



## AN OPTIMIZING METHOD OF INVERTER LOCATION AND CAPACITY ON THE URBAN RAIL POWER SUPPLY SYSTEM

Tran Van Khoi\*, An Thi Hoai Thu Anh, Dang Viet Phuc

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 06/01/2021

Revised: 07/04/2021

Accepted: 23/04/2021

Published online: 15/06/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.5.3>

\*Corresponding author

Email: tvkhoi.ktd@utc.edu.vn; Tel: 0971385813

**Abstract.** Recovery of braking energy on the contact line to return to the medium voltage grid is one of the effective measures to recover renewable energy during the operation process. To achieve the greatest recovery efficiency, besides the control mode, the position and capacity of the inverters play a very important role. This paper presents a method for determining the optimal location and capacity of inverters in the traction power supply system for urban railway lines. The goal is to find an inverter placement that minimizes the total cost of power consumption and the investment costs of the inverters that provide the greatest economic benefits. The proposed method is implemented in two stages. The first stage applies the power flow algorithm to determine the energy consumption and recovered energy at each substation corresponding to the inverter placement cases in the operating modes. The second stage searches for the location and capacity of the inverters so that the total cost is minimal. The proposed algorithm is tested on the model of the power supply system according to the reference data from the Cat Linh - Ha Dong railway. The simulation results for the case of operating 11 trains, the time from 5:00 to 22:00 daily for 10 years, the cost when equipped with the inverters is 252.98 billion VND compared to 340.6 billion VND without using inverters. Simulation results show that the example system is optimized, and its power saving is remarkable.

**Keywords:** Urban railway transit, Energy savings, Reversible substation, Regenerative braking energy, optimization algorithm.



## PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU VỊ TRÍ VÀ DUNG LƯỢNG BỘ NGHỊCH LƯU TRONG HỆ THỐNG CUNG CẤP ĐIỆN KÉO ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ

Trần Văn Khôi\*, An Thị Hoài Thu Anh, Đặng Việt Phúc

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 06/01/2021

Ngày nhận bài sửa: 07/04/2021

Ngày chấp nhận đăng: 23/04/2021

Ngày xuất bản Online: 15/06/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.5.3>

\*Tác giả liên hệ

Email: tvkhoi.ktd@utc.edu.vn; Tel: 0971385813

**Tóm tắt.** Thu hồi năng lượng dư thừa trên lưới tiếp xúc trả về lưới trung áp là một trong các biện pháp hiệu quả thu hồi năng lượng tái sinh trong quá trình hãm, xuống dốc của các đoàn tàu trong quá trình vận hành. Để đạt được hiệu quả thu hồi lớn nhất, bên cạnh chế độ điều khiển thì vị trí và dung lượng các bộ nghịch lưu đóng vai trò rất quan trọng. Bài báo này trình bày một phương pháp xác định vị trí tối ưu và dung lượng của các bộ nghịch lưu trong hệ thống cung cấp điện kéo cho các tuyến đường sắt đô thị. Mục tiêu là tìm được phương án bố trí nghịch lưu để tối thiểu hóa tổng chi phí tiêu thụ điện năng và chi phí đầu tư các bộ nghịch lưu, từ đó mang lại lợi ích kinh tế lớn nhất. Phương pháp đề xuất được thực hiện trong hai giai đoạn. Giai đoạn thứ nhất áp dụng thuật toán trào lưu công suất để xác định mức năng lượng tiêu thụ và năng lượng thu hồi tại mỗi trạm điện kéo tương ứng với các trường hợp bố trí nghịch lưu trong các chế độ vận hành. Giai đoạn hai tìm kiếm vị trí và dung lượng các bộ nghịch lưu để tổng chi phí là tối thiểu. Thuật toán đề xuất được kiểm nghiệm trên một mô hình hệ thống cung cấp điện xây dựng theo số liệu tham khảo từ tuyến đường sắt Cát Linh – Hà Đông. Kết quả mô phỏng cho trường hợp vận hành 11 đoàn tàu, thời gian từ 5h đến 22h hàng ngày trong 10 năm thì chi phí khi có trang bị nghịch lưu là 252,98 tỷ so với 340,6 tỷ khi không dùng nghịch lưu. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống ví dụ được tối ưu hóa và khả năng tiết kiệm năng lượng của nó là đáng chú ý.

**Từ khóa:** Tàu điện đô thị, Tiết kiệm năng lượng, Trạm nghịch lưu, Năng lượng hãm tái sinh, Thuật toán tối ưu.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các hệ thống giao thông đường sắt đô thị là giải pháp bức thiết để giải quyết các vấn đề về giao thông công cộng và ô nhiễm không khí. Do tàu điện đô thị phục vụ giao thông công cộng với quãng đường ngắn và lượng hành khách đông đúc nên khoảng cách giữa hai ga thường trong khoảng 1km trong khu vực dịch vụ trung tâm thành phố. Do đó đoàn tàu phải hoạt động với momen lớn để đạt được khả năng tăng tốc nhanh trong quá trình khởi động. Khi đoàn tàu đến ga tiếp theo, chế độ hãm tái sinh được áp dụng để dừng nhanh bằng cách áp dụng đồng thời phanh cơ và phanh điện. Khi tốc độ của đoàn tàu ở một dải giá trị xác định, chỉ tác dụng hãm điện để phục hồi hoàn toàn động năng. Với động năng rất cao của các đoàn tàu trong giai đoạn hãm có thể được chuyển thành năng lượng điện bằng cách điều khiển tần số cuộn dây stato nhỏ hơn tốc độ rôto của nó. Năng lượng tái tạo sau đó được đưa vào đường dây tiếp xúc (hoặc ray thứ ba) để cung cấp năng lượng cho các đoàn tàu khác trong cùng khu đoạn. Nếu như năng lượng dư thừa lớn sẽ làm tăng mức điện áp của dây tiếp xúc lên cao và khi đó cần phải áp dụng các biện pháp tiêu tán công suất để tiêu thụ điện năng dư thừa.

Theo mức tiêu thụ năng lượng của tàu điện đô thị cho các chế độ hoạt động khác nhau, động năng tái sinh chiếm khoảng 53% tổng năng lượng tiêu thụ sẽ được giải phóng trong giai đoạn phanh. Bằng cách trừ đi sự mất mát của lực cản chuyển động và phanh cơ học, khoảng 22%-40% năng lượng tiêu thụ có thể được phục hồi bằng cách tái tạo điện [1]. Dự kiến rằng năng lượng tái sinh có thể được phục hồi bằng các bộ nghịch lưu được lắp đặt tại các vị trí thích hợp dọc theo tuyến đường [2-4].

Lợi ích chính của việc lắp đặt nghịch lưu là tiết kiệm năng lượng. Tuy nhiên, cũng có những lợi ích khác, chẳng hạn như tăng mức độ dự phòng của hệ thống phanh tàu, cải thiện chất lượng năng lượng, cũng như giảm nhiệt độ do tiêu tán năng lượng dư thừa trên điện trở hãm [5,6].

Vấn đề thu hồi năng lượng tái sinh bằng trạm chỉnh lưu tích cực để nâng cao hiệu suất năng lượng trong hệ thống cung cấp điện giao thông đường sắt đã được quan tâm từ rất sớm. Từ những năm 1983 các bộ biến đổi 4-q sử dụng thyristor đã được nghiên cứu để áp dụng cho các trạm điện kéo để thực hiện chức năng thu hồi năng lượng hãm tái sinh. Bên cạnh đó, các cấu trúc khác cũng được nghiên cứu và áp dụng như chỉnh lưu diode- nghịch lưu thyristor; chỉnh lưu diode – nghịch lưu IGBT; INGEBER; ENVILINE; SISFREG, HESOP,...Đã có rất nhiều các nghiên cứu trong khía cạnh này [7-10] với việc tập trung vào vấn đề thiết bị và chế độ làm việc của trạm nghịch lưu.

