



MODELING AND INFLUENCE RESEARCH OF THE URBAN RAILWAY TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM CAT LINH – HADONG WITH 24 PULSE RECTIFIER UNIT ON THE GRID VOLTAGE HARMONICS BASED ON MATLAB

Trinh Duc Quyen¹, Dang Viet Phuc^{2,*}

¹Hanoi metro company, No 6 Ho Xuan Huong Street, Hanoi, Vietnam

²University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 23/6/2020

Revised: 26/7/2020

Accepted: 14/8/2020

Published online: 28/8/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.6.6>

* *Corresponding author*

Email: dvietphuc1984@utc.edu.vn; Tel: 0966802926

Abstract. The article mainly studies the voltage harmonic problems caused by the urban railway traction power supply system Cat Linh – Ha Dong on power grid 22 kV. The model of traction power supply system with 24-pulse rectifier units is worked out in software environment Matlab/Simulink. The contents of each voltage harmonic in result of simulation were obtained. The data of spectral analysis of voltage were compared with permitted levels as per the relevant standards of harmonic content in Vietnam power system. The simulation results show that the voltage harmonics generated by the traction power supply system is maximum of 23 and 25 times.

Keywords: urban railway system, traction power supply system, 24-pulse uncontrolled rectifier unit, harmonic analysis, voltage harmonic.

© 2020 University of Transport and Communications



MÔ HÌNH HÓA VÀ NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA HỆ THỐNG CUNG CẤP ĐIỆN KÉO TUYẾN ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ CÁT LINH – HÀ ĐÔNG SỬ DỤNG CHỈNH LƯU 24-XUNG LÊN SÓNG HÀI ĐIỆN ÁP LƯỚI TRÊN PHẦN MỀM MATLAB

Trịnh Đức Quyền¹, Đặng Việt Phúc^{2,*}

¹Công ty TNHH MTV đường sắt Hà Nội, Số 8 Hồ Xuân Hương, Hà Nội, Việt Nam

²Trường 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: 23/6/2020

Ngày nhận bài sửa: 26/7/2020

Ngày chấp nhận đăng: 14/8/2020

Ngày xuất bản Online: 28/8/2020

<https://doi.org/10.25073/tcsj.71.6.6>

* Tác giả liên hệ

Email: dvietchuc1984@utc.edu.vn; Tel:0966802926

Tóm tắt. Bài báo tập trung nghiên cứu vấn đề sóng hài điện áp gây ra bởi hệ thống cung cấp điện kéo tuyến đường sắt đô thị Cát Linh - Hà Đông lên lưới điện 22 kV. Mô hình mô phỏng hệ thống cung cấp điện kéo sử dụng tổ hợp chỉnh lưu 24-xung được xây dựng trên phần mềm Matlab/Simulink. Kết quả mô phỏng đưa ra biểu đồ cột các thành phần sóng hài điện áp. Dữ liệu phân tích phổ điện áp được đánh giá với giá trị cho phép theo tiêu chuẩn tương ứng về các mức sóng hài của hệ thống điện Việt Nam. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng thành phần sóng hài điện áp bậc 23 và 25 tạo ra bởi hệ thống cung cấp điện kéo có giá trị lớn nhất.

Từ khóa: Hệ thống đường sắt đô thị, hệ thống cung cấp điện kéo, tổ hợp chỉnh lưu không điều khiển 24 – xung, phân tích sóng hài, sóng hài điện áp.

© 2020 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong quá trình phát triển kinh tế, rất nhiều nước trên thế giới gặp phải vấn đề tăng trưởng nhanh về dân số ở các đô thị lớn. Cơ sở hạ tầng, hệ thống giao thông vận tải không đáp

ứng được nhu cầu đi lại hàng ngày của người dân. Đường sắt đô thị là loại hình giao thông vận tải có thể đáp ứng nhu cầu vận chuyển hành khách, không tạo ra ô nhiễm môi trường về khí thải trong các thành phố hiện đại.

Hiện nay, tuyến đường sắt đô thị (ĐSĐT) Cát Linh – Hà Đông chuẩn bị vào giai đoạn vận hành tại thành phố Hà Nội. Hệ thống cung cấp điện của tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông có chứa các bộ biến đổi năng lượng không tuyến tính, được cấp điện từ lưới điện trung áp 22 kV của thành phố. Trong quá trình vận hành thương mại sẽ tạo nên nhiều nguồn gây ô nhiễm sóng hài xuất hiện lên lưới điện cung cấp phía ngoài. Các thành phần sóng hài xuất hiện trên mạng trung áp ảnh hưởng đến chất lượng điện năng, quá trình làm việc các trang thiết bị điện khác trong hệ thống điện lực [1,2,3,4,5]. Vì vậy vấn đề nghiên cứu ảnh hưởng của hệ thống cung cấp điện kéo đến sóng hài lưới điện ngày càng được quan tâm.

