

MÔ HÌNH HÓA CÁC Lò HỒ QUANG ĐIỆN PHỤC VỤ CHO VIỆC NGHIÊN CỨU SỰ NHẤP NHÁY ĐIỆN ÁP VÀ SÓNG HÀI

MODELING ELECTRICAL ARC FURNACES FOR VOLTAGE FLICKER AND HARMONIC STUDY

Trần Lê Nhật Hoàng, Doãn Văn Đông

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật – Đại học Đà Nẵng; tlnhoang@ute.udn.vn, dvdong@ute.udn.vn

Tóm tắt - Điện áp nhấp nháy và sóng hài là các vấn đề về chất lượng điện năng được đưa vào hệ thống điện bởi hành vi ngẫu nhiên và phi tuyến khi hoạt động của lò hồ quang. Các nhà sản xuất thép lo lắng về các hiệu ứng này và cố gắng thực hiện các biện pháp phòng ngừa để tối thiểu chúng. Vì vậy, việc xây dựng các mô hình lò hồ quang để thể hiện các tình huống hoạt động khác nhau của nó là cần thiết. Trong bài báo này, tác giả thực hiện ba mô hình mô phỏng hồ quang khác nhau dưới Matlab Simulink. Kết quả mô phỏng cũng sẽ được giới thiệu và so sánh. Tác giả cũng giới thiệu việc nghiên cứu độ nhấp nháy điện áp và đề xuất một cách nghiên cứu khác cho vấn đề này. Kết quả phân tích, thảo luận và đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo nằm ở phần cuối của bài báo này.

Từ khóa - lò hồ quang điện; sóng hài; độ nhấp nháy điện áp; mô hình hóa; Matlab Simulink.

Abstract - Voltage flicker and harmonic are problems related to power quality which are brought to a power system via non-linear and stochastic behavior of an arc furnace in operation. Steel makers worry about these effects and try to take precaution measures to minimize them. Therefore, it is necessary to construct arc furnace models to simulate their various operational situations. In this paper, the authors introduce three different models of arc furnaces by means of Matlab Simulink. Simulation results are also introduced and compared. In addition, the authors also introduce the study of voltage flicker and propose another way of researching this issue. The results of the analysis, discussion and further research suggestions are presented at the end of this paper.

Key words - electrical arc furnace; harmonic; flicker; modeling; Matlab Simulink.

1. Đặt vấn đề

Từ đầu thế kỉ XX, lò hồ quang được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp để sản xuất thép. Nó sử dụng nhiệt năng từ hồ quang điện để có thể đạt được nhiệt độ đủ lớn làm nóng chảy kim loại [1]. Với sự linh hoạt của mình, lò hồ quang cho phép làm đơn giản quá trình sản xuất thép.

Tuy nhiên, lò hồ quang chính là một trong những phụ tải tiêu thụ điện năng rất lớn. Đây là phụ tải không cân bằng, không tuyến tính và biến đổi theo thời gian đồng thời gây ra sự không cân bằng về điện áp (flickers), sinh ra những sóng hài biên độ lớn, gây nhiễu loạn lưới điện và biến đổi mạnh về công suất phản kháng cũng như làm giảm hệ số công suất. Để nghiên cứu các tính chất của lò hồ quang, chúng ta cần xây dựng một cách chính xác và đầy đủ một mô hình lò hồ quang ba pha. Bước này có tầm quan trọng hàng đầu để thực hiện sau đó các bước nâng cao chất lượng năng lượng của hệ thống điện cung cấp cho chúng. Các nhân tố chính ảnh hưởng đến hoạt động của lò hồ quang là quá trình làm nóng chảy và tính chất vật liệu, vị trí của điện cực và điện áp cung cấp. Hơn nữa, quá trình làm nóng chảy kim loại là một quá trình ngẫu nhiên, vì vậy thật khó để đưa ra một mô hình xác định chính xác cho một phụ tải như lò hồ quang.

