

# THU HỒI NĂNG LƯỢNG HĂM TÁI SINH TRONG VẬN HÀNH TÀU ĐIỆN ĐÔ THỊ BẰNG BỘ CHỈNH LƯU TÍCH CỰC

## REGENERATIVE BRAKING ENERGY RECUPERATION FROM URBAN ELECTRIFIED TRAIN OPERATION BY ACTIVE RECTIFIER

<sup>1</sup>An Thị Hoài Thu Anh, <sup>2</sup>Trần Văn Khôi, <sup>3</sup>Đặng Việt Phúc

<sup>1</sup>Trường Đại học Giao thông vận tải, Hà Nội

<sup>1</sup>htanh.ktd@utc.edu.vn, <sup>2</sup>tvkhoi.ktd@utc.edu.vn, <sup>3</sup>dvphuc.ktd@utc.edu.vn

**Tóm tắt:** Với công suất động cơ truyền động lớn, tổng mức tiêu thụ điện năng vận hành tàu điện của hệ thống đường sắt đô thị rất cao. Do đó, các giải pháp tiết kiệm năng lượng có ý nghĩa quan trọng, góp phần làm nổi bật những ưu điểm của tàu điện đô thị so với các loại phương tiện giao thông khác. Thu hồi năng lượng hãm tái sinh là giải pháp chủ đạo nâng cao hiệu quả tiết kiệm năng lượng. Bài báo đề xuất giải pháp thu hồi năng lượng hãm tái sinh bằng bộ chỉnh lưu tích cực (CLTC) lắp đặt tại trạm điện kéo có khả năng cho dòng năng lượng chảy hai chiều. Ở chế độ hãm dừng, động cơ làm việc như máy phát trả năng lượng về lưới, nhờ bộ chỉnh lưu tích cực, năng lượng hãm tái sinh sẽ được trả về nguồn lưới mà không bị đốt trên các điện trở hãm. Hiệu quả năng lượng của giải pháp này được kiểm chứng bằng kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink với các dữ liệu thu thập từ tuyến đường sắt đô thị Cát Linh - Hà Đông, Việt Nam. Đánh giá mức độ tiết kiệm năng lượng trong các trường hợp có hoặc không sử dụng bộ chỉnh lưu tích cực đã chỉ ra sử dụng bộ chỉnh lưu tích cực tiết kiệm được 4.4% tổng năng lượng điện kéo.

**Từ khóa:** Thu hồi năng lượng hãm tái sinh, chỉnh lưu tích cực, vận hành hiệu quả năng lượng, điều khiển bám điện áp lưới (VOC).

**Mã phân loại:** 10.2

**Abstract:** With a large capacity, the total energy consumption for electrified train operation of the urban railway system is very high. Therefore, energy-saving solutions are very meaningful to retain their outstanding advantages compared to other means of transportation. Recovering regenerative braking energy is the potential solution to improve energy efficiency. This paper proposes a solution to recover regenerative braking energy by an active rectifier installed at a traction substation capable of bi-directional energy flow. In the braking phase, the motor operates as a generator that returns energy to the utility source. Thanks to the active rectifier, regenerative braking energy will be returned to the source without being burned on the braking resistors. The energy efficiency of this solution is verified by simulation results on Matlab Simulink software with simulation data collected from Cat Linh-Ha Dong urban railway, Vietnam. Evaluating the level of energy savings in the cases with/without active rectifiers showed that using the active rectifier had saved 4.4% of the total traction electric energy.

**Keywords:** Regenerative braking energy recuperation, active rectifier, energy-efficient operation, Voltage Oriented Control (VOC).

**Classification code:** 10.2

### 1. Giới thiệu

Với những ưu điểm nổi bật: Vận hành đúng giờ, an toàn, khả năng vận chuyển lớn, giảm ùn tắc giao thông và khí thải ra môi trường, hệ thống đường sắt đô thị ngày càng được sử dụng rộng rãi khắp nơi trên thế giới. Tuy nhiên điện năng cần cấp để vận hành đoàn tàu là rất lớn, nhiều giải pháp thu hồi năng lượng đã được đề xuất và áp dụng trong thực tế. Hình 1 chỉ ra hai nhóm các giải pháp tiết kiệm năng lượng: Nhóm giải pháp các qui trình vận hành (lái tàu hiệu quả năng lượng, giảm tiêu thụ năng lượng của dịch vụ

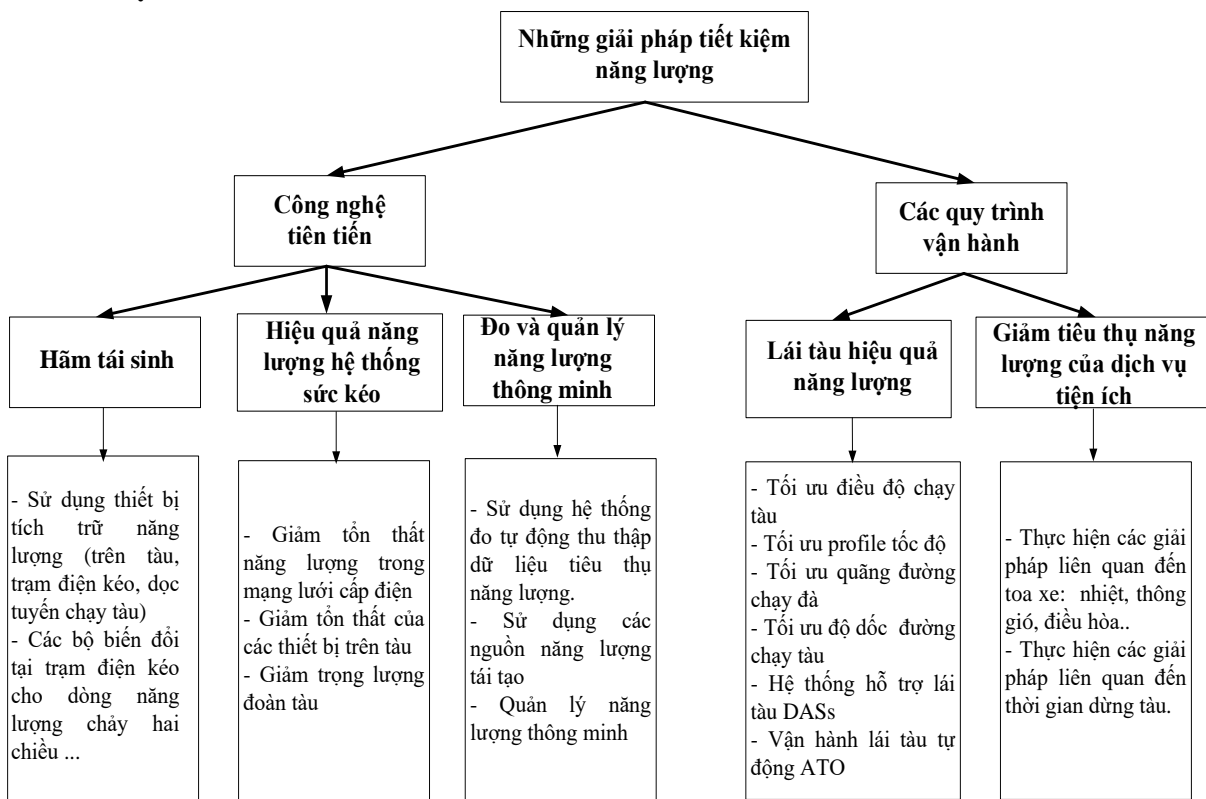
tiện ích) và nhóm giải pháp ứng dụng công nghệ tiên tiến (hãm tái sinh, hiệu quả năng lượng hệ thống sức kéo, đo và quản lý năng lượng thông minh) [1]. Nhóm giải pháp các qui trình vận hành là tạo ra những thay đổi hiệu quả năng lượng khi vận hành đoàn tàu mà không cần phải đầu tư thêm cơ sở hạ tầng của tuyến có sẵn; trong khi nhóm giải pháp về ứng dụng công nghệ tiên tiến cần thay thế, hoặc bổ sung hệ thống trang thiết bị đoàn tàu.

