



AN ENERGY MANAGEMENT CONTROL STRATEGY FOR SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE SYSTEMS ACCORDING TO LOAD DEMAND ON URBAN RAILWAY LINES

Van Khoi Tran*, Thi Hoai Thu Anh An

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

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 05/04/2023

Revised: 22/02/2024

Accepted: 31/03/2024

Published online: 15/04/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.3.5>

* *Corresponding author*

Email: tvkhai.ktd@utc.edu.vn

Abstract. Supercapacitor energy storage systems are becoming increasingly popular in electric railways due to their decreasing costs, great energy efficiency, and long lifespan. This paper presents a control strategy that optimizes the energy allocation of supercapacitor storage systems on urban railway lines based on load demand. The objective is to efficiently recover excess energy from the trains' regenerative braking and allocate the stored energy optimally to reduce peak load for the rectifier substation. The proposed solution uses a neural algorithm to predict the traction load demand in a cycle, which determines the energy demand at each time. Then, the dynamic programming optimization algorithm is applied to find the optimal working mode and control parameters for the supercapacitor storage station during the entire period of one cycle. To justify the proposed solution, a model based on the operating parameters of Lang station on June 24, 2022, is used. The simulation results have demonstrated that this strategy can optimize the allocation of stored energy and reduce the traction energy consumption during the day of the station by 6.88%.

Keywords: Urban railway transit, Energy savings, Supercapacitor, Regenerative braking energy, optimization algorithm.

@ 2024 University of Transport and Communications



GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN QUẢN LÝ NĂNG LƯỢNG CHO HỆ THỐNG TÍCH TRỮ NĂNG LƯỢNG SIÊU TỤ THEO NHU CẦU PHỤ TẢI TRÊN CÁC TUYẾN ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ

Trần Văn Khôi*, An Thị Hoài Thu Anh

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: 05/04/2023

Ngày nhận bài sửa: 22/02/2024

Ngày chấp nhận đăng: 31/03/2024

Ngày xuất bản Online: 15/04/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.3.5>

* Tác giả liên hệ

Email: tvkhai.ktd@utc.edu.vn

Tóm tắt. Với chi phí ngày càng giảm, khả năng mang lại hiệu quả năng lượng lớn, tuổi thọ cao, hệ thống tích trữ năng lượng siêu tụ ngày càng được quan tâm ứng dụng trong giao thông điện để thu hồi năng lượng tái sinh. Bài báo này trình bày một giải pháp điều khiển phân bổ tối ưu năng lượng của hệ thống tích trữ siêu tụ trên các tuyến đường sắt đô thị dựa theo nhu cầu phụ tải điện kéo trong toàn chu kỳ. Mục tiêu là thu hồi triệt để năng lượng dư thừa từ quá trình hãm tái sinh của các đoàn tàu, đồng thời phân bổ tối ưu nguồn năng lượng tích trữ hỗ trợ giảm đỉnh tải cho trạm biến áp chính lưu. Giải pháp đề xuất dựa trên nền tảng thuật toán neuron dự báo nhu cầu phụ tải điện kéo trong một chu kỳ để xác định nhu cầu năng lượng tại từng thời điểm. Tiếp đó, thuật toán tối ưu quy hoạch động được áp dụng để tìm ra chế độ làm việc và thông số điều khiển tối ưu cho bộ chuyển đổi DC/DC thực hiện quá trình phóng/nạp năng lượng của siêu tụ một cách tối ưu hóa trong toàn thời gian một chu kỳ. Một mô hình dựa trên thông số vận hành của trạm Láng trong ngày 24/06/2022 được sử dụng để kiểm nghiệm cho giải pháp đề xuất. Kết quả mô phỏng đã minh chứng quá trình phân bổ tối ưu năng lượng tích trữ và giảm mức tiêu thụ năng lượng điện kéo trong ngày của trạm đi 6,88%.

Từ khóa: Tàu điện đô thị, Tiết kiệm năng lượng, Siêu tụ điện, Năng lượng hãm tái sinh, Thuật toán tối ưu.

@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Để giảm mức tiêu thụ năng lượng và cải thiện hiệu suất đường sắt điện, năng lượng lãng

phí bị tiêu tán trên điện trở hãm có thể thực hiện thông qua việc áp dụng hiệu quả các hệ thống tích trữ năng lượng (ESS). Công nghệ ESS đã tiến bộ đáng kể trong khi giá thành của nó cũng giảm xuống, khiến nó trở nên hấp dẫn để sử dụng trong việc tích trữ năng lượng dư thừa và đưa nó trở lại hỗ trợ các đoàn tàu tăng tốc. Điều này không chỉ giảm mức tiêu thụ năng lượng mà còn giúp hạn chế lượng khí thải carbon tại nguồn cung cấp điện. Hơn nữa, năng lượng tích trữ có thể được sử dụng để ổn định điện áp của trạm điện kéo bằng cách giảm các đỉnh và độ sụt điện áp. Ngoài ra, năng lượng dự trữ có thể được khai thác trong trường hợp khẩn cấp để di chuyển đoàn tàu trong điều kiện mất điện.

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 [1].

Các nghiên cứu về chiến lược kiểm soát của thiết bị lưu trữ năng lượng siêu tụ điện đã được thực hiện trong và ngoài nước. Trong [2], phương pháp quy hoạch phi tuyến được sử dụng để xác định các tham số đặc trưng cơ bản của thiết bị lưu trữ năng lượng, và đặc tính dự báo của hoạt động chạy tàu được xem xét trong thiết kế, nhưng không có quá trình tối ưu hóa cụ thể. Trong [3], dưới sự liên lạc giữa các đoàn tàu và thiết bị lưu trữ năng lượng, chiến lược điều khiển được thực hiện theo lực kéo và gia tốc của đoàn tàu dự đoán động năng có thể tái sinh tối đa của thiết bị lưu trữ năng lượng. Trong [4], một chiến lược điều khiển vòng kín kép của điện áp mạng điện kéo và dòng điện siêu tụ điện đã được đề xuất, và phương pháp thiết kế các thông số điều khiển đã được đưa ra, nhưng cũng bỏ qua ảnh hưởng của hằng số thời gian của siêu tụ điện.

Do khuyết thiếu của chiến lược điều khiển vòng kép điện áp, nhiều nhà nghiên cứu đã đề xuất chiến lược điều khiển ba vòng và điều khiển thông minh dựa trên các mục tiêu khác nhau. Trong [5], một bộ điều khiển dòng công suất thiết bị lưu trữ năng lượng được đề xuất xem xét điện áp mạng điện kéo và trạng thái phóng nạp của siêu tụ điện. Tuy nhiên vấn đề tồn tại của nghiên cứu là tạo ra dao động điện áp lớn trong hệ thống cung cấp. Trong [6] dựa trên mô hình tổn thất và năng lượng chuyển động của đoàn tàu, chiến lược điều khiển nạp và xả được đề xuất dựa trên tốc độ đoàn tàu và đảm bảo rằng trạng thái nạp của siêu tụ được khôi phục về giá trị ban đầu sau khi đoàn tàu đến ga. Trong [7], để giảm công suất tiêu thụ của trạm điện kéo và giảm tổn thất đường dây mạng DC, giá trị hiệu dụng của dòng điện đầu ra được giảm xuống. Giải pháp điều khiển được đề xuất trong [8] sẽ tự động điều chỉnh điện áp ngưỡng nạp cho siêu tụ thông qua dữ liệu vị trí và công suất theo thời gian thực của đoàn tàu. Thông qua việc điều chỉnh công suất nạp của hệ thống lưu trữ năng lượng, thiết bị lưu trữ năng lượng hoạt động ở trạng thái tối ưu và có thể đạt được mức sử dụng tối đa dung lượng của hệ thống lưu trữ năng lượng.

