

Hệ thống cung cấp điện sức kéo một chiều tuyến Nhổn - Ga Hà Nội: Nguồn lưới kết hợp PV áp mái nhà ga

■ TS. AN THỊ HOÀI THU ANH

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: htanh.ktd@utc.edu.vn

TÓM TẮT: Bài báo đề xuất một hệ thống nguồn cấp điện kéo DC tích hợp hệ thống năng lượng mặt trời với bộ chỉnh lưu tích cực thay thế cho bộ chỉnh lưu diot đặt tại trạm điện kéo. Bộ chỉnh lưu tích cực có nhiệm vụ thu hồi năng lượng hãm tái sinh, chuyển năng lượng mặt trời từ Bus DC về nguồn lưới. Trong bài báo này giới thiệu cấu trúc, thiết kế điều khiển các bộ biến đổi. Bộ tăng áp sử dụng trong hệ thống năng lượng mặt trời sử dụng kỹ thuật điều khiển backstepping, bộ chỉnh lưu tích cực áp dụng thuật toán bám lưới VOC gồm ba mạch vòng: Vòng khóa pha, mạch vòng dòng, mạch vòng điện áp và đánh giá năng lượng tiết kiệm từ nguồn lại. Kết quả mô phỏng kiểm chứng các thuật toán điều khiển và đánh giá năng lượng tiết kiệm được từ hệ với thông số mô phỏng được khảo sát trên tuyến đường sắt đô thị tuyến Nhổn - Ga Hà Nội.

TỪ KHÓA: Bộ tăng áp, bộ chỉnh lưu tích cực, kỹ thuật điều khiển backstepping, thuật toán VOC, hệ thống PV.

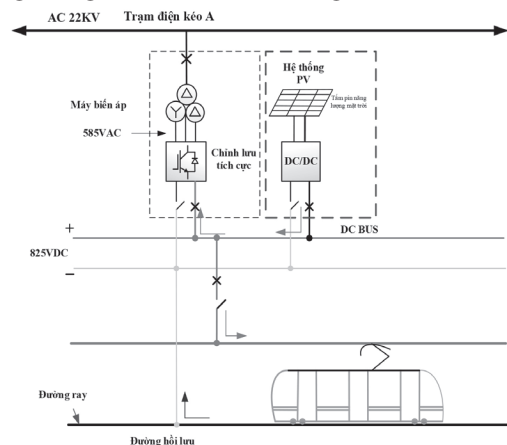
ABSTRACT: The article proposes the DC traction power supply system integrating a solar energy system with a active rectifier replacing the diode rectifier set at the traction substation. This rectifier is responsible for recovering regenerative energy, transferring solar energy from the DC Bus to the grid source. This paper introduces the structure, design and control of the conversion modules. The boost converter used in the solar energy system employs backstepping control technique, while the active rectifier applies the VOC (Voltage Oriented Control) algorithm consisting of three loop circuits: Phase-locked loop, current loop circuit, voltage loop circuit, and evaluates the energy saving from the hybrid source. Simulation results have verified the control algorithms and assessed saving energy from the system with simulation parameters surveyed on the urban railway line Nhon - Hanoi station.

KEYWORDS: Boost DC-DC converter, active rectifier, backstepping control technique, VOC algorithm, PV system.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống giao thông đô thị là một trong những giải pháp hiệu quả giải quyết ách tắc giao thông, giảm ô nhiễm môi trường trong các thành phố lớn tại Việt Nam do an toàn, đúng giờ và có sức chuyên chở lớn. Tuy nhiên, phương tiện giao thông này cũng là nguồn tiêu thụ năng lượng rất lớn [1]. Do vậy, rất nhiều nhóm giải pháp về tiết kiệm năng lượng vận hành đoàn tàu đã được nghiên cứu và triển khai trên các tuyến đường sắt đô thị trên thế giới. Nhóm giải pháp thu hồi năng lượng hãm tái sinh bằng bộ tích trữ năng lượng đặt tại trạm điện kéo hoặc trên tàu [2, 3]; bằng các bộ biến đổi có khả năng trao đổi năng lượng hai chiều tại trạm điện kéo [4], điều độ chạy tàu phân bổ đoàn tàu vận hành ở chế độ kéo trao đổi năng lượng với đoàn tàu khác ở chế độ hãm [5]; ứng dụng các thuật toán tối ưu trong xác định đường cong tốc độ chạy tàu tối ưu nhằm tiết kiệm điện năng [6], sử dụng hệ thống năng lượng mặt trời với ưu điểm không gây ô nhiễm, không tạo ra tiếng ồn trong hệ thống nguồn lại cấp cho đoàn tàu [7].

