



POWER NETWORK MODEL-BASED ESTIMATION OF RECYCLE ENERGY AT SUBSTATIONS

Tran Van Khoi*, Nguyen Duc Khuong

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

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 15/1/2020

Revised: 25/3/2020

Accepted: 25/3/2020

Published online: 24/4/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.3.4>

* *Corresponding author*

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

Abstract. This paper presents a new algorithm to estimate the recovery of energy from the train braking based on the power balance model of a power network. The proposed algorithm utilizes the Newton-Raphson algorithm to solve the problem of retraining the voltage constraint of contact line according to the power balance law in the power network, thereby determining the total of generative energy that can be recycled. A simulated model, which refers to the data of the Cat Linh – Ha Dong railway system is set up for testing and evaluating the effect of the proposed approach. The simulated results showed that the proposed algorithm is feasible and effective.

Keywords: Regenerative Braking Energy, Modeling of a Railway System, Urban Railway System, Energy Estimate Algorithm

© 2020 University of Transport and Communications



ƯỚC LƯỢNG NĂNG LƯỢNG THU HỒI TẠI CÁC TRẠM ĐIỆN KÉO DỰA TRÊN MÔ HÌNH MẠNG CÔNG SUẤT

Trần Văn Khôi*, Nguyễn Đức Khương

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: 15/1/2020

Ngày nhận bài sửa: 25/3/2020

Ngày chấp nhận đăng: 25/3/2020

Ngày xuất bản Online: 24/4/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.3.4>

* Tác giả liên hệ

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

Tóm tắt. Bài báo trình bày một thuật toán ước lượng năng lượng tái sinh có khả năng thu hồi được tại vị trí trạm điện kéo dựa trên mô hình công suất mạch điện. Thuật toán đề xuất dựa trên luật cân bằng công suất của mạch điện, sử dụng phương pháp lặp Newton-Raphson để xác định năng lượng tái sinh có khả năng thu hồi được trong điều kiện duy trì cho điện áp trên lưới tiếp xúc không vượt qua giá trị cho phép. Các kết quả ước lượng trong mô hình mô phỏng một tuyến đường sắt giao thông đô thị dựa trên số liệu tuyến đường và thông số đoàn tàu tuyến Cát Linh – Hà Đông minh họa cho tính khả thi và tính hiệu quả của thuật toán đề xuất.

Từ khóa: năng lượng thu hồi, hãm tái sinh, mô hình mạng điện kéo, giao thông điện đường sắt đô thị, thuật toán ước lượng năng lượng.

© 2020 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiệu quả năng lượng đang là vấn đề rất được quan tâm trong hệ thống giao thông điện đường sắt. Những nghiên cứu đã chỉ ra rằng 40% năng lượng cấp cho đoàn tàu có khả năng được trả lại lưới tiếp xúc trong chế độ hãm dừng đoàn tàu [1]. Hiện tại hầu hết các Trạm Điện Kéo (TĐK) của các hệ thống cung cấp điện giao thông đô thị đều sử dụng các bộ chỉnh lưu diode cung cấp dòng điện một chiều cho các đoàn tàu thông qua lưới tiếp xúc. Khi các đoàn tàu giảm tốc các động cơ sẽ làm việc như các máy phát và phát ra năng lượng điện. Năng lượng này gọi là năng lượng hãm tái sinh, có thể cấp trở lại lưới tiếp xúc và được sử dụng bởi các đoàn tàu khác trong cùng khu đoạn. Nếu như không có đoàn tàu khác hấp thụ năng lượng

này hoặc năng lượng dư thừa không được hấp thụ hết thì sẽ làm điện áp lưới tiếp xúc tăng lên. Tuy nhiên, trong điều kiện vận hành an toàn, điện áp lưới tiếp xúc không được tăng vượt quá giá trị cho phép cho nên cần phải có các biện pháp tiêu tán hoặc thu hồi năng lượng dư thừa. Có nhiều giải pháp đã từng được đề xuất và áp dụng để xử lý nguồn năng lượng dư thừa như xây dựng tối ưu cung đường chạy tàu kết hợp sử dụng điện trở trên tàu để tiêu tán năng lượng; cũng có thể sử dụng thiết bị thu hồi và lưu trữ năng lượng trên tàu hoặc là bố trí thiết bị lưu trữ và thu hồi tại các TĐK. Ngoài ra, sử dụng các bộ nghịch lưu trả năng lượng dư thừa về lưới trung áp cũng là một giải pháp được áp dụng [2].

Để đánh giá và lựa chọn được giải pháp phù hợp, trước hết vấn đề cần thiết là phải xác định được lượng năng lượng tái sinh có khả năng thu hồi được hoặc cần phải tiêu tán. Và để xác định được lượng năng lượng dư thừa này, có hai phương pháp ước lượng và đo lường được sử dụng phổ biến đó là phương pháp thực nghiệm và phương pháp mô phỏng [3]. Thứ nhất là phương pháp thực nghiệm, thiết bị đo được lắp trên từng đoàn tàu. Trong chế độ tái sinh, khi điện áp cần tiếp xúc tăng tới giá trị cho phép, điện trở hãm được đưa vào để tiêu tán năng lượng dư thừa trên đoàn tàu. Lúc này thiết bị đo sẽ thực hiện tính toán và lưu trữ giá trị năng lượng đã tiêu tán trên điện trở hãm. Một phương thức tiến hành khác là hệ thống thiết bị đo cũng có thể được thực hiện tại các trạm điện kéo [4]. Phương pháp thực nghiệm có thể xác định một cách chính xác lượng năng lượng có khả năng thu hồi tại các điểm đo, tuy nhiên yêu cầu phải trang bị và triển khai hệ thống thiết bị đo, thiết bị thu hồi hoặc hấp thụ năng lượng dư thừa. Bên cạnh đó khâu thực hiện đo và khâu xử lý số liệu cũng cần quan tâm xem xét. Do vậy phương pháp thực nghiệm không dễ dàng để có khả năng thực hiện được [3].