Trên thế giới, công nghệ điện khí hóa đường sắt đường dài và đô thị đã phát triển và gần như đạt được mức hoàn thiện ở các nước phát triển, trong khi đó, vấn đề này lại hoàn toàn mới ở nước ta. Trong những năm gần đây đã có một số công trình nghiên cứu trong nước liên quan đến kỹ thuật cấp điện kéo cho giao thông đường sắt như nghiên cứu lựa chọn công nghệ điện khí hóa đường sắt và giao thông thành phố [6], nghiên cứu công nghệ cung cấp điện cho giao thông đường sắt cao tốc và đô thị [7], đánh giá ảnh hưởng của sóng hài hệ thống cung cấp điện kéo đến hệ thống đảm bảo an toàn chạy tàu và sóng hài lưới điện phía ngoài [1,2,3], trong đó trạm điện kéo sử dụng tổ hợp bộ chỉnh lưu 6, 12-xung. Các nghiên cứu chưa đề cập đến ảnh hưởng hệ thống cung cấp điện kéo ĐSĐT sử dụng tổ hợp bộ chỉnh lưu 24-xung lên sóng hài điện áp lưới.

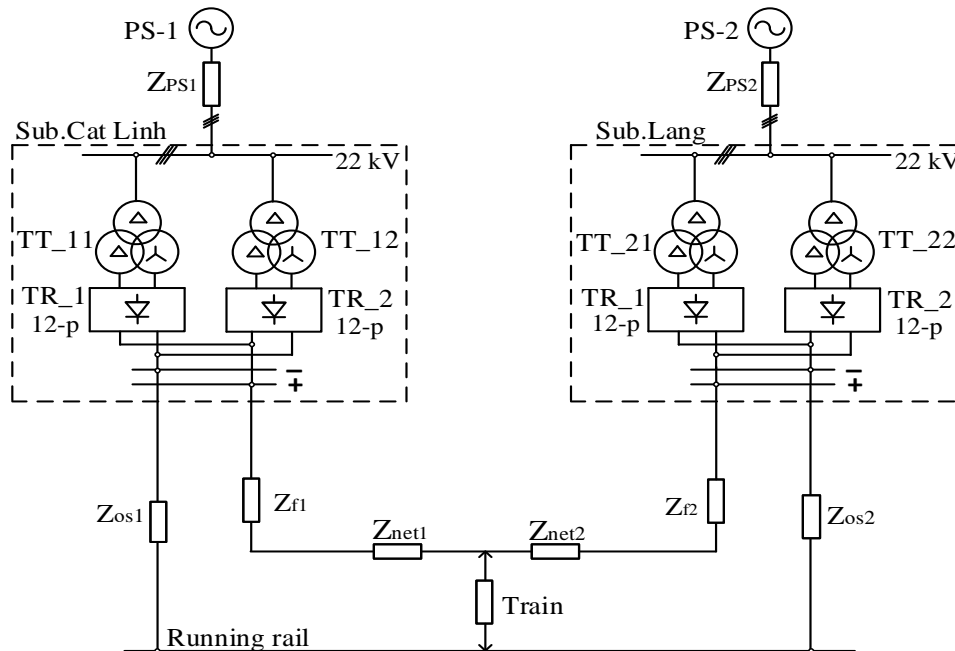
Vì vậy, bài báo này tập trung nghiên cứu các vấn đề về sóng hài gây ra bởi hệ thống cung cấp điện kéo sử dụng chỉnh lưu 24-xung tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông. Bài báo dựa vào thuyết minh thiết kế kỹ thuật của tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông để xây dựng mô hình mô phỏng, đánh giá ảnh hưởng sóng hài điện áp gây ra bởi hệ thống cung cấp điện kéo đến lưới điện phía ngoài 22 kV. So sánh kết quả mô phỏng với các giá trị tiêu chuẩn cho phép trong hệ thống điện lực Việt Nam.

2. NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG HỆ THỐNG CUNG CẤP ĐIỆN KÉO LÊN SÓNG HÀI ĐIỆN ÁP LƯỚI

2.1. Hệ thống cung cấp điện tuyến đường sắt đô thị Cát Linh – Hà Đông

Tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông là tuyến đường giao thông chính của mạng lưới giao