Trong bài báo đề xuất một hệ thống cung cấp điện lại nguồn lưới và hệ thống PV áp mái kết hợp bộ chỉnh lưu tích cực đặt tại trạm điện kéo thu hồi năng lượng hãm tái sinh và chuyển năng lượng từ hệ thống PV về lưới. Cấu trúc của bài báo bao gồm: Phần 1 giới thiệu các công trình nghiên cứu và đề xuất nội dung nghiên cứu, Phần 2 mô hình hóa các bộ biến đổi Boost, bộ chỉnh lưu tích cực; Phần 3 thiết kế điều khiển cho các bộ biến đổi; Phần 4 đánh giá thuật toán và năng lượng tiết kiệm được của nguồn lại.



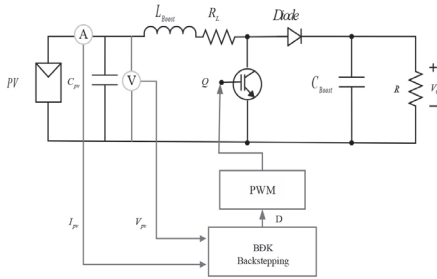
Hình 1.1: Hệ thống PV trong trạm điện kéo

2. CẤU TRÚC MẠCH LỰC CỦA CÁC BỘ BIẾN ĐỔI

Hệ thống PV sẽ đẩy năng lượng từ các tấm PV lên DC Bus để cung cấp năng lượng cho tàu và cũng như trả lưới. Nhưng thay vì đẩy năng lượng trực tiếp từ hệ thống PV lên DC Bus thì năng lượng sẽ qua bộ biến đổi tăng áp. Nhằm mục đích ổn định điện áp đầu ra trên DC Bus khi kết nối và điều khiển để năng lượng từ các tấm PV ra là lớn nhất. Cách thức kết nối các tấm PV vào hệ thống tàu điện được thể hiện trong *Hình 1.1*. *Hình 1.1* chỉ ra hệ thống gồm trạm điện kéo A, PV áp mái và đoàn tàu chạy trong khu gian.

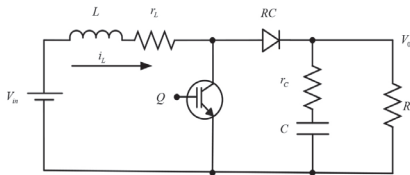
2.1. Cấu trúc mạch lực bộ tăng áp

Trong hệ thống pin mặt trời ứng dụng cho hệ thống tàu điện, một bộ biến đổi tăng áp DC-DC được thiết kế điều khiển theo kỹ thuật backstepping. Bộ biến đổi tăng áp DC-DC để điều chỉnh nguồn điện áp lấy từ nguồn pin mặt trời, chuyển đổi cung cấp điện áp lớn nhất phù hợp với hệ thống tàu điện được thể hiện trong *Hình 2.1*.

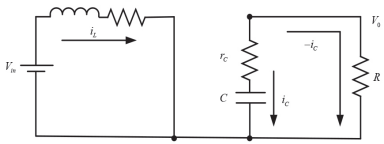


Hình 2.1: Bộ chuyển đổi tăng áp với tấm pin PV với kỹ thuật backstepping

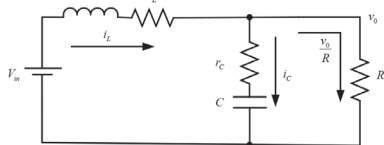
Với cấu trúc mạch lực của bộ tăng áp chỉ ra trong *Hình 2.2*; mô hình hóa bộ biến đổi tăng áp thông qua hai trạng thái khi van Q dẫn như *Hình 2.3* và van Q khóa như *Hình 2.4* [8].