Phương pháp mô phỏng được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu. Mô phỏng máy tính hiện là một công cụ hiệu quả đủ khả năng thực hiện mô hình hóa để kiểm chứng cho các thiết kế mới hoặc cải tiến những hệ thống đã có; do vậy một mô hình mô phỏng chính xác và tin cậy sẽ có tính quyết định tới hiệu quả của phương pháp mô phỏng. Trong hệ thống giao thông điện đường sắt, thủ tục mô phỏng thường dựa vào việc tính toán dòng công suất khi các đoàn tàu được mô hình hóa là một nguồn dòng điện hoặc một nguồn điện áp. Hầu hết các ứng dụng đều dựa trên việc phân tích dòng công suất trên mạng điện của hệ thống, và mô hình hệ thống thường được chia làm hai phần: thứ nhất là mô hình chuyển động của đoàn tàu; và thứ hai là mô hình mạng điện [5, 6]. Tuy nhiên, cấu hình mạng điện của hệ thống đường sắt là thay đổi tùy theo sự di chuyển của đoàn tàu, sự thay đổi các thông số mạng điện và tính chất phi tuyến tạo nên nhiều khó khăn trong việc mô hình hóa chính xác đối tượng cũng như vấn đề phân tích dòng công suất trên mạng điện đường sắt.

Bassam Mohamed [7] đề xuất phương pháp cải tiến coi các trạm điện kéo và các đoàn tàu là các nguồn dòng điện, trong đó các trạm điện kéo được mô hình là các nguồn có khả năng thu hồi được dòng điện tái sinh. Năng lượng tái sinh được tính dựa trên giá trị dòng điện tái sinh thu hồi được từ TĐK. Sử dụng mô hình nguồn dòng giúp cho mạch điện trở thành tuyến tính, việc giải mạch điện trở nên dễ dàng và nhanh; tuy nhiên độ chính xác sẽ phụ thuộc vào giá trị dòng điện của TĐK cũng như của các đoàn tàu trong từng thời điểm vận hành.

Rabih A. Jabr [8] cũng sử dụng mô hình nguồn dòng để mô phỏng tính toán dòng công suất cho mạch điện đường sắt với 144 đoàn tàu. Trong phương pháp này, trạm điện kéo được mô phỏng bằng hai nguồn làm việc luân phiên. Nguồn điện áp cấp cho năng lượng cho các đoàn tàu tiêu thụ, khi năng lượng trên mạng tiếp xúc dư thừa, nguồn điện áp được ngắt khỏi mạng và chuyển sang nguồn dòng thu hồi dòng điện tái sinh từ lưới tiếp xúc. Năng lượng tái sinh cũng được tính dựa vào dòng điện tái sinh thu hồi được tại các TĐK.

Thanatchai Kulworawanichpong [9] áp dụng mô hình nguồn dòng để mô tả cho các đoàn tàu trên toàn khu đoạn, TĐK được mô tả bằng nguồn dòng điện kết hợp với một diode mắc nối tiếp. Trong nghiên cứu của Kulworawanichpong, ngoài việc tính toán dòng công suất

trên lưới tiếp xúc trên khu đoạn trong các thời điểm vận hành, tác giả còn tập trung cải tiến ma trận Jacobian để nâng cao hiệu quả tính toán và thời gian hội tụ của thuật toán Newton-Raphson. Tuy nhiên, giá trị điện trở của phân đoạn lưới tiếp xúc cũng như của đường ray giữa các đoàn tàu và giữa đoàn tàu với TĐK sẽ thay đổi theo vị trí tương quan di chuyển của các đoàn tàu, là yếu tố có ảnh hưởng tới độ chính xác trong tính toán của mô hình thì chưa được đề cập trong bài báo này. Tiếp tục phát triển và cải tiến mô hình trong [9], Hammad Alnuman và các cộng sự [10] bổ sung thêm tính năng ước lượng giá trị điện trở trên lưới tiếp xúc và đường ray tương ứng với vị trí tương quan giữa các đoàn tàu ở từng thời điểm di chuyển; đồng thời thay thế mô hình nguồn dòng bằng mô hình nguồn áp cho các TĐK. Trong mô hình này, năng lượng tái sinh có khả năng thu hồi được mô phỏng và xác định trên điện trở hãm mắc song song với các nguồn dòng điện, các nguồn dòng điện này chính là các đoàn tàu.

Để nâng cao độ chính xác trong ước lượng năng lượng tái sinh từ đoàn tàu, các tác giả [11, 12] cải tiến mô hình động học của đoàn tàu từ động cơ truyền động và hộp giảm tốc, mô hình hóa chi tiết trạm điện kéo, đồng thời có bổ sung thêm mô hình nhận dạng thông số điện trở của mạng tiếp xúc và đường ray khi các đoàn tàu di chuyển.

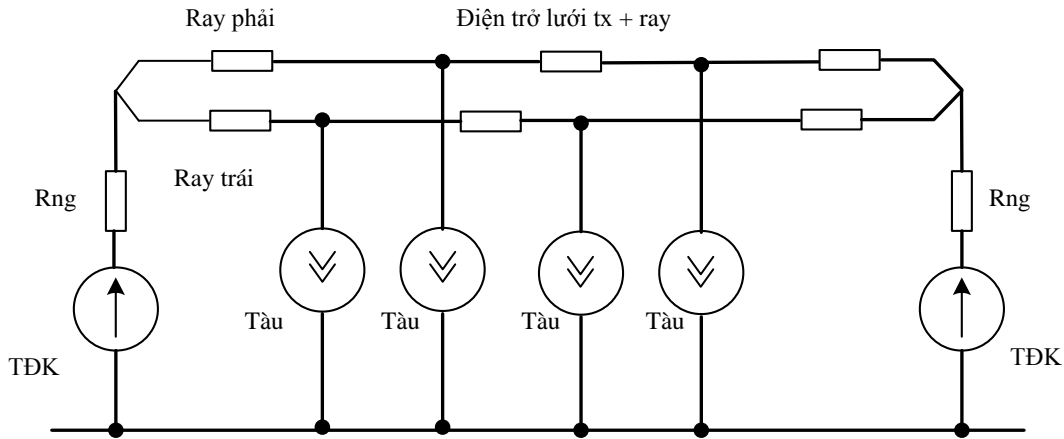
Các nghiên cứu trước hầu hết đều sử dụng phương pháp cân bằng dòng điện tại các đỉnh (áp dụng theo định luật Kirchoff 1) để phân tích mô hình mạch điện đường sắt với giả định coi TĐK là các nguồn dòng điện hoặc nguồn điện áp, còn các đoàn tàu là các nguồn dòng điện. Trong dạng mô hình này, giá trị dòng điện của đoàn tàu cần được tính toán và ước lượng tại từng thời điểm di chuyển với các thông số cụ thể của đặc tính đầu máy, động cơ truyền động, profile tuyến đường và profile tốc độ. Do đó phương pháp này có độ chính xác cao nhưng độ phức tạp và khối lượng tính toán lớn.