thông đường sắt đô thị Hà Nội. Tuyến đường chạy từ ga Cát Linh đến ga Hà Đông có tổng chiều dài là 13021,48 m, toàn bộ tuyến được thiết kế trên cao, tổng cộng có 12 ga, khoảng cách trung bình giữa các ga là 1156 m. Hệ thống cung cấp điện tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông bao gồm lưới điện trung áp phía ngoài 22 kV, trạm điện kéo (TĐK) hỗn hợp, trạm biến áp hạ áp, lưới điện kéo và hệ thống giám sát điện lực. Hệ thống sử dụng phương thức cấp điện kiểu phân tán từ hai trạm biến áp 110 kV Thành Công và Văn Quán của thống điện lực Hà Nội. Hệ thống cung cấp điện kéo sử dụng ray tiếp xúc thứ 3 cấp điện áp một chiều định mức 750 V, có 6 TĐK hỗn hợp đặt tại ga Cát Linh, ga đường Láng, ga Vành đai 3, ga bến xe Hà Đông, ga La Khê và ga Bến xe Hà Đông mới và một TĐK đặt tại khu Depot. Sơ đồ nguyên lý hệ thống cung cấp điện kéo tương ứng phân đoạn cấp điện giữa TĐK ga Cát Linh và TĐK ga đường Láng với khoảng cách xấp xỉ 2894 m, tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông được trình bày trên hình 1, bao gồm: hai nguồn cung cấp điện trung áp phía ngoài (PS-1, PS-2), TĐK cấu tạo từ các máy biến áp điện kéo (TT) và chỉnh lưu (TR), các đường dây cung cấp cho mạch tiếp xúc (Z_f), các đường dây hồi lưu về TĐK (Z_{os}), phân đoạn mạch tiếp xúc (Z_{net1} và Z_{net2}), đoàn tàu sử dụng hệ truyền động điện động cơ không đồng bộ rotor lồng sóc và đường ray chạy tàu.



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

Trong hệ thống cung cấp điện tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông, các TĐK được cung cấp điện từ lưới điện trung áp hệ thống điện lực Hà Nội dòng điện ba pha, cấp điện áp định mức 22 kV. Trong TĐK lắp đặt 2 tổ hợp bộ biến đổi máy biến áp khô công suất 1500 kVA và

chỉnh lưu 12-xung dòng điện định mức 2000A. Hai máy biến áp khô 3 pha 3 cuộn dây có dây quấn sơ cấp điện áp định mức 22 kV dịch pha tương ứng một góc lần lượt là $+7,5^\circ$ và $-7,5^\circ$, điện áp đầu ra hai dây quấn thứ cấp đấu hình Y và Δ với cấp điện áp định mức 590 V. Góc lệch pha điện áp dây giữa các dây quấn thứ cấp là 15° . Hai bộ chỉnh lưu 12-xung tương ứng nối với một máy biến áp điện kéo và nối trên cùng một thanh góp TĐK tạo thành chỉnh lưu 24-xung tương đương. Trong hệ thống cung cấp điện tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông, phân đoạn mạch tiếp xúc được cung cấp điện từ 2 phía với cấp điện áp một chiều định mức 750 V.

Đoàn tàu điện tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông có cấu tạo gồm 4 toa tàu, trong đó có 2 toa động lực sử dụng hệ truyền động điện động cơ không đồng bộ rotor lồng sóc. Mạch điện của toa tàu động lực bao gồm mạch lọc đầu vào, 2 bộ nghịch lưu biến đổi điện áp và tần số cung cấp cho động cơ và 4 động cơ điện kéo không đồng bộ 3 pha rotor lồng sóc. Hai động cơ được cung cấp điện từ một bộ nghịch lưu. Động cơ điện kéo không đồng bộ loại YQ-190-21 dạng thông gió tự nhiên, công suất định mức 190 kW, điện áp định mức 568 V, tần số định mức 64,2 Hz, tốc độ định mức 1900 vòng/phút, hiệu suất định mức 0,93 và số đôi cực $p = 2$.

2.2. Phân tích thành phần sóng hài của hệ thống cung cấp điện kéo sử dụng tổ hợp chỉnh lưu 24-xung

Hệ thống cung cấp điện kéo các tuyến ĐSĐT sử dụng các bộ chỉnh lưu với mục đích biến đổi dòng điện xoay chiều 3 pha tần số 50 Hz sang dòng điện một chiều cung cấp cho phụ tải đoàn tàu. Các bộ chỉnh lưu trong TĐK là nguồn chính gây nên sóng hài ảnh hưởng lên lưới điện trung áp 22 kV. Trong TĐK ứng dụng các bộ chỉnh lưu 12-xung, điện áp của nguồn xoay chiều cung cấp cho TĐK chứa các thành phần sóng hài bậc cao có tần số bằng một số nguyên lần của $12k \pm 1$ so với tần số cơ bản ($f = 50$ Hz) [2,3,4]. Trong TĐK sử dụng các bộ chỉnh lưu 24-xung, thành phần sóng hài bậc cao có tần số bằng một số nguyên lần $24k \pm 1$ so với tần số cơ bản xuất hiện trên lưới cấp điện phía ngoài hệ thống [3,4,5]. Các thành phần sóng hài này gây méo dạng sóng điện áp nguồn cung cấp và dòng điện tải.