Nhìn chung, các phương pháp mô hình hóa lò hồ quang có thể chia làm hai loại chính là phương pháp trong miền thời gian và phương pháp trong miền tần số [2], [3].

Trong phương pháp trong miền tần số, đại diện cho hiệu điện thế và dòng điện hồ quang là các sóng hài thành phần của chúng. Sau đó, ở mỗi tần số thành phần, một mạch điện tương đương cho hệ thống được đưa ra và lò hồ quang được xem như nguồn điện áp. Đáp ứng của toàn bộ hệ thống chính là sự xếp chồng của các đáp ứng hệ thống ở mỗi tần số [3], [4]. Phương pháp này cần một số giá trị được đo của hiệu điện thế và dòng điện hồ quang để thiết lập mô hình nguồn dòng cho mỗi sóng hài. Vì

vậy, phương pháp này có thể không được sử dụng nếu thiếu sự đo đạc [5].

Phương pháp trong miền thời gian dựa trên cơ sở đặc tính điện áp – dòng điện (VIC). Hồ quang điện có tính chất phi tuyến và biến đổi theo thời gian, nên việc mô phỏng các tính chất của nó trong miền thời gian thì dễ hơn trong miền tần số [3], [6]. Mặc dù phương pháp này yêu cầu nhiều thời gian tính toán [7], tuy nhiên với sự phát triển của khoa học máy tính ngày nay, nhược điểm này đã dần được khắc phục.

Nhiều nghiên cứu chỉ thực hiện trên mô hình mạch một pha [3], [8], điều này dẫn đến có sự sai lệch trong thành phần sóng hài của các pha do quá trình làm nóng chảy kim loại là hoạt động không cân bằng [7].

Trong bài báo này, tác giả thực hiện mô hình hóa ba mô hình lò hồ quang trong miền thời gian. Các mô hình lò hồ quang được xây dựng với mô hình nguồn ba pha dưới Matlab Simulink. Tác giả cũng thực hiện việc mô phỏng độ nhấp nháy điện áp (flicker) với một vài tần số nhấp nháy khác nhau. Các thành phần sóng hài được so sánh với tiêu chuẩn trong quy định hệ thống điện phân phối [9].

2. Mô hình lò hồ quang trong miền thời gian

2.1. Mô hình 1 (model 1)

Các nghiên cứu [4], [7] đã chỉ ra đặc tính V-I thực tế như trên Hình 1, với v_{ig} là điện áp bắt đầu phóng hồ quang tương ứng với dòng điện i_1 và v_{eg} là điện áp tắt hồ quang tương ứng với dòng điện i_2 . Hai điện áp này được xác định bởi chiều dài hồ quang trong quá trình hoạt động.

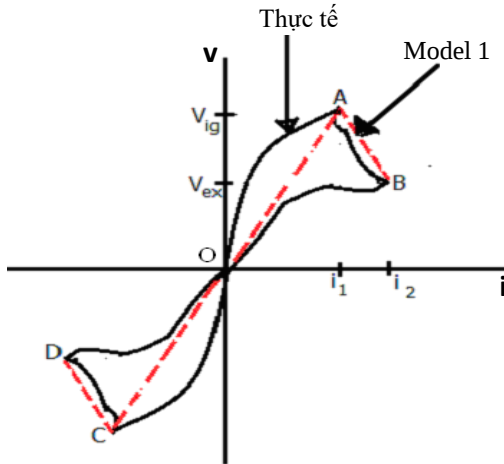
Model 1 giả thiết có thể tuyến tính hóa đặc tính V-I bởi hai phương trình tuyến tính tương ứng với đoạn AB và AC. Đoạn CD xem như đối xứng với AB qua điểm O. Với R_1 và R_2 là hệ số góc của AC và AB, model 1 cho 1 chu kì có thể được biểu diễn như sau:

$$v = \begin{cases} R_1 i \text{ với } -i_1 \leq i < i_1 \\ R_2 i + v_{ig} \left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right) \text{ với } i_1 \leq i \leq i_2 \\ R_2 i - v_{ig} \left(1 - \frac{R_2}{R_1}\right) \text{ với } -i_2 \leq i < -i_1 \end{cases} \quad (1)$$

