xúc và đường dây hồi lưu được mô hình là các điện trở tập trung. Khi các đoàn tàu di chuyển, khoảng cách tương đối giữa đoàn tàu và các ga hoặc các trạm sẽ thay đổi, dẫn tới giá trị điện trở của đoạn đường dây tiếp xúc và đoạn đường ray nối giữa đoàn tàu với các ga hoặc các trạm cũng sẽ thay đổi tương ứng. Giả sử đặt R_0 là điện trở đơn vị của đường dây tiếp xúc và ray chạy trên một đơn vị chiều dài. Khi đó điện trở của đoạn đường dây tiếp xúc và đường ray tại từng thời điểm được tính như công thức (2):

$$\begin{aligned} R_{1-2} &= R_0 * |x_1 - x_2| \\ R_{sst-2} &= R_{ng} + R_0 * |x_{sst} - x_2| \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó R_0 là điện trở đơn vị của dây tiếp xúc và đường ray trên 01 km; x_1 và x_2 tương ứng là vị trí của hai ga liền kề hoặc đoàn tàu và ga liền kề; x_{sst} là vị trí của trạm điện kéo liền kề với đoàn tàu; R_{ng} là điện trở của feeder cấp từ trạm điện kéo tới lưới tiếp xúc. Khi triển khai lắp đặt các trạm tích trữ năng lượng cho hệ thống thì siêu tụ điện được nối tới lưới tiếp xúc thông qua

bộ chuyển đổi DC-DC có khả năng trao đổi năng lượng hai chiều. Do vậy tương tự như đoàn tàu, siêu tụ điện được mô hình là nguồn áp trong chế độ phóng năng lượng cấp tới lưới tiếp xúc, và là phụ tải tiêu thụ trong chế độ nạp năng lượng dư thừa từ lưới tiếp xúc. Trên cơ sở đó, hệ thống cung cấp năng lượng cho tuyến đường sắt khi tích hợp trạm tích trữ năng lượng siêu tụ có thể được mô hình hóa dưới dạng mạch điện. Hình 2 minh họa sơ đồ mạch điện cho một phân đoạn cấp điện trong hệ thống cấp điện cho một tuyến đường sắt đô thị. Năng lượng của module tích trữ năng lượng siêu tụ điện được tính như công thức (3). Trong đó P_{SC} là công suất tức thời của module siêu tụ; v_{SC} , i_{SC} tương ứng là điện áp và dòng điện của module siêu tụ; C_{SC} là điện dung của module siêu tụ.

$$\begin{aligned} E_{SC}(t) &= \int_0^t P_{SC}(t) dt = \int_0^t v_{SC}(t) * i_{SC}(t) dt \\ &= \frac{1}{2} C_{SC} \int_0^t v_{SC}^2(t) dt \end{aligned} \quad (3)$$

Căn cứ vào điện áp trên lưới tiếp xúc tại vị trí module siêu tụ điện, trạng thái làm việc của siêu tụ điện sẽ được xác định. Từ đó dung lượng của siêu tụ tại từng thời điểm được tính:

$$\begin{aligned} E_{SC}(i+1) &= E_{SC}(i) + P_{SC}(i) * \Delta t \\ \Delta t &= t(i+1) - t(i) \end{aligned} \quad (4)$$

3. Phương pháp tối ưu

3.1. Hàm chi phí

Mục tiêu của nghiên cứu này là xác định vị trí và dung lượng của siêu tụ điện triển khai trên hệ thống cung cấp năng lượng cho các tuyến đường sắt đô thị để thu được lợi ích kinh tế lớn nhất. Do vậy hàm mục tiêu được xác định là tổng chi phí năng lượng tiêu thụ sau khi lắp đặt hệ thống tích trữ năng lượng siêu tụ và chi phí đầu tư lắp đặt cũng như bảo trì hệ thống tích trữ năng lượng đó. Chu kỳ thời gian để tính lợi nhuận ước lượng theo chu kỳ tuổi thọ trung bình của siêu tụ điện là 10 năm. Hàm mục tiêu như được mô tả trong công thức (5):

$$\min \sum_{k=1}^{n_{sub}} (energy_cost(k) + sc_cost(k)) \quad (5)$$

subject to: $0 \leq E_{sci} \leq E_{max}$

Trong đó:

$energy_cost(k)$: Chi phí năng lượng của trạm k tương ứng với sự triển khai lắp đặt tại trạm k một trạm tích trữ năng lượng có dung lượng E_{sci} .

$$energy_cost(k) = E_{sub_k}(E_{sci}) * 365 * ny * cost_{elec}$$

$sc_cost(k)$: Chi phí đầu tư lắp đặt và vận hành trạm tích trữ năng lượng với dung lượng E_{sci} tại trạm k .

$$sc_cost(k) = cost_{instal} + \frac{E_{sci}}{T_{charging}} * C_{\Sigma}$$

$$C_{\Sigma} = cost_{sc} + cost_{conv} + cost_{main} * 365 * ny$$

E_{sub_k} : Năng lượng tiêu thụ của trạm k trong thời gian 1 ngày khi trang bị module tích trữ năng lượng với dung lượng E_{sci} ;

E_{sci} : Dung lượng của module siêu tụ. Giá trị này biến đổi từ 0 tới giá trị cực đại E_{max} . E_{sci} được tính toán như công thức (2);

$cost_{elec}$: Giá thành của một kWh điện năng;

ny : Số năm để tính toán hiệu quả năng lượng khi triển khai hệ thống tích trữ năng lượng cho tuyến đường sắt;

