

ASSESSMENT OF THE EFFECTS OF THE ELECTRIC ARC FURNACE ON VOLTAGE FLUCTUATIONS AND SEVERAL OF SOLUTIONS

Phi Van Hung*, Ha Thi Thinh

Nam Dinh University of Technology Education

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 28/01/2021</p> <p>Revised: 27/02/2021</p> <p>Published: 28/02/2021</p>	<p>The power quality is getting more and more attention in our country. Voltage fluctuation is one of the importance parameters. Voltage fluctuation is a systematic variation in voltage or a series of random voltage changes more than one periode. Electric arc furnaces are the most common cause of voltage fluctuations on power distribution and transmission systems. The objective of this paper is to evaluate voltage fluctuations caused by electric arc furnaces in the electrical system before installation. The article focuses on the three-phase electric arc furnace simulation method based on the combination of the classical Cassie method and the Mayr mathematical equation, use <i>Matlab & Simulink</i> software. Simulation results are the waveforms of voltage and current at the common point of the arc furnace with other loads, from there assess the voltage fluctuation caused by the electric arc furnace and give some solutions to limit this electric fluctuations.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>EAF modelling</p> <p>EAF industry</p> <p>Power system distribution</p> <p>Power quality</p> <p>Voltage fluctuation</p>	

ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA Lò HỒ QUANG ĐIỆN GÂY RA DAO ĐỘNG ĐIỆN ÁP VÀ MỘT SỐ GIẢI PHÁP KHẮC PHỤC

Phí Văn Hùng*, Hà Thị Thịnh

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 28/01/2021</p> <p>Ngày hoàn thiện: 27/02/2021</p> <p>Ngày đăng: 28/02/2021</p>	<p>Chất lượng điện năng ngày càng được quan tâm hơn ở nước ta. Một trong các chỉ tiêu quan trọng của chất lượng điện năng là sự dao động điện áp. Dao động điện áp là sự biến đổi mang tính hệ thống của điện áp hay một chuỗi thay đổi điện áp ngẫu nhiên trong thời gian lớn hơn một chu kỳ. Lò hồ quang điện xoay chiều là một nguyên nhân phổ biến nhất gây ra dao động điện áp trên hệ thống phân phối và truyền tải điện. Mục tiêu của bài báo là đánh giá dao động điện áp do lò hồ quang điện gây ra trong hệ thống điện trước khi lắp đặt, vận hành. Bài báo tập trung nghiên cứu phương pháp mô phỏng lò hồ quang điện ba pha dựa trên sự kết hợp giữa phương pháp cổ điển Cassie và phương trình toán học Mayr, sử dụng phần mềm <i>Matlab & Simulink</i> để mô phỏng. Kết quả mô phỏng là dạng sóng điện áp, dòng điện tại điểm nối chung của lò hồ quang với các phụ tải khác, từ đó đánh giá sự dao động điện áp gây ra bởi lò hồ quang điện và đưa ra một số giải pháp để hạn chế hiện tượng này.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>Mô phỏng lò hồ quang điện</p> <p>Lò hồ quang công nghiệp</p> <p>Lưới điện phân phối</p> <p>Chất lượng điện năng</p> <p>Dao động điện áp</p>	

* Corresponding author. Email: hung.pv79@gmail.com

1. Đặt vấn đề

Lò hồ quang điện sử dụng nhiệt lượng để nung chảy kim loại được tạo ra do sự phóng điện giữa các điện cực hoặc giữa một điện cực và vật liệu kim loại để nóng chảy. Các lò thuộc loại này được sử dụng chính cho công nghiệp sản xuất gang, thép. Lò hồ quang điện xoay chiều là phụ tải xung kích với tính chất phụ tải phi tuyến đặc biệt. Khi lò hồ quang điện vận hành, dòng điện gây ra dòng hồ quang liên tục thay đổi theo kim loại nóng chảy, đồng thời do quá trình vận hành bị sập liệu, khi điều chỉnh các điện cực, khi thổi ôxy vào lò cũng luôn làm cho dòng hồ quang biến đổi nhanh trong phạm vi rộng và không ổn định. Qua phân tích thực tế cho thấy dòng điện của lò hồ quang điện chứa nhiều sóng hài và còn có dòng điện tần số thấp. Chính dòng điện tần số thấp này sẽ tác động tới dao động điện áp ở hệ thống điện cung cấp làm cho điện áp lưới điện liên tục dao động. Nếu dao động điện áp xảy ra với tần số vào khoảng 0,005 Hz đến 35 Hz sẽ dẫn đến sự dao động về ánh sáng có thể được cảm nhận bằng mắt người làm ảnh hưởng đến sức khỏe và năng suất lao động [1]. Do yêu cầu cấp thiết về đảm bảo chất lượng điện năng nên Bộ Công thương ra Thông tư số 39/2015/TT-BCT, trong đó yêu cầu thông số về mức dao động điện áp tại điểm đầu nối chung là $\pm 5\%$ [2].