Hình 2.2: Cấu trúc mạch lực của bộ chuyển đổi tăng áp DC-DC



Hình 2.3: Sơ đồ bộ tăng áp trong trạng thái 1 (Q: ON)



Hình 2.4: Sơ đồ bộ tăng áp trong trạng thái 2 (Q: OFF)

Phương trình trạng thái cho trạng thái 1 có dạng:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(-r_L i_L + V_{in}) \\ \frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}\left(-\frac{1}{R+r_C}v_C\right) \\ v_o = \frac{R}{R+r_C}(v_C + r_L i_L) \end{cases} \quad (1)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C(R+r_C)} \end{bmatrix}; B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}; C_1 = \begin{bmatrix} \frac{R}{R+r_C} & \frac{R}{R+r_C} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; D_1 = 0 \quad (2)$$

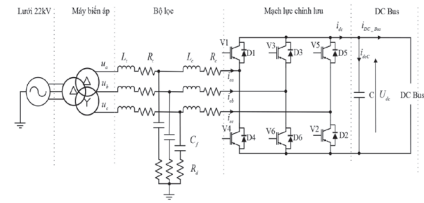
Phương trình trạng thái cho trạng thái 2 có dạng:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}\left(\frac{Rr_C}{R+r_C}i_L - \frac{R}{R+r_C}v_C + V_{in}\right) \\ \frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}\left(\frac{R}{R+r_C}i_L - \frac{1}{R+r_C}v_C\right) \\ v_o = \frac{R}{R+r_C}(v_C + r_L i_L) \end{cases} \quad (3)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}\left(\frac{Rr_C}{R+r_C} - r_L\right) & -\frac{R}{L(R+r_C)} \\ \frac{R}{C(R+r_C)} & -\frac{1}{C(R+r_C)} \end{bmatrix}; B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}; C_2 = \begin{bmatrix} \frac{Rr_C}{R+r_C} & \frac{R}{R+r_C} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; D_2 = 0 \quad (4)$$

2.2. Cấu trúc mạch lực bộ chỉnh lưu tích cực

Khi tàu điện vận hành trong giai đoạn hãm dừng, động cơ kéo làm việc như máy phát trả năng lượng về lưới. Nhưng do bộ chỉnh lưu diot không cho năng lượng trả về lưới nên năng lượng hãm tái sinh này bị đốt trên các điện trở hãm gây lãng phí điện năng. Do vậy, trong phần nội dung này sẽ đề cập thay thế bộ chỉnh lưu diot bằng bộ chỉnh lưu tích cực có khả năng trao đổi năng lượng hai chiều với cấu trúc mạch được mô tả trong *Hình 2.5* [8, 9].



Hình 2.5: Sơ đồ mạch lực của bộ chỉnh lưu tích cực nối lưới

Hình 2.5 chỉ ra bộ chỉnh lưu tích cực nối lưới bao gồm nguồn, máy biến áp, mạch lọc. Bộ chỉnh lưu tích cực với: L_L - Cuộn cảm phía máy biến áp; R_L - Điện trở phía máy biến áp; L_C - Cuộn cảm phía chỉnh lưu; R_C - Điện trở phía chỉnh lưu; C_f - Tụ điện lọc; R_d - Điện trở giảm cộng hưởng; u_a, u_b, u_c - Điện áp thứ cấp của máy biến áp.

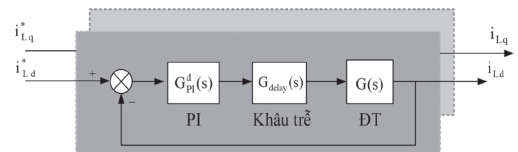
3. THIẾT KẾ ĐIỀU KHIỂN CÁC BỘ BIẾN ĐỔI

Trong nội dung Phần 3 thực hiện thiết kế điều khiển cho bộ chỉnh lưu tích cực và bộ tăng áp.