Trong các giải pháp trình bày tại hình 1, giải pháp thu hồi năng lượng hãm tái sinh là hiệu quả nhất với mức độ năng lượng được

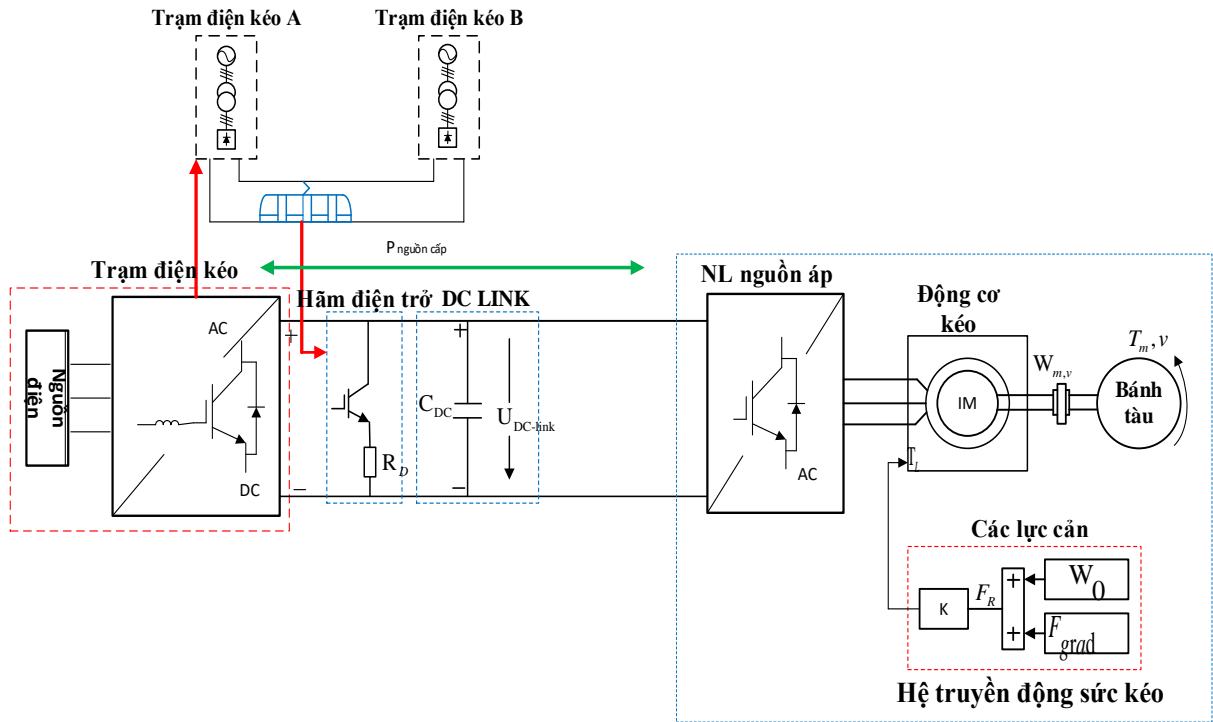
thu hồi lên đến 30% do khoảng cách giữa các khu gian ngắn, tàu điện đô thị hãm dừng thường xuyên [14]. Việc tái sử dụng năng lượng hãm tái sinh được thực hiện bằng nhiều cách thức: Sử dụng các thiết bị tích trữ năng lượng như bánh đà, ắc qui, siêu tụ đặt trên tàu, tại trạm điện kéo [2], [8], [9], [13], [14]; tối ưu biểu đồ chạy tàu để đồng bộ các giai đoạn tăng tốc và giảm tốc của các đoàn tàu, sao cho đoàn tàu vận hành trong chế độ kéo nhận được năng lượng hãm tái sinh từ đoàn tàu gần nhất vận hành trong chế độ hãm [8]; lắp đặt các bộ biến đổi tại trạm điện kéo cho dòng năng lượng chảy hai chiều từ nguồn tới tải là tàu điện và ngược lại [4], [10]. Trong bài báo này đề xuất thu hồi năng lượng hãm tái sinh bằng bộ chỉnh lưu tích cực. Khi tàu điện vận hành ở chế độ hãm, năng lượng dư thừa được trả lưới nhờ bộ chỉnh lưu này. Các kết quả mô phỏng đã cho thấy năng lượng tiết kiệm khi sử dụng chỉnh lưu tích cực lên tới 4.4%.