Bài báo này nghiên cứu phương pháp mô phỏng lò hồ quang điện ba pha dựa trên sự kết hợp giữa phương pháp cổ điển Cassie và phương trình toán học Mayr [3], [4], sử dụng phần mềm *Matlab & Simulink* để mô phỏng [5]. Đã có một số đề tài nghiên cứu mô phỏng các ảnh hưởng của lò hồ quang đến chất lượng điện năng, mục đích là để đánh giá trước khi lắp đặt thiết bị này. Tuy nhiên đa số là mô phỏng lò hồ quang một pha hay các hiện tượng phát sinh sóng hài trong lưới điện [6], [7].

2. Nghiên cứu mô phỏng lò hồ quang điện

2.1. Phương pháp mô phỏng lò hồ quang điện

Việc xây dựng mô hình tải lò hồ quang càng gần với thực tế sẽ giúp tìm hiểu được một số ảnh hưởng của phụ tải này đến chất lượng điện năng. Kết quả mô phỏng có thể đánh giá được các chỉ tiêu về chất lượng điện có nằm trong phạm vi cho phép hay không, từ đó có thể đưa ra các giải pháp hạn chế tác hại của lò hồ quang đến chất lượng điện năng của hệ thống điện.

Bài báo này giới thiệu một phương pháp mô phỏng mới dựa trên sự kết hợp giữa phương pháp cổ điển Cassie và phương trình toán học Mayr [3], [4].

Mô hình Cassie thừa nhận rằng mật độ dòng điện là không đổi, dòng điện thay đổi cùng với diện tích bề mặt, điện trở suất không đổi trong mỗi đơn vị thể tích. Không khí chảy qua mặt cắt ngang hồ quang mang theo nhiệt. Biểu thức Cassie với R là biến phụ thuộc được trình bày như sau:

$$\frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(1 - \frac{v^2}{E_0^2}\right) \quad (1)$$

Trong đó, E_0 là hằng số điện áp chỉ trạng thái ổn định của điện áp hồ quang, θ là hằng số thời gian bằng tỉ số giữa “năng lượng chứa trong một đơn vị thể tích” với “năng lượng tiêu hao trong một đơn vị thể tích”. Mô hình này có nhược điểm trong trường hợp mô phỏng quá trình hồ quang có thể bị gián đoạn. Trên thực tế, nó chỉ đúng trong trường hợp dòng điện hồ quang lớn.

Với mô hình Mayr, tổn thất nhiệt năng được giả định là chỉ xảy ra ở ngoại biên hồ quang, điện dẫn thay đổi cùng với năng lượng chứa trong nó. Biểu thức toán học của mô hình này là:

$$\frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(1 - \frac{vi}{P_0}\right) \quad (2)$$

Trong đó, P_0 là tổn thất công suất, giá trị này là hằng số. Ở trạng thái ổn định, dòng điện và điện áp biến đổi rất nhỏ, nên $vi = P_0$. Như vậy, đường đặc tính tĩnh là đường Hyperbolic, trường hợp này áp dụng tốt cho dòng điện nhỏ.

Mô hình này cho phép mô tả quá trình gián đoạn hồ quang, với R lớn thì vi/P_0 vẫn nhỏ hơn 1, do đó, dR/dt dương và điện trở tiếp tục tăng cho đến khi hồ quang bị dập tắt.