Một phương pháp điều khiển được đề xuất bởi Alnuman [9] để quản lý trạng thái làm việc của hệ thống tích trữ siêu tụ trong các tình huống vận hành đoàn tàu. Mục đích của phương pháp được đề xuất là ngăn hệ thống tích trữ đạt đến giới hạn trong quá trình làm việc để giảm tổn thất năng lượng, giảm công suất đỉnh của trạm điện kéo và tăng cường khả năng tản nhiệt. Một chiến lược khác về quản lý năng lượng tích trữ trong siêu tụ điện sử dụng bộ điều khiển logic mờ đã được đề xuất trong [10]. Chiến lược này thực hiện kiểm soát mức

năng lượng lưu trữ trong siêu tụ điện, trạng thái phóng nạp và dòng điện phóng nạp tương ứng với các trạng thái vận hành của tuyến đường sắt. Trên cơ sở máy học, một chiến lược quản lý năng lượng khác được đề xuất trong [11]. Trong nghiên cứu này, hệ thống quản lý năng lượng được chọn làm đối tượng (agent), hệ thống cung cấp năng lượng điện kéo chọn làm môi trường (invironment), còn phần thưởng (reward) được xây dựng trên cơ sở xem xét mức tiết kiệm năng lượng và mức sai lệch điện áp của siêu tụ điện. Cũng trên cơ sở máy học, Zhang và các cộng sự [12] đề xuất mô hình chiến lược điều khiển dự đoán công suất để phối hợp duy trì sự cân bằng cung – cầu năng lượng trong hệ thống cung cấp điện kéo bao gồm: Lưới cung cấp, siêu tụ điện và đoàn tàu. Kết quả được minh chứng trong công bố chỉ ra hiệu suất sử dụng năng lượng tăng 20% so với chiến lược kiểm soát điện hình trong điều kiện vận hành khuyến nghị.

Trong thời đại công nghệ vi xử lý phát triển nhanh và mạnh mẽ, kết hợp với thuật toán trí tuệ nhân tạo trong việc dự báo đã đạt được độ chính xác rất cao. Không giống như các công trình nghiên cứu đã công bố ở trên, các giải pháp điều khiển tối ưu đều thực hiện cho trạng thái hiện tại dựa trên việc kiểm soát ngưỡng điện áp lưới tiếp xúc tại vị trí lắp đặt trạm tích trữ để xác định chế độ làm việc cũng như không chế dòng năng lượng phóng nạp để đạt được trạng thái năng lượng tối ưu cục bộ tại từng thời điểm. Bài báo này trình bày một giải pháp quản lý phân bổ tối ưu dòng năng lượng cung cấp cho tải điện kéo từ hệ thống nguồn lưu trữ siêu tụ điện dựa trên sự kết hợp của thuật toán dự báo và thuật toán tối ưu. Mục tiêu là phân bổ tối ưu nguồn năng lượng của siêu tụ phục vụ cho quá trình giảm đỉnh tải cung cấp từ trạm điện kéo trong các trường hợp phụ tải lớn, qua đó giúp giảm mức năng lượng tiêu thụ, giảm tổn hao trong trạm và giảm sự dao động điện áp cung cấp. Đồng thời thu hồi triệt để nguồn năng lượng dư thừa do quá trình hãm tái sinh của các đoàn tàu sinh ra ngăn ngừa tình trạng làm điện áp lưới tiếp xúc tăng cao và gây tổn hao trên các điện trở hãm. Giải pháp đề xuất dựa trên nền tảng thuật toán neuron dự báo nhu cầu phụ tải điện kéo trong một chu kỳ để xác định nhu cầu năng lượng tại từng thời điểm. Tiếp đó, thuật toán tối ưu quy hoạch động được áp dụng để tìm ra chế độ điều khiển và thông số điều khiển cho bộ chuyển đổi DC/DC thực hiện quá trình phóng/nạp năng lượng tối ưu cho siêu tụ điện. Kết quả, quá trình phân bổ năng lượng được tối ưu hóa trong toàn thời gian một chu kỳ. Giải pháp điều khiển đề xuất được kiểm nghiệm dựa trên mô hình thông số của trạm Láng vận hành trong ngày 24/06/2022.

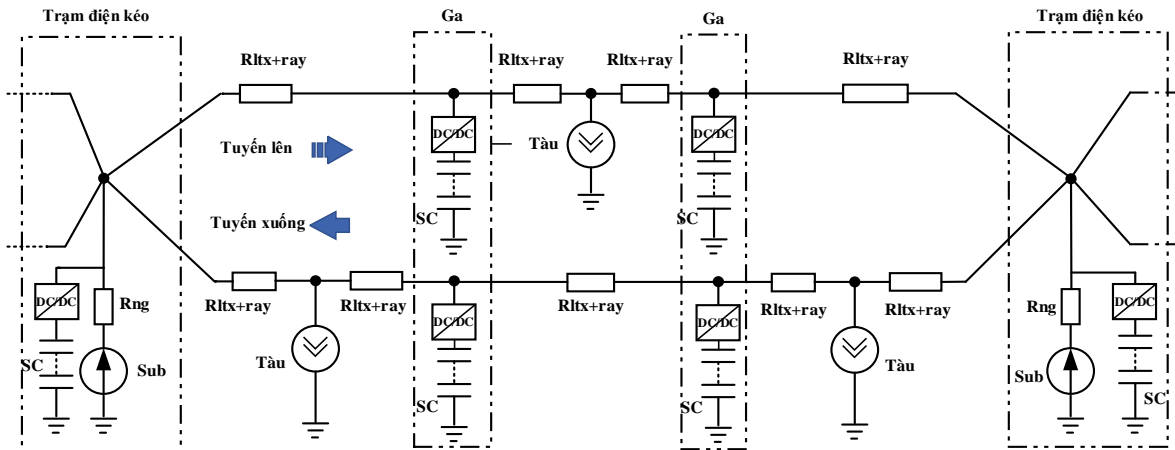
2. MÔ HÌNH CUNG CẤP NĂNG LƯỢNG ĐIỆN KÉO TÍCH HỢP TRẠM TÍCH TRỮ NĂNG LƯỢNG SIÊU TỤ

2.1. Hệ thống cung cấp điện kéo có tích hợp trạm tích trữ

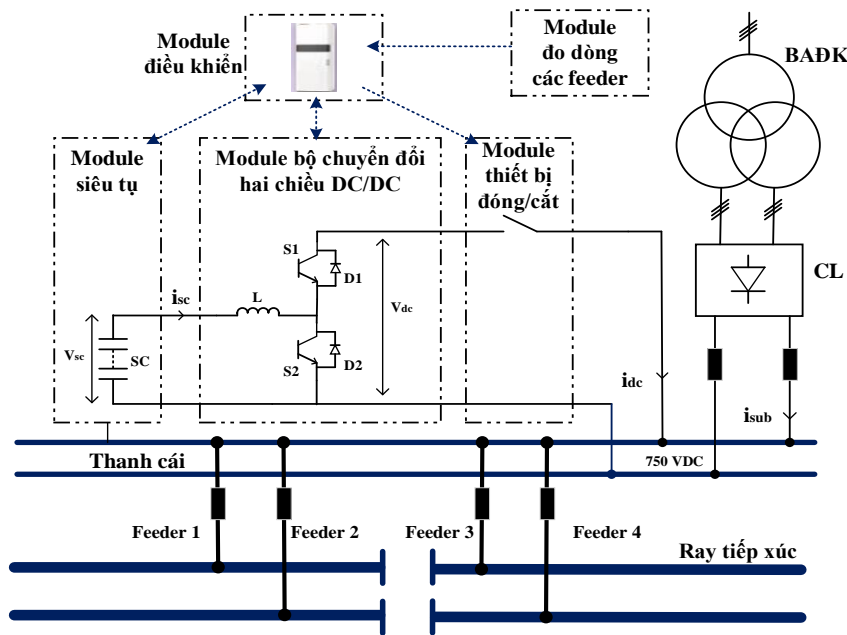
Hệ thống cung cấp năng lượng điện kéo cho giao thông đường sắt đô thị được cấu thành bởi các trạm điện kéo, lưới tiếp xúc (ray tiếp xúc), phụ tải đoàn tàu, hệ thống hồi lưu gồm ray chạy tàu và đường dây nối từ ray chạy tàu về trạm điện kéo. Về phương diện mô hình mạch điện, trạm điện kéo được mô hình 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.