## 2. Hệ thống tàu điện sử dụng bộ chỉnh lưu tích cực

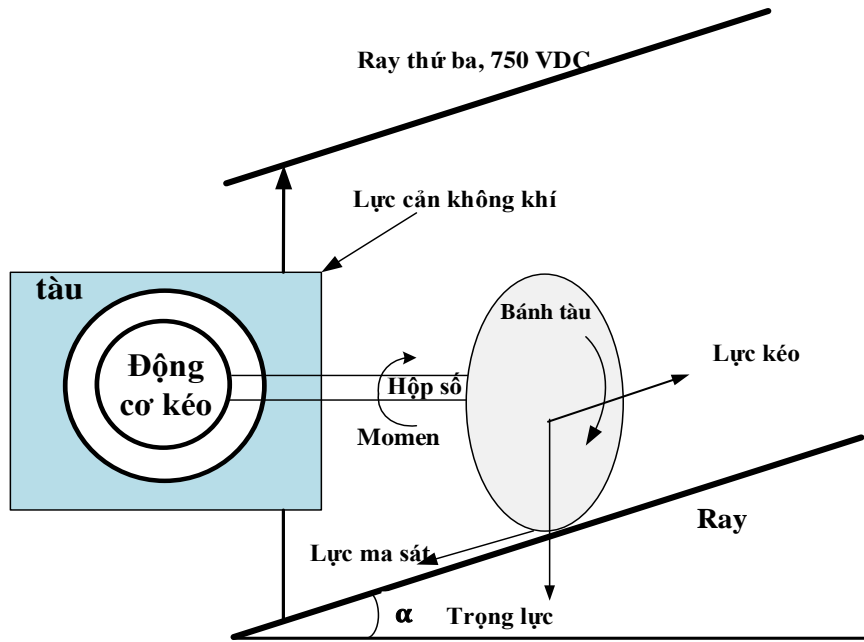
Trong trạm điện kéo của hệ thống đoàn tàu vận hành hiện nay là các bộ chỉnh lưu diode chỉ cho dòng năng lượng chảy từ nguồn tới tải. Khi tàu điện vận hành ở chế độ hãm về ga, động cơ làm việc như máy phát trả năng lượng về lưới, năng lượng dư thừa này bị đốt trên điện trở hãm gây lãng phí và làm tăng nhiệt độ môi trường. Do đó, đề xuất thay thế chỉnh lưu diode bằng chỉnh lưu tích cực với ưu điểm: Chứa ít sóng hài bậc cao, hệ số  $\cos\varphi$  được điều chỉnh xấp xỉ 1, có khả năng trao đổi năng lượng theo hai chiều như trong hình 2 và hình 3 [10]. Hệ thống tàu điện bao gồm những phần chính: Trạm điện kéo, hãm điện trở, hệ truyền động sức kéo với động cơ kéo là động cơ không đồng bộ roto lồng sóc, biến tần nguồn áp điều khiển các động cơ kéo mắc song song, các lực cản trở do ma sát, lực cản không khí, lực cản do độ dốc, lực cản do bán kính cong. Trong phần này tập trung nghiên cứu, phân tích bộ chỉnh lưu tích cực và phương pháp điều khiển tựa điện áp lưới (VOC).



Hình 1. Các giải pháp tiết kiệm năng lượng trong giao thông điện đường sắt [1].



Hình 2. Hệ thống tàu điện đô thị sử dụng bộ chỉnh lưu tích cực [10].



Hình 3. Mô men và các lực tác động lên đoàn tàu [10].

**2.1. Mô hình đoàn tàu**

Phương trình trạng thái của đoàn tàu được biểu diễn như sau [1]:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v \\ mv \frac{dv}{dx} = F_{tr}(v) - F_{br}(v) - W_0(v) - F_{grad}(x) \end{cases} \quad (1)$$

Ở đây  $v, t, x, m$  là tốc độ đoàn tàu ( $m/s$ ), thời gian vận hành ( $s$ ), vị trí đoàn tàu ( $m$ ), khối lượng đoàn tàu khi đầy tải (tấn),

$F_{tr}, F_{br}, W_0, F_{grad}$  là lực kéo, lực hãm điện, lực cản chính và lực cản do độ dốc.

Dựa vào đường các đặc tính lực kéo và lực hãm được đưa ra bởi nhà sản xuất [1]. Sử dụng phương pháp hồi qui để xác định các đặc tính này dưới dạng các đa thức:

$$F_{tr} = \begin{cases} 13.2 & (0 \leq v \leq 32) \\ -2.5 \cdot 10^{-5} v^3 + 0.007 \cdot v^2 & (32 < v \leq 80) \\ -0.66v + 28.35 & \end{cases} \quad (2)$$

$$F_{br} = \begin{cases} 14.7 & (0 \leq v \leq 65) \\ -0.254v + 31.21 & (65 < v \leq 75) \\ -0.2027v + 27.36 & (75 < v \leq 80) \end{cases} \quad (3)$$

Lực cản cơ bản tính theo đơn vị khối lượng  $w_0$  được tính dựa vào công thức Davis [1]:

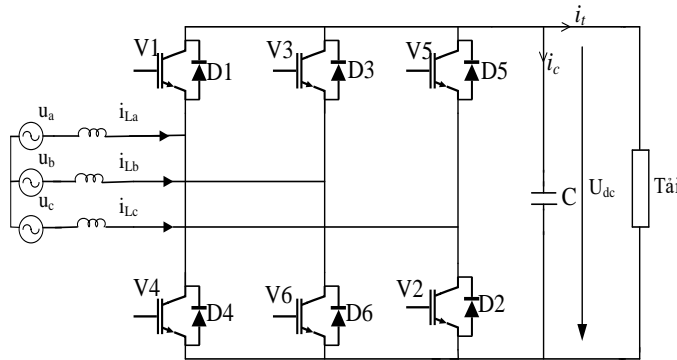
$$w_0 = \frac{W_0}{m} = a + bv + cv^2 \quad (4)$$

Ở đây  $a, b, c$  là các hệ số cản trở được cung cấp bởi nhà sản xuất.