Một số nghiên cứu sử dụng kỹ thuật tối ưu để xác định vị trí và dung lượng các trạm nghịch lưu. Các tác giả [11,12] sử dụng kỹ thuật tìm kiếm downhill để xác định vị trí và dung lượng của các trạm nghịch lưu. Kỹ thuật tìm kiếm dựa theo kết quả tính toán công suất tái sinh mỗi trạm thông qua thuật toán mô phỏng trào lưu công suất để xác định đối tượng ưu tiên. Kết quả tìm kiếm mang tính tối ưu cục bộ, chưa đảm bảo được tính tối ưu cho toàn hệ thống. Tác giả Włodzimirz Jefimowski [13] sử dụng thuật toán di truyền để xác định vị trí và dung lượng trạm nghịch lưu thỏa mãn cực đại hóa hàm mục tiêu là hiệu của năng lượng chỉnh lưu và năng lượng nghịch lưu trong khoảng thời gian chu kỳ 24h. Tuy nhiên mô hình năng lượng được xây dựng với mỗi khu đoạn chỉ có một đoàn tàu là chưa đủ tổng quát. Hui-Jen Chuang [14] cũng áp dụng thuật toán di truyền để xác định vị trí và dung lượng trạm nghịch lưu trong hệ thống cung cấp điện giao thông đô thị tại Đài Bắc. Hui-Jen Chuang lựa chọn hàm

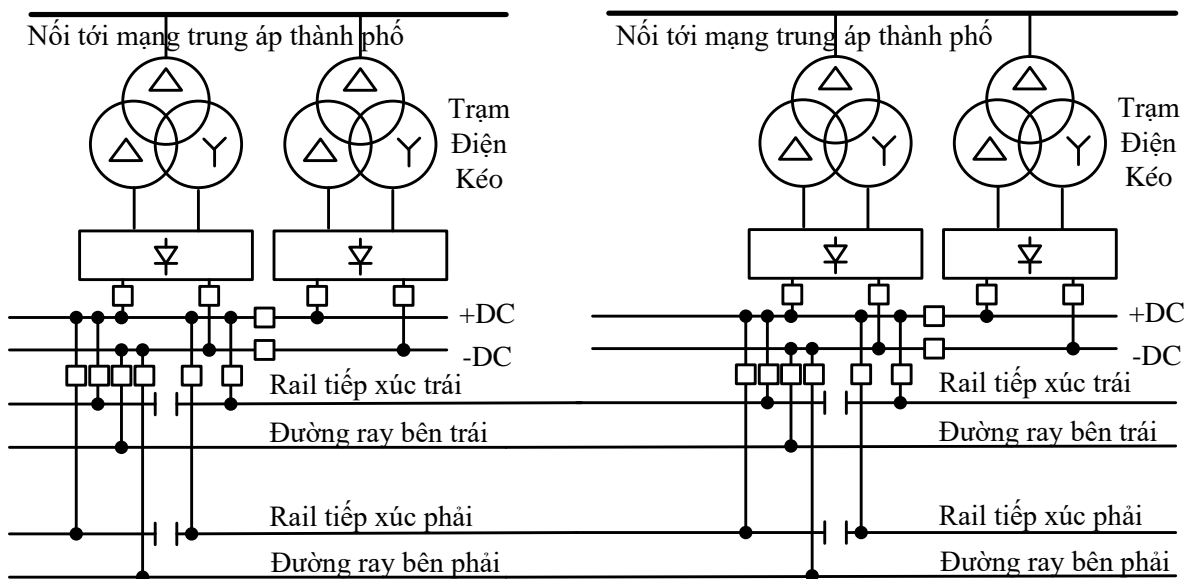
mục tiêu là tổng chi phí năng lượng tiêu thụ, chi phí đầu tư nghịch lưu và cả chi phí dịch vụ. Một thuật toán khác là tối ưu bầy đàn (PSO) cũng đã được áp dụng bởi Mohammad Reza Zolghadri [15] để tìm kiếm vị trí tối ưu trạm điện kéo bố trí nghịch lưu. Tuy nhiên kết quả tối ưu đạt được cũng là tối ưu cục bộ.

Bài báo này tập trung vào một phương pháp tối ưu toàn cục xác định vị trí tối ưu và dung lượng của các bộ nghịch lưu trong hệ thống cung cấp điện kéo cho các tuyến đường sắt đô thị. Cốt lõi của phương pháp là xác định được giá trị năng lượng tiêu thụ và năng lượng thu hồi tại các trạm điện kéo trong mỗi phương án bố trí bộ nghịch lưu để từ đó tìm được phương án có tổng chi phí nhỏ nhất. Phương pháp đề xuất được thực hiện trong hai giai đoạn. Giai đoạn thứ nhất áp dụng thuật toán trào lưu công suất để xác định mức năng lượng tiêu thụ và năng lượng thu hồi tại mỗi trạm điện kéo tương ứng với các trường hợp bố trí nghịch lưu trong các chế độ vận hành. Giai đoạn thứ hai tìm kiếm vị trí và dung lượng các bộ nghịch lưu để tổng chi phí là tối thiểu. Thuật toán đề xuất được kiểm nghiệm trên mô hình hệ thống cung cấp điện xây dựng theo số liệu tham khảo từ tuyến đường sắt Cát Linh – Hà Đông.

## 2. MÔ HÌNH CUNG CẤP NĂNG LƯỢNG ĐIỆN KÉO

### 2.1. Hệ thống cung cấp điện kéo cho các tuyến đường sắt đô thị

Nguồn điện được cung cấp cho đoàn tàu từ các trạm biến áp khu vực, thông qua mạng trung áp cấp tới các trạm điện kéo. Từ trạm điện kéo dòng điện được chỉnh lưu thành dòng điện một chiều dẫn qua mạng đường dây tiếp xúc (hoặc ray thứ ba) cấp tới đoàn tàu. Dòng điện từ đoàn tàu được khép kín mạch về trạm điện kéo thông qua đường ray và đường dây hồi lưu. Hình 1 minh họa sơ đồ nguyên lý hệ thống cung cấp điện kéo đường sắt đô thị cho một khu đoạn. Trong đó trạm điện kéo bao gồm hai tổ máy biến áp chỉnh lưu (một tổ sử dụng cho mục đích dự phòng). Mỗi tổ máy biến áp chỉnh lưu gồm một máy biến áp 3 pha 3 cuộn dây với hai cuộn dây thứ cấp tương ứng tạo ra sức điện động lệch pha nhau 30 độ điện. Đầu ra hai cuộn thứ cấp được nối tới bộ chỉnh lưu 12 xung (hoặc 24 xung) để tạo thành điện áp một chiều cấp tới thanh cái, từ đó thông qua mạng đường dây tiếp xúc (hoặc ray thứ 3) cấp cho đoàn tàu.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống cung cấp điện kéo đường sắt đô thị một khu đoạn.

Trong các tuyến đường sắt đô thị, công suất của trạm biến áp điện kéo thường nằm trong khoảng 1,5 MW đến 5,5 MW.