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. Một cách cơ bản, trong chế độ phóng năng lượng cấp tới lưới tiếp xúc, siêu tụ điện được mô hình là nguồn áp. Ngược lại, tụ điện đóng vai trò 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 như trên Hình 1. Trong đó, trạm tích trữ có thể được bố trí tại trạm điện kéo hoặc dọc theo đường ray (thường ở các nhà ga).



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống cung cấp điện kéo một phân đoạn cấp điện.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc trạm tích trữ siêu tụ.

2.2. Sơ đồ cấu trúc trạm tích trữ siêu tụ

Về cấu trúc cơ bản của hệ thống tích trữ năng lượng siêu tụ điện bao gồm 5 phần chính bao gồm: hệ thống siêu tụ (số lượng tụ và cách đấu phụ thuộc vào dung lượng và điện áp), bộ chuyển đổi năng lượng DC/DC hai chiều, bộ điều khiển cho bộ chuyển đổi DC/DC, module đo lường dòng điện tại các feeder, và module thiết bị đóng cắt thực hiện kết nối hệ thống tích trữ với mạng điện kéo. Sơ đồ cấu trúc điển hình của một trạm tích trữ năng lượng siêu tụ được minh họa trên Hình 2.

- Trường hợp bộ tích trữ lắp đặt tại trạm điện kéo, thì sau thiết bị đóng cắt được nối thẳng tới thanh cái của trạm.

- Trường hợp bộ tích trữ siêu tụ lắp đặt tại các ga thì sau thiết bị đóng cắt được nối tới ray cấp điện (ray thứ 3) và đường ray chạy.

2.3. Mô hình hóa trạm tích trữ siêu tụ

Siêu tụ kết nối với mạng điện kéo thông qua bộ chuyển đổi hai chiều DC/DC. Căn cứ vào nhu cầu tiêu thụ của phụ tải điện kéo và mức năng lượng hiện thời của module siêu tụ, trạng thái làm việc của siêu tụ điện sẽ được xác định.

Khi tải điện kéo tái sinh năng lượng làm mức điện áp lưới tiếp xúc vượt qua ngưỡng điện áp không tải, năng lượng trên lưới dư thừa, bộ điều khiển DC/DC làm việc ở chế độ Buck thu hồi năng lượng trên lưới nạp vào tụ điện. Lúc đó, như trên sơ đồ cấu trúc Hình 2, S1 được điều khiển mở còn S2 ở trạng thái khóa, dòng điện I từ thanh cái lưới tiếp xúc chạy qua S1 tới cuộn cảm L làm dòng điện cuộn cảm tăng lên, năng lượng được tích lũy dưới dạng từ trường trên cuộn cảm. Khi S1 khóa, D2 phân cực thuận, và dòng điện từ cuộn cảm L qua siêu tụ SC và qua D2 chuyển năng lượng tích trữ dạng từ trường sang siêu tụ, dòng điện giảm dần. Phương trình mô tả chế độ thu hồi năng lượng được mô tả như công thức (1).

$$\begin{aligned} L \frac{di_{sc}}{dt} &= F \cdot V_{dc} - V_{sc} \\ V_{dc} &= \frac{1}{m} V_{sc} \\ i_{dc} &= m i_{sc} \end{aligned} \quad (1)$$

Với F là hàm chức năng mở/ khóa cho van S1, và m là hệ số.

Và tương tự, khi năng lượng lưu trữ trong tụ còn đủ lớn, tải điện kéo có nhu cầu sử dụng thì bộ điều khiển DC/DC làm việc ở chế độ Boost phóng điện từ siêu tụ cấp ra lưới tiếp xúc. Phương trình mô tả chế độ phóng năng lượng từ siêu tụ được minh họa như công thức (2).

$$\begin{aligned} L \frac{di_{sc}}{dt} &= V_{dc} - (1 - F) V_{sc} \\ V_{dc} &= \frac{1}{m} V_{sc} \\ i_{dc} &= m i_{sc} \end{aligned} \quad (2)$$

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.

$$E_{sc}(t) = \int_0^T P_{sc}(t) dt = \int_0^T V_{sc}(t) * i_{sc}(t) dt = \frac{1}{2} C_{sc} \int_0^T V_{sc}^2(t) dt \quad (3)$$

Từ đó năng lượng của siêu tụ tại từng thời điểm được tính theo công thức (4).

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

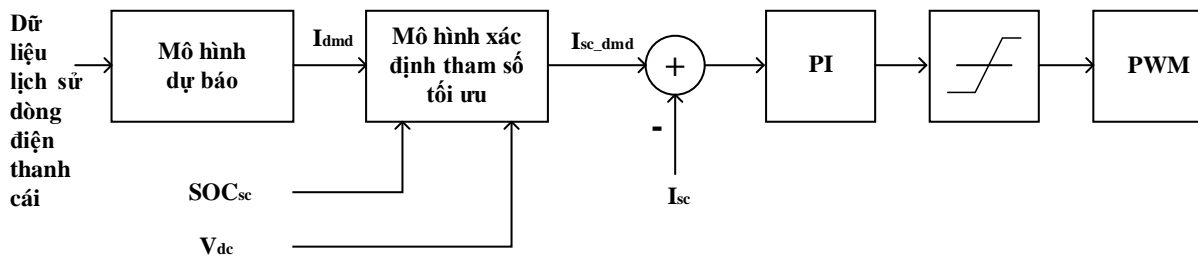
3. CHIẾN LƯỢC QUẢN LÝ VÀ GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN

3.1. Chiến lược quản lý năng lượng tích trữ siêu tụ

Với mong muốn sử dụng tối ưu năng lượng tích trữ trong siêu tụ trong toàn chu kỳ vận

hành. Không mất tính tổng quát, giả định rằng đầu mỗi chu kỳ năng lượng tích lũy trong siêu tụ đạt một mức cụ thể của dung lượng định mức. Khi đó đến cuối chu kỳ dung lượng siêu tụ lại tích lũy đến mức tương tự để tiêu dùng cho chu kỳ tiếp theo. Trong toàn chu kỳ, những giai đoạn khi mà tải điện kéo có giá trị dương, năng lượng lưu trữ trong tụ điện sẽ được phân phối một cách phù hợp để hỗ trợ giảm đỉnh tải. Ngược lại, những giai đoạn tải điện kéo tái sinh năng lượng, siêu tụ điện phải hấp thụ hoàn toàn năng lượng dư thừa trên mạng điện kéo.

Hình 3 minh họa sơ đồ cấu trúc nguyên lý của chiến lược quản lý và phân bổ năng lượng cho module siêu tụ. Căn cứ vào dữ liệu lịch sử thu thập tại các feeder (dòng điện trên đường dây nối từ thanh cái tới ray tiếp xúc) và thanh cái, mô hình dự báo sẽ ước lượng dòng điện phụ tải điện kéo nhu cầu (I_{dmd}) trong một chu kỳ vận hành (chu kỳ có thể là thời gian giãn cách vận hành chạy tàu, hoặc các khoảng thời gian vận hành trong ngày, hoặc toàn thời gian một ngày vận hành). Trên cơ sở dòng điện phụ tải nhu cầu (I_{dmd}) và các tham số trạng thái đo lường được gồm dung lượng siêu tụ (SOC_{sc}), điện áp thanh cái (V_{dc}), một mô hình ứng dụng thuật toán tối ưu được sử dụng để xác định dòng điện phóng/ nạp tối ưu của siêu tụ (I_{sc_dmd}) đáp ứng theo chế độ làm việc tối ưu của chiến lược đề xuất. Cuối cùng áp dụng bộ điều chỉnh thông dụng PI sẽ xác định được chu kỳ, độ rộng xung điều khiển bộ chuyển đổi DC/DC đáp ứng theo giá trị dòng phóng/nạp mong muốn của siêu tụ.



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc nguyên lý điều khiển.