Với

$$i_1 = \frac{v_{ig}}{R_1}$$

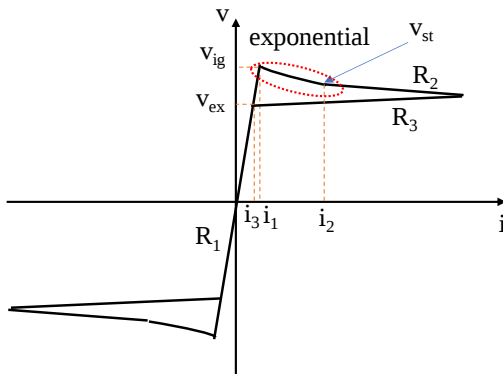
$$i_2 = \frac{v_{ex}}{R_2} - v_{ig} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right)$$



Hình 1. Đặc tính V-I thực tế và của mô hình 1

2.2. Mô hình 2 (model 2)

Model 1 tuyến tính hóa hoàn toàn đặc tính V-I. Như vậy model 1 sẽ không thể mô tả hết tính chất của đặc tính này, nhất là khi bắt đầu làm nóng chảy kim loại.



Hình 2. Đặc tính V-I của mô hình 2

Model 2 được giới thiệu trên Hình 2 [10]. Model 2 không xấp xỉ tuyến tính hoàn toàn đặc tính V-I và chia quá trình làm nóng chảy kim loại ra làm ba phần:

- Giai đoạn 1: Điện áp tăng từ $-v_{ex}$ đến v_{ig} , lò hoạt động như một điện trở và dòng điện thay đổi từ $-i_3$ đến i_1 .
- Giai đoạn 2: giai đoạn này bắt đầu làm nóng chảy kim loại. Điện áp giảm đột ngột qua điện cực, điện áp hồ quang giảm từ v_{ig} xuống v_{st} và dòng điện hồ quang tăng nhẹ từ i_1 đến i_2 . Giai đoạn này điện áp rơi được xấp xỉ như một hàm mũ.
- Giai đoạn 3: giai đoạn này xem như tiến trình làm nóng chảy kim loại bình thường. Điện áp rơi từ từ và tuyến tính từ v_{st} xuống v_{ex} .

Đặc tính V-I của model 2 được chia theo sự tăng và giảm của dòng điện ($i \nearrow$ và $i \searrow$). Đặc tính này được mô tả trong phương trình sau [4]:

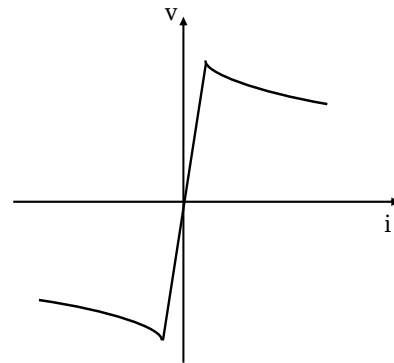
$$v = \begin{cases} R_1 i \text{ với } (-i_3 \leq i < i_1, \text{ và } i \nearrow) \\ \text{hoặc } (-i_1 \leq i < i_3 \text{ và } i \searrow) \\ v_{st} + (v_{ig} - v_{st}) \exp\left(\frac{i_1 - i}{i_T}\right) \\ \text{với } i_1 \leq i < i_2 \text{ và } i \nearrow \\ v_{st} + (i - i_2)R_2 \text{ với } i_2 \leq i \text{ và } i \nearrow \\ v_{ex} + (i - i_3)R_3 \text{ với } i_3 \leq i \text{ và } i \searrow \\ -v_{st} - (v_{ig} - v_{st}) \exp\left(\frac{i_1 + i}{i_T}\right) \\ \text{với } -i_2 \leq i < -i_1 \text{ và } i \searrow \\ -v_{st} + (i + i_2)R_2 \text{ với } i < i_2 \text{ và } i \searrow \\ -v_{ex} + (i + i_3)R_3 \text{ với } i < i_3 \text{ và } i \nearrow \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó R_1, R_2, R_3 là hệ số góc tương ứng của mỗi giai đoạn, và:

$$i_1 = \frac{v_{ig}}{R_1}; i_2 = 3i_1; i_3 = \frac{v_{ex}}{R_1}; \text{ và } i_T = 1.5i_1$$

2.3. Mô hình 3 (model 3)

Một phương pháp xấp xỉ đặc tính V-I khác được đưa ra trên Hình 3 [4].



Hình 3. Đặc tính V-I của mô hình 3

Vì hiệu điện thế của hồ quang thay đổi sự phân cực rất nhanh, nên model này bỏ qua thời gian tăng điện áp, dẫn đến sự thay đổi đột ngột trong điện áp hồ quang khi dòng điện hồ quang đi qua điểm zero. Một chu kì hoàn chỉnh của đặc tính V-I được đưa ra bởi công thức sau [11]:

$$v = \text{sign}(i)(v_{at} + \frac{C}{D + |i|}) \quad (3)$$

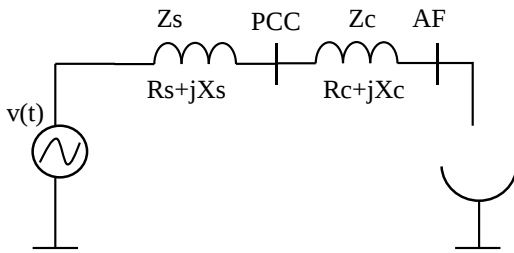
Với C là công suất hiệu dụng, D là hệ số, v_{at} phản ánh điều kiện hoạt động của lò và được tính theo công thức kinh nghiệm sau [4]:

$$v_{at} = A + B \cdot l$$

Trong đó, A, B là hệ số kinh nghiệm và l là chiều dài hồ quang.

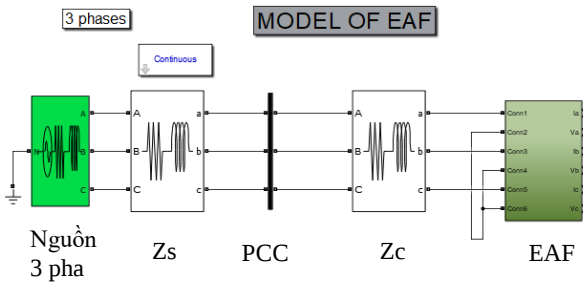
3. Mô hình hóa các mô hình lò hồ quang

Để đưa ra sự khác nhau của các mô hình lò hồ quang, một hệ thống lò hồ quang ba pha được xây dựng với sơ đồ như Hình 4, với Z_s là trở kháng của đường dây, thanh cái PCC là điểm kết nối chung, thanh cái AF là phía điện áp thấp của máy biến áp được đại diện bởi trở kháng Z_c . Các thông số này được giới thiệu trong [4].



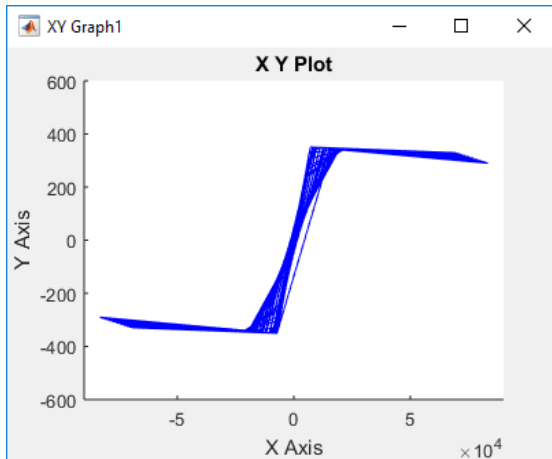
Hình 4. Sơ đồ hệ thống lò hồ quang

Sơ đồ mô phỏng được xây dựng dưới Matlab Simulink được giới thiệu trên Hình 5.