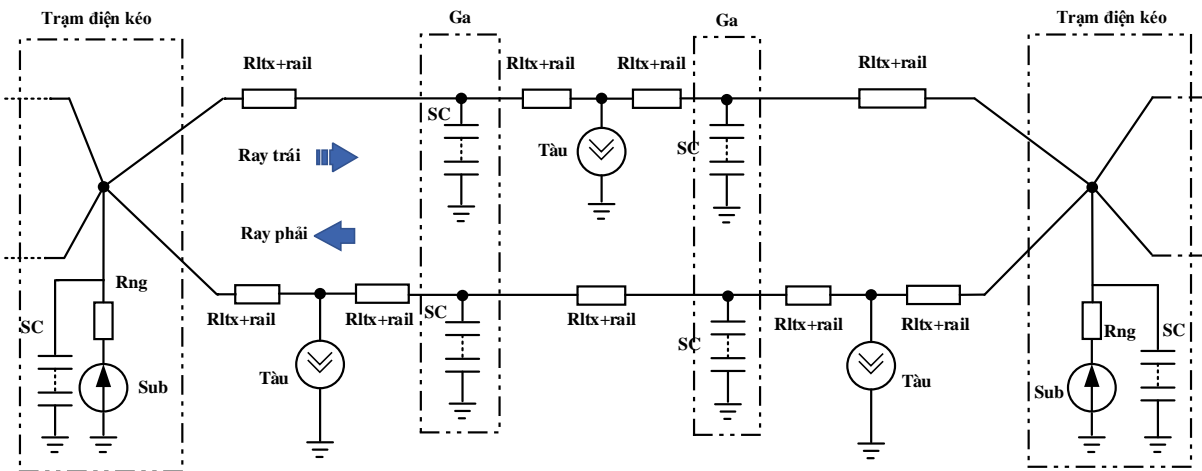
$T_{charging}$: Thời gian chu kỳ nạp cực đại của siêu tụ điện. Căn cứ vào thời gian chu kỳ nạp và năng lượng tích trữ để xác định công suất của module siêu tụ;

$cost_{instal}$: Chi phí lắp đặt một trạm tích trữ năng lượng trên tuyến đường sắt;

$cost_{sc}$: Giá thành một kW siêu tụ điện;

$cost_{conv}$: Giá thành bộ chuyển đổi năng lượng DC/DC;

$cost_{main}$: Chi phí vận hành, bảo dưỡng cho một trạm tích trữ năng lượng trong thời gian một ngày.



Hình 2. Mô hình mạch điện một phân đoạn cấp điện với các trạm tích trữ.

3.2. Thuật toán tối ưu vị trí và dung lượng siêu tụ điện dọc tuyến đường.

Để xác định được chi phí năng lượng của các trạm điện kéo cũng như của các trạm tích trữ cần xác định được biểu đồ công suất trong chu kỳ thời gian vận hành. Công suất tại từng thời điểm trong chu kỳ vận hành có thể xác định bằng phương pháp mô phỏng sử dụng thuật toán tra cứu công suất trên cơ sở vị trí và dung lượng của các trạm đã xác định. Giả sử có n_{sub} vị trí với khả năng triển khai trạm tích trữ, như vậy sẽ có tổng số $2^{n_{sub}}$ phương án bố trí trạm tích trữ. Với mỗi vị trí bố trí trạm tích trữ, dung lượng khả thi biến đổi trong phạm vi từ 0 tới dung lượng cực đại tương ứng với năng lượng tái sinh cực đại có khả năng thu hồi tại vị trí trạm. Giả sử phương án thứ i có j trạm tích trữ, mỗi trạm tích trữ có k dung lượng khả thi. Như vậy tại phương án thứ i sẽ có tổng số $k_1 * k_2 * \dots * k_j$ lựa chọn dung lượng cho j trạm tích trữ. Nếu dùng phương pháp duyệt toàn bộ để tìm được phương án tối ưu sẽ phải duyệt qua một số lượng rất lớn các phương án. Do vậy trong bài báo, đề xuất áp dụng nguyên lý truy hồi để tìm dung lượng tối ưu và áp dụng nguyên lý tham lam để tìm phương án khả thi.

Quan sát hàm mục tiêu như mô tả trong công thức (5), giá trị tổng của toàn hệ thống bằng tổng giá trị của các trạm thành phần, do vậy theo nguyên lý truy hồi nếu các trạm thành phần đạt giá trị tối ưu sẽ dẫn đến kết quả tổng đạt tối ưu. Dựa trên cơ sở này, bài báo đề xuất một thuật toán để xác định dung lượng tối ưu của mỗi trạm tích trữ với mục tiêu tối thiểu hóa tổng chi phí năng lượng và chi phí đầu tư khi triển khai trạm tích trữ năng lượng tại vị trí từng trạm. Về vấn đề xác định tổ hợp phương án theo nguyên lý tham lam sẽ dựa trên cơ chế loại bỏ các trạm tích trữ có chỉ số kinh tế thấp.

Chỉ số kinh tế (Eco_ID) được tính bằng hiệu của chi phí năng lượng tiết kiệm được khi triển khai lắp đặt trạm tích trữ ($Sav\ Cost$) và chi phí đầu tư thiết bị, chi phí triển khai lắp đặt, chi phí

vận hành cũng như chi phí bảo trì bảo dưỡng cho hệ thống trạm tích trữ ($Invest\ Cost$).

$$Eco_ID = Sav\ Cost - Invest\ Cost$$

Phương án khởi tạo sẽ chọn toàn bộ các vị trí triển khai lắp đặt trạm tích trữ. Chỉ số kinh tế được tính và so sánh. Nếu trạm có $Eco_ID \leq 0$ thì sẽ loại bỏ việc bố trí trạm tích trữ tại vị trí trạm này. Nếu không, trạm có chỉ số kinh tế thấp nhất sẽ được loại bỏ. Cơ chế loại bỏ này được thực hiện cho đến khi toàn bộ các vị trí đều được loại bỏ. Chi tiết về thuật toán được minh họa trong lưu đồ thuật toán hình 3.

4. Kết quả mô phỏng

4.1. Số liệu mô phỏng

Để kiểm nghiệm thuật toán đề xuất, trong bài báo này đã thực hiện mô phỏng trên một mô hình mô phỏng tuyến đường sắt đô thị dựa trên môi trường Matlab. Các số liệu và tham số mô hình được tham khảo trong tài liệu [13], [14]. Tuyến đường sắt này có tổng chiều dài là 12.6 km, trong đó có 12 ga và được cấp nguồn từ 5 trạm điện kéo. Hình 4 minh họa cấu trúc và phân bố các ga dọc tuyến đường. Bảng 1 trình bày các thông số đặc tính của tuyến đường cũng như các tham số cơ bản của đoàn tàu.

Thời gian di chuyển của đoàn tàu giữa các ga và trong toàn bộ hành trình được mô tả trên bảng 2. Giả sử thời gian khởi hành từ ga đầu tiên là 0 (giây) và thời gian dừng ở các ga đều là 30 (giây). Khi đó tổng thời gian hành trình đoàn tàu di chuyển từ ga đầu tiên tới ga cuối cùng là 1292 giây và hành trình di chuyển theo hướng ngược lại hết 1285 giây.