3.2. Mô hình dự báo nhu cầu phụ tải điện kéo trong một chu kỳ

Trong hệ thống đường sắt đô thị chạy điện một chiều, phụ tải lớn nhất là tàu điện có độ dao động công suất tức thời lớn do đặc điểm của nó là phụ tải chuyển động, đồng thời nhận điện song song từ hai trạm điện kéo. Do phụ tải đoàn tàu là phụ tải chuyển động, nó phụ thuộc rất lớn vào chế độ làm việc (chế độ khởi động – tăng tốc, chế độ tốc độ không đổi, chế độ chạy đà, và chế độ hãm dừng) của đoàn tàu cũng như vị trí của đoàn tàu so với vị trí của trạm điện kéo. Từ đó làm cho phụ tải điện kéo biến động nhanh và trong dải phạm vi lớn. Thời gian dòng điện biến đổi khá nhanh, ước chừng khoảng 15 giây tới khoảng 60 giây. Sự biến đổi nhanh của dòng điện trong phạm vi rất rộng ngoài việc phụ thuộc vào tải trọng đoàn tàu, sự di chuyển của đoàn tàu, mà còn do sự trao đổi năng lượng giữa các phân vùng cấp điện từ các feeder của trạm điện kéo. Từ đó tạo nên tính chất rất phức tạp của phụ tải trạm điện kéo.

Với mục tiêu dự báo dòng điện thanh cái cung cấp cho phụ tải điện kéo ở thời điểm hiện tại, dữ liệu cần thiết để thực hiện bao gồm dữ liệu lịch sử của dòng điện thanh cái ($I(bus, t-1)$, $I(bus, t-2), \dots$). Từ đó hình thành cấu trúc liên kết mạng nơ-ron thần kinh (ANN) sử dụng mô hình truyền thẳng nhiều lớp MLP như trên Hình 4. Phương trình mô hình ước lượng được mô tả như trong công thức (5):

$$I(bus, t) = f(I(bus, t-1), I(bus, t-2), \dots, I(bus, t-n)) + \varepsilon \quad (5)$$

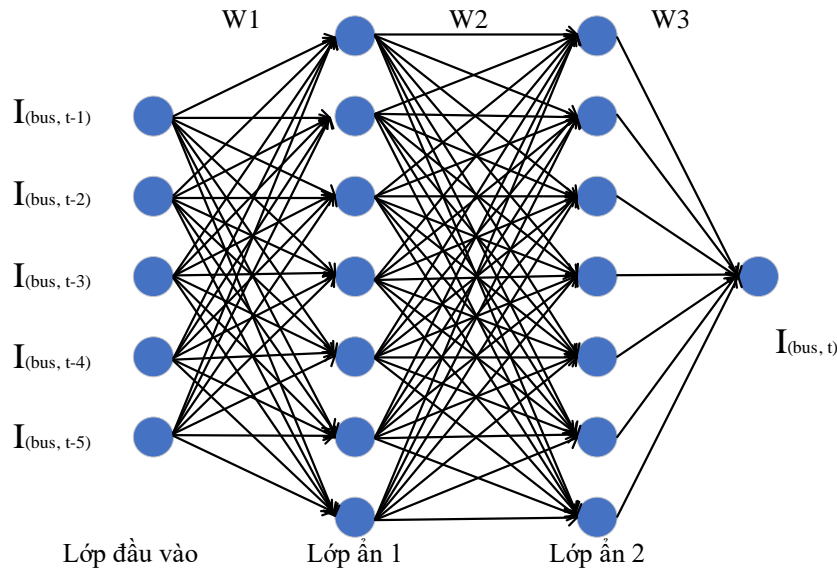
Mô hình ANN được đề xuất có tối thiểu năm nơ-ron trong lớp đầu vào, lớp đầu ra chỉ bao

gồm một nơ-ron. Để đạt được độ chính xác mong muốn, số lượng nơ-ron lớp đầu vào có thể được bổ sung trong quá trình huấn luyện, từ đó số lượng tế bào thần kinh trong lớp ẩn cũng sẽ tăng theo. Ở cấu trúc liên kết mô hình đề xuất sử dụng hai lớp ẩn để đảm bảo mô tả chính xác tính chất phi tuyến của dòng điện đồng thời giảm thiểu độ phức tạp trong cấu trúc và rút ngắn thời gian thực thi. Số lượng nơ-ron trong lớp ẩn chọn bằng 3/2 số lượng nơ-ron trong lớp đầu vào.

Để giảm khối lượng tính toán và tăng tốc độ hội tụ, trong cấu trúc này sử dụng hàm kích hoạt Relu. Các trọng số của các liên kết và độ lệch ban đầu được sinh tự động và sẽ được hiệu chỉnh cập nhật sau mỗi lần tối ưu hóa. Mô hình toán học của hàm Relu được mô tả bằng phương trình:

$$f(x) = \max(0, x) \quad (6)$$

Hàm mất mát chọn là hàm bình quân quân phương (rms). Thuật toán tối ưu hóa hàm mất mát để xác định và update các trọng số của các liên kết sử dụng thuật toán Adam.



Hình 4. Sơ đồ cấu trúc liên kết của mô hình dự báo.

3.3. Mô hình xác định tham số điều khiển tối ưu

Để xác định được tham số tối ưu dòng điện siêu tụ trong từng thời điểm toàn chu kỳ, áp dụng thuật toán quy hoạch động để tối ưu hóa quá trình phân phối năng lượng.

Từ sơ đồ hình 2, mô hình hệ thống để xác định tham số điều khiển được mô tả trong công thức (7), với i_{dmd} là dòng điện nhu cầu phụ tải trên thanh cái, đã được xác định bằng mô hình dự báo nhu cầu phụ tải như trình bày trong mục 3.2.

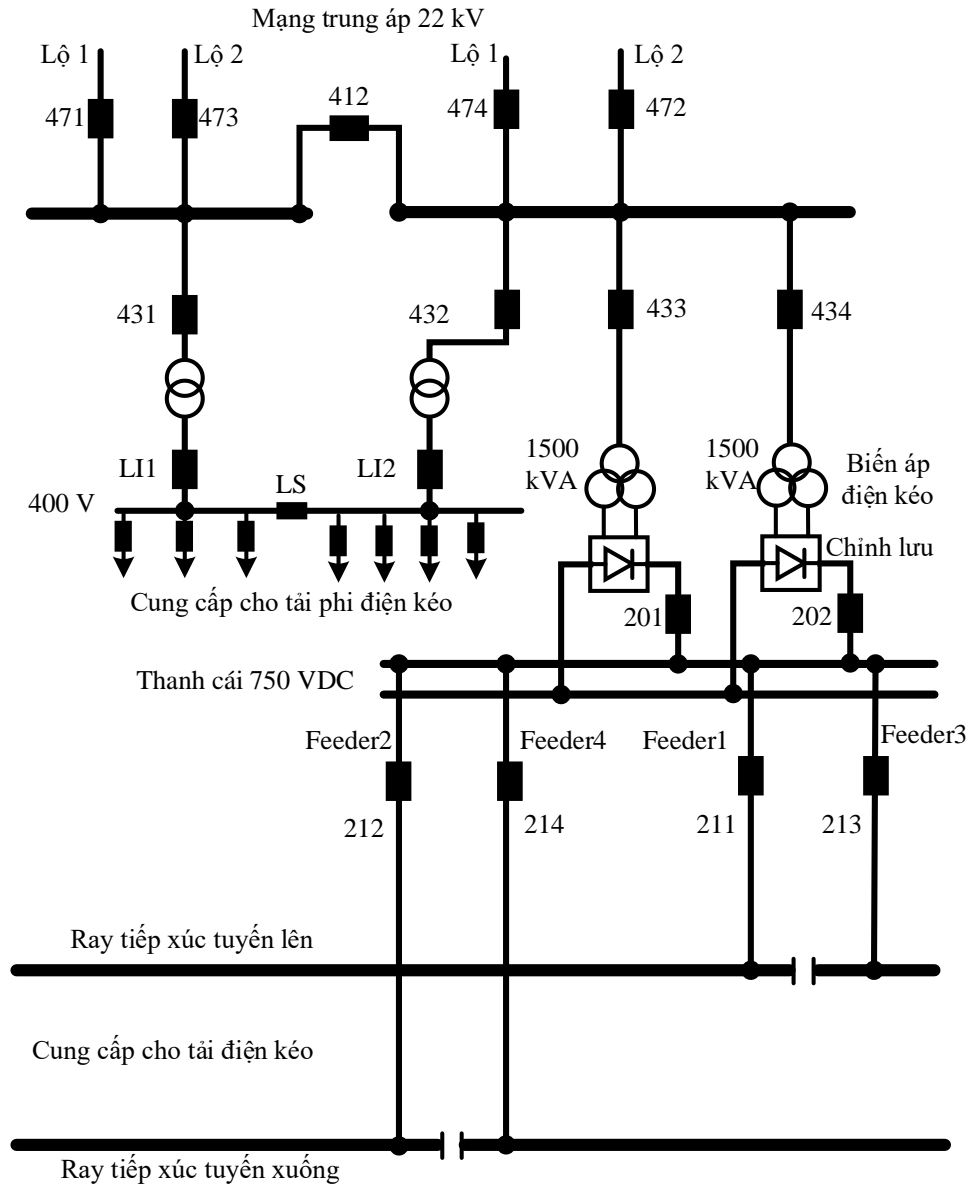
$$\begin{aligned} i_{dc} &= m i_{sc} = i_{dmd} - i_{sub} \\ C \frac{dV_{sc}}{dt} &= i_{sc} \\ V_{dc} &= \frac{1}{m} V_{sc} \end{aligned} \quad (7)$$