Sử dụng kỹ thuật mô phỏng, bài báo này đề xuất một thuật toán ước lượng dựa trên mô hình tính toán cân bằng công suất của mạch điện. Trong mô hình mạch điện hệ thống cung cấp điện từ TĐK tới các đoàn tàu, TĐK được mô hình hóa là trạm cung cấp công suất có khả năng điều chỉnh được, còn các đoàn tàu sẽ được mô hình là các trạm tiêu thụ công suất hoặc là trạm cung cấp công suất tùy theo chế độ làm việc của đoàn tàu là chế độ kéo hay chế độ hãm. Khi đó, giá trị công suất các TĐK tự động điều chỉnh, còn công suất của đoàn tàu được ước lượng theo công thức gần đúng của Davis dựa vào các hằng số thực nghiệm, trọng tải đoàn tàu, profile tốc độ và profile tuyến đường. Mạng tiếp xúc và đường ray được mô tả bằng các điện trở có trị số biến thiên tùy theo vị trí tương quan giữa TĐK với các đoàn tàu và giữa các đoàn tàu. Thuật toán ước lượng được phân thành 3 giai đoạn: giai đoạn thứ nhất sẽ thực hiện ước lượng giá trị công suất của từng đoàn tàu tại các vị trí tương ứng trong khu đoạn theo công thức tính trở lực cơ bản của đoàn tàu được đề xuất bởi Davis; sang giai đoạn thứ 2, điện áp lưới tiếp xúc tại các điểm TĐK và các đoàn tàu được ước lượng dựa trên thuật toán lặp Newton-Raphson. Giai đoạn 3 xác định công suất thu hồi tại TĐK để đảm bảo duy trì điều kiện giới hạn điện áp cho phép trên lưới tiếp xúc trong toàn khu đoạn. Kết thúc giai đoạn 3, tổng năng lượng tái sinh có khả năng thu hồi tại TĐK sẽ được xác định. Phương pháp đề xuất được kiểm nghiệm trên một hệ thống mô phỏng dựa trên số liệu cơ bản của tuyến Cát Linh-Hà Đông.

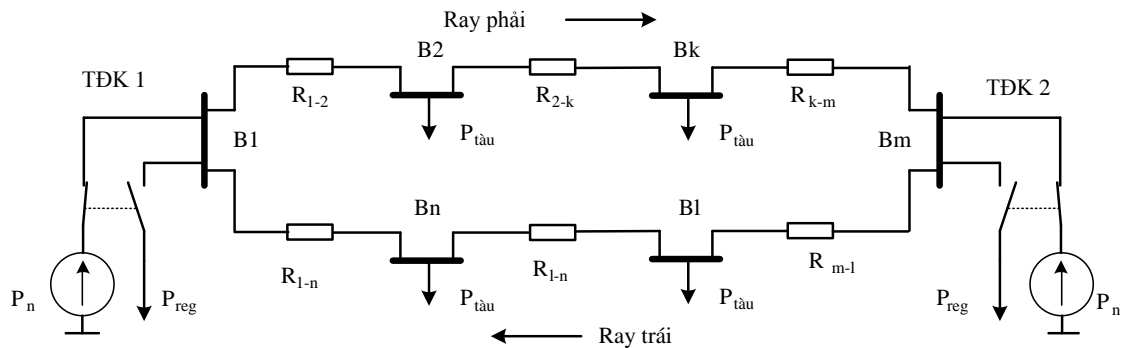
2. MÔ HÌNH MẠNG CÔNG SUẤT

Hệ thống cung cấp điện giao thông một chiều cơ bản chia thành 4 bộ phận: thứ nhất là trạm điện kéo; thứ hai và thứ ba tương ứng là lưới tiếp xúc (ray tiếp xúc) và phụ tải đoàn tàu; cuối cùng là 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 một 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 một phân đoạn cấp điện sẽ được minh họa như Hình 1.



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



Hình 2. Mô hình mạng công suất một khu đoạn

Phụ tải đoàn tàu là dạng phụ tải di chuyển, giá trị dòng điện đoàn tàu tiêu thụ sẽ phụ thuộc vào chế độ vận hành và vị trí dọc tuyến đường, giá trị này không dễ để có thể xác định được chính xác, dẫn đến việc phân tích mạch gặp nhiều khó khăn. Tuy nhiên, trong một thời điểm cụ thể khi biết chế độ làm việc và vị trí của đoàn tàu, giá trị công suất của đoàn tàu có khả năng xác định được, từ đó các thông số trên mạng công suất cũng có khả năng tính được. Do vậy, để thuận lợi hơn cho việc phân tích, trong bài báo này, mô hình mạch sẽ được chuyển hóa sang mô hình mạng công suất như minh họa trên Hình 2. Trong mô hình mạng công suất, các đoàn tàu là các trạm tiêu thụ công suất, chúng được phân loại là kiểu trạm phụ tải với thông số xác định là công suất P . Đối với TĐK, sẽ đóng vai trò là trạm phát công suất được mô phỏng thành kiểu trạm nguồn với thông số xác định là điện áp. Công suất TĐK sẽ tự động điều chỉnh tùy theo mức độ tiêu thụ của phụ tải trên mạng điện. Khi trong mạng điện xuất hiện công suất dư thừa, TĐK sẽ chuyển sang chế độ thu hồi năng lượng để cân bằng công suất trên toàn mạng điện.

3. THUẬT TOÁN ƯỚC LƯỢNG NĂNG LƯỢNG THU HỒI TẠI TĐK

Năng lượng có khả năng thu hồi được là lượng công suất dư thừa làm tăng giá trị điện áp trên lưới tiếp xúc vượt quá giá trị cho phép. Giá trị điện áp cho phép thông thường được xác định là giá trị điện áp của TĐK khi không tải cộng với một lượng dự trữ để không xảy ra trường hợp dòng điện từ máy biến áp của TĐK qua chỉnh lưu cấp thẳng vào thiết bị thu hồi hoặc cấp ngược trở lại lưới trung áp. Trong bài báo này, giá trị công suất dư thừa được xác định dựa vào thuật toán lặp Newton-Raphson để đạt được mục tiêu duy trì điện áp lưới tiếp xúc tại các trạm không vượt quá giá trị điện áp cho phép. Trình tự của thuật toán ước lượng năng lượng thu hồi tại TĐK được thực hiện theo các bước như sau:

Bước 1: Nhập số liệu các thông số của đoàn tàu, profile tuyến đường, profile tốc độ chạy tàu trong khu đoạn.

Số liệu cần thiết để ước lượng và tính toán công suất đoàn tàu tại từng vị trí trên tuyến đường bao gồm các thông số về tổng khối lượng đoàn tàu và hành khách, profile tốc độ chạy tàu giữa các ga trong khu đoạn, và profile tuyến đường bao gồm chiều dài lý trình, độ dốc, bán kính cong.