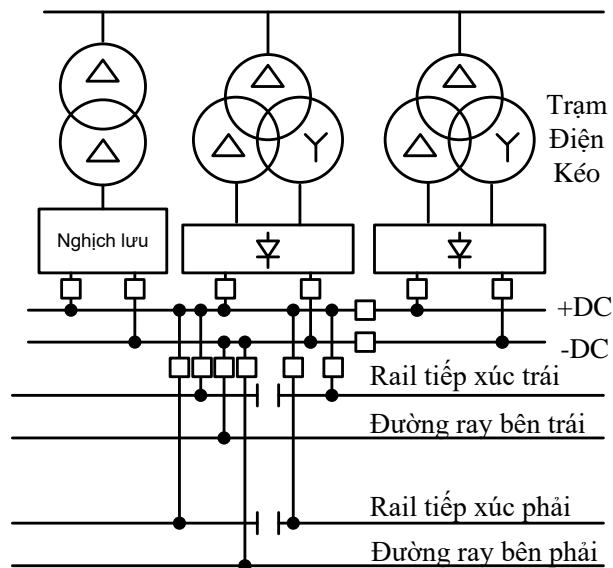
Để thuận tiện cho quá trình phân tích hệ thống cung cấp điện kéo được mô hình hóa, trong đó trạm biến áp chỉnh lưu được mô hình bởi nguồn điện áp có điện trở trong là  $r$ .  $U_0$  là điện áp ra không tải của trạm biến áp chỉnh lưu. Dòng điện  $I$  chạy qua đường dây tiếp xúc (hoặc đường dây thứ ba), qua đoàn tàu và quay trở lại trạm biến áp thông qua đường ray. Điện trở của toàn mạch  $R$  là tổng của điện trở đường dây tiếp xúc (đường dây thứ ba) và điện trở của hai thanh ray mắc song song.

## 2.2. Sơ đồ trạm điện kéo có nghịch lưu

Để có được khả năng cho phép dòng điện chạy ngược trong trạm biến áp kéo một chiều được trang bị bộ chỉnh lưu không điều khiển, một nghịch lưu phải được kết nối song song với bộ chỉnh lưu. Vì vậy, nhóm hiện có bao gồm máy biến áp điện kéo và bộ chỉnh lưu diode được giữ lại và khả năng thu hồi năng lượng đạt được với thiết bị tối thiểu. Có thể sử dụng các phương án như:

- Bộ chỉnh lưu diode và bộ nghịch lưu dựa trên thyristor, còn được gọi là bộ nghịch lưu chuyển mạch dòng thyristor (TCD);
- Bộ chỉnh lưu diode và nghịch lưu điều chế độ rộng xung (PWM) dựa trên các van bán dẫn công suất được điều khiển hoàn toàn (IGBT).

Trên Hình 2 minh họa sơ đồ nguyên lý trạm điện kéo có trang bị nghịch lưu.



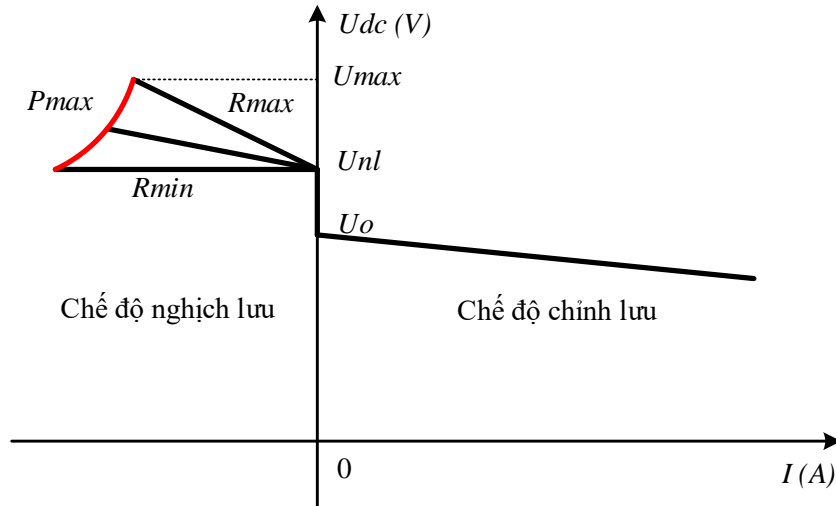
Hình 2. Sơ đồ trạm điện kéo có nghịch lưu.

Khi việc nâng cấp hệ thống được chấp nhận, bộ chỉnh lưu không điều khiển được có thể được thay thế bằng bộ chuyển đổi bốn góc phần tư (4-q). Ví dụ, nó có thể là bộ chỉnh lưu điều khiển bằng thyristor thuận nghịch, cầu chỉnh lưu thyristor được kết hợp với bộ chuyển đổi IGBT hoặc cầu chỉnh lưu/nghịch lưu điều khiển bằng IGBT. Do đó, nhu cầu thay thế máy biến áp hiện tại làm cho giải pháp này trở nên phức tạp và tốn kém hơn.

## 2.3. Chế độ làm việc của trạm điện kéo có nghịch lưu

Trạm điện kéo có trang bị nghịch lưu được vận hành ở chế độ dòng điện hai chiều để

chuyển đổi từ chỉnh lưu sang nghịch lưu và ngược lại. Dòng điện hình thành do chênh lệch điện áp đầu ra tức thời của hai bộ chuyển đổi. Để hạn chế dòng điện tuần hoàn giữa hai bộ chuyển đổi, điện áp một chiều của nghịch lưu phải được thiết kế cao hơn điện áp không tải của bộ chỉnh lưu. Tuy nhiên, khả năng tiếp nhận của hệ thống sẽ bị giảm nếu điện áp một chiều của nghịch lưu quá cao. Đối với điều này, điện áp nghịch lưu phải được giữ ở mức thấp nhất có thể mà không giảm xuống dưới điện áp không tải của bộ chỉnh lưu. Hình 3 minh họa đặc tính làm việc của trạm điện kéo có nghịch lưu.



Hình 3. Đặc tính làm việc trạm điện kéo có nghịch lưu.

Trong đó:  $U_o$  – điện áp đầu ra chỉnh lưu khi không tải;  $U_{nl}$  – điện áp bắt đầu thực hiện chế độ nghịch lưu;  $U_{max}$  – điện áp một chiều lớn nhất cho phép;  $P_{max}$  – công suất nghịch lưu lớn nhất cho phép.

Vì bộ nghịch lưu không điều khiển được nên đặc tính  $U-I$  của bộ chỉnh lưu được xác định bởi trở kháng chuyển mạch của bộ chỉnh lưu. Tuy nhiên, đặc tính  $U-I$  của bộ nghịch lưu có thể điều chỉnh được. Hai đặc tính làm việc chính thường được áp dụng điều khiển nghịch lưu là:

- 1) Điều khiển điện áp không đổi, để duy trì điện áp một chiều đầu vào nghịch lưu luôn ở giá trị đặt trước.
- 2) Điều khiển duy trì trở kháng không đổi.

### 3. NĂNG LƯỢNG ĐIỆN KÉO CỦA CÁC ĐOÀN TÀU TRÊN MỘT TUYẾN ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ

#### 3.1. Công suất đoàn tàu di chuyển dọc tuyến đường

Công suất đoàn tàu tại từng thời điểm được xác định dựa trên đường tốc độ và lực kéo đoàn tàu tại từng thời điểm dọc theo tuyến đường được xác định trong công thức (1).