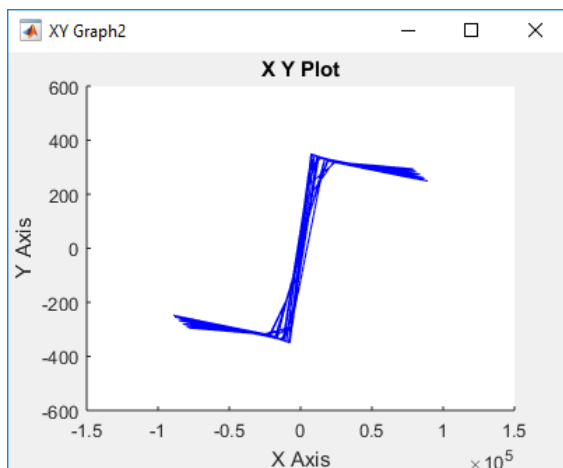


Hình 5. Sơ đồ mô phỏng dưới Matlab Simulink

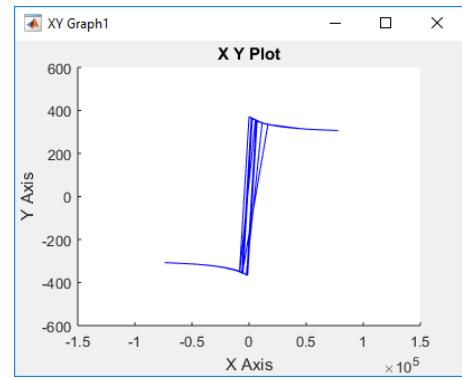
Kết quả mô phỏng đặc tính V-I của model 1, model 2, model 3 lần lượt được giới thiệu trên các hình sau:



Hình 6. Mô phỏng đặc tính V-I của model 1



Hình 7. Mô phỏng đặc tính V-I của model 2



Hình 8. Mô phỏng đặc tính V-I của model 3

Từ kết quả mô phỏng, model 2 mô phỏng đặc tính V-I chính xác hơn hai model 1 và model 3. Bởi vì, model 2 mô tả đầy đủ ba pha của lò nấu thép hơn hai model 1 và model 3, chỉ mô tả có hai pha. Hơn nữa, model 2 không tuyến tính hóa hoàn toàn đặc tính V-I như model 1. Model 3 thì không xem xét quá trình tăng điện áp ban đầu và phụ thuộc hoàn toàn vào công thức kinh nghiệm sẽ không thể áp dụng tổng quát cho việc nghiên cứu các tác động đến lưới điện của tất cả các lò hồ quang. Vì vậy, trong phần tiếp theo, tác giả sử dụng model 2 cho các nghiên cứu của mình và kết quả đưa ra được thực hiện với model 2.

4. Nghiên cứu sóng hài và sự nhấp nháy điện áp (flicker)

Điện áp nhấp nháy là một hiện tượng ngẫu nhiên và biến đổi theo thời gian. Theo tiêu chuẩn IEC6100-4-15, IEEE-519, sự biến đổi điện áp trung bình nằm trong dải tần số 0,5-25Hz.

Để phân tích vấn đề này, cần có một mô hình động của lò hồ quang. [3] đưa ra phương pháp điều chỉnh hệ số góc R_2 vì nó nằm trong giai đoạn dòng điện đi qua điện cực nhiều hơn, theo công thức sau:

$$R_2(t) = R_2(1 + m \cdot \sin(2\pi f_f t)) \quad (4)$$

Với m là hệ số điều chỉnh và f_f là tần số nhấp nháy điện áp.