Bước 2: Tính giá trị công suất của đoàn tàu tại từng vị trí trên tuyến đường.

Giá trị công suất của đoàn tàu được tính toán dựa vào công thức gần đúng tính trở lực cơ bản của đoàn tàu được đề xuất bởi Davis như minh họa ở công thức (1):

$$P_{tr}(s) = (a + b * v(s) + c * v^2(s) + F_{\alpha} + F_R + acc * m_{tr}) * v(s) \quad (1)$$

trong đó:

P_{tr} là công suất của đoàn tàu tại từng vị trí s dọc tuyến đường;

$F_{cb} = a + b * v + c * v^2$ là trở lực cơ bản của đoàn tàu theo công thức thực nghiệm của Davis, với các hằng số a, b, c được ước lượng theo loại đoàn tàu;

$v(s)$ là tốc độ đoàn tàu tương ứng tại vị trí s trên tuyến đường;

F_{α} là lực cản gây ra do độ dốc, được ước lượng theo công thức (2):

$$F_{\alpha} = -m_{tr} * g * \alpha \quad (2)$$

với m_{tr} là khối lượng đoàn tàu, g là gia tốc trọng trường, và α là độ dốc tính theo phần nghìn.

F_R là lực cản do độ cong của cung đường gây ra, được ước lượng theo công thức của Rockle [13]:

$$F_R = \begin{cases} \frac{6500}{R - 55}, & R > 350m \\ \frac{5300}{R - 35}, & 250m < R < 350m \\ \frac{5000}{R - 30}, & R < 250m \end{cases} \quad (3)$$

$F_{acc} = acc * m_{tr}$ là lực cần thiết để gia tốc đoàn tàu với gia tốc bằng acc .

Bước 3: Xây dựng mạng công suất và tính các thông số trong mạng công suất.

Tương ứng với mỗi thời điểm, vị trí và số lượng đoàn tàu vận hành trong khu đoạn là không giống nhau, từ đó hình thành các mạng công suất là không giống nhau. Tuy nhiên chế

độ vận hành là có tính chu kỳ, khi đã biết chiều dài của khu đoạn, thời gian chạy tàu giữa các ga, và giãn cách nhỏ nhất (headway), thì sẽ xác định được số lượng và vị trí cụ thể của các đoàn tàu trong khu đoạn tại từng thời điểm, và khi đó chu kỳ phân bố công suất trên lưới được xác định bằng chính khoảng thời gian giãn cách chạy tàu. Trong bài báo này, số mạng công suất được hình thành chính bằng giá trị giãn cách chạy tàu, tương ứng với khoảng cách giữa hai thời điểm tính là 1 giây. Giá trị công suất của từng đoàn tàu trong khu đoạn tại từng thời điểm t được tính như mô tả trong công thức (4).

$$P(i,t) = P_{tr}((i-1)*headway + t) \quad (4)$$

trong đó, $i = 1, \dots, n_{tr}$ với n_{tr} là số đoàn tàu trong khu đoạn; và $t = 1, \dots, headway$.

Sau khi xác định được số lượng và vị trí cụ thể của các đoàn tàu tại thời điểm tính, giá trị điện trở của lưới tiếp xúc và đường ray từ đoàn tàu tới TĐK cũng như giữa các đoàn tàu với nhau có thể xác định được theo công thức (5).

$$\begin{aligned} R_{1-2} &= R_0 * |x_1 - x_2| \\ R_{sst-2} &= R_{ng} + R_0 * |x_{sst} - x_2| \end{aligned} \quad (5)$$

trong đó, R_0 là điện trở của lưới tiếp xúc (LTX) và ray tính trên 1 km; còn x_1 và x_2 tương ứng là vị trí của hai trạm công suất liền kề. Trường hợp trạm công suất là TĐK tương ứng với vị trí x_{sst} thì được bổ sung thêm R_{ng} là điện trở của dây dẫn nối từ máy biến áp tới LTX.

Bước 4: Ước lượng công suất tái sinh có khả năng thu hồi tại TĐK tại từng thời điểm tính trong chu kỳ thời gian giãn cách nhỏ nhất.

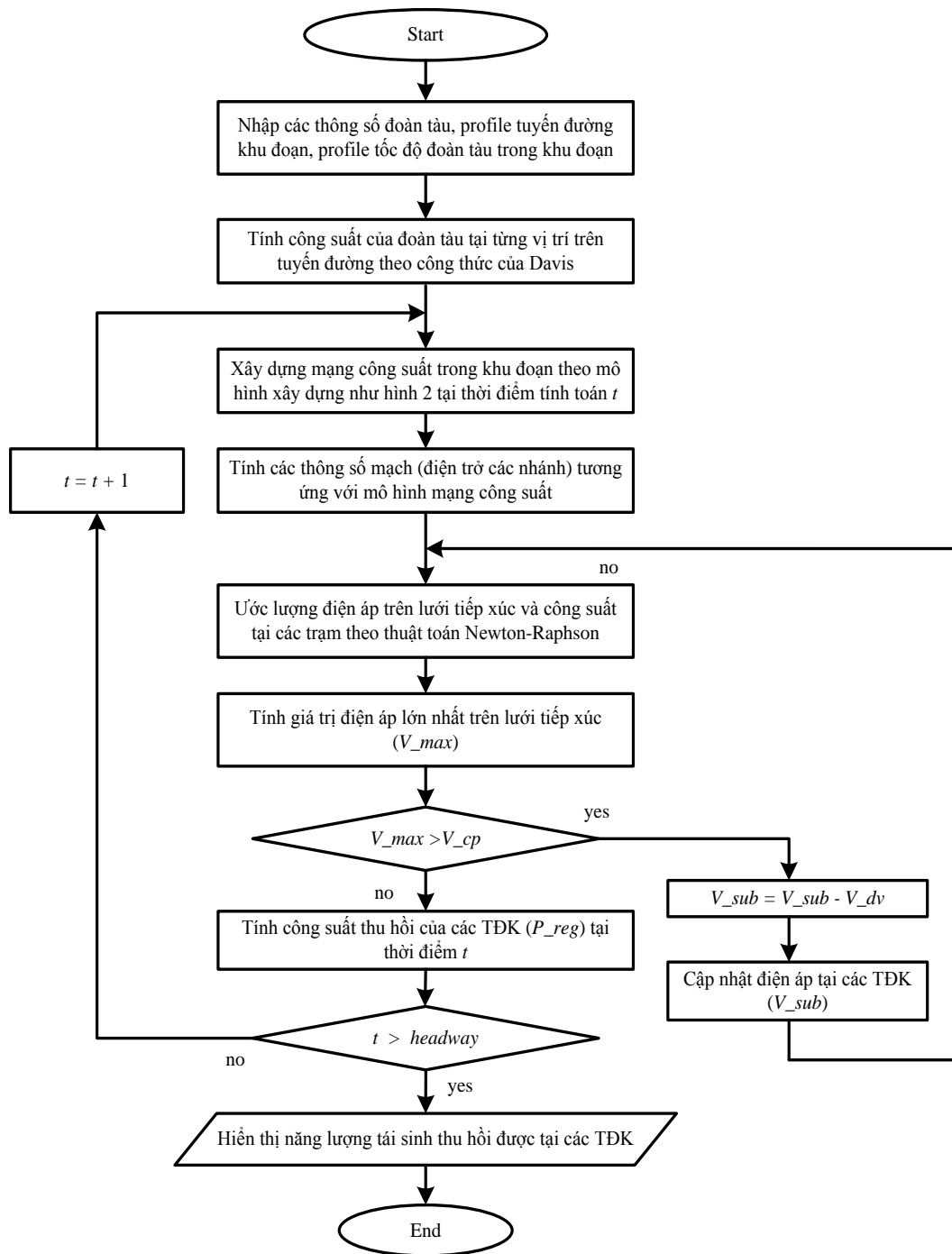
Trong bước này, tại mỗi thời điểm công suất của các đoàn tàu được xác định, giá trị điện áp trên lưới tiếp xúc được tiến hành ước lượng theo thuật toán Newton-Raphson, đồng thời giá trị công suất tại các TĐK cũng được xác định. Để đảm bảo điện áp lưới tiếp xúc được duy trì trong điều kiện làm việc cho phép, trong mỗi bước xét điều kiện điện áp lớn hơn giá trị cho phép (V_{cp}), giá trị điện áp TĐK (V_{sub}) được điều chỉnh giảm đi $V_{dv} = 5$ (V).