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

trong đó:

$v(t)$ - tốc độ được xác định từ profile tốc độ đã được xây dựng theo các chế độ vận hành.

$F_k(t)$  - lực kéo đoàn tàu được xác định tương ứng với tốc độ vận hành từ đặc tính lực kéo.

$F_h(t)$  - lực hãm đoàn tàu được xác định tương ứng với tốc độ vận hành từ đặc tính lực hãm điện.

$\eta_k$  – hiệu suất trong chế độ kéo, giả định là không đổi trên toàn tuyến.

$\eta_h$  – hiệu suất trong chế độ hãm điện, giả định là không đổi trên toàn tuyến.

### 3.2. Năng lượng điện kéo tại các trạm điện kéo theo thời gian vận hành đoàn tàu

Tại trạm nghịch lưu, dòng năng lượng tiêu thụ được cung cấp qua chỉnh lưu và năng lượng dư thừa sẽ được thu hồi thông qua nghịch lưu. Năng lượng tiêu thụ tại một trạm điện kéo ( $E_{sub}$ ) trong khoảng thời gian một ngày được tính theo công thức (2).

$$E_{sub} = E_{rec} - E_{inv} = \frac{1}{\eta_{rec}} \int_5^{22} P_{rec}(t) dt - \eta_{inv} \int_5^{22} P_{inv}(t) dt \quad (2)$$

Trong đó:

$P_{rec}$  – công suất cung cấp qua chỉnh lưu tại từng thời điểm, được xác định dựa trên thuật toán trào lưu công suất theo tài liệu trích dẫn [16].

$P_{inv}$  – công suất thu hồi qua nghịch lưu tại từng thời điểm, được xác định dựa trên thuật toán trào lưu công suất theo tài liệu trích dẫn [16].

$\eta_{rec}$  – hiệu suất của máy biến áp và chỉnh lưu.

$\eta_{inv}$  – hiệu suất của nghịch lưu và máy biến áp.

Năng lượng điện kéo của một tuyến ( $E_{net}$ ) sẽ được tính bằng tổng năng lượng tại các trạm điện kéo trên toàn tuyến như trong công thức (3), với  $n_{sub}$  là tổng số trạm điện kéo.

$$\begin{aligned} E_{ener} &= \sum_{k=1}^{n_{sub}} E_{rec}(k) \\ E_{reg} &= \sum_{k=1}^{n_{sub}} E_{inv}(k) \\ E_{net} &= E_{ener} - E_{reg} = \sum_{k=1}^{n_{sub}} E_{rec}(k) - \sum_{k=1}^{n_{sub}} E_{inv}(k) \end{aligned} \quad (3)$$

## 4. THUẬT TOÁN TỐI ƯU VỊ TRÍ VÀ DUNG LƯỢNG TRẠM NGHỊCH LƯU TRONG HỆ THỐNG CUNG CẤP ĐIỆN KÉO GIAO THÔNG ĐÔ THỊ

### 4.1. Hàm mục tiêu

Lắp đặt nghịch lưu tại các trạm điện kéo để thu hồi năng lượng dư thừa. Nó cũng có những lợi ích khác như tăng mức độ dự phòng của hệ thống phanh tàu, cải thiện chất lượng năng lượng, cũng như giảm nhiệt độ do tiêu tán năng lượng dư thừa trên điện trở hãm. Tuy

nhiên mục đích chính vẫn là tiết kiệm năng lượng vận hành trên toàn tuyến. Do vậy hàm mục tiêu được xác định là chi phí năng lượng tiêu hao để vận hành hệ thống các đoàn tàu làm việc. Để đơn giản, bỏ qua các chi phí thường xuyên (bảo dưỡng...), hàm chi phí bao gồm chi phí của năng lượng tiêu hao, năng lượng thu hồi và chi phí đầu tư cũng như chi phí cơ bản cần thiết để triển khai thiết bị nghịch lưu tại trạm điện kéo. Thời gian sử dụng cho tính toán chi phí được giả định là trong vòng 10 năm. Hàm mục tiêu như được mô tả trong công thức (4).

$$\min(E_{ener}(j) * 365 * 10 * C_{elec-mua} - E_{reg}(j) * 365 * 10 * C_{elec-ban} + \sum_{i=1}^{n_{sub}} (P_{reg-sub(i)}(j) * C_{inv}) + C_{inv0}) \quad (4)$$

trong đó:

$E_{ener}(j)$  – năng lượng tiêu thụ toàn tuyến trong một ngày ứng với phương án  $j$

$E_{reg}(j)$  – năng lượng thu hồi được trong một ngày ứng với phương án  $j$

$P_{reg-sub(i)}(j)$  – công suất tái sinh lớn nhất tại trạm điện kéo  $i$  trong phương án  $j$

$C_{elec-mua}$  – giá thành phải trả cho một kw.h điện năng (giả định bằng 1700 đồng).

$C_{elec-ban}$  – giá thành bán một kw.h điện năng (giả định bằng 1700 đồng).

$C_{inv}$  – chi phí đầu tư một kw nghịch lưu (130 USD  $\approx$  2,86 triệu đồng [14])

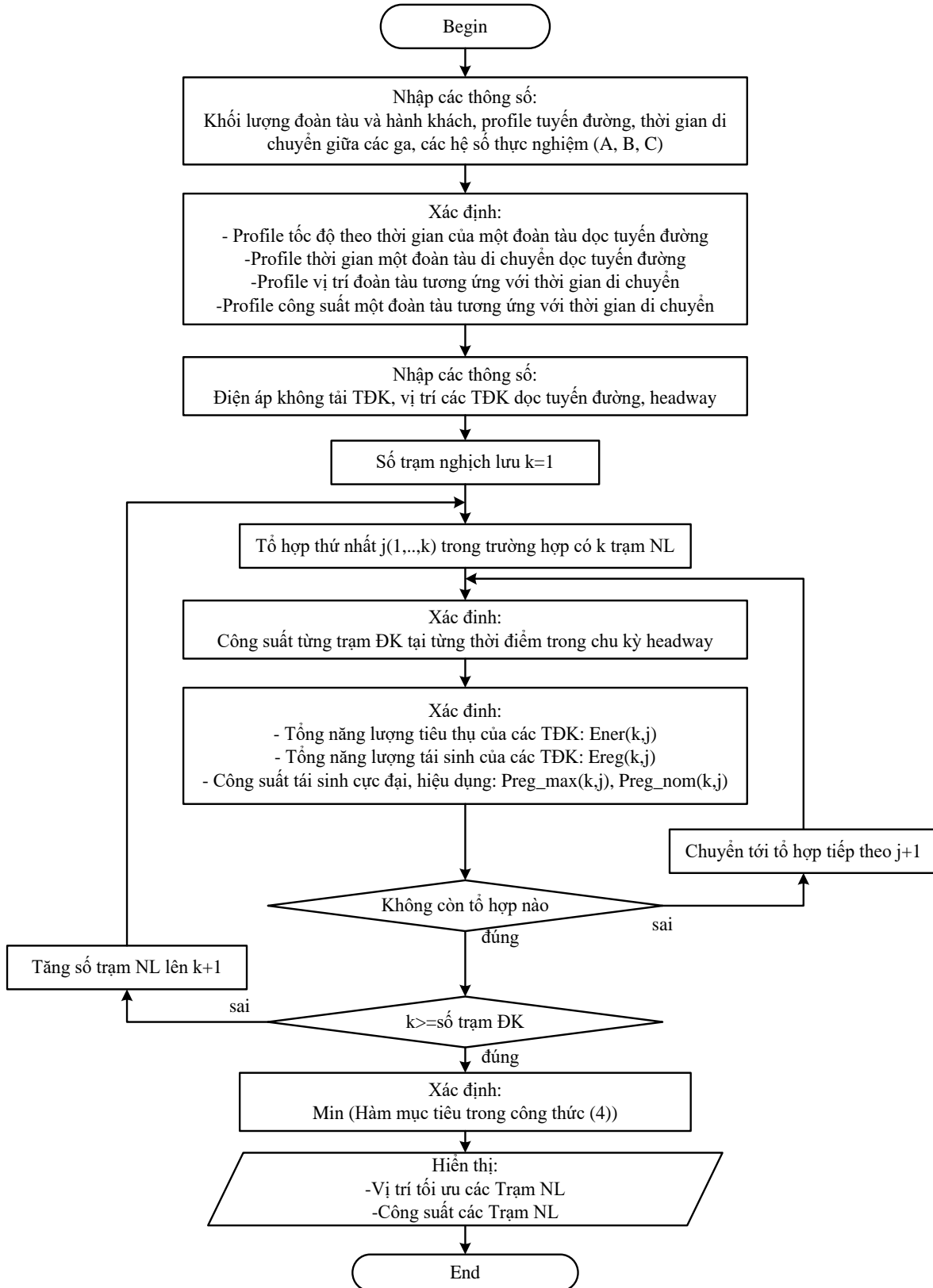
$C_{inv0}$  – chi phí triển khai trạm nghịch lưu (129000 USD  $\approx$  2,838 tỷ đồng [14])