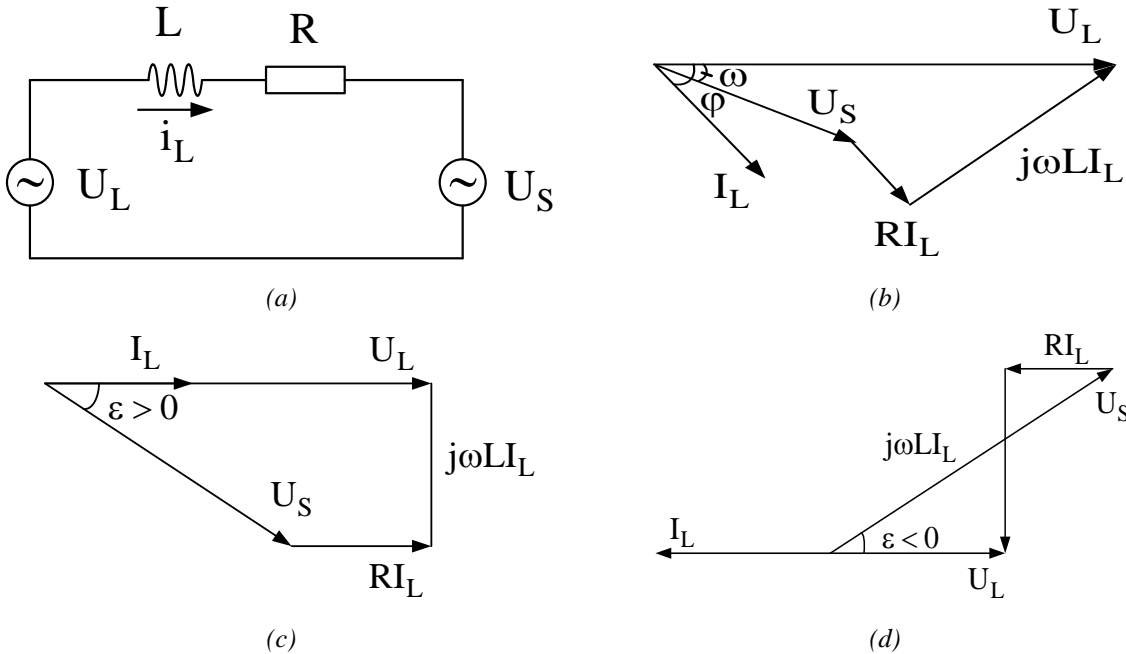
$$\text{Lực cản do độ dốc: } F_{grad} = mg \sin \alpha \quad (5)$$

Trong đó  $g, \alpha$  là gia tốc trọng trường độ dốc của đường ray.

**2.2. Mô hình hóa bộ chỉnh lưu tích cực**



Hình 4. Sơ đồ cấu trúc mạch lực của bộ chỉnh lưu tích cực [7].



Hình 5. Sơ đồ thay thế một pha và đồ thị vector chỉnh lưu tích cực [7].

- a. Sơ đồ thay thế 1 pha của CLTC, b. Đồ thị vector tổng quát, c. Đồ thị vector ứng với  $\cos \varphi = 1$ , d. Đồ thị vector ứng với  $\cos \varphi = -1$ .

Trong hình 4 chỉ ra cấu trúc mạch lực của bộ chỉnh lưu tích cực, khác với các bộ chỉnh lưu thông thường là có các cuộn cảm  $L$ , Cuộn cảm  $L$  có tác dụng tích trữ năng lượng, tạo ra kho từ để trao đổi năng lượng với lưới, trở kháng  $X_L = \omega.L$  chính là phần tử

hạn chế dòng điện có thể xuất hiện giữa hai nguồn điện áp (sức điện động nghịch lưu và sức điện động lưới). Tụ  $C$  lọc điện áp một chiều trước khi cấp vào tải. Tụ  $C$  có giá trị đủ lớn để san bằng điện áp  $u_{dc}$ , chỉnh bởi đủ lớn nên điện áp một chiều  $u_{dc}$  thay đổi chậm, có

thể coi  $u_{dc}=U_{dc}=const$ . Hình 5 chỉ ra sơ đồ thay thế một pha và đồ thị vector của chỉnh lưu tích cực thể hiện hệ số  $\cos\varphi=1$  khi mạch van làm việc ở chế độ chỉnh lưu, và  $\cos\varphi=-1$  khi mạch van làm việc trong chế độ hãm, năng lượng trả lưới. Từ hình 4 và hình 5, ba phương trình điện áp được thể hiện:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Và một phương trình dòng điện:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_{La} + S_b i_{Lb} + S_c i_{Lc} - i_t \quad (7)$$

Với  $s_a, s_b, s_c$  là các hàm đóng cắt của các van trên mỗi nhánh với quy luật như sau:

- $s_a = 1$  nếu V1 đóng,  $s_a = 0$  nếu V4 đóng;
- $s_b = 1$  nếu V3 đóng,  $s_b = 0$  nếu V6 đóng;
- $s_c = 1$  nếu V5 đóng,  $s_c = 0$  nếu V2 đóng.

Sử dụng phép biến đổi Clark, Park để chuyển các phương trình cân bằng điện áp và dòng điện từ hệ tọa độ (a,b,c) sang ( $\alpha$ - $\beta$ ), rồi sang hệ tọa độ quay (d-q). Ta được các phương trình sau:

Phương trình điện áp:

$$\begin{cases} u_{Ld} = Ri_{Ld} + L \frac{di_{Ld}}{dt} - \omega Li_{Lq} + u_{sd} \\ u_{Lq} = Ri_{Lq} + L \frac{di_{Lq}}{dt} + \omega Li_{Ld} + u_{sq} \end{cases} \quad (8)$$

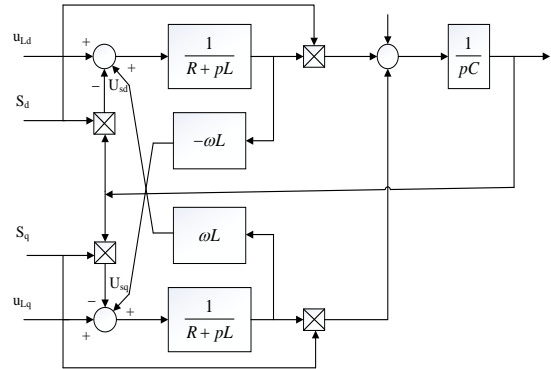
Phương trình dòng điện:

$$C \frac{du_c}{dt} = (i_{Ld} S_d + i_{Lq} S_q) - i_t \quad (9)$$

Trong đó:

$$\begin{cases} S_d = S_\alpha \cos \omega t + S_\beta \sin \omega t \\ S_q = -S_\alpha \sin \omega t + S_\beta \cos \omega t \\ S_\alpha = \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \\ S_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \end{cases}$$

Cấu trúc mô hình toán học của chỉnh lưu tích cực trong hệ tọa độ quay d-q như minh họa trên hình 6.

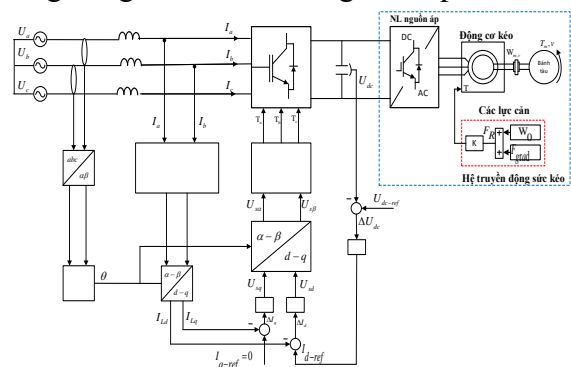


Hình 6. Mô hình toán học của chỉnh lưu tích cực trong hệ tọa độ dq.