Các tham số chi phí được liệt kê trong bảng 3. Chi phí để triển khai lắp đặt một trạm tích trữ năng lượng siêu tụ điện ($cost_{instal}$) được tham khảo trong tài liệu [15] (với giá trị bằng 5000 euros quy đổi sang VND sẽ là 140.425.700 VND). Cũng trong tài liệu này, giá thành của module chuyển đổi công suất DC/DC ($cost_{conv}$) và chi phí cho công tác bảo trì, sửa chữa cũng

như vận hành trạm tích trữ năng lượng siêu tụ điện ($cost_{main}$) tương ứng là 40 euros và 0.14 euros. Giá thành của module siêu tụ điện ($cost_{sc}$) được tham khảo trong tài liệu [16] với giá trị trung bình là 4600000 VND/kW.

4.2. Kết quả

Dựa trên các thông số đặc tính như đã liệt kê trong bảng 1, cũng như thời gian hành trình của đoàn tàu như trình bày ở bảng 2, công suất của đoàn tàu tại mỗi thời điểm được tính toán theo công thức (1). Trong đó giá trị lực kéo/lực hãm và giá trị tốc độ được tính toán theo phương pháp kinh nghiệm tham khảo trong tài liệu [17]. Hình 5 minh họa đồ thị công suất và đồ thị tốc độ theo thời gian dọc hành trình tuyến đường. Giá trị công suất là số dương và tăng dần trong giai đoạn tăng tốc; công suất giảm xuống ở chế độ di chuyển với tốc độ không đổi; Công suất bằng 0 khi đoàn tàu được thả trôi hoặc dừng tại các ga; và công suất có giá trị âm trong giai đoạn đoàn tàu hãm dừng.

Ở trường hợp mô phỏng, giãn cách chạy tàu được lựa chọn có giá trị bằng 300 giây, tương ứng mỗi thời điểm sẽ vận hành đồng thời 9 đoàn tàu trên toàn tuyến. Đồ thị chạy tàu trong chế độ vận hành đã lựa chọn được minh họa như trên hình 6.

Áp dụng thuật toán trào lưu công suất như được phát triển trong tài liệu [18] để xác định giá trị công suất tại các trạm trong khoảng thời gian chu kỳ vận hành, từ đó xác định mức năng lượng lớn nhất có khả năng thu hồi. Mức năng lượng này là cơ sở để xác định dung lượng tối đa của module siêu tụ điện có thể được triển khai lắp đặt tại trạm. Hình 7 minh họa đồ thị công suất theo thời gian chu kỳ vận hành của trạm đặt tại ga số 9, tương ứng với trạm điện kéo thứ tư. Quan sát đồ thị có thể thấy rằng có ba giai đoạn trong đó công suất có giá trị âm. Trong các giai đoạn này, siêu tụ điện làm việc ở chế độ nạp để tích trữ năng lượng.

Trong những giai đoạn khi mà công suất có giá trị dương, năng lượng lưu trữ trong tụ điện sẽ được sử dụng và siêu tụ điện làm việc ở chế

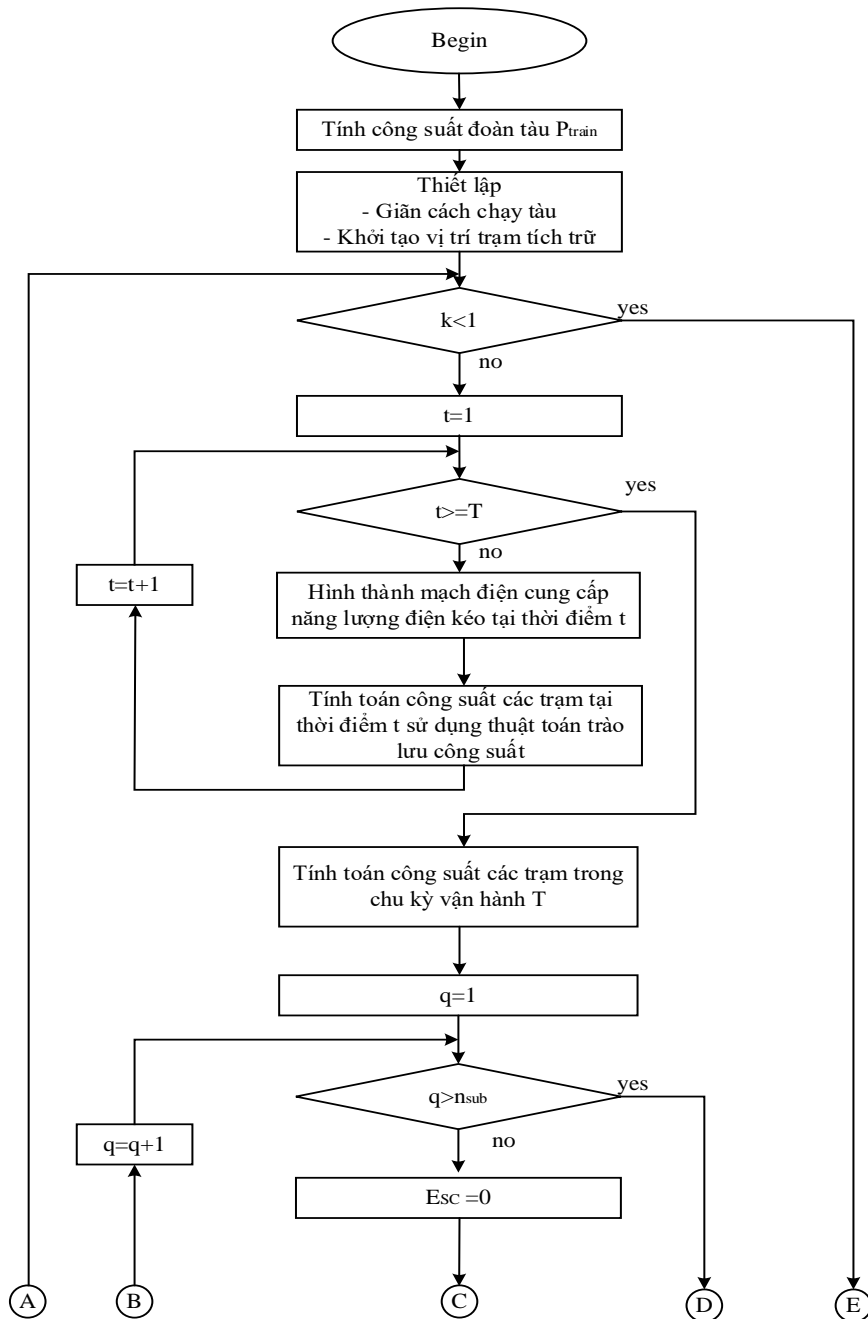
độ phóng năng lượng. Giả thiết rằng luôn có thể thực hiện được chế độ điều khiển cho module chuyển đổi công suất DC/DC để đáp ứng được đường đặc tính phóng/nạp của siêu tụ điện như mô tả trong tài liệu [19]. Từ đó, giá trị công suất của siêu tụ điện tại từng thời điểm làm việc sẽ được xác định. Hình 7 minh họa đồ thị công suất theo thời gian của module siêu tụ điện khi được triển khai lắp đặt tại ga số 9. Quan sát đồ thị có thể nhận thấy rằng, từ thời điểm 36 giây tới 80 giây siêu tụ điện làm việc ở chế độ tích trữ năng lượng. Trong giai đoạn từ 80 giây tới 155 giây, siêu tụ điện phóng năng lượng điện đã tích trữ hỗ trợ cung cấp năng lượng cho trạm điện kéo. Năng lượng cung cấp từ siêu tụ điện được phân phối theo cơ chế giảm đỉnh tải cho trạm và sử dụng triệt để toàn bộ lượng năng lượng đã tích trữ trong toàn chu kỳ làm việc.