$n_{sub}$  – tổng số trạm điện kéo trong hệ thống cung cấp điện cho tuyến đường sắt

#### 4.2. Thuật toán tối ưu vị trí và dung lượng trạm nghịch lưu trong hệ thống cung cấp điện kéo đường sắt đô thị

Đối với đường sắt đô thị, chiều dài mỗi tuyến thường trong khoảng 10 km đến 25 km, số lượng trạm điện kéo khi đó thường không quá 10 trạm. Số phương án tối đa bố trí trạm nghịch lưu sẽ là  $2^{10}-1=1023$ . Với sự hỗ trợ tính toán từ máy tính, duyệt đủ 1023 phương án cũng không phải là công việc khó khăn. Do đó để đảm bảo tính tối ưu toàn cục, phương án lựa chọn được phải là tốt nhất, thuật toán được xây dựng trong bài báo này sẽ duyệt đủ tổng số phương án. Cốt lõi của thuật toán là xác định được năng lượng tiêu thụ và năng lượng thu hồi tại các trạm điện kéo trong mỗi phương án bố trí trạm nghịch lưu. Công việc này được thực hiện trong giai đoạn thứ nhất của thuật toán đề xuất dựa trên thuật toán trào lưu công suất [16]. Thuật toán trong [16] phân tích dòng năng lượng cho một phương án và dòng năng lượng tại trạm điện kéo có thể di chuyển hai chiều. Thuật toán trong bài báo này được cải tiến để thay đổi tùy chọn chức năng của trạm điện kéo là chỉnh lưu hoặc nghịch lưu, và tính cho tất cả các phương án. Mỗi phương án bố trí nghịch lưu sẽ quyết định tổng năng lượng tiêu thụ, tổng năng lượng có khả năng thu hồi và tổng tổn hao năng lượng trên lưới tiếp xúc. Sau khi đã xác định được năng lượng trong từng phương án ở giai đoạn thứ nhất, giai đoạn tiếp theo đi tìm phương án tối ưu với chi phí tối thiểu như mô tả trong công thức (4). Chi tiết các bước thuật toán minh họa trên lưu đồ Hình 4.





Hình 4. Lưu đồ thuật toán tối ưu vị trí và dung lượng trạm nghịch lưu.

### 4.3. Kết quả mô phỏng

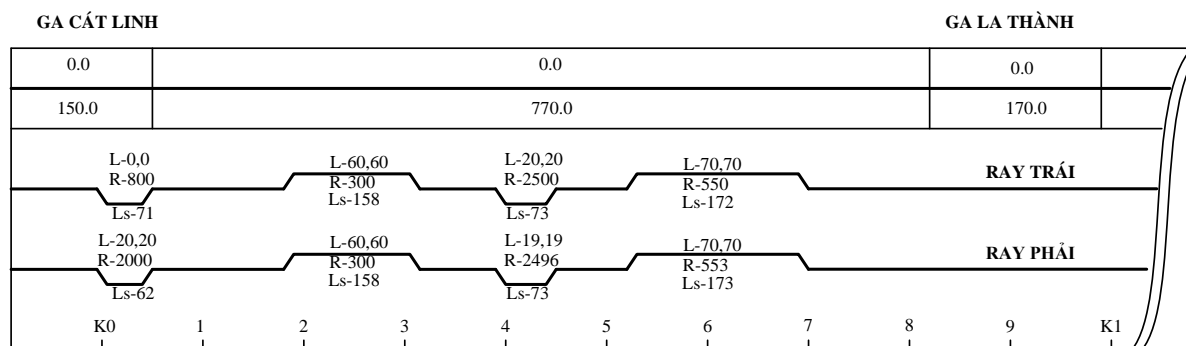
Để kiểm nghiệm thuật toán đề xuất, một mô hình đoàn tàu được xây dựng dựa theo số liệu của tuyến đường sắt Cát Linh-Hà Đông, sử dụng tham khảo trong tài liệu dự án Cát Linh-Hà Đông [17]. Các thông số cơ bản của đoàn tàu được liệt kê trong Bảng 1. Bảng 2 tổng kết thời gian chạy tàu và khoảng cách giữa các ga. Profile tuyến đường sử dụng trong mô hình mô phỏng được mô tả như trên Hình 5. Trong mô hình mô phỏng cũng giả thiết hệ thống cung cấp điện đã xác định gồm có 5 trạm điện kéo được bố trí tương ứng tại các ga: Cát Linh, Láng, Phùng Khoang, Hà Đông, và ga Yên Nghĩa.

Bảng 1. Thông số cơ bản của đoàn tàu và tuyến đường.

Thông số	Đơn vị	Giá trị
Điện áp định mức lưới tiếp xúc	V	750
Điện áp lưới tiếp xúc khi không tải	V	790
Tổng khối lượng đoàn tàu và hành khách	Tấn	142
Giãn cách nhỏ nhất (headway)	Giây	180-600
Điện trở đơn vị của LTX và ray ( $R_0$ )	$\Omega/\text{km}$	0.0625
Điện trở cấp nguồn từ MBA tới LTX ( $R_{ng}$ )	$\Omega$	0.01

Bảng 2. Thời gian chạy tàu giữa các ga trên tuyến Cát Linh – Hà Đông.