Bước 5: Tính giá trị năng lượng thu hồi được tại mỗi TĐK trong khoảng thời gian chu kỳ giãn cách chạy tàu tối thiểu.

Trong bước 4, giá trị công suất thu hồi trong từng thời điểm đã xác định được. Do vậy, tổng giá trị năng lượng có khả năng thu hồi được trong khoảng thời gian headway được tính là bình phương quân phương tổng giá trị công suất thu hồi của tất cả các thời điểm trong khoảng thời gian đó. Trong khoảng thời gian vận hành một ngày là T_{lv} (giờ) thì tổng năng lượng có khả năng thu hồi sẽ được tính toán như công thức (6).

$$E_{reg} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{headway} P_{reg}^2(i)}{headway}} * T_{lv} \text{ (kWh/ngày)} \quad (6)$$

Trình tự thực hiện cụ thể của giải pháp đề xuất được mô tả theo lưu đồ thuật toán trên Hình 3:



Hình 3. Lưu đồ thuật toán ước lượng năng lượng tái sinh tại các TĐK

4. 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 [14]. Các thông số cơ bản của đoàn tàu được liệt kê trong Bảng 1. Bảng 2 tổng kết

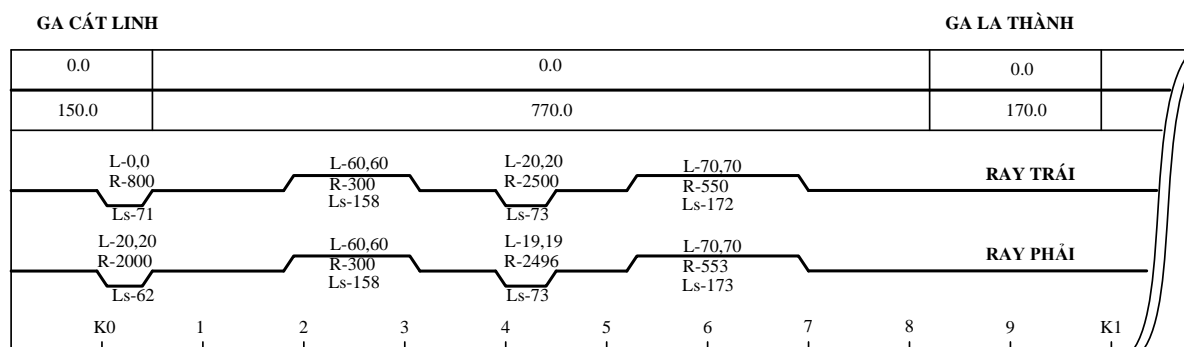
thời gian chạy tàu và khoảng cách giữa các ga. Profile tuyến đường sử dụng trong mô hình mô phỏng được mô tả như trên Hình 4.

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	795
Tổng khối lượng đoàn tàu và hành khách	Tấn	150
Giãn cách nhỏ nhất	Giây	80-220
Điện trở đơn vị của LTX và ray (R_0)	Ω/km	0.0625
Điện trở cấp nguồn từ MBA tới LTX (R_{ng})	Ω	0.01
Vị trí đặt các TĐK: Ga C. Linh, Ga Láng, Ga P. Khoang, Ga H. Đông, Ga Y. Nghĩa		

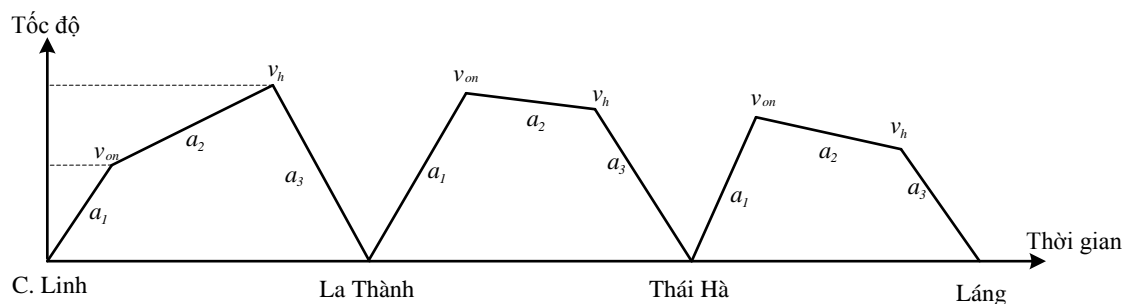
Bảng 2. Thời gian chạy tàu giữa các ga trên khu đoạn Cát Linh - Láng.