Với mục tiêu là tối thiểu hóa năng lượng tiêu dùng của nguồn cấp từ biến áp điện kéo – chỉnh lưu, tận dụng tối đa năng lượng tích lũy trong siêu tụ để đáp ứng nhu cầu phụ tải trong

toàn chu kỳ. Hàm mục tiêu được xác định như mô tả trong biểu thức (8).

$$J = \min E_{sub} = \min \int_{t=0}^{t=T} V_{dc} * i_{sub} * dt \quad (8)$$

Với T là thời gian chu kỳ đánh giá, E_{sub} là năng lượng điện kéo mà trạm cung cấp, V_{dc} là điện áp sau chỉnh lưu, và i_{sub} là dòng điện sau chỉnh lưu.



Hình 5. Sơ đồ một sợi trạm điện kéo Láng.

Để đạt được mục tiêu trên, lựa chọn dòng điện siêu tụ i_{sc} (hoặc dòng điện của bộ chuyển đổi DC/DC) làm tham số điều khiển để không chế trạng thái nạp cho module siêu tụ (chế độ buck) hoặc trạng thái phóng điện (chế độ boost) bổ sung cho trạm điện kéo cung cấp tới phụ tải. Hai tham số là dòng điện chỉnh lưu từ biến áp điện kéo (i_{sub}) và điện áp trên siêu tụ (u_{sc}) được lựa chọn làm thông số trạng thái của hệ thống.

Điều kiện đầu của các tham số trạng thái được giả định cho quá trình tối ưu hóa là: $i_{sub}(0) = 0$; $u_{sc}(0) = 0-80\%u_{scmax}$.

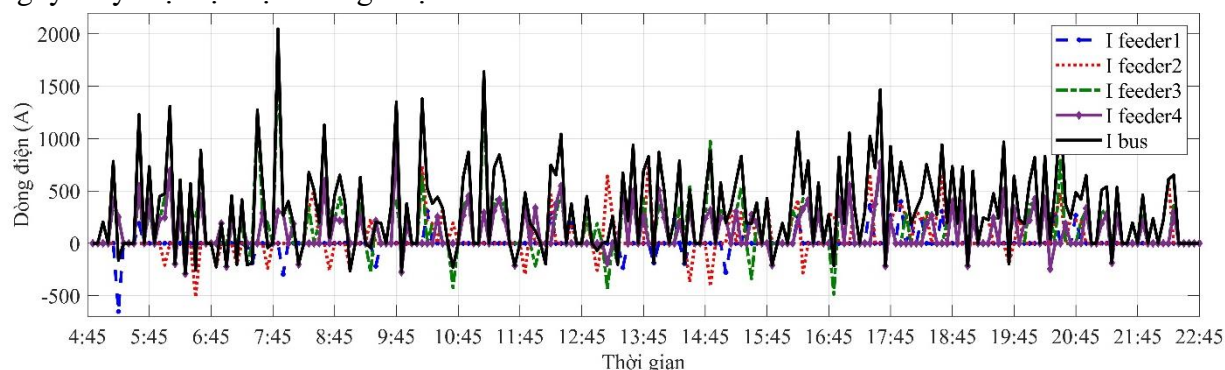
Các điều kiện ràng buộc cho bộ thông số tối ưu bắt buộc như mô tả bởi công thức (9):

$$\begin{aligned} 0 &\leq i_{sub} \leq i_{dmd} \\ i_{scmin} &\leq i_{sc} \leq i_{scmax} \\ u_{scmin} &\leq u_{sc} \leq u_{scmax} \end{aligned} \quad (9)$$

Trên cơ sở các biến điều khiển và các biến trạng thái đã lựa chọn cũng như các điều kiện ràng buộc trong công thức (9), áp dụng thuật toán quy hoạch động để thực hiện tối ưu hàm mục tiêu (8) cho mô hình (7) sẽ xác định được chế độ điều khiển tối ưu cho trạng thái phóng/ nạp của siêu tụ điện, qua đó có được chế độ phân phối năng lượng tối ưu trong hệ thống nguồn lưu trữ năng lượng trong siêu tụ điện tại các trạm điện kéo.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG KIỂM NGHIỆM

Để kiểm nghiệm chiến lược điều khiển kiểm soát năng lượng đã đề xuất, một mô hình mô phỏng dựa trên thông số của trạm Láng trên tuyến đường sắt Cát Linh – Hà Đông. Sơ đồ nguyên lý một sợi trạm Láng được mô tả trên hình 5.



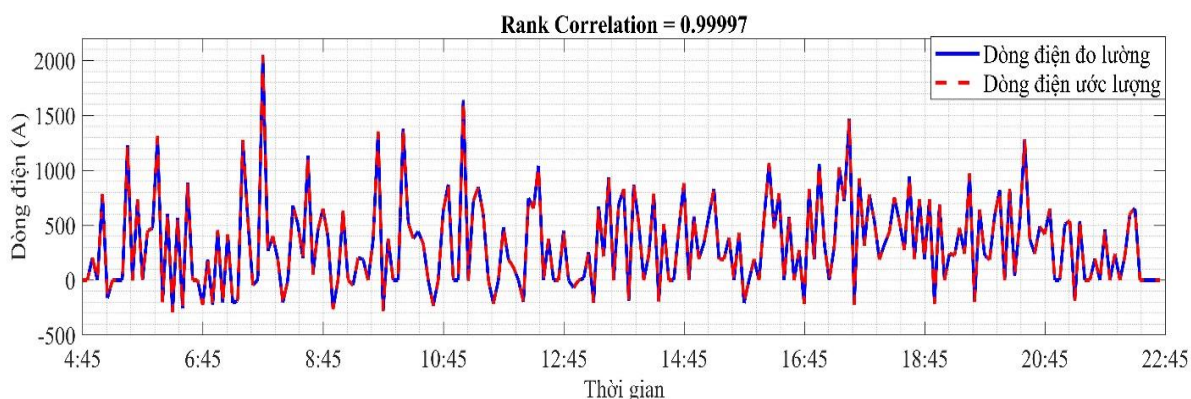
Hình 6. Dòng điện kéo tại các feeder và thanh cái của trạm Láng ngày 24/6/2022.