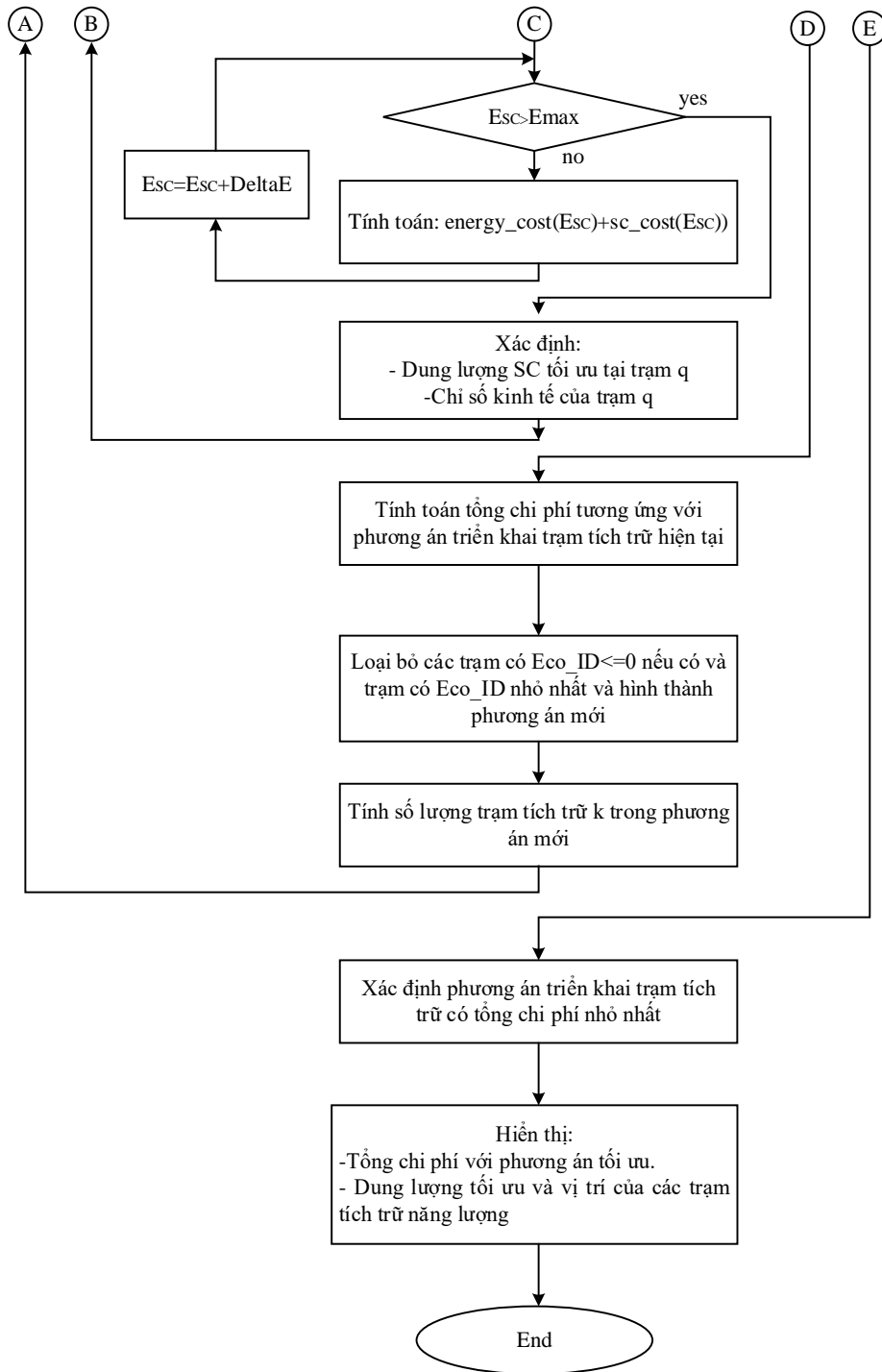
Khi triển khai lắp đặt siêu tụ điện, công suất tiêu thụ của trạm sẽ được cải thiện. Hình 8 minh họa đồ thị công suất tiêu thụ của trạm điện kéo đặt tại ga số 9 trong hai trường hợp có trang bị và không có trang bị lắp đặt siêu tụ điện. Khi siêu tụ điện được trang bị, năng lượng dư thừa được thu hồi giúp hạn chế mức tăng điện áp trên lưới tiếp xúc; và các giá trị đỉnh tải cũng được hạn chế từ đó mức giảm điện áp sẽ được cải thiện. Sau khi xác định được tổng năng lượng có khả năng phục hồi trong mỗi chu kỳ, thuật toán sẽ tiếp tục thực hiện xác định dung lượng tối ưu của siêu tụ điện với mục tiêu tối thiểu hàm chi phí như mô tả trong công thức (5). Trong đó, chi phí năng lượng tiêu thụ tỷ lệ nghịch với dung lượng của hệ thống tích trữ. Tuy nhiên khi dung lượng của hệ thống tích trữ tăng tới một giá trị nhất định tương ứng với năng lượng tối đa có khả năng thu hồi được, thì chi phí sẽ không giảm nữa và sẽ duy trì không đổi. Còn chi phí đầu tư, vận hành và bảo dưỡng, tỷ lệ thuận với công suất, dung lượng của trạm tích trữ. Do vậy tổng chi phí có thể coi là có mối quan hệ tuyến tính với dung lượng trạm tích trữ. Bằng sự hỗ trợ của công cụ máy tính, hàm chi phí tổng sẽ được tính toán tương ứng với từng giá trị của dung lượng trạm tích trữ, trên cơ sở đó giá trị

dung lượng tối ưu là thành phần mà chi phí đạt giá trị nhỏ nhất. Hình 9 minh họa mối quan hệ của các hàm chi phí với dung lượng của trạm tích trữ. Trong trường hợp mô phỏng cho trạm điện kéo đặt tại ga số 9, giá trị dung lượng tối ưu của trạm tích trữ là 7.825 kWh, tương ứng với giá trị hàm chi phí tổng đạt 69.407 tỷ VND/10 năm.