Sóng hài dòng điện gây ra bởi chỉnh lưu 24-xung được phân tích theo phép biến đổi Fourier. Dòng điện nguồn cung cấp cho chỉnh lưu 24-xung có dạng $i_n(\omega t) = I_m \cos \omega t$. Phân tích hàm dòng điện nguồn cấp theo thời gian, thu được biểu thức (1) [8].

$$i_n(\omega t) = \frac{6I_m}{\pi} \left[\left(1 + \frac{2\pi}{3\sqrt{3}}\right) \cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 23\omega t + \frac{1}{13} \cos 25\omega t - \dots \right] \quad (1)$$

Trong đó: $i_{n.cb}(\omega t) = \frac{6I_m}{\pi} \left(1 + \frac{2\pi}{3\sqrt{3}}\right) \cos \omega t$ là thành phần ứng với tần số cơ bản, còn các

thành phần còn lại ứng với các dòng điện hài trên lưới cung cấp. Theo công thức (1) thì giá trị hiệu dụng thành phần dòng điện ứng với tần số cơ bản $I_{n.cb} = 2,9835I_m$. Giá trị hiệu dụng của dòng điện tổng các thành phần sóng hài $I_{n.sh} = 0,1878I_m$. Như vậy, tỉ lệ giữa giá trị hiệu dụng thành phần dòng điện tổng các thành phần sóng hài và giá trị hiệu dụng thành phần dòng điện ứng với tần số cơ bản là 0,063:1. Giá trị sóng hài dòng điện được đánh giá là giảm đi rất nhiều so với hệ thống sử dụng các tổ hợp chỉnh lưu 12-xung và 6-xung.

Sóng hài điện áp gây ra bởi chỉnh lưu 24-xung được đánh giá theo chỉ số tổng độ biến dạng sóng hài điện áp THD và độ biến dạng riêng lẻ các thành phần sóng hài IHD. Chỉ số THD là đại lượng thể hiện mức độ biến dạng tổng của điện áp, được tính theo công thức sau [2,4,5].

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N (U_n)^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

Độ biến dạng riêng lẻ (IHD) các thành phần sóng hài là tỷ lệ của giá trị hiệu dụng của sóng hài bậc cao với giá trị hiệu dụng của điện áp cơ bản [2,4,5]:

$$IHD(\%) = \frac{U_n}{U_1} \cdot 100\% \quad (3)$$

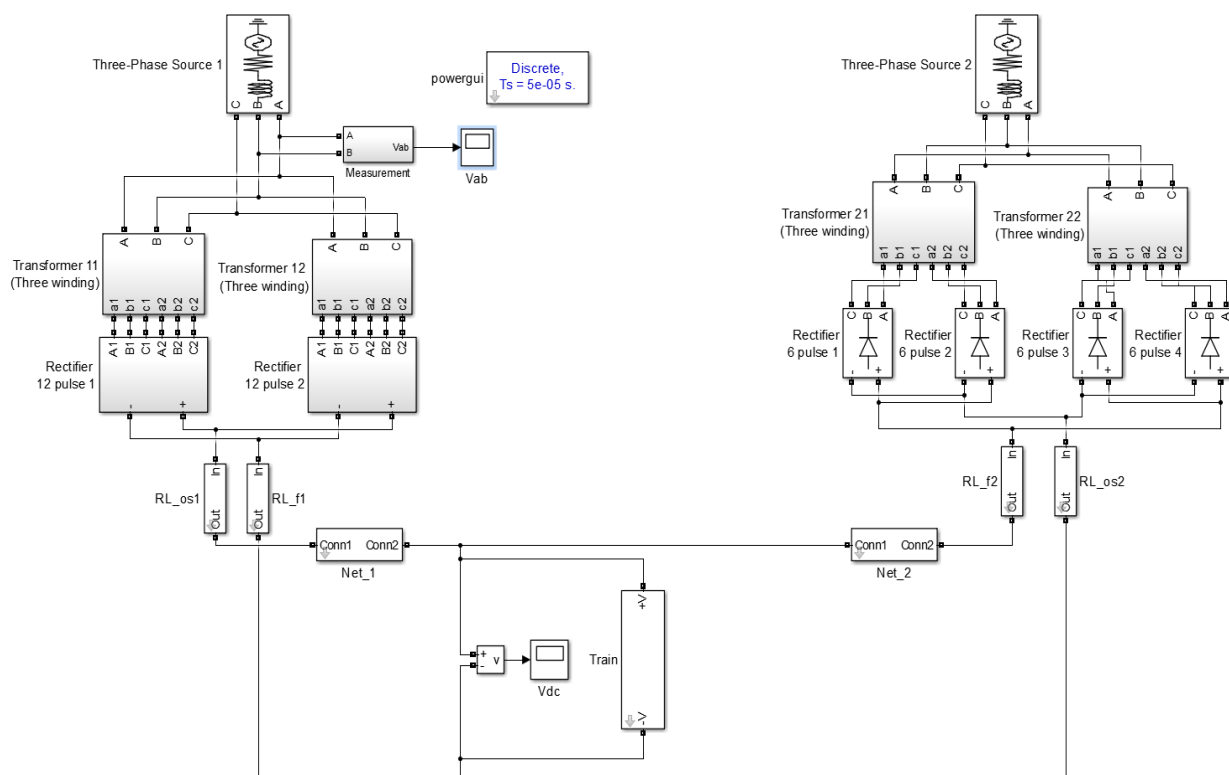
Trong đó: U_n – trị số hiệu dụng của sóng hài bậc n và N là bậc cao nhất của sóng hài cần đánh giá ($N_{\max}=50$) [4]. U_1 là giá trị hiệu dụng của điện áp bậc cơ bản ($f = 50$ Hz).