3.1. Thiết kế điều khiển bộ chỉnh lưu tích cực

Thiết kế điều khiển cho bộ chỉnh lưu tích cực theo phương pháp bám lưới VOC gồm ba mạch vòng: Mạch vòng dòng điện, mạch vòng điện áp và vòng khóa pha.

3.1.1. Thiết kế bộ điều khiển dòng điện



Hình 3.1: Sơ đồ mạch vòng điều chỉnh dòng điện

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

$$\begin{cases} u_{Ld} = Ri_{Ld} + L \frac{di_{Ld}}{dt} - \omega_L Li_{Lq} + u_{sd} \\ u_{Lq} = Ri_{Lq} + L \frac{di_{Lq}}{dt} + \omega_L Li_{Ld} + u_{sq} \end{cases} \quad (5)$$

Khâu PI có phương trình:

$$G_{PI}^d(s) = k_{PI} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = \frac{k_{PI}(1 + T_i s)}{T_i s} \text{ với } T_i = \frac{k_{PI}}{k_{ii}} \quad (6)$$

Đơn giản hóa hàm truyền bằng cách chọn hằng số thời gian T_i bằng với hằng số thời gian lọc T_{φ} nên hàm truyền hệ kín có thể được viết lại như sau:

$$G_k(s) = \frac{k_{pi}}{Ls(1+1.5T_s s) + k_{pi}} = \frac{\frac{2k_{pi}}{3T_s L}}{s^2 + \frac{2}{3T_s} s + \frac{2k_{pi}}{3T_s L}} \quad (7)$$

Hệ thống là hàm bậc hai với:

$$\omega_n^2 = \frac{2k_{pi}}{3T_s L} \text{ và } 2\xi\omega_n = \frac{2}{3T_s}$$

Trong đó: ω_n - Tần số dao động riêng.

ξ - Hệ số dao động tắt dần thường được chọn $\xi = 1/\sqrt{2}$ trong thực nghiệm để độ quá điều chỉnh phản hồi không quá 5%.

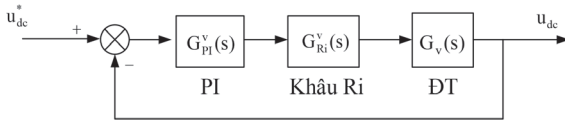
Từ đây ta có thông số bộ điều khiển là:

$$\begin{cases} T_f = \frac{L}{R} \\ 4\xi^2\omega_n^2 = \frac{4}{9T_s^2} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} T_f = \frac{L}{R} = T_i = \frac{k_{pi}}{k_{hi}} \\ \frac{4\xi^2 2k_{pi}}{3T_s L} = \frac{4}{9T_s^2} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k_{hi} = \frac{L}{6\xi^2 T_i T_f} \\ k_{pi} = \frac{L}{6\xi^2 T_i} \end{cases} \quad (8)$$

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

3.1.2. Thiết kế bộ điều khiển điện áp

Vì bộ điều khiển dòng R_{li} đảm bảo nhanh, chính xác và không tương tác nên có thể giả thiết bộ R_{li} là khâu 1-1.



Hình 3.2: Sơ đồ mạch vòng điều khiển điện áp

Thiết kế bộ điều khiển tốc độ theo chuẩn tối ưu đối xứng với hàm chuẩn:

$$G_k(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

Suy ra:

$$\omega_n^2 = k_0 \text{ và } 2\xi\omega_n = k_0 T_{iv}$$

Trong đó: ω_n - Tần số dao động riêng;

ξ - Hệ số dao động tắt dần ($0 < \xi < 1$)

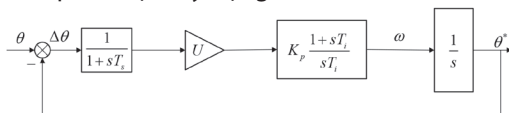
Thông số cho bộ điều khiển điện áp là:

$$\Rightarrow \begin{cases} k_0 = \omega_n^2 \\ k_0 T_{iv} = 2\xi\omega_n \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k_0 = \frac{3V_m k_{pv}}{2V_{dc} C T_{iv}} = \omega_n^2 \\ T_{iv} = \frac{2\xi}{\omega_n} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k_{pv} = \frac{2\xi\omega_n 2V_{dc} C}{3V_m} \\ k_{iv} = \frac{2\omega_n^2 V_{dc} C}{3V_m} \end{cases} \quad (10)$$

Thay số tính toán thu được các tham số K_{pv} , K_{iv} của bộ điều chỉnh điện áp.