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. Đại 3	1009	79	V.Quán	P.Khoang	1122	85
V. Đại 3	P.Khoang	1480	104	P.Khoang	V. Đại 3	1480	106
P.Khoang	V.Quán	1122	86	V. Đại 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 4. Profile tuyến đường đoạn Ga Cát Linh – Ga La Thành

Trong bài báo này, giả định rằng bỏ qua yếu tố độ dốc 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, vị trí giới hạn tốc độ và thời gian chạy tàu giữa các ga để xây dựng đường cong tốc độ chạy tàu theo dạng như Hình 5. Với giả định tốc độ tại các điểm chuyển đã xác định, dựa trên tiêu chí tối ưu năng lượng vận hành, nhóm tác giả áp dụng thuật toán quy hoạch tuyến tính (LP) để tìm được giá trị tối ưu của các tham số gia tốc (a_1, a_2, a_3), thời gian và độ dài các phân đoạn trong quãng đường di chuyển giữa các ga. Kết quả ước lượng được liệt kê minh họa trên Bảng 3.

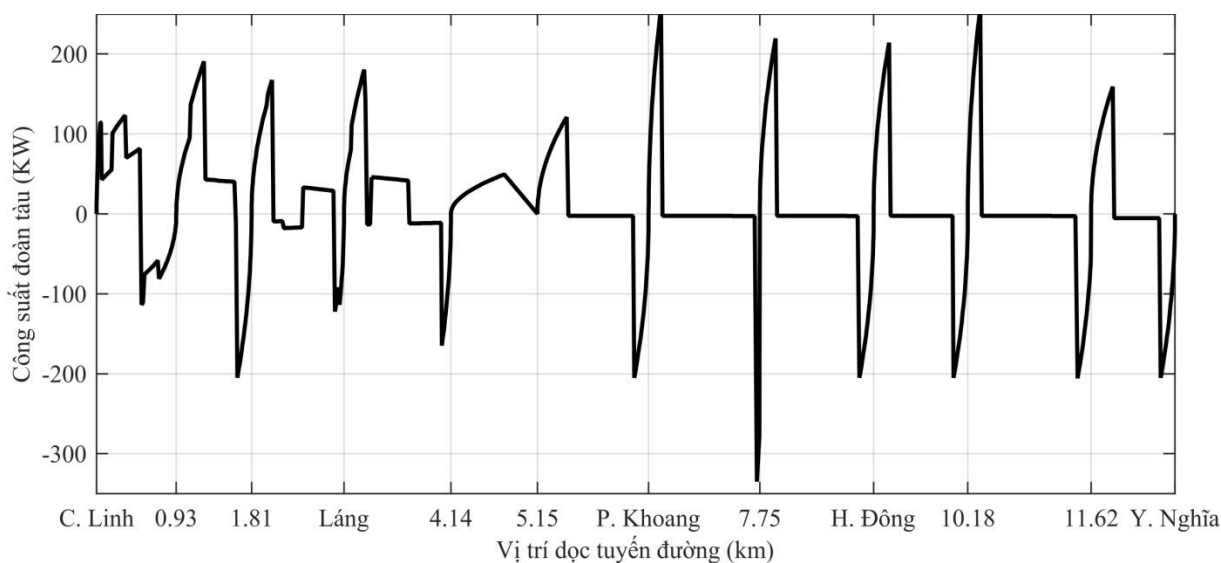


Hình 5. Đồ thị tốc độ đoàn tàu trong khu đoạn C. Linh - Láng

Bảng 3. Thông số di chuyển đoàn tàu giữa các ga

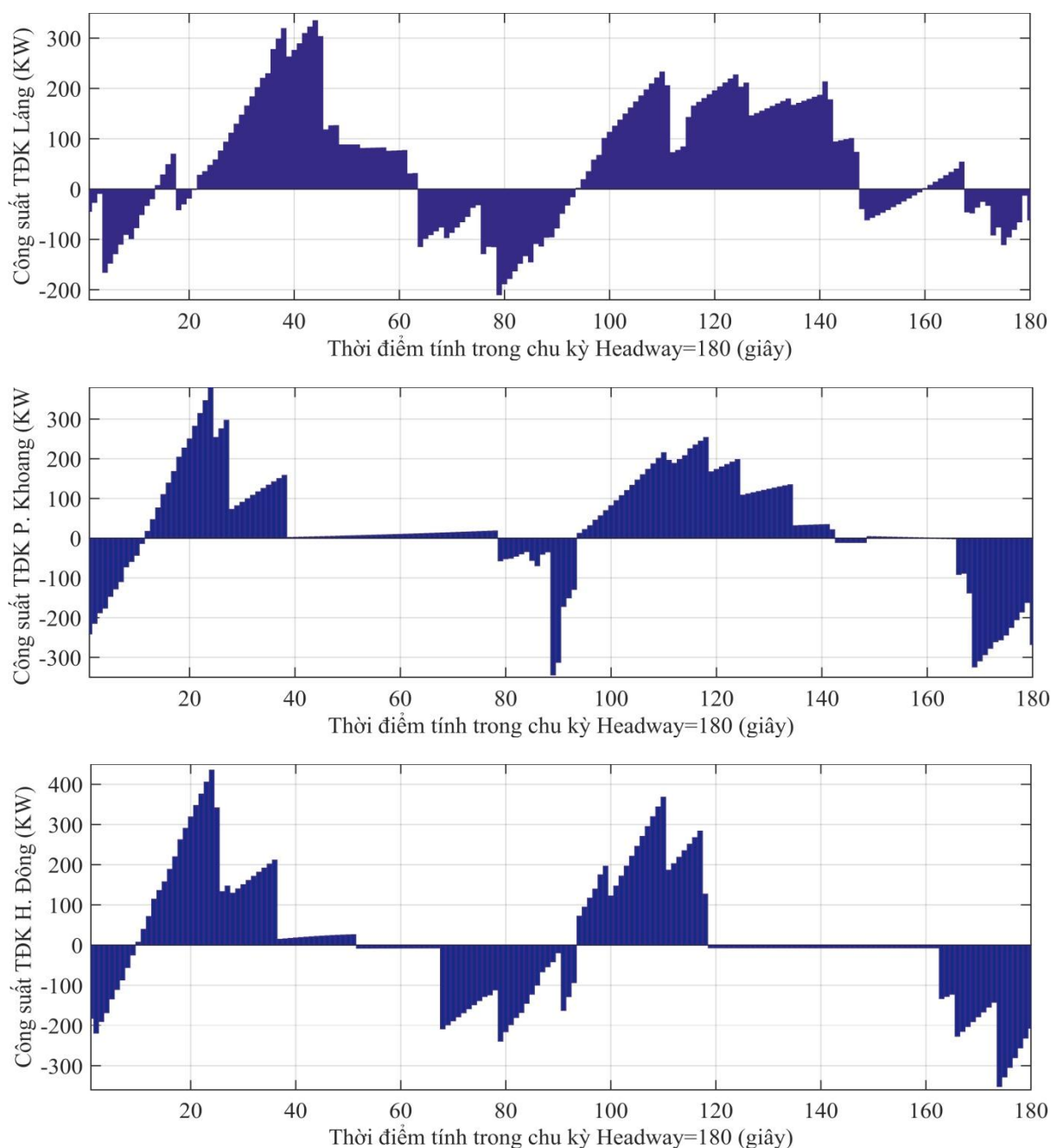
Thông số	C. Linh- L. Thành	L. Thành – T. Hà	T. Hà - Láng	Láng – T. Hà	T. Hà – L. Thành	L. Thành – C. Linh
v_{on} (m/s)	10	18.3	17.4	17.7	17.7	17.7
v_h (m/s)	18.8	17.2	13.8	18.8	16.6	15
a_1 (m/s ²)	0.83	0.50	0.61	0.83	0.49	0.50
a_2 (m/s ²)	0.28	-0.05	-0.08	0.04	-0.05	-0.09
a_3 (m/s ²)	-0.42	-0.83	-0.83	-0.51	-0.83	-0.83
$t_{chạy\ dầm}$ (s)	36.82	28.34	30.83	21.24	35.97	35.70
$t_{thả\ trôi}$ (s)	20.54	46.10	55.61	29.88	23.11	29.30
$t_{hãm}$ (s)	20.64	16.56	16.56	36.88	19.92	18.00
$S_{chạy\ dầm}$ (m)	336.89	246.54	268.22	187.97	318.34	315.94
$S_{thả\ trôi}$ (m)	364.60	719.20	867.51	545.40	396.32	479.05
$S_{hãm}$ (m)	177.50	114.26	114.26	346.63	165.34	135.00