Theo kinh nghiệm mô phỏng quá trình dao động trong mạch điện bằng cách sử dụng phương pháp lặp Newton- Raphson, sự hội tụ thường xuyên đạt được khi điện trở tiến đến một giá trị vô cùng nhỏ. Vì vậy, đề xuất phương án sử dụng điện dẫn là biến phụ thuộc thay vì sử dụng giá trị điện trở.

Mô hình Cassie lúc này trở thành:

$$G = \frac{vi}{E_0^2} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (3)$$

Mô hình Mayr trở thành:

$$G = \frac{i^2}{P_0} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (4)$$

Như vậy, ta có hai biểu thức mới riêng biệt để diễn tả diễn biến của hồ quang, tuy nhiên, mỗi phương án chỉ sử dụng trong một số trường hợp nhất định. Khi dòng điện hồ quang nhỏ, ta sử dụng mô hình Cassies; khi dòng điện hồ quang lớn, thì mô hình Mayr thích hợp hơn. Để mô hình hóa một cách tổng quát hơn, ta kết hợp hai mô hình trên vào một mô hình duy nhất bằng cách sử dụng một hệ số chuyển tiếp $\sigma(i)$ là một hàm số với biến là dòng điện hồ quang. Khi đó, điện dẫn được cho bởi biểu thức:

$$G = [1 - \sigma(i)]G_c + \sigma(i)G_m \quad (5)$$

Trong đó, G_c và G_m là điện dẫn được cho bởi (1.3) và (1.4); hệ số chuyển tiếp $\sigma(i)$ thay đổi giữa 0 và 1 và là hàm đơn điệu giảm khi dòng điện tăng lên, $\sigma(i)$ được xác định bởi biểu thức sau:

$$\sigma(i) = \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right) \quad (6)$$

Trong đó, I_0 là dòng điện chuyển tiếp.

Khi dòng điện hồ quang nhỏ (i nhỏ), giá trị của $\sigma(i)$ xấp xỉ bằng 1 nên điện dẫn G lúc này có giá trị là G_m ứng với mô hình Mayr. Khi dòng điện hồ quang lớn thì $\sigma(i)$ nhỏ đến mức có thể bỏ qua được, điện dẫn lúc này là G_c ứng với mô hình Cassie. Tuy nhiên, nó có hạn chế nhỏ về giá trị của điện dẫn giữa các điện cực khi hồ quang bị triệt tiêu, giá trị này phụ thuộc vào khoảng cách giữa các điện cực, môi trường vật chất giữa chúng và vật liệu làm điện cực, để mô phỏng đầy đủ hơn ta đưa vào giá trị này là G_{min} . Mô hình đầy đủ được cho bởi biểu thức sau:

$$G = G_{min} + \left[1 - \exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right)\right] \frac{vi}{E_0^2} + \left[\exp\left(-\frac{i^2}{I_0^2}\right)\right] \frac{i^2}{P_0} - \theta \frac{dG}{dt} \quad (7)$$

Và:

$$i = Gv \quad (8)$$

Trong trường hợp tổng quát, thời gian θ là một hàm phụ thuộc dòng điện hồ quang bởi vì thời điểm môi hay dập tắt hồ quang thì năng lượng chứa trong mỗi đơn vị thể tích sẽ lớn hơn nhiều so với tổn thất năng lượng cho mỗi đơn vị thể tích. Tuy nhiên, khi hồ quang cháy ổn định thì giá trị này sẽ nhỏ. Bởi vậy, hàm θ được giả thiết như sau:

$$\theta = \theta_0 + \theta_1 \exp(-\alpha|i|) \quad (9)$$

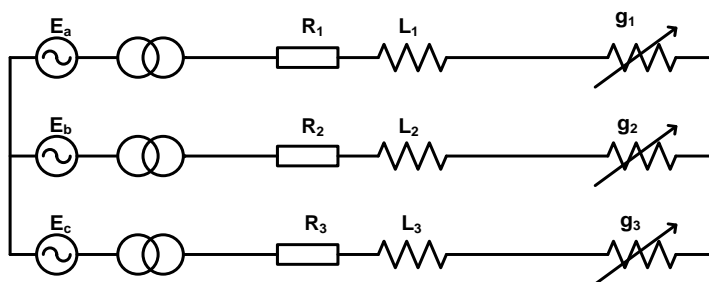
Với $\alpha > 0$ và $\theta_1 \gg \theta_0$, thời điểm hồ quang được môi hay bị dập tắt dòng điện có giá trị nhỏ nên $\theta \approx \theta_1$, khi hồ quang cháy ổn định do dòng điện lớn nên $\theta \approx \theta_0$.