3.1.3. Thiết kế vòng khóa pha

Với khoảng biến thiên $\Delta\theta$ nhỏ, ta thực hiện tuyến tính hóa xung quanh điểm làm việc $U \sin(\Delta\theta) \approx U \Delta\theta$, ω_{ref} coi như nhiều hằng số. Xét tới trễ do quá trình trích mẫu với chu kỳ T_s , coi như một khâu quán tính bậc nhất, cấu trúc bộ vòng khóa pha được xây dựng như hình.



Hình 3.3: Sơ đồ tuyến tính hóa mạch vòng khóa pha PLL

Thiết kế BĐK tốc độ theo chuẩn tối ưu đối xứng với hàm chuẩn:

$$G_k(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (11)$$

Trong đó: ω_n - Tần số dao động riêng;

ξ - Hệ số dao động tắt dần ($0 < \xi < 1$)

Thời gian để giá trị đầu ra nằm trong khoảng sai lệch 2% so với giá trị đặt là t_s .

$$\Rightarrow \begin{cases} k_1 = \omega_n^2 \\ k_1 T_{i0} = 2\xi\omega_n \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k_1 = \frac{k_{p0} U}{T_{i0}} = \omega_n^2 \\ T_{i0} = \frac{2\xi\omega_n}{\omega_n^2} = \frac{2\xi}{\omega_n} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k_{p0} = \frac{\omega_n^2 T_{i0}}{U} \\ T_{i0} = \frac{2\xi}{\omega_n} \end{cases} \quad (12)$$

Thay số tính toán thu được các tham số $K_{p\theta}$, $K_{i\theta}$ của vòng khóa pha PLL.

3.2. Thiết kế điều khiển backstepping cho bộ tăng áp

Từ sơ đồ cấu trúc điều khiển thể hiện trong Hình 2.1. Hệ thống pin mặt trời có thể được mô tả dưới dạng phương trình như sau:

$$\begin{cases} C_i \dot{U}_{pv} = I_{pv} - I_L \\ L \dot{I}_L = U_{pv} - (1-D)V_b \end{cases} \quad (13)$$

Trong đó: D - Tham số điều chỉnh; C_i , L - Lấn lượt là các giá trị của tụ điện và cuộn cảm trong Hình 2.1.

I_{pv} , U_{pv} - Dòng điện và điện áp đầu ra của khối pin mặt trời; I_L , V_b - Lấn lượt là dòng điện chạy qua cuộn cảm và điện áp của tải. Đặt $d=1-D$ thì lúc đó (13) trở thành phương trình sau:

$$\begin{cases} C_i \dot{U}_{pv} = I_{pv} - I_L \\ L \dot{I}_L = U_{pv} - dV_b \end{cases} \quad (14)$$

Xét sai lệch giữa điện áp đầu ra pin mặt trời và điện áp đặt:

$$e = V_d - U_{pv} \quad (15)$$

Đạo hàm 2 vế ta được:

$$\dot{e} = \dot{V}_d - \dot{U}_{pv} \quad (16)$$

Nhân cả 2 vế của (16) ta được phương trình sau:

$$C_i \dot{e} = C_i \dot{V}_d - C_i \dot{U}_{pv} \quad (17)$$

Thay (14) vào (17) ta được:

$$C_i \dot{e} = C_i \dot{V}_d - I_{pv} + I_L \quad (18)$$

Xét hàm Lyapunov $V_1 = \frac{C_i}{2} e^2$ xác định dương. Đạo hàm V_1 ta được:

$$\dot{V}_1 = C_i e \dot{e} \quad (19)$$

Thay (17) vào (19) ta được:

$$\dot{V}_1 = e(C_i \dot{V}_d - I_{pv} + I_L) \quad (20)$$

Xác định được biến điều khiển ảo I_L như sau:

$$I_L = -k_1 e - C_i \dot{V}_d + I_{pv} \quad (21)$$

Khi đó: $\dot{V}_1 = -k_1 e^2 \leq 0$ và sẽ ổn định tại 0. Nhưng I_L không phải là tín hiệu điều khiển của hệ thống. Ta đặt:

$$I_d = -k_1 e - C_i \dot{V}_d + I_{pv} \quad (22)$$

Và điều khiển cho I_L ổn định bằng I_d thì sai lệch e sẽ ổn định tại 0 và lúc đó hệ thống sẽ ổn định. Ta xét sai lệch $z = I_d - I_L$ có đạo hàm:

$$\dot{z} = \dot{I}_d - \dot{I}_L \quad (23)$$

Nhân cả 2 vế với L ta được phương trình tương đương sau:

$$L\dot{z} = L\dot{I}_d - L\dot{I}_L \quad (24)$$

Thay (14) vào (24) ta được phương trình sau:

$$L\dot{z} = L\dot{I}_d - U_{pv} + dV_b \quad (25)$$

Để z ổn định tại 0 thì ta xét ứng viên hàm Lyapunov xác định dương. Đạo hàm của V_2 xác định theo:

$$\dot{V}_2 = L\dot{z}z \quad (26)$$

Thay (25) vào (26) ta được phương trình sau:

$$\dot{V}_2 = z(L\dot{I}_d - U_{pv} + dV_b) \quad (27)$$

Ta xác định tín hiệu điều khiển d như sau:

$$d = \frac{1}{V_b} (-L\dot{I}_d + U_{pv} - Lk_2 z) \quad (28)$$

Khi đó: $\dot{V}_2 = -k_2 z^2 \leq 0$ và z sẽ ổn định tại 0, từ đó có được e sẽ

ổn định tại 0 và hệ thống sẽ ổn định theo chuẩn Lyapunov.
Vậy tín hiệu điều khiển của hệ thống:

$$D=1-d=1-\frac{1}{V_b}\left(-L\dot{I}_d+U_{pv}-Lk_2z\right) \tag{29}$$

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Các thông số đoàn tàu, động cơ kéo, trắc dọc đường được thu thập từ tuyến tàu điện đô thị Nhổn - Ga Hà Nội.

Khảo sát mặt bằng PV áp mái tại nhà ga Cầu Diễn nên biểu đồ chạy tàu được xây dựng theo tuyến Lê Đức Thọ - Cầu Diễn, đoàn tàu có 12 động cơ kéo đặt trên 3 toa, khoảng cách giữa Ga Lê Đức Thọ và Ga Cầu Diễn là 1.125 m, thời gian chạy trong khu gian là 76s, tốc độ chạy tàu tối đa đạt đến 60 km.

Bảng 4.1. Các thông số của đoàn tàu tuyến Nhổn - Ga Hà Nội

Các thông số của đoàn tàu	Đơn vị đo	Giá trị
Khối lượng đoàn tàu (M)	[kg]	192000
Số động cơ (N)		12
Gia tốc khi tàu tăng tốc	[m/s2]	1
Gia tốc kéo khi tàu hãm	[m/s2]	1,1
Gia tốc lớn nhất khi hãm khẩn cấp	[m/s2]	1,25
Hệ số cản trở a	[KN]	0,0115070
Hệ số cản trở b	[kg/s]	0,0003494
Hệ số cản trở c	[kg/m]	0,00005497
Đường kính bánh xe (Dwh)	[m]	0,84
Đường tỉ số truyền (i)		3,52:1
Mô-men quán tính đoàn tàu (Jeq)	[kg.m2]	227,78