Tiêu chuẩn đánh giá ảnh hưởng của sóng hài dòng điện hệ thống cung cấp điện kéo đường sắt đô thị lên lưới cấp điện trung áp 22 kV phía ngoài được quy định trong “Thông tư quy định hệ thống điện phân phối” số 39/2015/TT-BCT của Bộ Công thương. Theo đó, chỉ số tổng độ biến dạng sóng hài điện áp, độ biến dạng riêng lẻ tại điểm kết nối không được vượt giá trị cho phép tương ứng 6,5% và 3,0% [9].

2.3. Mô hình mô phỏng hệ thống cung cấp điện kéo sử dụng tổ hợp chỉnh lưu 24-xung

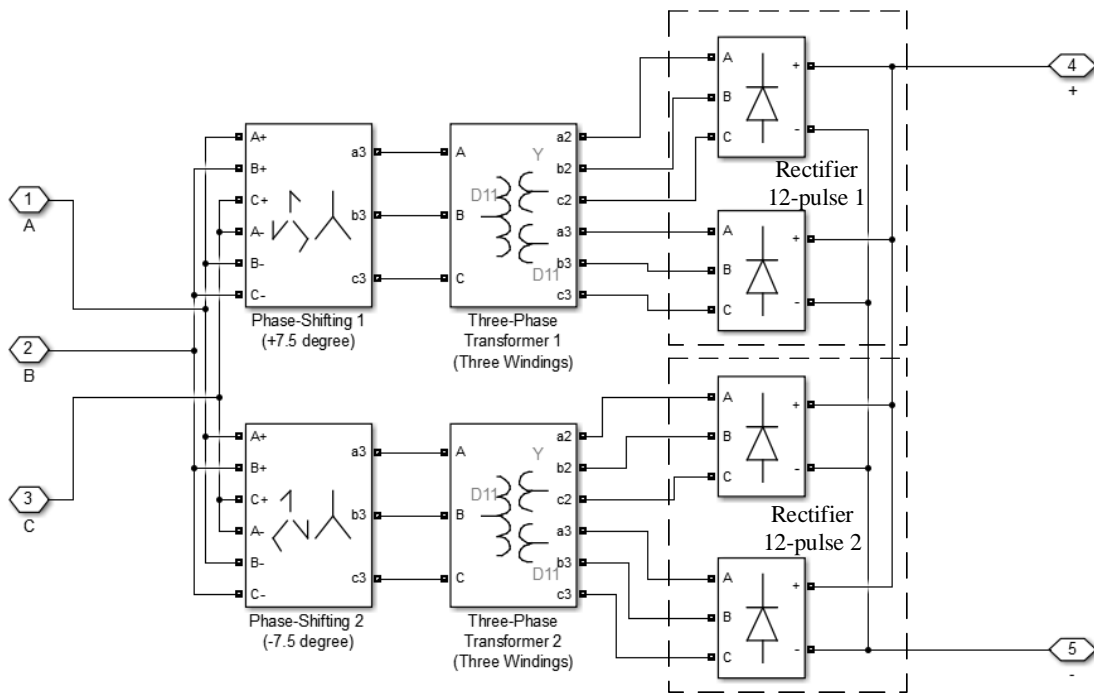
Trong các nghiên cứu [1, 2, 3] đã xây dựng mô hình mô phỏng quá trình làm việc của hệ thống cung cấp điện kéo ĐSĐT phục vụ nghiên cứu ảnh hưởng sóng hài lên lưới điện phía ngoài, trong đó TĐK sử dụng tổ hợp chỉnh lưu 12-xung.