Cấu trúc mô hình toán học của chỉnh lưu tích cực trong hệ tọa độ quay d-q như minh họa trên hình 6.

### 2.3. Các cấu trúc điều khiển chỉnh lưu tích cực

Từ mô hình toán học của bộ chỉnh lưu tích cực được thể hiện trong phương trình (3), (4) và hình 6. Cấu trúc điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực được thiết kế theo phương pháp tựa điện áp lưới - VOC như minh họa trên hình 7. Cấu trúc điều khiển VOC sử dụng mạch vòng điều khiển dòng điện. Cấu trúc này dựa trên việc chuyển đổi giữa hệ trục tọa độ cố định  $\alpha\beta$  và hệ trục tọa độ dq. Phương pháp này đảm bảo đáp ứng tức thời nhanh và chính xác thông qua các mạch vòng điều khiển: Vòng khóa pha (PLL), mạch vòng dòng điện, mạch vòng điện áp [3], [7].

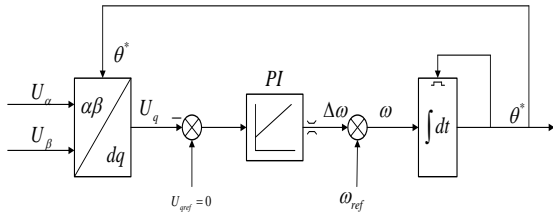


Hình 7. Cấu trúc điều khiển chỉnh lưu tích cực theo phương pháp VOC [3], [7].

#### 2.3.1. Thiết kế vòng khóa pha PLL

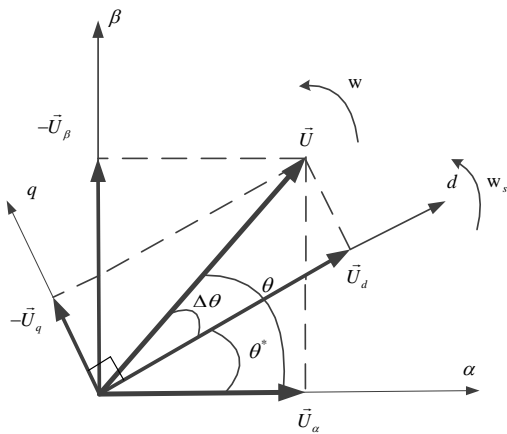
Đối với các thiết bị điện tử công suất khi muốn trao đổi năng lượng giữa thiết bị với

lưới cần giải quyết bài toán đồng bộ góc pha, biên độ, tần số. Do đó thuật toán vòng khóa pha được thiết lập nhằm xác định góc pha điện áp lưới cũng như tần số của hệ thống. Cấu trúc điều khiển vòng khóa pha được mô tả trên hình 8.



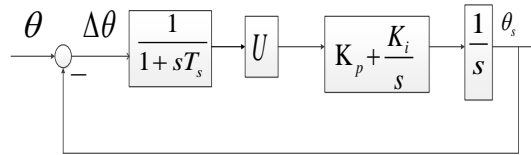
Hình 8. Cấu trúc vòng khóa pha [3], [7].

Thông tin đầu vào là giá trị điện áp lưới được biểu diễn trên trục tọa độ cố định  $\alpha\beta$  và giá trị đầu ra là thông tin góc pha điện áp.



Hình 9. Phân tích thành phần vector điện áp lưới

Như hình 9 minh họa, bằng việc biểu diễn điện áp lưới thành một vector quay  $\vec{U}$  có vận tốc góc bằng với vận tốc góc của điện áp lưới và góc quay so với trục  $\alpha$  chính là góc pha của vector điện áp lưới. Từ đó, đưa hệ trục vector quay  $dq$  cùng chiều quay với vector điện áp, khi đó vector  $\vec{U}$  sẽ có thành phần dọc trục là  $\vec{U}_d$ , và thành phần ngang trục là  $\vec{U}_q$ . Với việc điều khiển thành phần ngang trục  $\vec{U}_q$  bằng không, thì thành phần dọc trục  $\vec{U}_d$  này sẽ trùng với vector điện áp lưới và góc quay của hệ trục  $dq$  khi đó sẽ mang thông tin của góc pha vector điện áp lưới. Cấu trúc điều khiển vòng khóa pha có thể được mô tả như hình 10.



Hình 10. Cấu trúc điều khiển vòng khóa pha.

Đại lượng cần điều khiển:  $\theta^*$  - góc tựa đầu ra khỏi PLL.

Đại lượng đặt:  $\theta$  - góc pha điện áp nguồn.

Yêu cầu điều khiển: Góc quay trục  $d$  bám giá trị góc pha điện áp lưới, thông qua giá trị biểu diễn sai lệch:

$$U_q = -U \sin(\theta^* - \theta) = U \sin(\Delta\theta) \quad (10)$$

Sai lệch  $\Delta\theta$  tiến về không, khi đó thành phần vector ngang trục  $\vec{U}_q$  bằng không, góc quay trục  $d$  bám giá trị góc pha điện áp lưới.

Với khoảng biến thiên  $\Delta\theta$  nhỏ, ta xấp xỉ  $U \sin(\Delta\theta) \approx U \Delta\theta$ ,  $\omega_{ref}$ , coi  $\omega_{ref}$  là nhiều hằng số.

Vì bộ điều khiển số sẽ gây trễ một chu kỳ trích mẫu  $T_s$ , ta coi như một khâu quán tính bậc nhất. Như vậy đối tượng của hệ

$S(s) = \frac{U}{s(1+sT_s)}$  là một khâu tích phân quán tính bậc nhất. Khi đó hàm truyền hệ hở là:

$$G_o(s) = \left( K_p \frac{1+sT_s}{sT_i} \right) \frac{1}{1+sT_s} \frac{U}{s} \quad (11)$$

Hàm truyền hệ kín lúc này trở thành:

$$\begin{aligned} G_k(s) &= \frac{G_o(s)}{1+G_o(s)} \\ &= \frac{u(K_p s + K_i)}{s^2(1+sT_s) + u(K_p s + K_i)} \\ &= \frac{u.K_s s + uK_i}{T_s.s^3 + s^2 + u.K_s s + uK_i} \end{aligned} \quad (12)$$

Sử dụng tiêu chuẩn tối ưu đối xứng để tổng hợp bộ điều khiển:

Chọn hệ số  $a=4$  và thời gian trích mẫu  $T_s = 0.2ms$  ta được các tham số của bộ điều khiển:

$$T_I = aT_1 = aT_s = 8.10^{-4}$$

$$k_p = \frac{1}{kT_1\sqrt{a}} = 8.0353 \quad (13)$$

### 2.3.2. Thiết kế mạch vòng điều khiển dòng điện

Từ mô hình toán học của đối tượng trên hệ trục tọa độ  $d-q$  theo công thức sau:

$$\begin{cases} u_{Ld} = Ri_{Ld} + L \frac{di_{Ld}}{dt} - \omega L i_{Lq} + u_{sd} \\ u_{Lq} = Ri_{Lq} + L \frac{di_{Lq}}{dt} + \omega L i_{Ld} + u_{sq} \end{cases} \quad (14)$$

Do hai bộ điều chỉnh dòng điện trên hai trục  $d, q$  là tương đương nhau, nên ta chỉ tổng hợp một bộ điều chỉnh tổng quát cho cả hai.