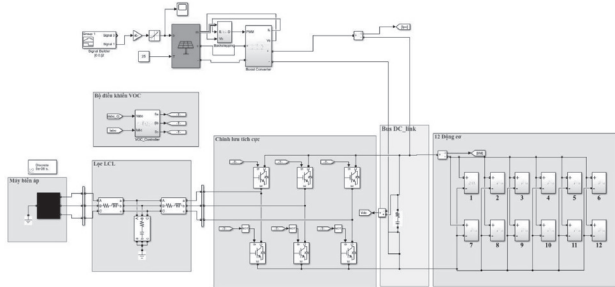
Bảng 4.2. Các thông số của động cơ kéo

Các thông số của động cơ KĐB rô-to lồng sóc	Đơn Vị	Giá trị
Công suất định mức (P _{nom})	[kW]	180
Điện áp định mức (U _{nom})	[V]	415
Số đôi cực (z _p)		2
Hệ số công suất (cosφ)		0,865
Tốc độ định mức (n _{nom})	[rpm]	1485
Mô-men quán tính động cơ (J)	[kg.m²]	11,2
Điện cảm Stator (L _s)	[mH]	0,0064
Điện cảm Rotor (L _r)	[mH]	0,0064
Điện trở Stator (R _s)	[Ω]	0,008
Điện trở Rotor (R _r)	[Ω]	0,008

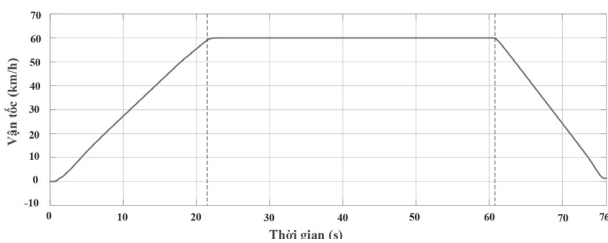
Bảng 4.3. Các thông số của hệ thống PV, bộ tăng áp tại Ga Cầu Diễn

Các thông số của hệ thống PV	Đơn Vị	Giá trị
Công suất lớn nhất của một tấm pin (P _{PV})	[W]	480
Điện áp hở mạch của một tấm pin (U _{oc})	[V]	42,71
Dòng điện ngắn mạch của một tấm pin (I _{sc})	[A]	14,31
Điện áp ở điểm công suất lớn nhất của một tấm pin (U _{mp})	[V]	35,38
Dòng điện ở điểm công suất lớn nhất của một tấm pin (I _{mp})	[A]	13,57
Số lượng tấm pin mắc nối tiếp để tạo thành một dãy	[Tấm]	9
Số lượng dãy mắc song song	[Dãy]	79
Tổng số lượng tấm pin	[Tấm]	711
Các thông số của bộ tăng áp		
Tần số phát xung chuyển mạch của bộ tăng áp (f _{sw} —DC/DC)	[Hz]	5.000
Tụ điện (C _{Boost})	[μF]	15.000
Cuộn cảm (L _{Boost})	[mH]	10
Điện trở trên tụ (r _{CBoost})	[Ω]	0,0038

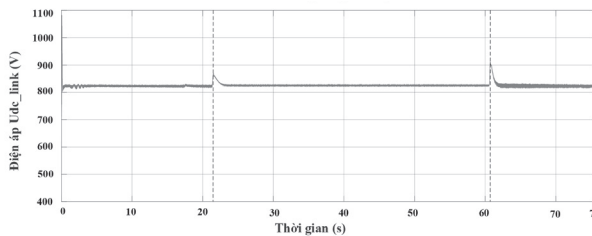
Kết quả các đáp ứng đánh giá quá trình trao đổi năng lượng khi sử dụng bộ chỉnh lưu tích cực kết hợp với hệ thống PV bao gồm: Tốc độ, điện áp trên DC Bus, công suất đoàn tàu, năng lượng khi có nguồn PV.



Hình 4.1: Bộ chỉnh lưu tích cực kết hợp với hệ thống PV và 12 động cơ truyền động

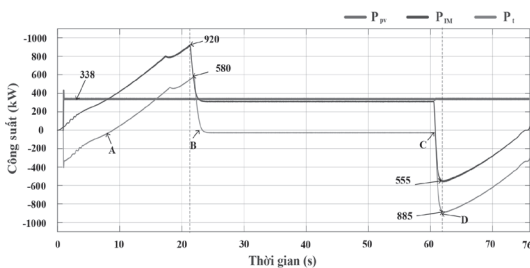


Hình 4.2: Đường cong tốc độ



Hình 4.3: Điện áp trên DC Bus

Hình 4.2 chỉ ra đáp ứng đường cong tốc độ qua 3 chế độ vận hành: Chế độ kéo, chế độ ổn tốc và chế độ hãm dừng. Với mạch vòng điện áp kiểm soát trao đổi năng lượng từ nguồn đến tải và từ tải về nguồn (hãm tái sinh) trong 3 giai đoạn vận hành của đoàn tàu đã đảm bảo đáp ứng điện áp trên Udc_link đạt giá trị đặt 825V DC hạn chế dao động điện áp trên lưới.