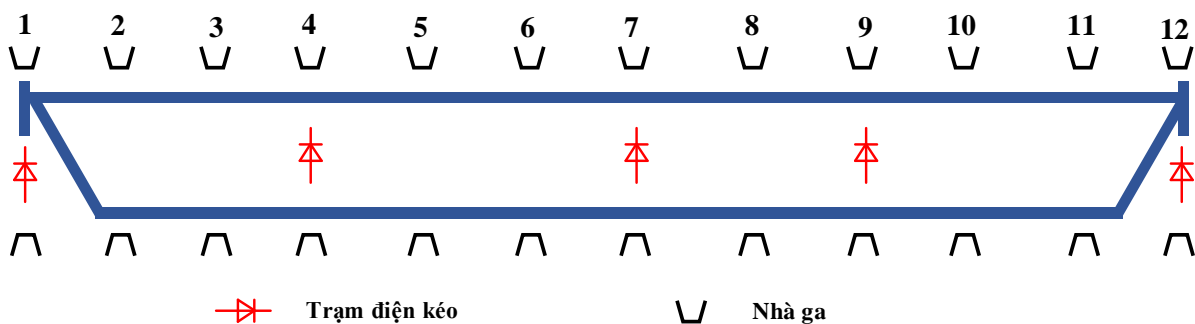
Bảng 4 tổng hợp hàm chi phí tổng cũng như giá trị dung lượng tối ưu của trạm tích trữ siêu tụ điện tương ứng với các phương án triển khai khả thi. Trong mô hình mô phỏng, có tổng số 12 ga, 5 trạm điện kéo tại các vị trí của ga số 1, 4,

7, 9 và 12. Như vậy có tổng số 19 vị trí có thể bố trí triển khai trạm tích trữ, về mặt lý thuyết sẽ có tổng số $2^{19} = 524288$ phương án. Tuy nhiên khi áp dụng cơ chế loại bỏ theo nguyên lý tham lam, số tổ hợp phương án còn lại là 19. So sánh giá trị hàm chi phí tổng có thể thấy rằng phương án số 16 có giá trị nhỏ nhất khi bố trí các trạm tích trữ tại các ga số 3, 5, 6, 12 và giá trị dung lượng trạm tích trữ tương ứng đã xác định được là 14, 12, 9, 14 kWh. Tổng chi phí trong 10 năm với việc triển khai hệ thống tích trữ cho phương án tối ưu đã xác định ở trên ước tính bằng 346.91 tỷ đồng.





Hình 3. Lưu đồ thuật toán tối ưu vị trí và dung lượng trạm tích trữ năng lượng.



Hình 4. Cấu trúc và phân bố các ga dọc tuyến đường.

Bảng 1. Thông số đặc tính của tuyến đường và đoàn tàu.

Thông số	Giá trị
Chiều dài tuyến đường	12.6 km
Vị trí ga (km)	0; 0.93; 1.81; 2.89; 4.14; 5.15; 6.45; 7.75; 9.08; 10.18; 11.62; 12.60
Vị trí trạm điện kéo (km)	0; 2.89; 6.45; 9.08; 12.60
Điện áp định mức	750 VDC
Khối lượng đoàn tàu	1450 tấn
Công suất phụ trợ	200 kW
Tốc độ lớn nhất	80 km/h
Giãn cách chạy tàu	300 giây
Điện trở đơn vị của dây tiếp xúc và đường ray	0.065 Ω /km
Điện trở feeder	0.01 Ω

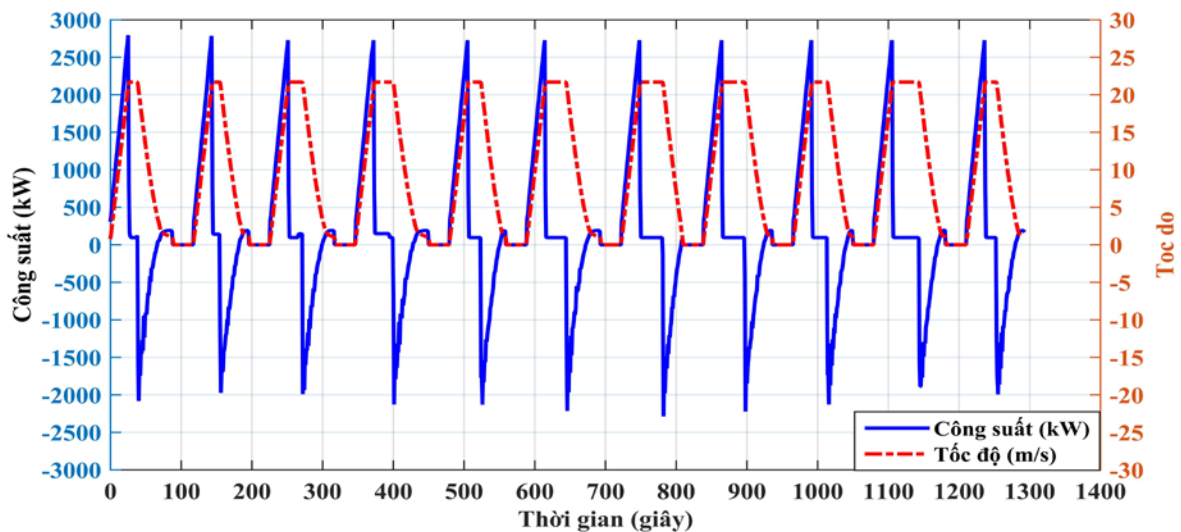
Bảng 2. Thời gian hành trình đoàn tàu dọc tuyến đường.