Xuất phát từ phương trình:

$$u_{Ld} = Ri_{Ld} + L \frac{di_{Ld}}{dt} - \omega L i_{Lq} + u_{sd} \quad (15)$$

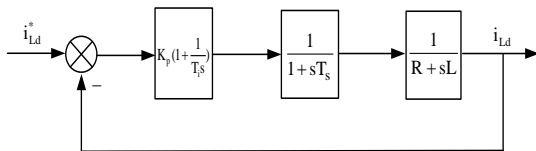
Để đơn giản cho thiết kế, bỏ qua thành phần đan kênh  $\omega L$ .

Laplace hai vế của phương trình (15) và bỏ qua thành phần xen kênh, có phương trình:

$$U_{Ld} = RI_{Ld} + L.s.I_{Ld} + U_{sd}$$

$$\Rightarrow \frac{I_{Ld}}{U_{Ld} - U_{sd}} = \frac{1}{R + L.s} \quad (16)$$

Trong thực tế luôn có thời gian trễ  $T_s$  từ khi bắt đầu có tín hiệu của điện áp điều khiển đến khi điện áp điều khiển đó được bộ nghịch lưu điều chế ra. Ta coi tác động của thời gian trễ đó là một khâu quán tính bậc nhất và có mô hình dùng để tổng hợp bộ điều khiển:



Hình 11. Sơ đồ mạch vòng điều chỉnh dòng điện.

Khâu PI có phương trình:

$$C(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i.s} \right) = \frac{1 + T_i.s}{T_a.s} \quad (17)$$

Với  $T_a = \frac{T_i}{k_p}$ , chọn  $T_i = \frac{L}{R}$ ;

Hàm truyền kín của đối tượng:

$$G_k(s) = \frac{1/R}{(1 + T_s s)T_a.s + 1/R} \quad (18)$$

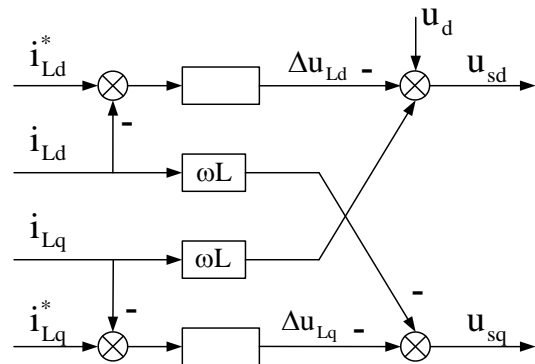
Sử dụng phương pháp tối ưu độ lớn ta được [12]:

$$\begin{cases} T_i = \frac{L}{R} \\ T_a = 2 \frac{1}{R} T_s \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} T_i = \frac{L}{R} \\ \frac{T_i}{k_p} = 2 \frac{1}{R} T_s \end{cases} \quad (19)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} T_i = \frac{L}{R} \\ k_p = \frac{L}{2T_s} \end{cases}$$

Thay số tính toán ta được thông số bộ PI điều khiển dòng  $i_{Ld}$ . Tổng hợp tương tự ta được thông số bộ PI điều khiển dòng  $i_{Lq}$ .

Khi tổng hợp xong hai mạch vòng dòng điện  $i_{Ld}, i_{Lq}$ , quay lại xét thành phần  $\omega L$  để bù xen kênh. Mạch vòng dòng điện được thiết kế bù xen kênh như sau:



Hình 12. Sơ đồ điều chỉnh dòng điện sau khi tách kênh.

### 2.3.3. Thiết kế mạch vòng điện áp

Do yêu cầu thiết kế bộ điều khiển dòng  $R_{iL}$  đảm bảo nhanh, chính xác và tách kênh nên có thể coi bộ  $R_{iL}$  là khâu có hàm truyền bằng 1. Xuất phát từ phương trình:

$$c \frac{du_{dc}}{dt} = i_{Ld}.s_d + i_{Lq}.s_q - i_t \quad (20)$$

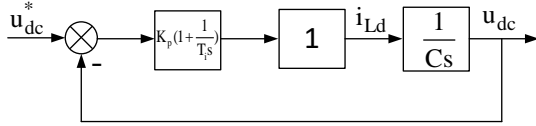
Laplace hai vế, ta được phương trình:

$$Cs.U_{dc} = I_{Ld}.S_d + I_{Lq}.S_q - I_t \quad (21)$$

$I_{Lq} = 0$  do đó:

$$\Rightarrow U_{dc} = \frac{I_{Ld}.S_d - I_t}{Cs} \quad (22)$$

Bỏ qua thành phần nhiễu  $I_t$ , sơ đồ mạch vòng điều khiển như sau:



Hình 13. Sơ đồ mạch vòng điều khiển điện áp.

Hàm truyền hệ hở:

$$\begin{aligned} F_{hu}(s) &= \frac{k_{pu}(1 + T_{iu}s)}{T_{iu}s} \cdot \frac{1}{Cs} \\ &= \frac{k_{pu}}{T_{iu} \cdot C} \cdot \frac{1 + T_{iu}s}{s^2} \end{aligned} \quad (23)$$

Chọn:  $k_1 = \frac{k_{pu}}{T_{iu} \cdot C}$

$$\Rightarrow F_{hu}(s) = k_1 \frac{1 + T_{iu}s}{s^2}$$

Hàm truyền hệ kín:

$$\begin{aligned} F_{ku}(s) &= \frac{F_{hu}(s)}{1 + F_{hu}(s)} = \frac{k_1 \frac{1 + T_{iu}s}{s^2}}{1 + k_1 \frac{1 + T_{iu}s}{s^2}} \\ &= \frac{k_1(1 + T_{iu}s)}{s^2 + k_1(1 + T_{iu}s)} = \frac{k_1.T_{iu}.s + k_1}{s^2 + k_1.T_{iu}.s + k_1} \end{aligned} \quad (24)$$