Hình 4.4: Công suất thu được phía nguồn (P_p), phía động cơ (P_m) và hệ thống PV (P_{pv})

Khi tàu điện vận hành trong chế độ kéo (giai đoạn A), động cơ cần huy động công suất (P_m) để kéo đoàn tàu, nguồn cấp được huy động từ nguồn lưới và nguồn PV. Trong chế độ chạy ổn tốc (giai đoạn BC), công suất cần cấp giảm đi. Sau thời điểm (C) là chế độ hãm dừng, động cơ

hoạt động trong chế độ máy phát trả năng lượng về lưới qua bộ chỉnh lưu tích cực. Do vậy, phía nguồn nhận năng lượng không chỉ từ hệ thống PV mà còn năng lượng hãm tái sinh thu hồi được khi tàu điện vận hành trong chế độ hãm. Hình 4.4 chỉ ra năng lượng thu được về lưới là 885 kW.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất giải pháp tiết kiệm năng lượng bằng hệ thống nguồn lai gồm nguồn lưới kết hợp PV áp mái nhà ga và thu hồi năng lượng hãm tái sinh trả lưới nhờ bộ chỉnh lưu tích cực đặt tại trạm điện kéo. Kết quả mô phỏng hệ thống PV áp mái thực hiện cho nhà ga Phú Diễn thuộc tuyến tàu điện đô thị Nhổn - Ga Hà Nội với kỹ thuật backstepping điều khiển bộ tăng áp, thuật toán bám lưới (VOC) áp dụng cho bộ chỉnh lưu tích cực đã chứng minh được năng lượng thu hồi về nguồn là 885 kW. Kết quả nghiên cứu của bài báo đã cho thấy tính khả thi cao trong các giải pháp tiết kiệm năng lượng vận hành các tuyến tàu điện đô thị của Việt Nam.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học GTVT trong Đề tài mã số T2024-DT-008.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Popescu, Mihaela and Alexandru Bitoleanu (2019), *A review of the energy efficiency improvement in DC railway systems*, Energies 12.6,1092.
- [2]. Ciccirelli, Flavio, Diego Iannuzzi and Pietro Tricoli (2012), *Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol.24, pp.36-49.
- [3]. Dutta, Oindrilla, et al. (2020), *A dual-stage modeling and optimization framework for wayside energy storage in electric rail transit system*, Energies 13.7, 1614.
- [4]. Zhou, Z., et al. 2012, *Load current observer based feed-forward DC bus voltage control for active rectifiers*, Electric power systems research, vol.84, no.1, pp.165-173.
- [5]. Zhou, Yuhe, et al. (2018), *Integrated optimization on train control and timetable to minimize net energy consumption of metro lines*, Journal of Advanced Transportation.
- [6]. Bao, K., Lu, S., Xue, F., & Tan, Z. (2017), *Optimization for train speed trajectory based on Pontryagin's Maximum Principle*, In 2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp.1-6
- [7]. Vasisht, M. S., Vashista, G. A., Srinivasan, J., & Ramasesha, S. K. (2017), *Rail coaches with rooftop solar photovoltaic systems: A feasibility study*, Energy, vol.118, pp.684-691.
- [8]. Seddik Bacha, Ilulian Munteanu, Antoneta I. Bratcu (2014), *Power Electronic Converters Modeling and Control*, Springer.
- [9]. Nguyễn Doãn Phước (2009), *Lý thuyết điều khiển tuyến tính*, NXB. Khoa học và Kỹ thuật.

Ngày nhận bài: 02/02/2024

Ngày nhận bài sửa: 28/02/2024

Ngày chấp nhận đăng: 19/3/2024