Trong bài báo này, nhóm tác giả xây dựng thành phần mô hình mới tổ hợp chỉnh lưu 24-xung thay thế cho 12-xung. Các thành phần mô hình mô phỏng sử dụng các thông số tham khảo trong thuyết minh thiết kế kỹ thuật hệ thống cung cấp điện kéo tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông. Mô hình mô phỏng hệ thống cung cấp điện kéo ĐSĐT được xây dựng trên phần mềm Matlab, bao gồm các thành phần tương ứng với sơ đồ nguyên lý (hình 1), hệ thống điều khiển và đo lường trong chế độ thời gian thực.



Hình 2. Sơ đồ mô hình mô phỏng hệ thống cung cấp điện kéo ĐSĐT.

Trong mô hình mô phỏng, trạm điện kéo sử dụng các bộ chỉnh lưu 24-xung thực hiện biến đổi dòng điện xoay chiều ba pha điện áp 22 kV thành dòng điện một chiều điện áp định mức 750 V. Mô hình máy biến áp khô trong tổ hợp chỉnh lưu 24-xung được sử dụng một máy biến áp dịch pha và máy biến áp 3 pha 3 cuộn dây. Xây dựng mô hình máy biến áp điện kéo như vậy cũng không gây nên ảnh hưởng trong quá trình đánh giá sóng hài gây ra bởi hệ thống cung cấp điện kéo các tuyến đường sắt đô thị [8,10]. Mô hình bộ chỉnh lưu 24-xung gồm 2 bộ chỉnh lưu 12-xung mắc song song và được nối trên cùng các thành góp dòng điện dương và âm của trạm điện kéo (hình 3). Các bộ chỉnh lưu 12-xung cấu tạo từ 2 khối chỉnh lưu cầu 3 pha diode mắc song song “Universal Bridge” sử dụng diode có điện trở 0,01 Ω trong trạng thái mở và $10^6 \Omega$ trong trạng thái đóng.



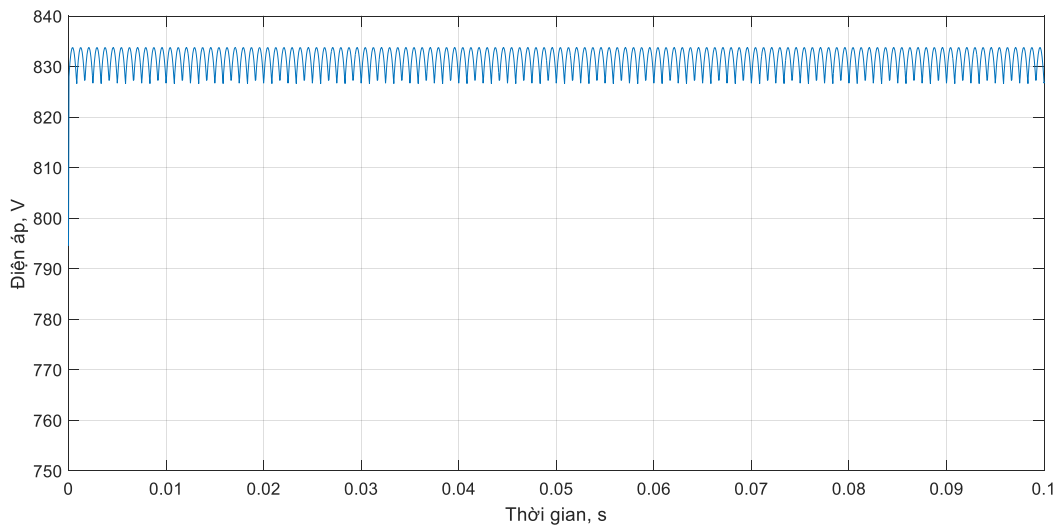
Hình 3. Sơ đồ mô hình mô phỏng trạm điện kéo hệ thống cung cấp điện ĐSDT.