Thiết kế bộ điều khiển điện áp theo phương pháp tối ưu đối xứng với hàm chuẩn [12]:

$$G_k(s) = \frac{2.\xi.\omega_n.s + \omega_n^2}{s^2 + 2.\xi.\omega_n.s + \omega_n^2} \quad (25)$$

Trong đó:

$\omega_n$  là tần số dao động riêng;

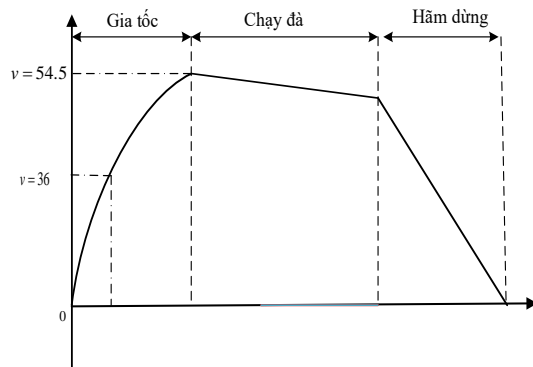
$\xi$  là hệ số dao động tắt dần ( $0 < \xi < 1$ ).

$$\begin{aligned} \Rightarrow \begin{cases} k_1 = \omega_n^2 \\ k_1.T_{iu} = 2.\xi.\omega_n \end{cases} &\Leftrightarrow \begin{cases} k_1 = \frac{k_{pu}}{T_{iu}.C} = \omega_n^2 \\ T_{iu} = \frac{2.\xi.\omega_n}{\omega_n^2} = \frac{2.\xi}{\omega_n} \end{cases} \\ &\Leftrightarrow \begin{cases} k_{pu} = \omega_n^2.T_{iu}.C \\ T_{iu} = \frac{2.\xi}{\omega_n} \end{cases} \end{aligned} \quad (26)$$

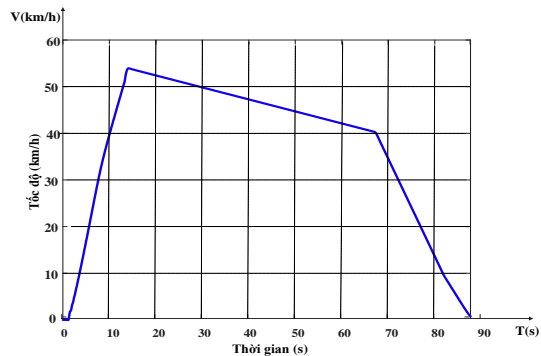
Thay số tính toán tìm được các tham số  $k_{pu}, T_{iu}$  của bộ điều khiển điện áp.

### 3. Kết quả mô phỏng

Kết quả mô phỏng được thực hiện trên các tham số thu thập được từ tuyến tàu điện đô thị Cát Linh - Hà Đông với 11 khu gian, 12 ga có tổng chiều dài 12,61 km [6]. Trong phần mô phỏng này minh chứng các nghiên cứu lý thuyết bằng kết quả mô phỏng trên một khu gian: Từ ga Cát Linh đến ga La Thành có khoảng cách 931 m, thời gian chạy: 87.7s gồm ba giai đoạn vận hành: Chế độ kéo, chế độ chạy đà, chế độ hãm dừng với quãng đường và thời gian được phân bố như trong chu trình chạy tàu thể hiện tại hình 14.



Hình 14. Chu trình chạy tàu.



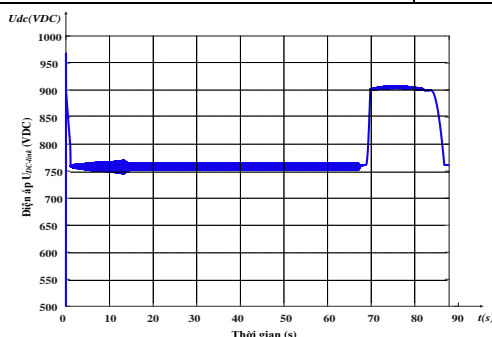
Hình 15. Đáp ứng tốc độ.

Kịch bản mô phỏng: Xét cho một khu gian, với tốc độ lớn nhất quá trình kéo 54,5 km/h, tốc độ hãm là 40,58 km/h như đáp ứng hình 15. So sánh mức độ tiết kiệm năng lượng trong trường hợp có hoặc không sử dụng chỉnh lưu tích cực đặt tại trạm điện kéo. Thiết kế mạch vòng điện áp đảm bảo điện áp trên Udc-link ổn định tại giá cho phép - thể hiện sự cân bằng năng lượng giữa nguồn và tải. Khi sử dụng bộ chỉnh lưu diode như đáp ứng trên hình 16, giá trị điện áp này sẽ có sự

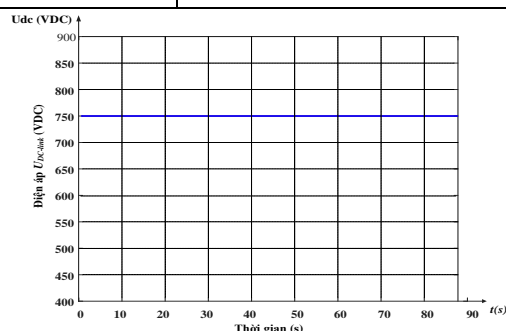
thăng giáng, và trong quá trình hãm (từ giây 76 đến giây 88,7) điện áp Udc-link tăng vọt đến 900 VDC nên phải sử dụng hãm điện trở (để hạn chế giá trị điện áp tăng khi hãm tái sinh). Sử dụng bộ chỉnh lưu tích cực đặt tại trạm điện kéo thì giá trị điện áp Udc-link được duy trì ổn định tại 750 VDC và có sự dao động rất nhỏ như đáp ứng trong hình 17, thể hiện bộ chỉnh lưu tích cực đã cho dòng năng lượng chảy hai chiều, có sự cân bằng năng lượng giữa nguồn cấp và tải tàu điện.

Bảng 1. Các thông số đoàn tàu [6].