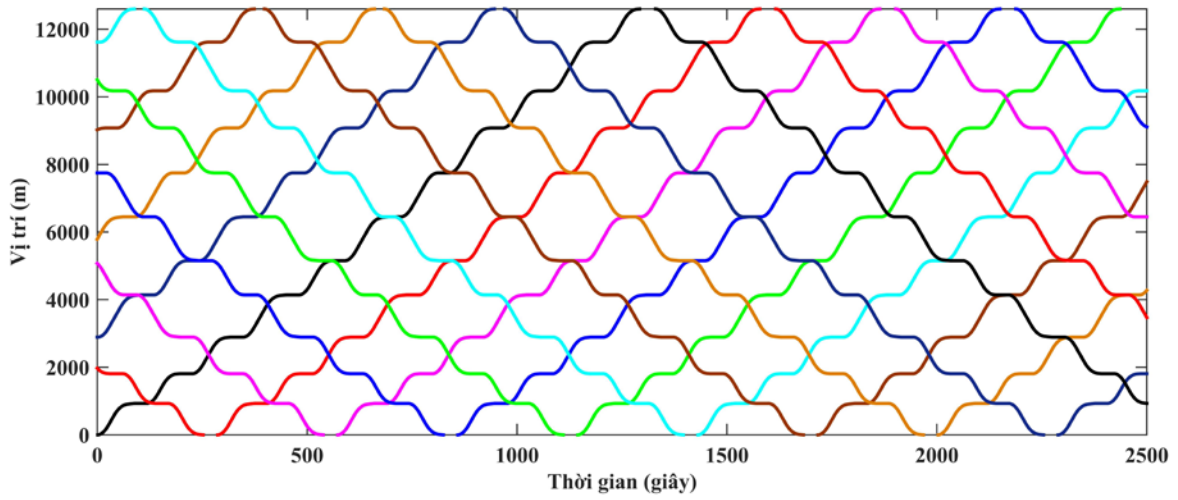
Ga khởi hành	Ga đích	Thời gian khởi hành (giây)	Thời gian đến (giây)	Thời gian hành trình (giây)	Thời gian dừng ở ga (giây)
1	2	0	88	88	30
2	3	118	196	78	30
3	4	226	317	91	30
4	5	347	450	103	30
5	6	480	559	79	30
6	7	589	693	104	30
7	8	723	809	86	30
8	9	839	936	97	30
9	10	966	1050	84	30
10	11	1080	1181	101	30
11	12	1211	1292	81	30
12	11	1292	1372	80	30
11	10	1402	1503	101	30
10	9	1533	1617	84	30
9	8	1647	1744	97	30
8	7	1774	1859	85	30
7	6	1889	1995	106	30
6	5	2025	2103	78	30

Ga khởi hành	Ga đích	Thời gian khởi hành (giây)	Thời gian đến (giây)	Thời gian hành trình (giây)	Thời gian dừng ở ga (giây)
5	4	2133	2237	104	30
4	3	2267	2355	88	30
3	2	2385	2464	79	30
2	1	2494	2577	83	30

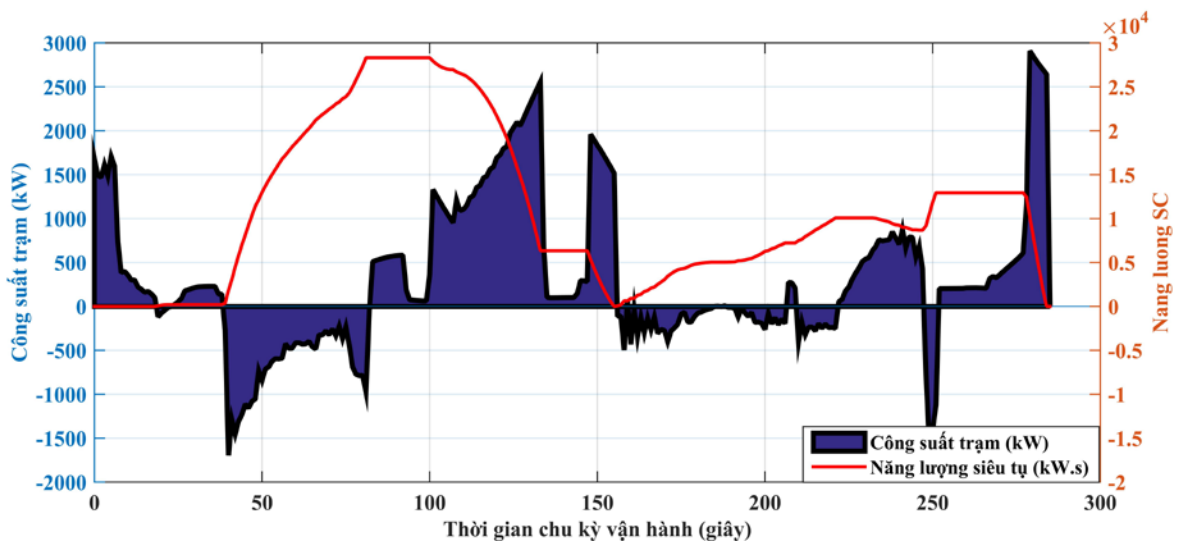
Bảng 3. Chi phí tính toán cho các tham số.

Thông số	Giá trị
Chi phí lắp đặt một trạm tích trữ siêu tụ điện ($cost_{instal}$)	140425700 VND
Giá thành một kWh điện năng ($cost_{elec}$)	3000 VND/kWh
Giá thành một kW bộ chuyển đổi năng lượng DC/DC ($cost_{conv}$)	1123400 VND/kW
Giá thành một kW siêu tụ điện ($cost_{sc}$)	4611000 VND/kW
Chi phí bảo trì, vận hành hệ thống tích trữ năng lượng ($cost_{main}$) trong một ngày	3932 VND/kW
Thời gian vận hành một ngày	16 giờ
Số ngày vận hành một năm	365 ngày
Số năm tính toán hiệu quả kinh tế (ny)	10 năm