Dựa trên các kết quả ước lượng trong Bảng 3, công suất đoàn tàu phân bố trên từng điểm của tuyến đường được tính theo công thức (1), trong đó các hệ số thực nghiệm trong công thức của Davis được tham khảo trong tài liệu [15]. Hình 6 mô tả phân bố công suất đoàn tàu tại từng điểm di chuyển theo hướng Cát Linh – Yên Nghĩa.



Hình 6. Công suất đoàn tàu di chuyển hướng C. Linh – Y. Nghĩa

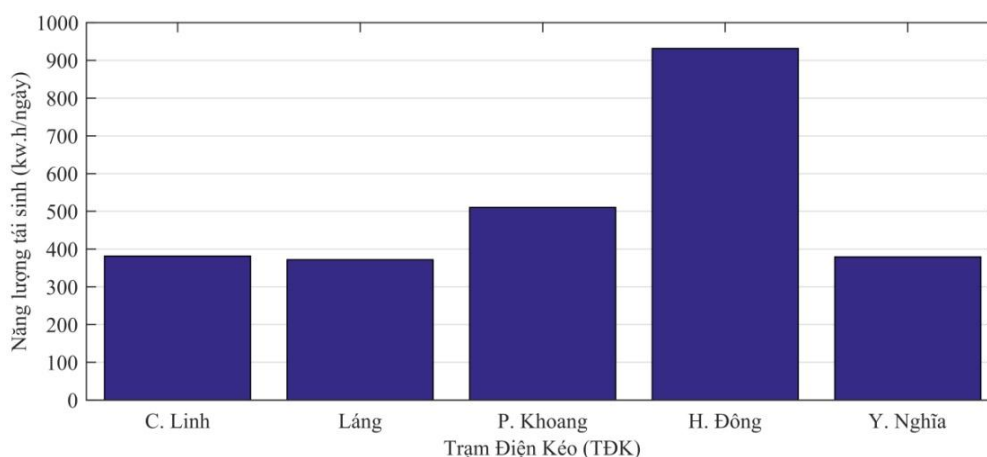
Sau khi giá trị công suất của đoàn tàu tại từng vị trí được xác định, với giãn cách nhỏ nhất đặt trước, quá trình mô phỏng ước lượng công suất tại các TĐK được tiến hành thực hiện theo thuật toán đã đề xuất. Hình 7 mô tả công suất của các TĐK tại từng thời điểm ứng với giãn cách chạy tàu nhỏ nhất (headway) là 180 (s). Thời điểm $t=0$ được tính là thời điểm đoàn tàu bắt đầu rời ga Cát Linh. Từ Hình 7 có thể nhận thấy rằng chế độ tải của các TĐK tại từng thời điểm khá tương đồng mặc dù giá trị độ lớn tải khác nhau. Tuy vậy vẫn có một số thời điểm TĐK này làm việc ở chế độ cung cấp công suất cho tải thì TĐK khác lại làm việc ở chế độ thu hồi năng lượng như thời điểm từ giây 48 đến giây 62.



Hình 7. Công suất TĐK từng thời điểm trong chu kỳ Headway

Tổng năng lượng tái sinh có khả năng thu hồi tại các TĐK từ đó cũng tính được theo công thức (6) với thời gian làm việc 16 giờ trong một ngày. Kết quả ước lượng trên từng trạm như minh họa trên Hình 8.

Năng lượng dư thừa cũng phụ thuộc nhiều vào chế độ vận hành, ở thời điểm cao điểm, số lượng cặp tàu đưa vào vận hành sẽ lớn hơn, tương ứng giãn cách nhỏ nhất sẽ nhỏ đi. Thuật toán đề xuất có khả năng thực hiện được quá trình ước lượng năng lượng thu hồi với những giãn cách nhỏ nhất bất kỳ. Bảng 4 minh họa các kết quả tính toán tổng năng lượng có khả năng thu hồi tại các TĐK trong thời gian một ngày áp dụng thuật toán đề xuất tương ứng với các giãn cách nhỏ nhất khác nhau. Thời điểm năng lượng thu hồi lớn khi có nhiều đoàn tàu cùng hãm. Nếu giãn cách chạy tàu tương đồng với khoảng thời gian di chuyển giữa các ga thì gần như các đoàn tàu là cùng khởi động, cùng hãm. Quan sát số liệu trong Bảng 4, về cơ bản khi headway có giá trị từ 90(s) đến 100(s) khá tương đồng với khoảng thời gian di chuyển giữa các ga thì năng lượng thu hồi lớn hơn nhiều khi headway nằm trong dải giá trị từ 120 (s) đến 160(s). Trong mỗi dải phạm vi của headway, cũng dễ nhận thấy rằng giá trị năng lượng thu hồi lớn có xu hướng nằm ở giá trị headway là bội số của thời gian các đoàn tàu di chuyển giữa các ga, ví dụ trong dải phạm vi 120 – 220(s), giá trị năng lượng thu hồi lớn nhất khi headway bằng 180(s).