Để đánh giá các ảnh hưởng của lò hồ quang đến chất lượng điện năng của hệ thống điện, ta xây dựng mô hình mô phỏng sử dụng phần mềm Matlab/Simulink.

Hệ thống bao gồm nguồn điện được lấy từ nguồn hệ thống điện 3 pha xoay chiều điện áp 110 kV là nguồn lý tưởng (hình sin và cân bằng) qua máy biến áp trung gian hạ xuống 22 kV cấp điện cho lò hồ quang.

2.2. Mô phỏng lò hồ quang điện

Mạch điện tương đương của lò hồ quang bao gồm một máy biến áp ba pha, điện trở và điện kháng cấp nối từ máy biến áp đến các điện cực và điện dẫn phi tuyến của lò. Sơ đồ được thể hiện trên hình 1.

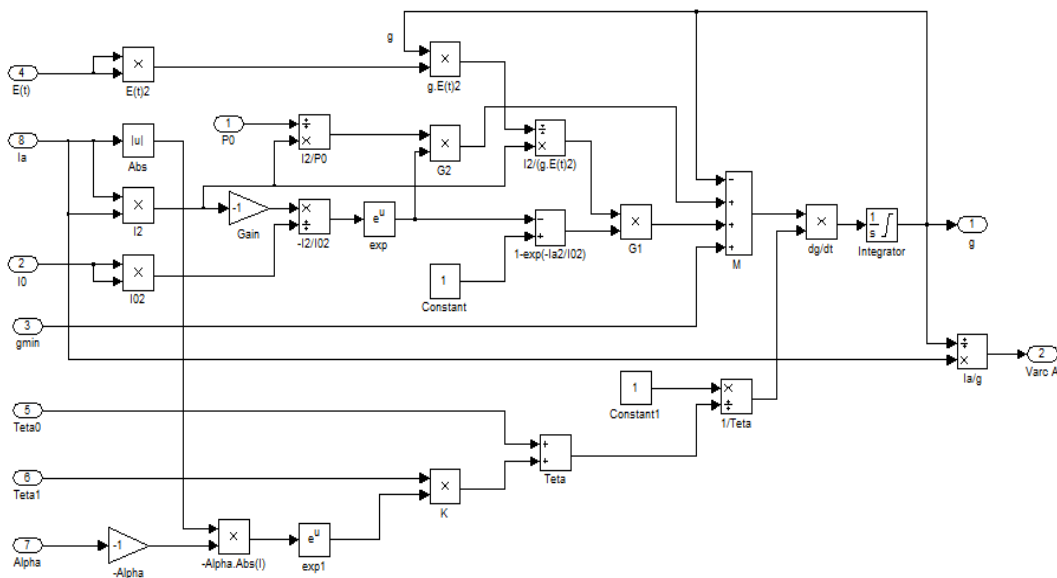


Hình 1. Mạch điện tương đương của lò hồ quang

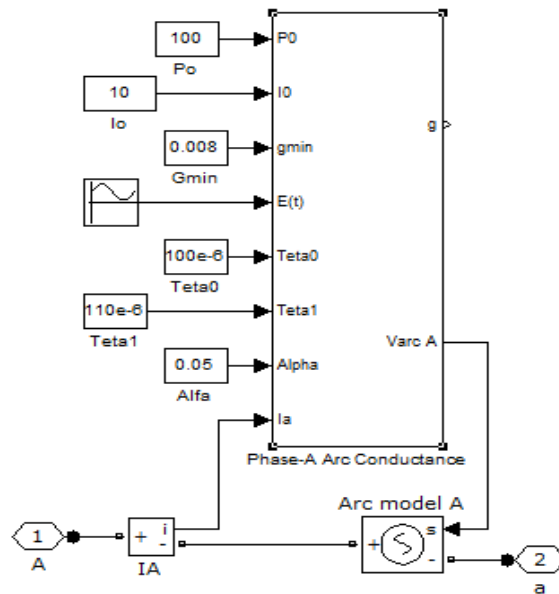
Phương trình điện dẫn của lò hồ quang ba pha viết cho từng pha như sau:

$$\begin{aligned}
 g_1 &= g_{\min} + \left[1 - \exp\left(-\frac{i_{f1}^2}{I_0^2}\right) \right] \frac{i_{f1}^2}{g_1 E_1^2} + \left[\exp\left(-\frac{i_{f1}^2}{I_0^2}\right) \right] \frac{i_{f1}^2}{P_0} - \theta_a \frac{dg_1}{dt} \\
 g_2 &= g_{\min} + \left[1 - \exp\left(-\frac{i_{f2}^2}{I_0^2}\right) \right] \frac{i_{f2}^2}{g_2 E_2^2} + \left[\exp\left(-\frac{i_{f2}^2}{I_0^2}\right) \right] \frac{i_{f2}^2}{P_0} - \theta_b \frac{dg_2}{dt} \\
 g_3 &= g_{\min} + \left[1 - \exp\left(-\frac{i_{f3}^2}{I_0^2}\right) \right] \frac{i_{f3}^2}{g_3 E_3^2} + \left[\exp\left(-\frac{i_{f3}^2}{I_0^2}\right) \right] \frac{i_{f3}^2}{P_0} - \theta_c \frac{dg_3}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Sử dụng các khối sẵn có trong Matlab/simulink và SimpowerSystems mô phỏng phương trình điện dẫn các pha [5], ta có được sơ đồ mô phỏng như hình 2, hình 3.



Hình 2. Sơ đồ khai triển điện dẫn pha A của lò hồ quang điện xoay chiều ba pha

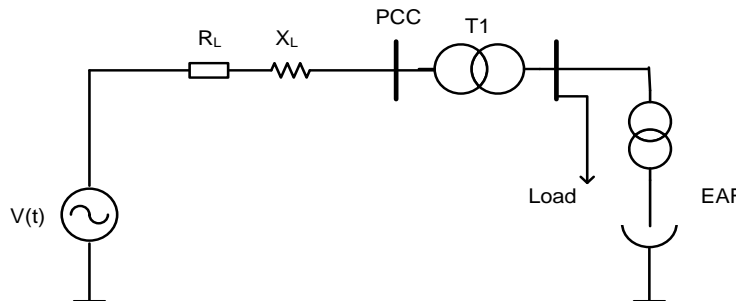


Hình 3. Mô hình điện dẫn pha của lò hồ quang điện xoay chiều ba pha

2.3. Đánh giá ảnh hưởng của lò hồ quang điện đến chất lượng nguồn điện

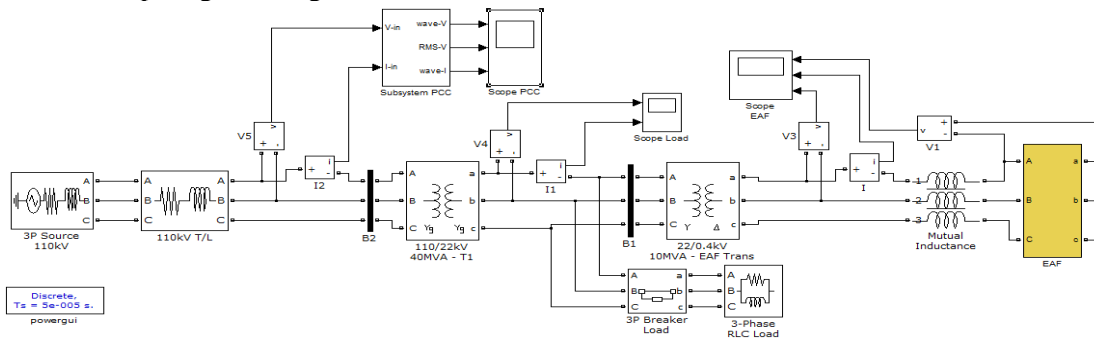
Để mô phỏng các hiện tượng ảnh hưởng đến chất lượng điện của lò hồ quang, ta xây dựng sơ đồ hệ thống như hình 4.

Một lò hồ quang ba pha được cung cấp điện từ một nguồn hệ thống điện áp 110 kV, công suất ngắn mạch 500 MVA qua một đường dây dài 1 km và máy biến áp trung gian T1-110/22 kV. Một tải ba pha công suất 10 MVA được nối vào thanh cái 22 kV.