Tuy nhiên, quá trình nấu chảy kim loại từ khi bắt đầu đến khi kết thúc là quá trình động. Vì vậy, mô hình tải động được xem xét như biến đổi theo chu kỳ. Do đó, tác giả đề xuất xem các hệ số góc khi bắt đầu quá trình nấu chảy kim loại R_2 và R_3 của model 2 (các model khác xem xét tương tự) đều biến đổi theo chu kỳ và được định nghĩa như phương trình (4).

Kết quả được giới thiệu trong **Bảng 1** với giá trị $m=0,4$ và nhiều giá trị f_f khác nhau. Do sự chênh lệch giữa các pha là nhỏ, nên ở đây, tác giả chỉ đưa ra kết quả của một pha. Từ **Bảng 1**, chúng ta thấy rằng độ nhấp nháy điện áp không ảnh hưởng nhiều đến sóng hài thành phần và TDH của cả điện áp và dòng điện tại điểm PCC. Tuy nhiên, đối với điện áp tại điểm PCC, thành phần sóng hài bậc 5 đã vượt quá tiêu chuẩn cho phép. Đối với dòng điện tại điểm PCC thì cả thành phần sóng hài bậc 5 và THD đều vượt tiêu chuẩn cho phép. Thành phần sóng hài bậc 7 của dòng điện và điện áp tại điểm PCC cũng khá cao. Hơn nữa hệ số công suất thấp (0,785 so với tiêu chuẩn 0,85). Điều này đặt ra là cần phải thực hiện lọc sóng hài và bù công suất phản kháng để giảm các sóng hài này và tăng hệ số công suất phù hợp với tiêu chuẩn.

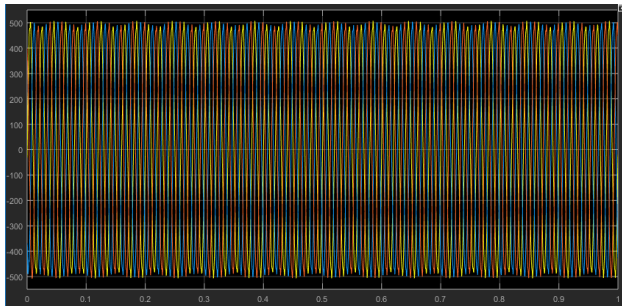
Bảng 1. Thành phần sóng hài và hệ số công suất với các tần số f_i khác nhau

	Sóng hài (%)	$f_r=5$	$f_r=10$	$f_r=15$	$f_r=18$	TCV N (%)
Điện áp tại PCC	Bậc 3	0,02	0,04	0,04	0,08	3
	Bậc 5	3,42	3,34	3,35	3,33	3
	Bậc 7	2,25	2,27	2,28	2,27	3
	Bậc 9	0,04	0,05	0,05	0,06	3
	Bậc 11	1,39	1,23	1,24	1,23	3
	THD	4,54	4,62	4,61	4,6	6,5
Dòng điện tại PCC	Bậc 3	0,17	0,06	0,48	0,32	4
	Bậc 5	5,23	4,95	4,98	4,82	4
	Bậc 7	2,52	2,44	2,45	2,42	4
	Bậc 9	0,06	0,02	0,09	0,07	4
	Bậc 11	0,93	0,84	0,85	0,83	2
	THD	6,11	6,79	6,81	6,82	5
Hệ số công suất		0,78	0,785	0,78	0,785	0,85

Độ nhấp nháy điện áp ứng với các tần số khác nhau được giới thiệu trong **Bảng 2**. Độ nhấp nháy điện áp ứng với $f_r=15\text{Hz}$ cũng được giới thiệu trên **Hình 9**.

Bảng 2. Độ nhấp nháy điện áp ứng với f_i khác nhau

Tần số	$f_r=5$	$f_r=10$	$f_r=15$	$f_r=18$
Flicker ($\frac{\Delta V}{V}$, %)	3,36	3,06	4,33	4,24



Hình 9. Độ nhấp nháy điện áp ứng với $f_r=15\text{Hz}$

Từ Bảng 2, ta thấy độ nhấp nháy điện áp rất cao ($>3\%$) và phụ thuộc nhiều vào tần số nhấp nháy.