Trạm tích trữ siêu tụ điện được gắn trực tiếp tới thanh cái. Trong ứng dụng mô phỏng sử dụng siêu tụ có trị số 1750 F, điện áp tối đa cho phép bằng 750 VDC, điện áp tối thiểu bằng 0 VDC và dòng nạp/xả tối đa cho phép bằng 600 A. Giá trị điện dung cũng như dung lượng của module siêu tụ trên toàn tuyến có thể được xác định dựa theo các phương pháp tham khảo trong [13, 14]. Hình 6 cho thấy dòng phụ tải điện kéo ngày 24/06/2022 của trạm Láng tuyến đường sắt Cát Linh – Hà Đông được trích xuất trong hệ thống SCADA. Trong trạng thái vận hành hiện tại, tuyến đường sắt số 2 mới vận hành 6 đoàn tàu trên toàn tuyến tương ứng 2/3 mức công suất của cả tuyến. Quan sát đồ thị dòng điện tại các feeder cũng như tại thanh cái trạm điện kéo Láng, dòng điện biến thiên từ khoảng -600 A đến hơn 2200 A.

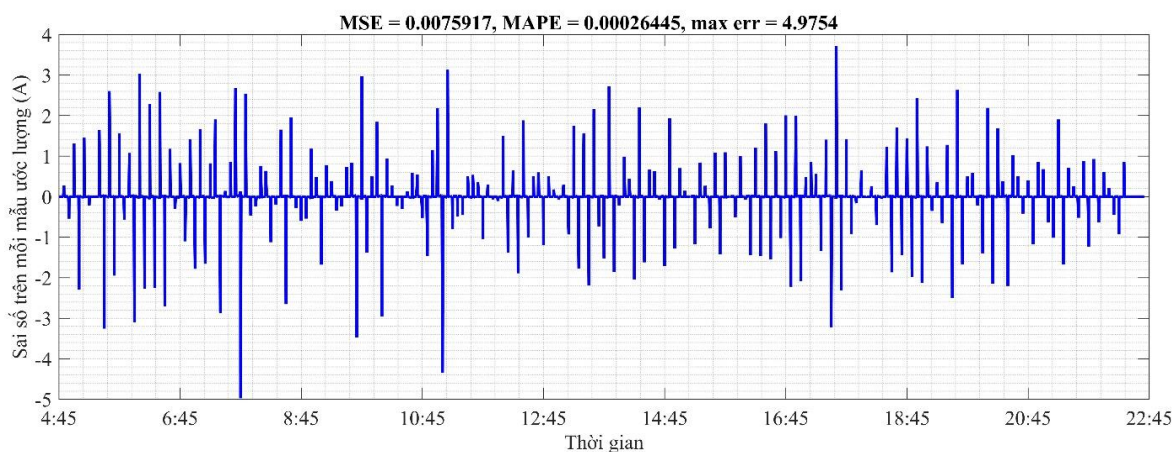
Trên cơ sở các thông số dòng điện lịch sử thanh cái, ước lượng giá trị dòng điện trong toàn chu kỳ vận hành một ngày theo mô hình ước lượng đề xuất. Tập dữ liệu huấn luyện cần được chuẩn bị đủ cho các ngày đặc trưng trong một năm bao gồm dữ liệu dòng điện thanh cái của ngày thứ hai, một ngày trong giữa tuần, ngày thứ bảy và ngày chủ nhật trong tất cả các tuần của các tháng của một năm. Trong nghiên cứu này, do một số lý do khách quan, nhóm tác giả chỉ thu thập được dữ liệu của ngày 24/06/2022. Dữ liệu này chưa đủ để huấn luyện để có được kết quả dự báo cho từng ngày trong cả năm, nhưng có thể kiểm nghiệm được độ chính xác của mô hình dự báo trong ngày 24/06/2022, từ đó có cơ sở để đánh giá tính ứng

dụng của mô hình dự báo đề xuất. Dựa vào dữ liệu thu thập được ở thanh cái trạm Láng ngày 24/06/2022, lựa chọn số mẫu trong quá trình huấn luyện tối thiểu bằng 1/4 tổng số mẫu ước lượng, tương ứng sẽ chọn các mẫu trong thời gian từ 4h45 đến 8h45. Các mẫu còn lại từ 8h45 đến 22h45 được sử dụng trong quá trình test. Kết quả dòng điện ước lượng theo mô hình đề xuất so sánh với dòng điện đo lường trích xuất từ hệ thống SCADA trên thanh cái minh họa tương ứng trên Hình 7 và sai số của mỗi mẫu ước lượng mô tả trên Hình 8. Quan sát đồ thị có thể nhận thấy, kết quả ước lượng theo phương pháp đề xuất luôn bám theo các kết quả đo lường thực tế trong toàn phạm vi mẫu thử nghiệm cả trong giai đoạn huấn luyện và trong giai đoạn test. Mỗi tương quan giữa giá trị ước lượng và giá trị đo lường lên đến 99,997%. Giá trị sai số lớn nhất bằng 4,9754 (A). Bình quân của bình phương sai số (MSE) bằng 0,0075917.

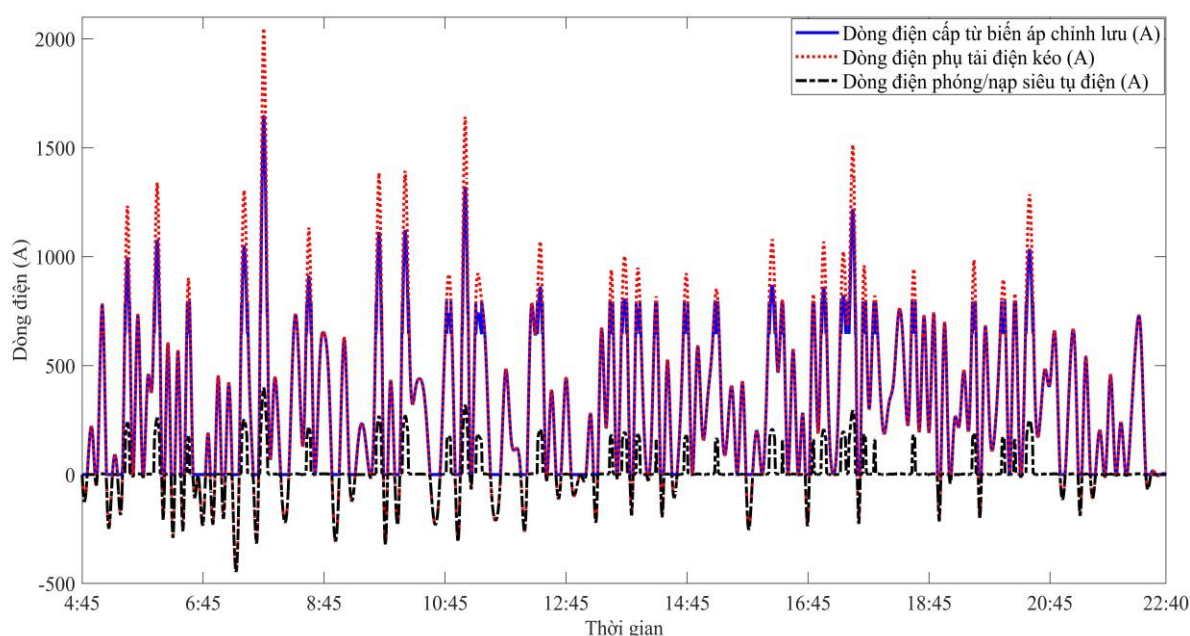
Sau khi có được dòng điện dự báo nhu cầu phụ tải trong toàn chu kỳ, thực hiện thuật toán quy hoạch động theo chiến lược đề xuất trên mô hình mô phỏng thu được dòng điện tối ưu của trạm điện kéo và của trạm tích trữ siêu tụ tương ứng với từng thời điểm đáp ứng cho các yêu cầu vận hành trên toàn chu kỳ. Kết quả các dòng điện xác định được như mô tả trên đồ thị Hình 9. Quan sát đồ thị có thể nhận thấy, trong các giai đoạn phụ tải lớn (dòng điện có trị số lớn hơn 900 A), năng lượng tích lũy trong siêu tụ điện được giải phóng cung cấp hỗ trợ cho trạm biến áp – chỉnh lưu giúp giảm đỉnh tải, giảm tổn hao trong trạm, đồng thời giảm độ dao động điện áp. Bên cạnh đó, trong tất cả các giai đoạn dòng điện tải nhỏ hơn không đều được hấp thụ hoàn toàn bởi bộ tích trữ siêu tụ điện, qua đó giảm thiểu hoặc loại trừ tình trạng làm tăng điện áp trên lưới tiếp xúc và tiêu tán năng lượng trên điện trở hãm.