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý hệ thống

Sơ đồ mô phỏng hệ thống được minh họa trên hình 5.



Hình 5. Sơ đồ mô phỏng hệ thống

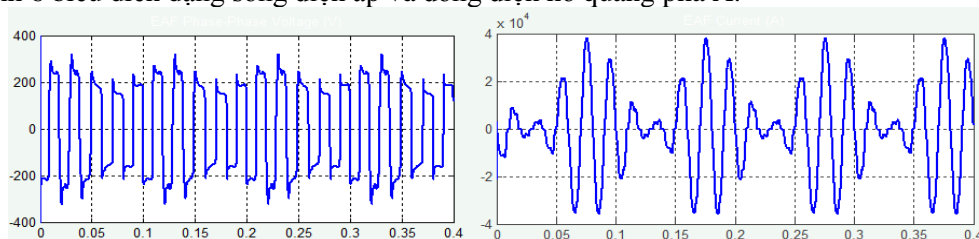
2.3.1. Các thông số mô phỏng

Bảng 1. Thông số các phần tử của hệ thống *Bổ sung tiêu đề của bảng*

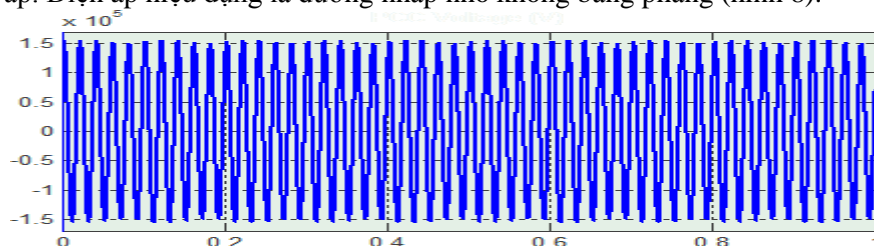
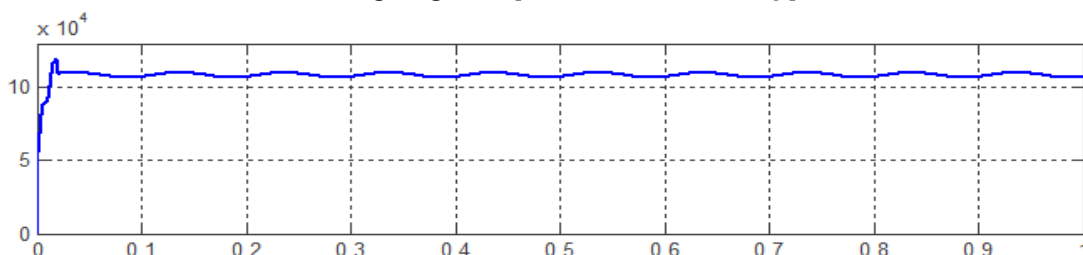
TT	Mô tả	Thông số
1	Nguồn cung cấp	Điện áp: 110 kV; Tần số: 50 Hz Công suất ngắn mạch: 200 MVA; Tỉ số X/R: 9
2	Máy biến áp trung gian	Công suất: 40 MVA; Điện áp: 110 kV/22 kV ; Tần số: 50 Hz Điện trở, điện cảm cuộn dây cao áp, hạ áp: $R_{HV} = 0,002$ pu; $L_{HV} = 0,04$ pu; $R_{LV} = 0,002$ pu; $L_{LV} = 0,04$ pu
3	Lò hồ quang	Máy biến áp lò: Công suất $S = 10$ MVA; Cấp điện áp: 22 kV/0,4 kV; tần số 50 Hz Điện trở, điện cảm cuộn cao thế, hạ thế: $R_{HV} = 0,002$ pu; $L_{HV} = 0,04$ pu; $R_{LV} = 0,002$ pu; $L_{LV} = 0,04$ pu Điện trở, điện cảm của dây dẫn từ máy biến áp đến lò: $R_A = R_B = R_C = 0,0004$ Ω ; $L_A = L_B = L_C = 1,6 \cdot 10^{-5}$ H Các thông số đặc tính tĩnh: $\theta_0 = 100 \cdot 10^{-6}$; $\theta_1 = 110 \cdot 10^{-6}$; $P_o = 100$; $I_o = 10$; $G_{min} = 0.008$; $\alpha = 0,05$
4	Đường dây 110kV	$R_L = 0,1$ Ω ; $L = 1 \cdot 10^{-3}$ (H)