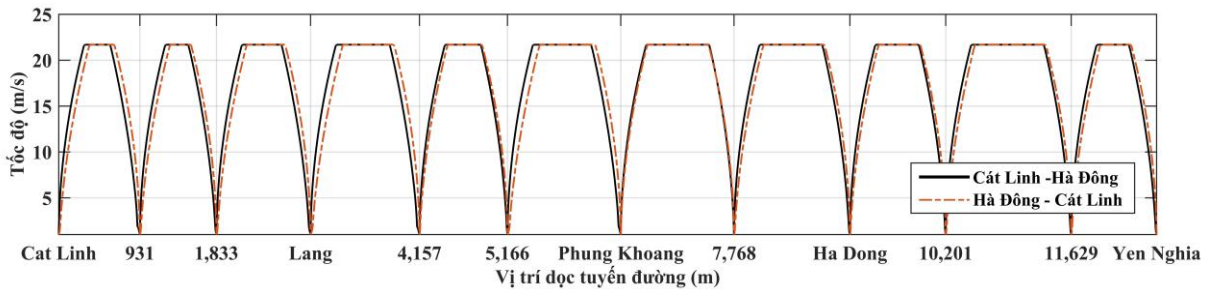
Từ ga	Đến ga	Chiều dài (m)	Thời gian (s)	Từ ga	Đến ga	Chiều dài (m)	Thời gian (s)
C. Linh	L.Thành	931	88	Y.Nghĩa	V. Khê	1032	80
L. Thành	T. Hà	902.5	78	V. Khê	L.Khê	1428	101
T. Hà	Láng	1075	91	L.Khê	H.Đông	1110	84
Láng	T. Đình	1249	103	H.Đông	V.Quán	1323	97
T. Đình	V. Đai 3	1009	79	V.Quán	P.Khoang	1122	85
V. Đai 3	P.Khoang	1480	104	P.Khoang	V. Đai 3	1480	106
P.Khoang	V.Quán	1122	86	V. Đai 3	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



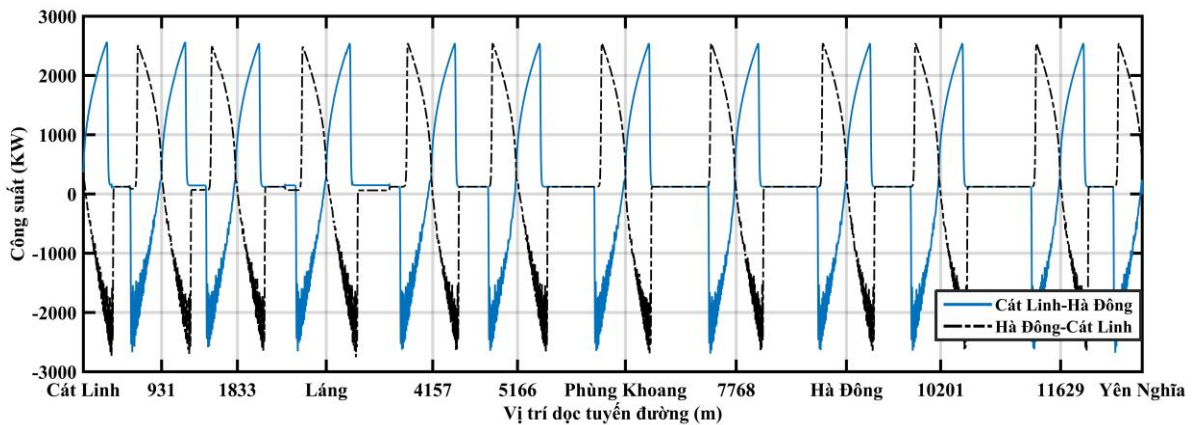
Hình 5. Profile tuyến đường đoạn Ga Cát Linh – Ga La Thành.

Trong bài báo này, giả định rằng bỏ qua yếu tố độ dốc trắc dọc của đường để tính toán khả năng lớn nhất có khả năng thu hồi năng lượng tái sinh. Do không có được số liệu đường cong tốc độ nên các tác giả dựa vào các thông số đoàn tàu, thông số tuyến đường và thời gian

chạy tàu giữa các ga để xây dựng đường cong tốc độ chạy tàu theo dạng như Hình 6. Hình 7 mô tả phân bố công suất đoàn tàu tại từng điểm di chuyển theo cả hai hướng từ Cát Linh đến Yên Nghĩa và từ Yên Nghĩa quay về Cát Linh.



Hình 6. Đồ thị tốc độ theo vị trí dọc tuyến đường cả hai hướng.

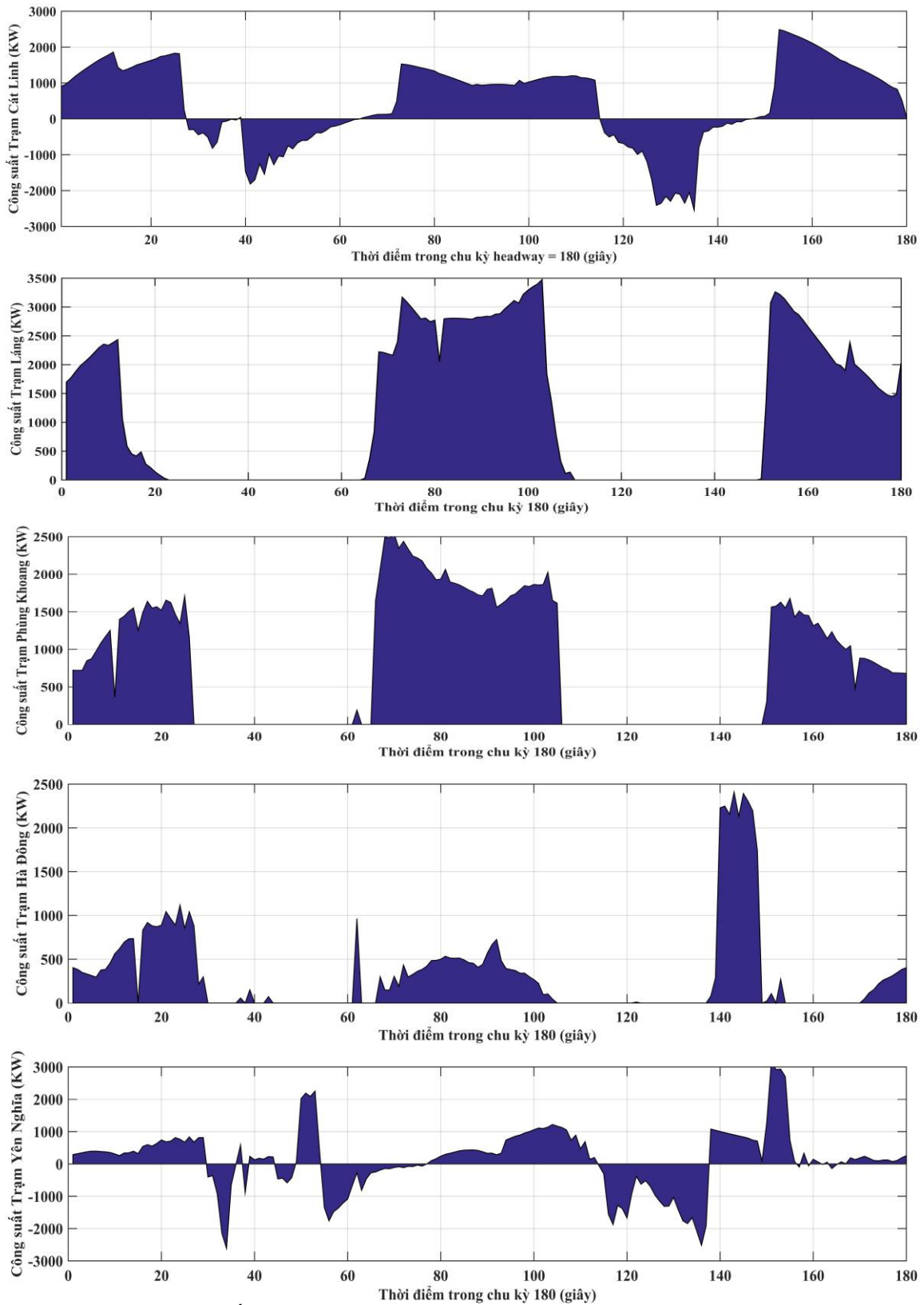


Hình 7. Công suất dọc hành trình từ ga Cát Linh tới ga Yên Nghĩa theo cả hai hướng.