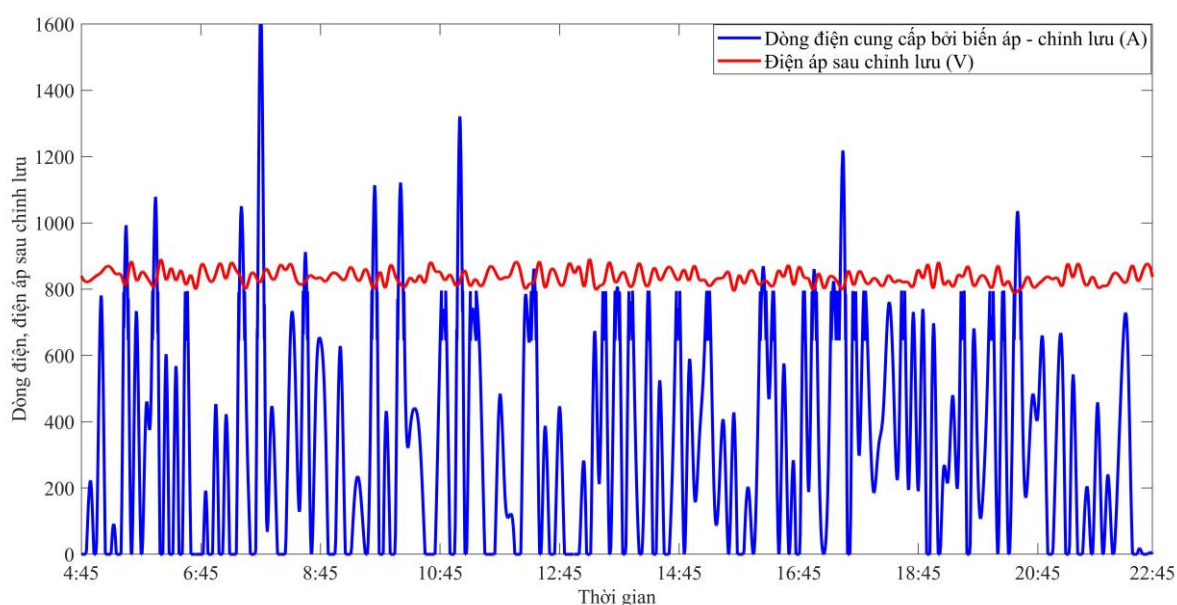
Hình 7. Kết quả ước lượng dòng điện tại thanh cái.



Hình 8. Sai số tại mỗi mẫu ước lượng giá trị dòng điện dự báo trên thanh cái.



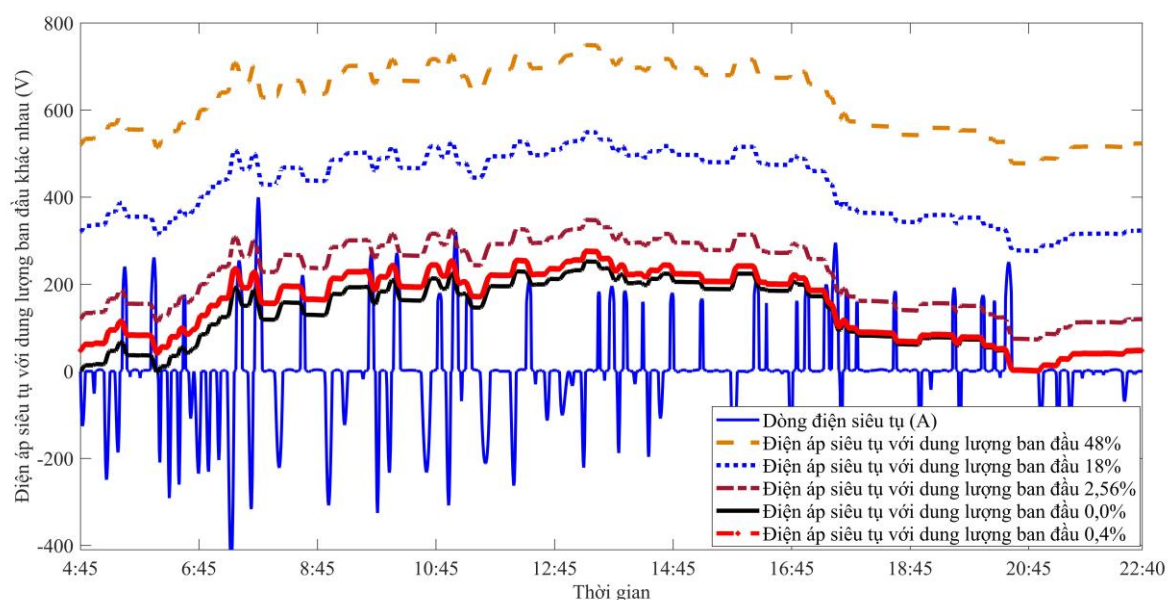
Hình 9. Đồ thị dòng điện.



Hình 10. Dòng điện và điện áp sau chỉnh lưu.

Hình 10 và Hình 11 tương ứng biểu diễn đồ thị dòng điện và điện áp của biến áp – chỉnh lưu cũng như của module siêu tụ. Với mục tiêu thu hồi triệt để năng lượng tái sinh và phân phối tối ưu năng lượng trên toàn chu kỳ làm việc, module siêu tụ được điều khiển để không bao giờ đạt dung lượng giới hạn, tránh trường hợp không thể dung nạp được năng lượng tái sinh; đồng thời năng lượng siêu tụ cũng được kiểm soát để không ở trạng thái cạn kiệt toàn bộ. Quá trình phóng/nạp và mức độ phóng/nạp được phân bổ một cách tối ưu trên toàn chu kỳ. Trên đồ thị mô phỏng, giả định điện áp ban đầu của module siêu tụ là 520 V, tương ứng dung lượng ở mức 48%. Đến cuối chu kỳ điện áp module siêu tụ cũng ở mức 520 V để sử dụng cho chu kỳ tiếp theo. Việc giả định một giá trị cụ thể ban đầu của siêu tụ có thể bất kỳ

(kể cả giá trị 0) thì thuật toán thực hiện, trạng thái làm việc, chế độ làm việc của module siêu tụ đều đồng dạng. Vì vậy việc giả định không làm mất đi tính tổng quát cho quá trình xác định thông số điều khiển tối ưu của hệ thống. Quan sát trên đồ thị Hình 10 và Hình 11, giai đoạn từ 4:45 đến 7:00, mức độ phụ tải tiêu thụ ở mức thấp, dòng điện tái sinh có giá trị lớn và ở mức tần suất lớn, siêu tụ chủ yếu thực hiện chức năng thu hồi năng lượng, dung lượng tăng từ 48% (mức ban đầu) lên đến khoảng 92%. Giai đoạn từ 7:00 đến khoảng 16:30, các quá trình phóng/nạp diễn ra đan xen và tương đối cân bằng. Từ 16:30 về cuối ngày, dòng điện tái sinh nhỏ và tần suất thấp, siêu tụ làm việc chủ yếu ở chế độ phóng năng lượng. Việc tích lũy năng lượng ở một số giai đoạn trước đã được sử dụng để phân phối cho giai đoạn cuối chu kỳ này. Trong quá trình làm việc, điện áp của siêu tụ được giới hạn trong dải từ 0 V đến 750 V, và dòng điện lớn nhất không vượt quá 400 A.



Hình 11. Dòng điện và điện áp siêu tụ điện.