2.4. Kết quả nghiên cứu

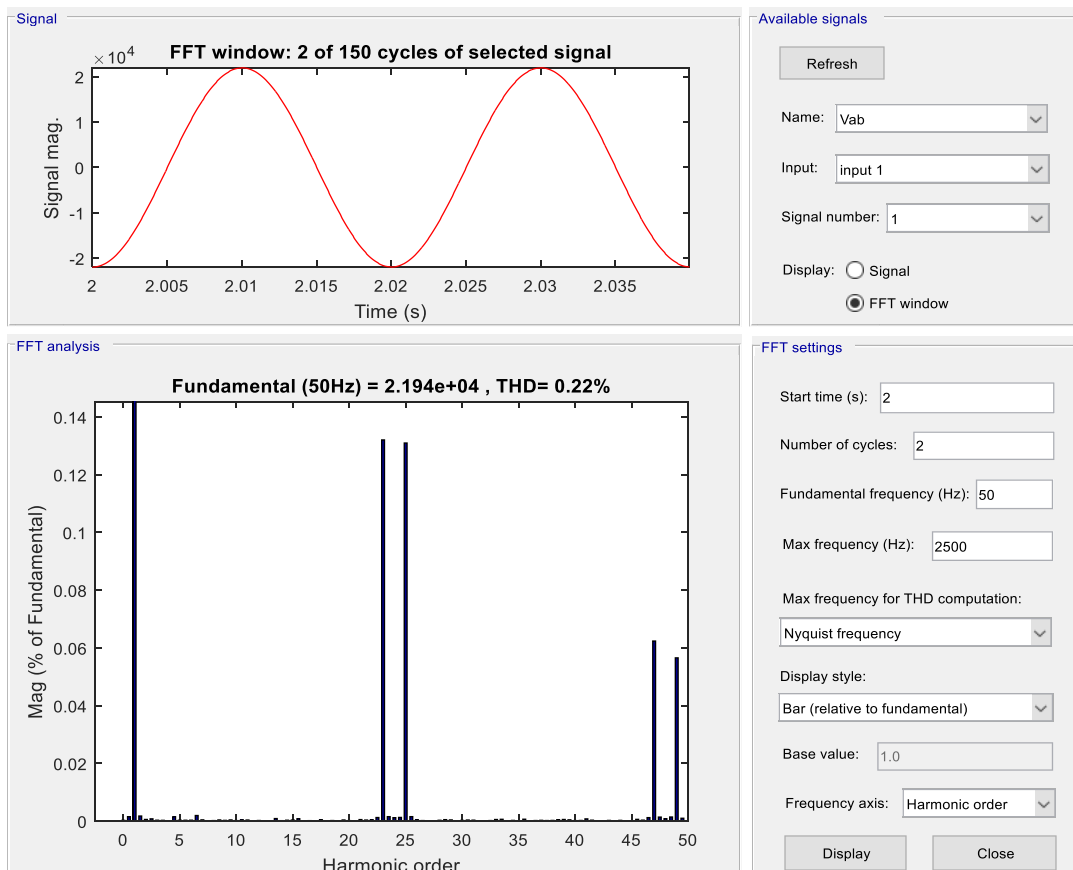
Mô phỏng quá trình làm việc của hệ thống cung cấp điện kéo tuyến ĐSDT Cát Linh – Hà Đông trên phần mềm Matlab sử dụng thuật toán “ode23tb”, trong khoảng miền thời gian thực ở các mức tốc độ 10, 20, 30, 40, 50, 60 km/h của đoàn tàu. Trong nghiên cứu này, chúng ta giả thiết rằng, trong khoảng thời gian xem xét thì quá trình khởi động và tăng tốc của đoàn tàu đã kết thúc, xác định điện áp và dòng điện trong miền tần số nghiên cứu ở thời điểm khi đoàn tàu chuyển động với vận tốc xác lập.

Trong mô hình, các hệ thống đo lường thể hiện kết quả quá trình mô phỏng là đồ thị điện áp một chiều trên mạch tiếp xúc, các thành phần điện áp và dòng điện cơ bản và sóng hài bậc cao trên lưới cung cấp điện trung áp 22 kV. Đồ thị điện áp chỉnh lưu trên lưới điện kéo thể hiện trên hình 4.

Từ kết quả mô phỏng là đồ thị giá trị tức thời điện áp lưới trung áp cung cấp cho hệ thống cung cấp điện kéo tương ứng với vận tốc của đoàn tàu. Sử dụng phép biến đổi “Fast Fourier transform” trong khối Powergui của phần mềm Matlab, nhóm tác giả tiến hành phân tích các thành phần sóng hài điện áp lưới trung áp 22 kV đối với dải tần số từ 0 ÷ 2500 Hz (tương ứng sóng hài đến bậc 50). Hiện thị thành phần điện áp ứng với tần số cơ bản, biểu đồ cột ứng với các thành phần sóng hài theo tỉ lệ phần trăm với thành phần điện áp tần số cơ bản.



Hình 4. Đồ thị điện áp chỉnh lưu trạm điện kéo.



Hình 5. Phân tích phổ điện áp lưới 22 kV bằng FFT analysis.