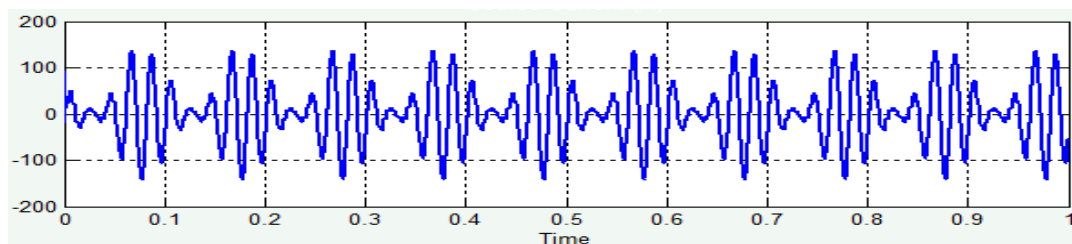
2.3.2. Kết quả mô phỏng

Hình 6 biểu diễn dạng sóng điện áp và dòng điện hồ quang pha A.

**Hình 6.** a) Điện áp hồ quang; b) Dòng điện hồ quang

Kết quả mô phỏng dạng sóng điện áp và dòng điện tại thanh cái nối chung phụ tải được biểu diễn ở hình 7 và hình 9. Giá trị biên độ của dòng điện và điện áp thay đổi liên tục sẽ gây ra dao động điện áp. Điện áp hiệu dụng là đường nhấp nhô không bằng phẳng (hình 8).

**Hình 7.** Dạng sóng điện áp tại thanh cái nối chung phụ tải**Hình 8.** Điện áp hiệu dụng tại thanh cái nối chung phụ tải



Hình 9. Dòng điện tại thanh cái nối chung phụ tải

Kết quả mô phỏng cho ta thấy điện áp tại thanh cái PCC (thanh cái nối chung phụ tải) xuất hiện những xung nhọn làm biến dạng sóng điện áp, dao động điện áp xảy ra mạnh và liên tục, trị số $d = \Delta V/V$ lên tới 7,27% vượt quá giá trị cho phép (giá trị cho phép là $\pm 5\%$ theo Thông tư số 39/2015/TT-BTC của Bộ Công Thương).

2.4. Một số giải pháp hạn chế ảnh hưởng của lò hồ quang đến chất lượng nguồn điện

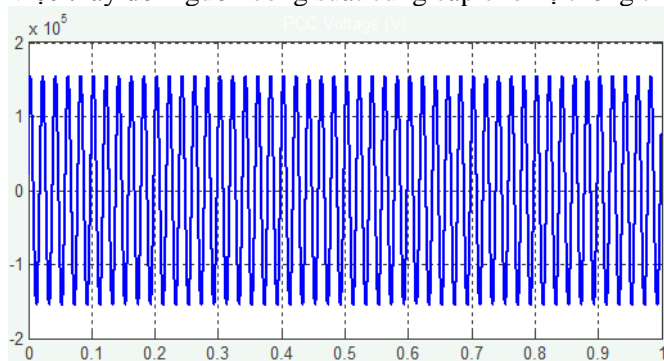
Có rất nhiều phương pháp hạn chế ảnh hưởng của lò hồ quang đến chất lượng nguồn điện như: Phương pháp sử dụng thiết bị bù tĩnh SVC (Static Var Compensator), sử dụng thiết bị đồng bộ tĩnh STACOM, sử dụng điện kháng mắc nối tiếp với tải, điện kháng bão hòa, tăng công suất ngắn mạch nguồn [3]. Dưới đây là kết quả mô phỏng của phương pháp tăng công suất ngắn mạch nguồn (Bảng 2).