Trên cơ sở công suất đoàn tàu tại từng thời điểm dọc tuyến đường đã xác định, thuật toán được thực hiện để xác định năng lượng tiêu thụ cũng như năng lượng thu hồi được trên mạng điện kéo tương ứng với các phương án khác nhau. Hình 8 mô tả biểu đồ công suất theo thời gian của các trạm điện kéo trong trường hợp bố trí hai nghịch lưu tại trạm Cát Linh và trạm Yên Nghĩa. Thời gian mô phỏng trong khoảng 180 giây, trong đó vận hành tổng số 11 đoàn tàu toàn tuyến. Điều kiện thiết lập chế độ nghịch lưu chọn giá trị điện áp tối thiểu là 825 V.

Trường hợp mô phỏng cho chế độ vận hành tổng số 11 đoàn tàu trong thời gian từ 5 giờ đến 22 giờ có kết quả tổng hợp trong Bảng 3. Minh họa trong bảng, cột thứ hai biểu diễn vị trí các trạm có nghịch lưu (T1 – Cát Linh; T2 – Láng; T3 – Phùng Khoang; T4 – Hà Đông; T5 – Yên Nghĩa) tương ứng với từng phương án. Cột 3 và cột 4 là năng lượng tiêu thụ và thu hồi trên toàn tuyến trong khoảng thời gian một ngày. Các cột từ 7 tới 9 liệt kê công suất nghịch lưu tương ứng với từng phương án tại các trạm điện kéo từ Cát Linh tới Yên Nghĩa. Hai cột cuối cùng hiển thị tổng chi phí trong 10 năm cho hai trường hợp có và không có trang bị nghịch lưu trong trạm điện kéo. Với tuyến đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông, chiều dài cả tuyến đường là 13 km, giả định bố trí 5 trạm điện kéo. Khi đó tổng số phương án là 31. Trên Bảng 4 liệt kê các phương án sử dụng nghịch lưu tương ứng với các tổ hợp trang bị từ một trạm điện kéo có nghịch lưu trở lên. Quan sát trên bảng, phương án 12 đạt được chi phí tối thiểu với mức 252,98 tỷ đồng. Vị trí trạm cần trang bị nghịch lưu là Cát Linh và Yên Nghĩa với công suất nghịch lưu tương ứng là 2531 (kW) và 1504 (kW). Ước tính tiết kiệm được 87,62 tỷ đồng so sánh với mức chi phí khi không trang bị nghịch lưu trong các trạm điện kéo ở mức 340,6 tỷ đồng. Năng lượng thu hồi trong phương án bố trí này 15215 (KW.h/ngày), so

sánh với tổng lượng năng lượng tiêu thụ là 57846 (KW.h/ngày), sẽ tiết kiệm được tới 26,3% tổng năng lượng tiêu thụ.

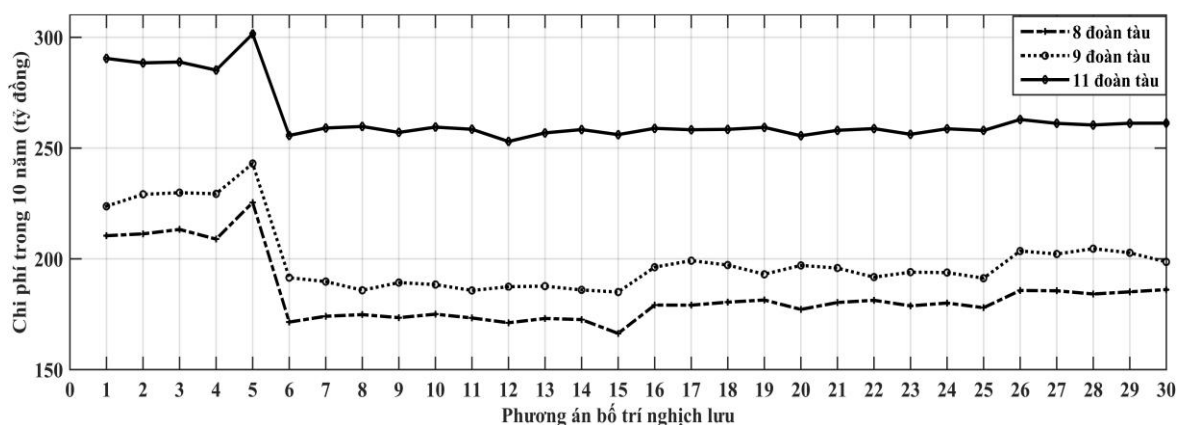


Hình 8. Công suất các trạm điện kéo khi trạm Cát Linh và Yên Nghĩa có nghịch lưu.

Bảng 3. Kết quả thuật toán trường hợp vận hành 11 đoàn tàu.

STT	Vị trí trạm NL	Năng lượng (KW.h/ngày)		Công suất nghịch lưu tại các trạm điện kéo (KW)					Tổng chi phí trong 10 năm khi có NL (tỷ đồng)	Chi phí trong 10 năm khi không có NL (tỷ đồng)
		Tiêu thụ	Thu hồi	T1	T2	T3	T4	T5		
1	T1	62191	14213	2536	0000	0000	0000	0000	290,45	340,6
2	T2	62687	14828	0000	2978	0000	0000	0000	288,45	
3	T3	62366	14297	0000	0000	3296	0000	0000	288,84	
4	T4	62194	14742	0000	0000	0000	3231	0000	285,20	
5	T5	61926	12460	0000	0000	0000	0000	1890	301,53	
6	T4-5	58966	15958	0000	0000	0000	3013	0887	255,70	
7	T3-5	61147	17438	0000	0000	3291	0000	0951	259,07	
8	T3-4	61416	17619	0000	0000	3204	0993	0000	259,74	
9	T2-5	59978	16657	0000	2976	0000	0000	1130	257,06	
10	T2-4	61173	17464	0000	2884	0000	1226	0000	259,46	
11	T2-3	61011	17354	0000	2713	1623	0000	0000	258,49	
<b>12</b>	<b>T1-5</b>	<b>57846</b>	<b>15215</b>	<b>2531</b>	<b>0000</b>	<b>0000</b>	<b>0000</b>	<b>1504</b>	<b>252,98</b>	
13	T1-4	59671	16448	2328	0000	0000	1636	0000	256,86	
14	T1-3	60570	17055	1950	0000	2126	0000	0000	258,35	
15	T1-2	59207	16135	1074	2839	0000	0000	0000	256,07	
16	T3-4-5	61911	17955	0000	0000	3204	0746	0887	258,91	
17	T2-4-5	61526	17702	0000	2884	0000	1000	0887	258,28	
18	T2-3-5	61922	17970	0000	2713	1322	0000	0951	258,46	
19	T2-3-4	62191	18151	0000	2713	1159	0993	0000	259,35	
20	T1-4-5	59839	16561	2328	0000	0000	1317	0887	255,57	
21	T1-3-5	61159	17453	1950	0000	1705	0000	0951	258,01	
22	T1-3-4	61428	17635	1950	0000	1580	0993	0000	258,79	
23	T1-2-5	59978	16657	1074	2193	0000	0000	1130	256,22	
24	T1-2-4	61173	17465	1074	2071	0000	1226	0000	258,71	
25	T1-2-3	61014	17357	1074	1828	1623	0000	0000	257,95	
26	2-3-4-5	62687	18486	0000	0755	0754	0917	1550	262,89	
27	1-3-4-5	61923	17970	0636	000	0943	0917	1550	261,16	
28	1-2-4-5	61526	17703	0799	808	0000	0864	1551	260,42	
29	1-2-3-5	61926	17973	0799	693	0713	0000	1819	261,22	
30	1-2-3-4	62194	18154	0799	696	0747	1963	0000	261,24	
31	1-2-3-4-5	62366	18488	1074	1828	1159	0746	0887	290,45	