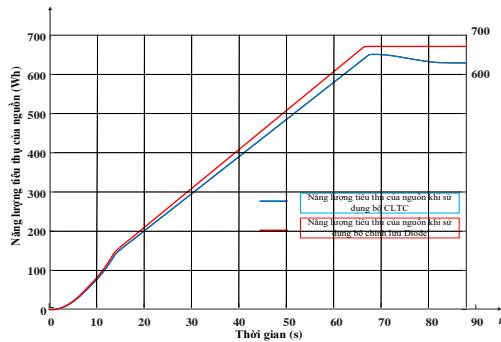
Thông số đoàn tàu	Đơn vị đo	Giá trị
Thiết lập đoàn tàu 2M2T		
Khối lượng đoàn tàu khi đầy tải (M)	[kg]	247000
Số động cơ (N)		08
Công suất động cơ	[kW]	200
Tốc độ lớn nhất ( $v_{max}$ )	[km/h]	80
Tốc độ cơ bản (vb)	[km/h]	35
Gia tốc lớn nhất/Gia tốc hãm	[m/s <sup>2</sup> ]	0.94/1
Hệ số cản trở a	[KN]	7.75
Hệ số cản trở b	[kg/s]	0.062367
Hệ số cản trở c	[kg/m]	0.0113
Đường kính bánh xe ( $D_{wh}$ )	[m]	0.84
Tỉ số truyền (i)		5.3:1
Hiệu suất hộp số ( $\eta_{mech}$ )		0.95
Hiệu suất động cơ ( $\eta_{em}$ )		0.9
Điện trở hãm	[ $\Omega$ ]	4
Mô men quán tính đoàn tàu ( $J_{eq}$ )	[kg.m <sup>2</sup> ]	179



Hình 16. Đáp ứng điện áp UDC-link với chỉnh lưu diode.



Hình 17. Đáp ứng điện áp trên UDC-link khi sử dụng bộ chỉnh lưu tích cực.



**Hình 18.** So sánh mức năng lượng tiêu thụ khi sử dụng bộ chỉnh lưu Diode và sử dụng bộ chỉnh lưu tích cực.

Hình 18 minh họa mức năng lượng tiêu thụ trong trường hợp sử dụng bộ chỉnh lưu tích cực so sánh với trường hợp chỉnh lưu diode. Trong đó, đường màu đỏ - năng lượng nguồn tiêu thụ khi sử dụng bộ chỉnh lưu diode là 658 Wh, đường màu xanh - năng lượng nguồn tiêu thụ khi sử dụng bộ chỉnh lưu tích cực đặt tại trạm điện kéo là 629 Wh. Vậy mức năng lượng tiết kiệm khi sử dụng bộ chỉnh lưu tích cực là 4,4%.

#### 4. Kết luận

Bài báo đề xuất giải pháp tiết kiệm năng lượng vận hành tàu điện đô thị bằng bộ chỉnh lưu tích cực thay thế cho chỉnh lưu diode đặt tại trạm điện kéo. Trong đó, tập trung thiết kế điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực theo phương pháp VOC. Các kết quả mô phỏng đã minh chứng tính đúng đắn và hiệu quả của phương pháp điều khiển VOC với mức năng lượng tiết kiệm được là 4,4%. Những kết quả trong bài báo là cơ sở để nhóm tác giả tiếp tục các nghiên cứu tiếp theo, kết hợp các giải pháp nhằm tăng tỷ lệ tiết kiệm năng lượng vận hành đoàn tàu lên cao hơn.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] An Thị Hoài Thu Anh (2019), *Về một giải pháp điều khiển quá trình trao đổi năng lượng hãm của tàu điện đường sắt đô thị Việt Nam*, Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật, trường Đại học Giao thông vận tải;
- [2] A. Anh et al. (2018), *Braking energy recuperation for electric traction drive in urban rail transit network based on control supercapacitor energy storage system*, Journal of Electrical Systems. Volume 14, PP. 99-114 ;
- [3]
- [4] A. Al-Ogaili et al. (2019), *A three-level universal electric vehicle charger based on voltage-oriented control and pulse-width modulation*, Energies. Volume 12, PP. 1-20;
- [5] D. Cornic (2010), *Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation*, Conference on Electrical systems for aircraft, railway and ship propulsion(ESARS), 19-21 Oct. 2010, Bologna, Italy, PP. 1-9 ;
- [6] O. Dutta, M. Saleh, M. Khodaparastan, A. Mohamed (2020), *A Dual-Stage Modeling and Optimization Framework for Wayside Energy Storage in Electric Rail Transit Systems*, Energies. Volume 13, PP. 1614-1640 ;
- [7] Dự án thiết kế xây dựng tuyến đường sắt đô thị Hà Nội - Tuyến Cát Linh - Hà Đông (2014), *Phần 2 Tổng hợp, quyển 2 Quản lý vận hành và khai thác chạy tàu* ;
- [8] A. Fekik (2015), *A fuzzy-logic based controller for three phase PWM rectifier with voltage oriented control strategy*, International journal of circuits, systems and signal processing. Volume 9, PP. 412-419 ;
- [9] M. Khodaparastan, O. Dutta, M. Saleh (2019), *Modeling and simulation of dc electric rail transit systems with wayside energy storage*, IEEE Transactions on Vehicular Technology. Volume 68, PP. 2218-2228;
- [10] M. Khodaparastan, A. Mohamed (2019), *Flywheel vs. Supercapacitor as Wayside Energy Storage for Electric Rail Transit Systems*, Inventions. Volume 4, PP. 62-77 ;
- [11] W. Lei, L. Zhigang, Z. Gang (2009), *A novel traction supply system for urban rail transportation with bidirectional power flow and based on PWM rectifier*, The International Conference on Energy and Environment Technology, Guilin, China, Volume 2, PP. 40-42 ;
- [12] J. Liu, H. Guo, Y. Yu (2016), *Research on the cooperative train control strategy to reduce energy consumption*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. Volume 18, PP.1134-1142 ;
- [13] Nguyễn Doãn Phước (2009), *Lý thuyết điều khiển tuyến tính*, Tái bản lần thứ 4, NXB Khoa học Kỹ thuật, Hà Nội ;
- [14] M. Steiner et al. (2007), *Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles*, European conference on power electronics and applications, 2-5 Sept. 2007, Aalborg, Denmark. PP. 1-10 ;

- [15] S. Su, T. Tang, Y. Wang (2016), *Evaluation of strategies to reducing traction energy consumption of metro systems using an optimal train control simulation model*, *Energies*. Volume 9, PP. 1-19.

**Ngày nhận bài: 04/05/2021**

**Ngày chuyển phản biện: 07/05/2021**

**Ngày hoàn thành sửa bài: 28/05/2021**

**Ngày chấp nhận đăng: 01/06/2021**

*Ngoài hình ảnh, bảng biểu đã chú thích nguồn từ tài liệu tham khảo,  
những hình ảnh, bảng biểu còn lại đều thuộc bản quyền của tác giả/nhóm tác giả.*