Bảng 2. Kết quả mô phỏng với các giá trị công suất ngắn mạch nguồn khác nhau

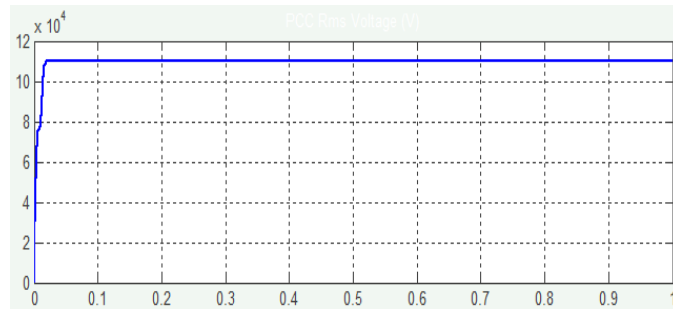
S_{sc} (MVA)	200	500	1000	1500	2000	10000
$\Delta V/V$ (%)	7,27	3,83	1,99	1,36	1,04	0,25

Khi tăng công suất ngắn mạch lên 10.000 MVA thì dao động điện áp hầu như không còn, đường thể hiện giá trị hiệu dụng của điện áp không còn nhấp nhô xuống như ban đầu. Dạng sóng điện áp và điện áp hiệu dụng tại điểm kết nối chung PCC với công suất ngắn mạch nguồn là 10.000MVA được biểu diễn trên hình 10, hình 11.

Đây là một biện pháp hiệu quả để giảm dao động điện áp nhưng không dễ dàng thực hiện được vì liên quan đến việc thay đổi nguồn công suất cung cấp cho hệ thống thì chi phí là rất cao.



Hình 10. Dạng sóng điện áp tại PCC với công suất ngắn mạch $S_{sc} = 10000$ MVA



Hình 11. Điện áp hiệu dụng tại PCC với công suất ngắn mạch $S_{sc} = 10000\text{MVA}$

3. Kết luận

Bài báo đã nêu ra một số hiện tượng chất lượng điện năng đang được ngành điện nói riêng và ngành công nghiệp nói chung quan tâm trong đó đặc biệt là hiện tượng dao động điện áp. Một loại hình phụ tải đang được sử dụng rộng rãi và phổ biến trong ngành công nghiệp năng lượng có ảnh hưởng xấu đến chất lượng điện năng là lò hồ quang. Để nghiên cứu ảnh hưởng của nó đến lưới điện, bài báo đã đưa ra một phương pháp mới để mô phỏng ảnh hưởng của lò hồ quang ba pha đến lưới điện, đặc biệt là hiện tượng dao động điện áp.

Kết quả đã mô phỏng thành công hiện tượng dao động điện áp do lò hồ quang ba pha gây ra cho lưới điện bằng công cụ Matlab/Simulink và đưa ra một số biện pháp khắc phục hiện tượng này, đó có thể phát triển là một công cụ hiệu quả trong việc tính toán thiết kế các thiết bị để khắc phục hiện tượng dao động điện áp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] J. Schlabbach, D. Blume, and T. Stephanblome, *Voltage Quality in Electrical Power Systems*, the Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2001, pp. 103-122.
- [2] Ministry of Industry and Trade of the Socialist Republic of Vietnam, Circular No.39/2015/TT-BCT, Regulating power distribution, 2015.
- [3] K.-J. Tseng, Y. Wang, and D. M. Vilathgamuwa, "An Experimentally Verified Hybrid Cassie- Mayr Electric Arc Model for Power Electronics Simulations," *IEEE Transactions On Power Electronics*, vol.12, no. 3, pp. 429-436 May 1997.
- [4] H. Mokhtari, and M. Hejri, "A New Three Phase Time-Domain Model for Electric Arc Furnaces Using MATLAB," *Transmission and Quality of Power proceeding*, 1998, vol. 2, pp. 1079-1085.
- [5] P. K. Nguyen, *Matlab & Simulink*. Science and Technics Publishing House, 2005.
- [6] T. Zheng, E. B. Makram, and A. A. Girgis, "Effect of different arc furnace models on voltage distortion," *Harmonics and Quality of power proceeding*, vol. 2, pp. 1079-1085, 1998.
- [7] S. Chako, and N. Goel, "Voltage sag mitigation in electric arc furnace with D-STATCOM," *International Electrical Engineering Journal (IEEJ)*, vol. 2, no. 2, pp. 536-542, 2011.