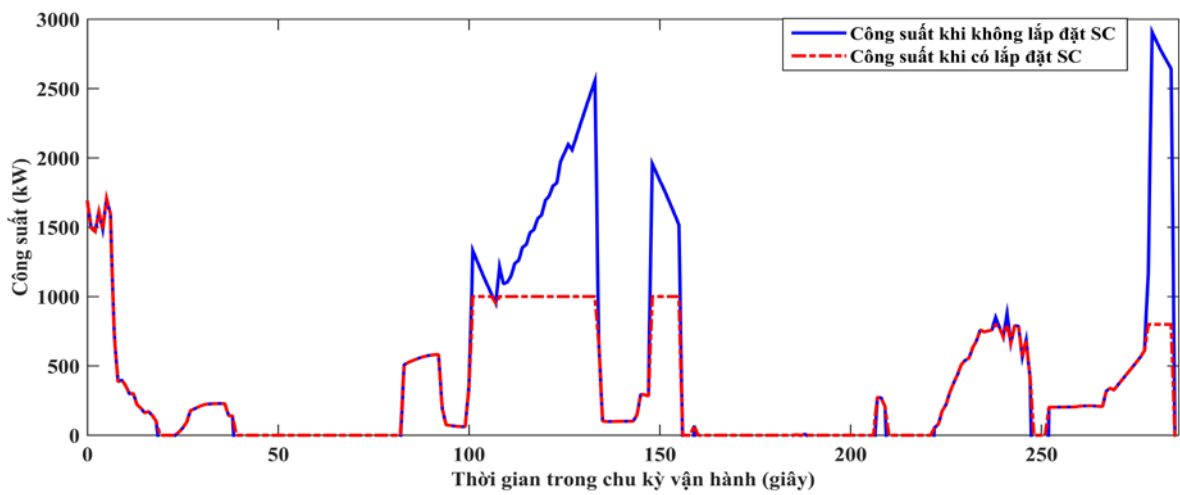
**Hình 5.** Công suất và tốc độ đoàn tàu tại từng thời điểm dọc tuyến đường.



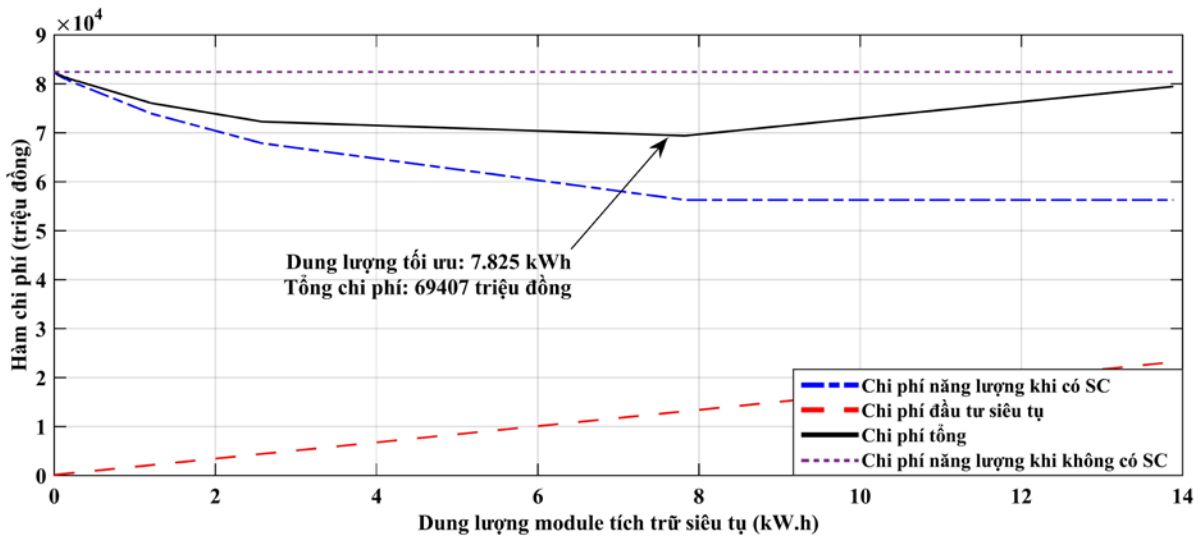
Hình 6. Đồ thị thời gian vận hành với giãn cách chạy tàu bằng 300 (s).



Hình 7. Công suất của trạm điện kéo đặt tại ga số 9.



Hình 8. Công suất trạm khi có và không có trang bị hệ thống tích trữ năng lượng.



Hình 9. Mối quan hệ của các hàm chi phí với dung lượng trạm tích trữ.

Bảng 4. Tổng chi phí tương ứng với các phương án lắp đặt trạm tích trữ siêu tụ.

No.	Dung lượng siêu tụ tại các trạm (kWh)																Chi phí (Tỷ đồng)			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12								
	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R				
1	3	14	14	14	6	14	14	14	7	13	14	14	12	14	7	14	14	14	408.38	
2	0	6	14	14	14	6	14	14	14	7	13	14	14	12	14	7	14	14	13	412.32
3	0	6	12	14	0	10	14	14	14	7	13	14	14	12	14	7	14	14	13	402.18
4	0	6	12	14	0	10	14	14	14	7	13	14	0	14	14	7	14	14	13	403.96
5	0	6	10	14	0	14	14	0	14	14	13	14	0	14	14	7	14	14	13	405.31
6	0	6	14	14	0	0	13	0	14	14	13	14	0	14	14	7	14	14	13	383.18
7	0	6	14	14	0	0	13	0	14	14	13	14	0	14	14	9	14	0	13	378.47
8	0	6	14	14	0	0	13	0	14	14	9	14	0	14	0	9	14	0	13	382.26
9	0	6	14	14	0	0	14	0	0	14	14	14	0	14	0	9	14	0	13	379.66
10	0	6	14	14	0	0	14	0	0	14	14	10	0	14	0	9	0	0	13	376.79
11	0	0	14	12	0	0	14	0	0	14	14	10	0	14	0	9	0	0	13	375.18
12	0	0	14	12	0	0	14	0	0	14	14	10	0	14	0	0	0	0	14	370.02
13	0	0	14	12	0	0	14	0	0	14	14	0	0	14	0	0	0	0	14	373.44
14	0	0	0	14	0	0	9	0	0	14	14	0	0	14	0	0	0	0	14	369.91
15	0	0	0	14	0	0	12	0	0	9	0	0	0	14	0	0	0	0	14	353.43
16	0	0	0	14	0	0	12	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	14	346.91
17	0	0	0	14	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	14	348.07

No.	Dung lượng siêu tụ tại các trạm (kWh)																Chi phí (Tỷ đồng)								
	1		2		3		4		5		6		7		8			9		10		11		12	
	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L	R		L	R	L	R	L	R		
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	349.09
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	348.19