Hình 8. Năng lượng tái sinh có khả năng thu hồi tại các TĐK

Bảng 4. Năng lượng thu hồi tại các TĐK theo giãn cách chạy tàu nhỏ nhất

No.	Headway (s)	E_{reg} (kWh/ngày)					Tổng
		C. Linh	Láng	P. Khoang	H. Đông	Y. Nghĩa	
1	100	323.4299	335.5657	716.7575	783.7186	627.0655	2786.5372
2	120	289.0526	266.3171	278.9281	518.0559	487.8720	1840.2257
3	140	290.5926	159.0223	431.0480	544.40	439.0344	1864.0973
4	160	286.7534	463.7303	295.0280	574.1847	350.5909	1970.2873
5	180	381.6458	371.8608	510.4736	931.2669	379.3634	2574.6105
6	200	242.3478	293.1461	416.4662	455.7644	334.2939	1742.0184
7	220	249.9535	284.6981	289.9618	480.1525	346.8547	1651.6206
8	300	269.0168	239.6811	275.2158	347.9027	228.5826	1360.399
9	400	176.6376	231.1565	291.8948	154.7200	168.6674	1023.0763
10	600	186.5789	219.2659	130.5430	224.4978	11.7315	772.6171

Thông qua ví dụ mô phỏng, thuật toán đề xuất đã cung cấp một cái nhìn hệ thống trong vấn đề mô phỏng hệ thống giao thông điện đô thị, mô hình tính toán công suất mạng điện đường sắt, cũng như mô hình tính toán ước lượng năng lượng dư thừa trên mạng điện đường sắt trong quá trình vận hành một tuyến đường sắt đô thị. Từ kết quả mô phỏng có thể xác định chính xác những thời điểm năng lượng có khả năng thu hồi được, qua đó có thể đưa ra tham chiếu để điều khiển quá trình thu hồi năng lượng đạt hiệu quả. Ngoài ra hiệu suất thu hồi năng lượng tái sinh cũng được xác định dựa trên tổng năng lượng tiêu thụ và tổng năng lượng tái sinh, từ đó có thể sử dụng làm cơ sở để tham vấn việc lựa chọn giá trị giãn cách chạy tàu nhỏ đô thị, cũng như trong các giải pháp ứng dụng thiết bị thu hồi, tích trữ năng lượng cho các tuyến đường sắt giao thông đô thị.

5. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày một thuật toán để giải quyết vấn đề mô phỏng, phân tích dòng công suất, và ước lượng năng lượng có khả năng thu hồi được tại các trạm điện kéo trên hệ thống mạng điện giao thông đường sắt đô thị. Thuật toán đề xuất được thực hiện dựa trên mô hình công suất của mạng điện, trong mô hình này giá trị công suất của đoàn tàu cũng như thông số của mạch điện được ước lượng, tính toán và cập nhật theo từng thời điểm; còn công suất có khả năng thu hồi được xác định một cách chính xác tương ứng với từng khoảng thời gian 1 giây. Thuật toán đề xuất được mô phỏng kiểm nghiệm trên mô hình mô phỏng đoàn tàu của tuyến đường sắt Cát Linh – Hà Đông. Kết quả mô phỏng đã chứng minh tính khả thi và tính hiệu quả của thuật toán khi áp dụng cho các ứng dụng trong phân tích quá trình năng lượng trên mạng điện đường sắt, cũng như cho các giải pháp thu hồi, tích trữ năng lượng cho các tuyến giao thông điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Chenh et al., Quasi-Static decoupled load flow modelling of a power supply network with AC-DC converters applied to light rail system, in 2007 European Conference on Power Electronics and Applications. 2007: Aalborg, Denmark. <https://doi.org/10.1109/EPE.2007.4417602>
- [2]. M. Popescu, A. Bitoleanu, A Review of the Energy Efficiency Improvement in DC Railway Systems, *Energies*, 12 (2019) 1092-1117. <https://doi.org/10.3390/en12061092>
- [3]. Bae, C.H., et al., A Study of capacity calculation of regenerative inverter for 1500v dc traction system, *WIT Transactions on The Built Environment*, 88 (2006) 757-766. <https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/88/16676>
- [4]. C.-h. Bae, et al., Calculation of regenerative energy in DC 1500V electric railway substations, in 7th International Conference on Power Electronics. 2007: Daegu, South Korea. p. 801-805, 2007. <https://doi.org/10.1109/ICPE.2007.4692497>
- [5]. P. Arboleya, G. Diaz, M. Coto, Unified AC/DC power flow for traction systems: a new concept, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61 (2012) 2421-2430. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2196298>
- [6]. W.Liu, Q. Li, M. Chen. Study of the simulation of DC traction power supply system based on AC/DC unified Newton-Raphson method, in 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, China, 2009. <https://doi.org/10.1109/SUPERGEN.2009.5348365>
- [7]. b. mohamed, p. arboleya, c. gonzalez-moran, modified current injection method for power flow analysis in heavy-meshed dc railway networks with nonreversible substations, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66 (2017) 7688-7696. <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2687061>
- [8]. R.A. Jabr, I. Dzafic, Solution of DC railway traction power flow systems including limited network receptivity, *IEEE Transactions on Power Systems*, 33 (2018) 962-969. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2688338>

- [9]. T. Kulworawanichpong, Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method. *Journal of Modern Transportation*, 23 (2015) 241-251. <https://doi.org/10.1007/s40534-015-0086-y>
- [10]. H. Alnuman, D. Gladwin, M. Foster, Electrical modelling of a dc railway system with multiple trains, *Energies*, 11 (2018) 3211-3231. <https://doi.org/10.3390/en11113211>
- [11]. M. Khodaparastan, A. Mohamed, Modeling and simulation of regenerative braking energy in DC electric rail systems, in 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Long Beach, CA, USA. p. 1-6, 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8450133/>
- [12]. M. Khodaparastan et al., Modeling and simulation of dc electric rail transit systems with wayside energy storage, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68 (2019) 2218 - 2228. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2895026>
- [13]. W. Jefimowski, A. Szlag, T 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>
- [14]. 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.
- [15]. TB/T 1407.1-2018 Railway train traction calculation-Part 1: Trains with locomotives 2018.