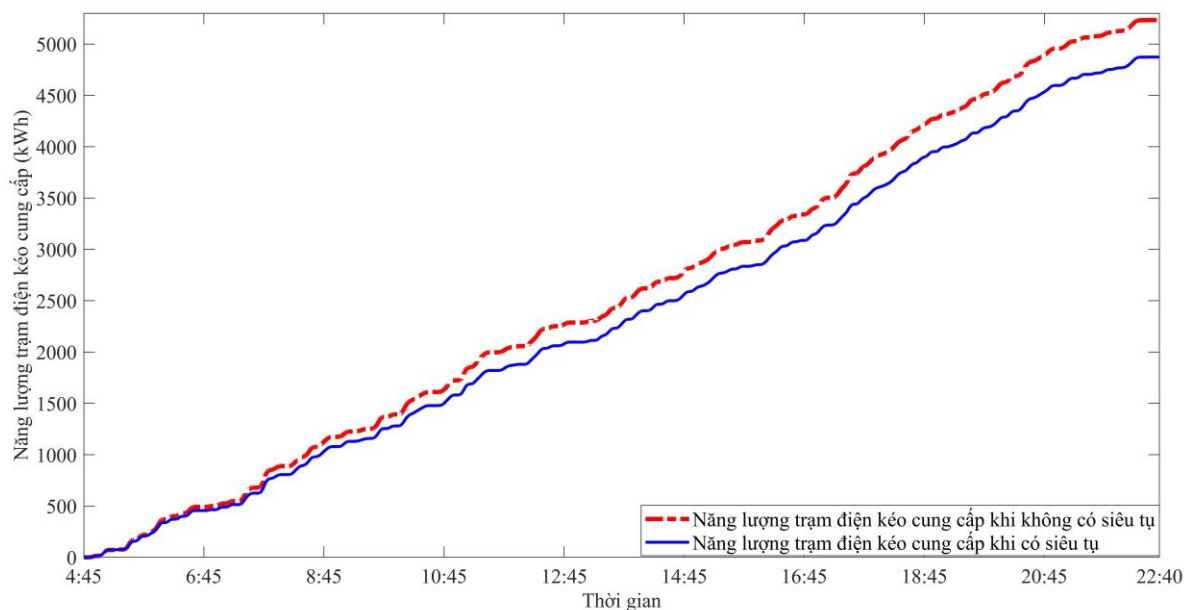
Hình 12 đưa ra đồ thị mô tả mức tiêu thụ năng lượng điện kéo theo thời gian tại Trạm Láng ngày 26/04/2022 trong trường hợp không có siêu tụ và trường hợp giả định có bố trí siêu tụ và áp dụng chiến lược điều khiển đã đề xuất. Kết thúc chu kỳ làm việc một ngày, trạm Láng cung cấp 5233,4 (kWh) cho tải điện kéo trong trường hợp không có siêu tụ, và tương ứng khi có bố trí siêu tụ thực hiện theo chiến lược đề xuất thì mức năng lượng bằng 4873,3 (kWh). Mức chênh lệch sẽ là 360,1 (kWh), chiếm khoảng 6,88% tổng mức năng lượng điện kéo của trạm.

Kết quả mô phỏng đã minh chứng cho tính khả thi và hiệu quả của giải pháp đề xuất. Qua đó có thể làm cơ sở tham chiếu để đánh giá hiệu quả cũng như để lựa chọn, triển khai ứng dụng hệ thống tích trữ năng lượng trên các tuyến đường sắt chạy điện ở Việt Nam.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một giải pháp điều khiển quản lý năng lượng cho hệ thống tích trữ năng lượng siêu tụ trên các tuyến đường sắt đô thị. Giải pháp điều khiển kết hợp tính dự báo có độ chính xác cao của thuật toán neuron và tính tối ưu toàn cục trong thuật toán quy hoạch động để xây dựng chế độ làm việc tối ưu cũng như xác định tham số điều khiển tối ưu cho hệ thống tích trữ. Kết quả thử nghiệm trên mô hình mô phỏng theo thông số vận hành tại trạm

Láng trong ngày 26/04/2022 đã minh chứng cho tính hiệu quả của giải pháp đề xuất. Toàn bộ năng lượng dư thừa trong quá trình các đoàn tàu tái sinh đều được thu hồi, các đỉnh tải trong dải giá trị lớn hơn 800 (A) đều giảm, và tổng năng lượng tiết kiệm được trong ngày khoảng 360 (kWh) chiếm khoảng 6,88% tổng năng lượng điện kéo trạm đã cung cấp.



Hình 12. Đồ thị năng lượng theo thời gian trường hợp có và không có siêu tụ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber, Siting and sizing of stationary Super Capacitors in a Metro Network, AEIT Annual Conference, Mondello, Palermo, Italy, 2013, IEEE, 1-5. <https://doi.org/10.1109/AEIT.2013.6666809>
- [2]. Diego Iannuzzi, Flavio Ciccarelli, Davide Lauria, Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 21 (2012) 321-337. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.11.002>
- [3]. Flavio Ciccarelli, Andrea Del Pizzo, Diego Iannuzzi, Improvement of energy efficiency in light railway vehicles based on power management control of wayside lithium-ion capacitor storage, IEEE Transactions on Power Electronics, 29 (2014) 275-286. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2253492>
- [4]. B. Hu, Z. Yang, X. Huang, J. Shi, Three-level bi-directional DC-DC converter and its control strategy used for super-capacitor energy storage system, Transactions of China Electrotechnical Society, 30 (2015) 83-89.
- [5]. Ricardo Barrero, Xavier Tackoen, Joeri Van Mierlo, Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network, in 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008, IEEE: Harbin, China. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677491>
- [6]. Flavio Ciccarelli, Diego Iannuzzi, Pietro Tricoli, Speed-based super capacitor state of charge tracker for light railway vehicles, in Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 2011, IEEE: Birmingham, UK.
- [7]. Flavio Ciccarelli, Diego Iannuzzi, Ivan Spina, Comparison of energy management control strategy based on wayside ESS for LRV application, in IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013, IEEE: Vienna, Austria. <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6699363>
- [8]. Zhihong Yang, Zhongping Yang, Fei Lin, Huan Xia, Improved Control Strategy of Energy Storage System Considering Train Operation States, in 2017 IEEE 20th International Conference on

- Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2017, IEEE: Yokohama, Japan. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2017.8317623>
- [9]. Hammad Alnuman, Daniel T. Gladwin, Martin P. Foster, Thomas Fantham, Adaptive Control Method to Manage SOC for Energy Storage in DC Electric Railways, in IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2019, IEEE: Lisbon, Portugal. <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927602>
- [10]. Yue Xin, Zhongping Yang, Fei Lin, Feiqin Zhu, Research on Energy Management Strategy of Supercapacitor Energy Storage System in Urban Rail Transit Based on Fuzzy Logic Control, 2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Seogwipo, Korea (South), 2019, IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2019.8903702>
- [11]. Zhongping Yang, Feiqin Zhu, Fei Lin, Deep-Reinforcement-Learning-Based Energy Management Strategy for Supercapacitor Energy Storage Systems in Urban Rail Transit, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 22 (2020) 1150–1160. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2963785>
- [12]. Hongjuan Zhang, Fang Zhang, Lei Yang, Yan Gao, Baoquan Jin, Multi-parameter Collaborative Power Prediction to Improve the Efficiency of Supercapacitor-based Regenerative Braking System, IEEE Transactions on Energy Conversion, 36 (2021) 2612–2622. <https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3074697>
- [13]. Tran Van Khoi, An Thi Hoai Thu Anh, Optimal supercapacitor placement in an urban railway line, Transport and Communications Science Journal, 73 (2022) 75-89. <https://doi.org/10.47869/tcsj.73.1.7>
- [14]. Trần Văn Khôi, Đặng Việt Phúc, 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, Tạp chí Khoa học công nghệ Giao thông vận tải, 11 (2022) 32-46. [https://www.doi.org/10.55228/JTST.11\(1\)32-46](https://www.doi.org/10.55228/JTST.11(1)32-46)