Kết quả mô phỏng cho thấy rằng, sóng hài điện áp tạo ra bởi hệ thống cung cấp điện kéo đạt giá trị lớn nhất ứng với bậc 23 và 25, phù hợp với lý thuyết về sóng hài gây ra bởi các bộ chỉnh lưu 24-xung trong các nghiên cứu đã được công bố. Độ biến dạng sóng hài điện áp ứng với bậc 23 và 25 có giá trị 0,13%. Tổng độ biến dạng sóng hài điện áp lưới cung cấp phía

ngoài THD = 0,22%. Từ kết quả nghiên cứu sóng hài điện áp hệ thống cung cấp điện kéo đường sắt đô thị sử dụng tổ hợp chỉnh lưu 12-xung trong trạm điện kéo [2,3] (THD = 0,34%) cho thấy rằng tổng độ biến dạng sóng hài trong hệ thống cung cấp điện kéo ứng dụng tổ hợp chỉnh lưu 24-xung giảm đi rất nhiều (tổng độ biến dạng sóng hài giảm từ 0,34% xuống 0,22%). Kết quả nghiên cứu trên mô hình mô phỏng cho thấy rằng, hệ thống cung cấp điện kéo tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông sử dụng tổ hợp chỉnh lưu 24-xung có gây nên ảnh hưởng đến sóng hài lưới điện phía ngoài 22 kV, nhưng chỉ số tổng độ biến dạng sóng hài rất nhỏ và nằm trong giới hạn theo quy định của hệ thống điện lực Việt Nam.

3. KẾT LUẬN

Mô hình mô phỏng quá trình làm việc của hệ thống cung cấp điện kéo tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông giúp có thể xác định đầy đủ các yếu tố ảnh hưởng đến thành phần sóng hài trên lưới điện phía ngoài 22 kV. Theo kết quả mô phỏng, hệ thống cung cấp điện tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông sử dụng sơ đồ tổ hợp chỉnh lưu 24-xung làm xuất hiện trên lưới điện trung áp 22 kV các thành phần sóng hài điện áp bậc 23,25,47,49... Giá trị các thành phần sóng hài này nằm trong dải cho phép theo quy định của hệ thống điện lực Việt Nam.

Trong giai đoạn vận hành thương mại tuyến ĐSĐT Cát Linh – Hà Đông, phương pháp mô phỏng kết hợp với phương pháp đo thực nghiệm xác định nhanh, chính xác các thành phần thiết bị điện làm việc phi tuyến trong hệ thống làm tăng chỉ số tổng độ biến dạng sóng hài THD lên lưới điện 22 kV. Từ đó giúp các nhà quản lý có thể ứng dụng các giải pháp kỹ thuật để làm giảm ảnh hưởng của sóng hài gây ra bởi hệ thống cung cấp điện kéo lên lưới cung cấp điện phía ngoài.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Đặng Việt Phúc, Nguyễn Thanh Hải, Shevliugin Maxim Valerievich, Phân tích sóng hài dòng điện kéo trong hệ thống cung cấp điện tàu điện ngầm, Chuyên san Đo lường, Điều khiển và Tự động hóa, 20 (2017) 60-66.
- [2]. Đặng Việt Phúc, Nguyễn Thanh Hải, Nghiên cứu ảnh hưởng của hệ thống cung cấp điện kéo đường sắt đô thị đến sóng hài lưới điện, Tạp chí khoa học Giao thông vận tải, 65 (2018) 3-10. <http://repository.utc.edu.vn/handle/19999/7549>
- [3]. Đặng Việt Phúc, Nghiên cứu và đánh giá chất lượng sóng hài nguồn điện một chiều cung cấp cho đoàn tàu tuyến ĐSĐT Nhôn – Ga Hà Nội, Trường ĐH GTVT, 2018.
- [4]. Trần Đình Long và cộng sự, Sách tra cứu về chất lượng điện năng, Nhà xuất bản Bách khoa, Hà

Nội, 2013.

[5]. IEC 61000-4-7, Electromagnetic compatibility (EMC), part 4: Limits, section 7: General guide on harmonics and inter-harmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto, 2010.

[6]. Lê Mạnh Việt, Võ Thanh Hà, Trần Văn Khôi, Nguyễn Tuấn Phường, Nghiên cứu lựa chọn công nghệ điện khí hóa đường sắt và điện giao thông thành phố tới năm 2025 ở Việt Nam, Đề tài NCKH cấp bộ, mã số B2008-04-57.

[7]. Lê Mạnh Việt, Nguyễn Tuấn Phường, Nghiên cứu công nghệ cung cấp điện cho giao thông đường sắt cao tốc và đô thị, Tạp chí khoa học Giao thông vận tải, 28 (2008) 46-50.

[8]. Han Aoyang, Yu Litao, Wang Li, Jia Xu, Sun Wenhui, Bi Yunfan, Research on the influence of urban metro traction power supply system on power grid harmonics, 2017 International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS), (2017).
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8298567>

[9]. Thông tư quy định hệ thống điện phân phối số 39/2015/TT-BCT, Bộ Công thương, 2015.
<http://vbpl.vn/bocongthuong/Pages/vbpq-van-ban-goc.aspx?ItemID=93602>

[10]. Hui Liu, Zhenhai Sun, Jinping Fang, Zihui Hao, Modeling and simulation of multi-vehicle DC traction power supply system based on Matlab/Simulink, Lecture Notes in Electrical Engineering, 638 (2020) 623-634. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2862-0_6