trạm điện kéo có nghịch lưu trở lên. Quan sát trên bảng, phương án 12 đạt được chi phí tối thiểu với mức 252,98 tỷ đồng. Vị trí trạm cần trang bị nghịch lưu là Cát Linh và Yên Nghĩa với công suất nghịch lưu tương ứng là 2531 (kW) và 1504 (kW). Ước tính tiết kiệm được 87,62 tỷ đồng so sánh với mức chi phí khi không trang bị nghịch lưu trong các trạm điện kéo ở mức 340,6 tỷ đồng. Năng lượng thu hồi trong phương án bố trí này 15215 (KW.h/ngày), so sánh với tổng lượng năng lượng tiêu thụ là 57846 (KW.h/ngày), sẽ tiết kiệm được tới 26,3% tổng năng lượng tiêu thụ.



Hình 9. Chi phí của các phương án tương ứng với số lượng đoàn tàu vận hành.

Một cách tương tự, thuật toán được thực hiện cho các chế độ quản lý vận hành khác nhau bao gồm: trường hợp một vận hành 11 đoàn tàu trên toàn tuyến; trường hợp hai vận hành 9 đoàn tàu trên toàn tuyến; và trường hợp thứ ba chỉ vận hành 8 đoàn tàu. Chi phí tổng cũng được tính toán cho 10 năm, kết quả được biểu diễn trên Hình 9.

Kết quả mô phỏng minh họa tính linh hoạt của thuật toán. Với công suất đoàn tàu tại từng thời điểm dọc tuyến đường được xác định, có thể tùy chọn chế độ vận hành với số lượng đoàn tàu khác nhau thuật toán đều có thể tìm được giải pháp tối ưu cho số lượng, vị trí cũng như công suất nghịch lưu. Qua đó cho thấy phương pháp đề xuất có thể đóng vai trò như một công cụ hỗ trợ cho các nghiên cứu khả thi và các dự án sơ bộ về triển khai thiết bị nghịch lưu thu hồi năng lượng tái sinh trong các hệ thống giao thông đường sắt đô thị.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất một phương pháp tối ưu vị trí và dung lượng trạm nghịch lưu trong hệ thống cung cấp điện kéo đường sắt đô thị. Để minh họa ảnh hưởng của số lượng và vị trí bố trí trạm nghịch lưu đến hiệu quả thu hồi năng lượng, tuyến đường sắt Cát Linh – Hà Đông đã được chọn để mô phỏng trên máy tính. Trên cơ sở đó, một thuật toán dựa trên nguyên lý tìm kiếm toàn cục được xây dựng để xác định số lượng, vị trí cũng như công suất tối ưu của các bộ nghịch lưu. Trong tối ưu hóa kinh tế, hàm mục tiêu bao gồm chi phí nghịch lưu và chi phí tiêu thụ năng lượng của hệ thống. Kết quả tối ưu hóa trên mô hình mô phỏng dự đoán tiết kiệm tài chính đến 25,7% và tiết kiệm năng lượng tiêu thụ đạt được là 26,3%. Có thể thấy rằng năng lượng tái tạo đáng kể có thể được thu hồi bằng cách lắp đặt bộ nghịch lưu thích hợp để đạt được mức tiết kiệm năng lượng. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống ví dụ được tối ưu hóa và khả năng tiết kiệm năng lượng của nó là đáng chú ý.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2021-DT-007.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. J. Chuang, Optimization of inverter placement for mass rapid transit systems by immune algorithm, *Electric Power Applications (IEE Proc Elec Power Appl)*, 152 (2005) 61-71. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20041143>
- [2] Y. S. Tzeng, R. N. Wu, N. Chen, Electric Network Solutions of DC Transit Systems with Inverting Substations, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 47 (1998) 1405-1412. <https://doi.org/10.1109/25.728537>
- [3] C. S. Chang, J. S. Low, D. Srinivasan, Application of Tabu Search in Optimal System Design and Operation of MRT Power Supply Systems, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 146 (1999) 75-80. <https://doi.org/10.1109/25.728537>
- [4] C. S. Chang et al., Bicriterion Optimisation for Tractions in Rapid Transit Systems Using Genetic Algorithms, *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 145 (1998) 49-54. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:19981485>
- [5] T. Suzuki, DC power-supply system with inverting substations for traction systems using regenerative brakes, *IEE Proc. B Electr. Power Appl*, 129 (1982) 18-26. <https://doi.org/10.1049/ip-b.1982.0002>
- [6] P. H. Henning et al., A 1.5-MW seven-cell series-stacked converter as an active power filter and regeneration converter for a dc traction substation, *IEEE Trans. Power Electron*, 23 (2008) 2230–2236. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2008.2001882>
- [7] A. J. Gray, D. Stinton, Designing Reversible Substations using Inverters, in 7th IET Professional Development Course on Railway Electrification Infrastructure and Systems, 2015. <https://doi.org/10.1049/ic.2015.0336>
- [8] D. R. Dupré et al., Simulation-based assessment of the installation of a Reversible Substation in a railway line, including a realistic model of large traffic perturbations, *Electrical Power and Energy Systems*, 115 (2020) 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105476>
- [9] M. Khodaparastan et al., Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20 (2019) 2831-2847. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>
- [10] M. Popescu, A. Bitoleanu, A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems, *Energy*, 12 (2019) 1092-1117. <https://doi.org/10.3390/en12061092>
- [11] H. J. Chuang, Optimization of inverter placement for mass rapid transit systems using genetic algorithm, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition*, 152 (2005) 61-71. <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20041143>
- [12] C. H. Bae, A simulation study of installation locations and capacity of regenerative absorption inverters in DC 1500 V electric railways system, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17 (2009) 829-838. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2009.02.003>
- [13] C. H. Bae et al., A study of the power capacity of regenerative inverters in a DC electric railway system, *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering*, 39 (2010) 35-44. <https://doi.org/10.2495/978-1-84564-498-7/04>
- [14] W. Jefimowski, A. Szlag, The multi-criteria optimization method for implementation of a regenerative inverter in a 3 kV DC traction system, *Electric Power Systems Research*, 161 (2018) 61-73. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.03.023>
- [15] S. A. HosseiniPour, M. R. Zolghadri, Effectiveness and Optimal Placement of Bidirectional Substations for Regenerative Braking Energy Recovery in Electrical Network of Metro System,

International Journal of Railway Research, 6 (2019) 43-52. <http://ijrare.iust.ac.ir/article-1-229-en.html>

[16] Trần Văn Khôi, Nguyễn Đức Khương, Ước lượng năng lượng thu hồi tại các trạm điện kéo dựa trên mô hình mạng công suất, Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, 71 (2020) 196-209. <https://doi.org/10.25073/tcsj.71.3.4>

[17] 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, 2013.