L: Vị trí đường ray bên trái

R: Vị trí đường ray bên phải

5. Kết luận

Bài báo trình bày một phương pháp xác định vị trí và dung lượng tối ưu của các trạm tích trữ năng lượng siêu tụ điện triển khai cho các tuyến đường sắt đô thị với mục tiêu là cực đại hóa lợi ích kinh tế. Thuật toán đề xuất sử dụng cơ chế loại bỏ trạm không kinh tế theo tiêu chí chỉ tiêu kinh tế để hạn chế không gian tìm kiếm và xác định phương án khả thi nhất, đồng thời áp dụng nguyên lý truy hồi để tìm ra dung lượng tối ưu tương ứng với các phương án khả thi. Sự kết hợp của hai nguyên lý đã giúp giảm thiểu không gian tìm kiếm và khối lượng tính toán rất lớn trong quá trình xác định giá trị của phương án tối ưu. Thuật toán đề xuất có thể áp dụng được cho các kiểu đường sắt đô thị, nó có thể mô hình và mô phỏng cho các kiểu đoàn tàu, các dạng đường sắt với các chế độ vận hành bất kỳ kết hợp với việc tích hợp trạm tích trữ tại các vị trí chỉ định dọc đường ray. Tính hiệu quả của phương pháp được minh chứng trên kết quả mô phỏng, qua đó có thể sử dụng như một công cụ hữu ích tạo ra cơ sở tham vấn có giá trị cho các đơn vị quản lý, điều hành cũng như khai thác các tuyến đường sắt đô thị.

Tài liệu tham khảo

- [1] J. A. Aguado, A. J. S. Racero, S. d. I. Torre; "Optimal Operation of Electric Railways With Renewable Energy and Electric Storage Systems". IEEE Transactions on Smart Grid. 2018; 9(2):993 - 1001. DOI: 10.1109/TSG.2016.2574200.
- [2] C. Spalvieri, et al.; "Train braking impact on energy recovery: The case of the 3 kV d.c. railway line Roma-Napoli via Formia"; in Proc. 2019 AEIT International Annual Conference (AEIT); 18-20 September 2019; Florence, Italy. IEEE. 2019; pp.1-6. DOI: 10.23919/AEIT.2019.8893399.
- [3] H. -J. Chuang; "Optimization of inverter placement for mass rapid transit systems by immune algorithm"; in Proc. Electric Power Applications. 2005; 152(3):61-71. DOI: 10.1049/ip-epa:20041143.
- [4] M. Popescu, A. Bitoleanu; "A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems". Energies. 2019; 12(6):1092-1117. DOI: 10.3390/en12061092.
- [5] V. Calderaro, V. Galdi, and G. Graber; "Siting and sizing of stationary Super Capacitors in a Metro Network"; in Proc. AEIT Annual Conference; 3-5 October 2013; Mondello, Palermo, Italy. IEEE. 2013; pp.1-5. DOI: 10.1109/AEIT.2013.6666809.
- [6] R. Teymourfar, et al.; "Energy recovery in a metro network using stationary supercapacitors"; in Proc. 2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference; 16-17 February 2011; Tehran, Iran. IEEE. 2011; pp.324-329. DOI: 10.1109/PEDST C.2011.5742440.
- [7] B.Wang, Z. Yang, F. Lin, W. Zhao; "An Improved Genetic Algorithm for Optimal Stationary Energy Storage System Locating and Sizing". Energies. 2014; 7(10):6434-6458. DOI: 10.3390/en7106434.
- [8] T. Ratniyomchai, S. Hillmansen, P. Tricoli; "Optimal capacity and positioning of stationary supercapacitors for light rail vehicle systems"; in Proc. 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion; 18-20 June 2014; Ischia, Italy. IEEE. 2014; pp.807-812. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2014.687201.

- [9] H. Xia, et al; "Optimal Energy Management, Location and Size for Stationary Energy Storage System in a Metro Line Based on Genetic Algorithm". *Energies*. 2015; 8(10):11618-11640. DOI: 10.3390/en81011618.
- [10] V. Calderaro, et al.; "Optimal siting and sizing of stationary supercapacitors in a metro network using PSO"; in Proc. 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT); 17-19 March 2015; Seville, Spain. IEEE. 2015; pp. 2680-2685. DOI: 10.1109/ICIT.2015.7125493.
- [11] R. Lamedica, et al.; "Optimal Siting and Sizing of Wayside Energy Storage Systems in a D.C. Railway Line". *Energies*. 2020; 13(23):6271-6293. DOI: 10.3390/en13236271.
- [12] D. R. Dupré, et al; "Determining the optimum installation of energy storage systems in railway electrical infrastructures by means of swarm and evolutionary optimization algorithms". *Electrical Power and Energy Systems*. 2020; 124:1-15. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106295.
- [13] T. V. Khoi, N. D. Khuong; "Optimal planning of substations on urban railway power supply systems using integer linear programming". *Transport and Communications Science Journal*. 2019; 70(4):264-278. DOI: 10.25073/tcsj.70.4.14.
- [14] N. T. M. Chau, "Hanoi Urban Railway Project Cat Linh-Ha Dong Line. Package 1: EPC Contact. Technical Design, Book 2: Traffic organization and operation management," Railway Project Management Unit, Vietnam Railway Administration, 2014.
- [15] S. Wei, et al.; "Stochastic optimization of a stationary energy storage system for a catenary-free tramline". *Applied Energy*. 2020; 280:1-10. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115711.
- [16] X. Liu, K. Li, "Energy storage devices in electrified railway systems: A review". *Transportation Safety and Environment*. 2020; 2(3):183-201. DOI: 10.1093/tse/tdaa016.
- [17] T. V. Khoi, A. T. H. T. Anh, D. V. Phuc; "Optimizing the urban train speed to minimize the energy consumption and comfort". *Transport and Communications Science Journal*. 2021; 72(3):317-329. DOI: 10.47869/tcsj.72.3.7.
- [18] T. V. Khoi, N. D. Khuong; "Power network model - based estimation of recycle energy at substations". *Transport and Communications Science Journal*. 2020; 71(3):196-209. DOI: 10.25073/tcsj.71.3.4.
- [19] D. R. Dupré, et al.; "Analysis of the demand charge in DC railway systems and reduction of its economic impact with Energy Storage Systems". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2017; 93:459-467. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.06.022.

Ngày nhận bài: 24/12/2021

Ngày chuyển phản biện: 27/12/2021

Ngày hoàn thành sửa bài: 17/01/2022

Ngày chấp nhận đăng: 20/01/2022