Từ các kết quả nhận được, ta thấy rằng lò hồ quang đã làm suy giảm rất lớn chất lượng điện năng tại điểm PCC (nằm dưới mức so với tiêu chuẩn Việt Nam). Điều này gây nên tổn thất lớn về điện năng và làm cho các thiết bị đấu nối vào điểm PCC nhanh hư hỏng. Từ đó cần có các biện pháp để nâng cao chất lượng điện năng tại điểm PCC.

5. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả giới thiệu ba mô hình lò hồ

quang trong miền thời gian. Các mô hình thực hiện trên cơ sở xấp xỉ gần đúng đặc tính V-I. Các mô hình này được thực hiện mô phỏng dưới Matlab Simulink. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình 2 cho kết quả tốt hơn hai mô hình còn lại. Tác giả cũng đề xuất nghiên cứu độ nhấp nháy điện áp từ khi bắt đầu quá trình nấu chảy kim loại bằng cách xem các hệ số góc R_2 và R_3 biến đổi theo chu kì.

Kết quả phân tích từ mô hình 2 cho thấy lò hồ quang tác động rất lớn đến chất lượng điện năng tại điểm kết nối chung PCC của lưới điện. Chất lượng điện năng tại điểm này cũng không đáp ứng được tiêu chuẩn Việt Nam.

Các kết quả thu được cũng tạo điều kiện cho những nghiên cứu tiếp theo như thiết kế và tối ưu các bộ lọc sóng hài và bù công suất phản kháng để giảm độ nhấp nháy điện áp và nâng cao chất lượng điện năng tại điểm PCC phù hợp với tiêu chuẩn Việt Nam.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ phát triển tiềm lực Khoa học Công nghệ của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật – Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số T2018-06-104.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] “Four à arc électrique”, *Wikipédia*. 22-Feb-2018.
- [2] O. Ozgun and A. Abur, “Flicker study using a novel arc furnace model”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, no. 4, pp. 1158–1163, Oct. 2002.
- [3] M. A. Golkar and S. Meschi, “MATLAB modeling of arc furnace for flicker study”, in *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008, pp. 1–6.
- [4] T. Zheng, E. B. Makram, and A. A. Girgis, “Effect of different arc furnace models on voltage distortion”, in *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.98EX227)*, 1998, vol. 2, pp. 1079–1085 vol.2.
- [5] W. Ting, S. Wrennan, and Z. Yao, “A new frequency domain method for the harmonic analysis of power systems with arc furnace”, in *1997 Fourth International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, APSCOM-97. (Conf. Publ. No. 450)*, 1997, vol. 2, pp. 552–555 vol.2.
- [6] K. A. Nguyen, C. Hoang, T. H. Le, T. C. Le, and D. B. Ngo, “Modelling and simulation static VAR compensator by Matlab/Simulink for reducing impacts of EAF on power”, in *Hội Nghị Sinh viên nghiên cứu khoa học lần thứ 7*, 2010, pp. 100–105.
- [7] M. A. P. Alonso and M. P. Donsion, “An improved time domain arc furnace model for harmonic analysis”, *Power Deliv. IEEE Trans. On*, vol. 19, no. 1, pp. 367–373, Jan. 2004.
- [8] T. Zheng and E. B. Makram, “An adaptive arc furnace model”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 15, no. 3, pp. 931–939, Jul. 2000.
- [9] “Thông Tư Quy định hệ thống điện phân phối.” 39/2015/TT-BCT, 18-Nov-2015.
- [10] S. Juan Celada, “Electrical analysis of the steel melting arc furnace”, *Iron Steel Eng.*, vol. 70, pp. 35–39, May 1993.
- [11] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, and D. Zaninelli, “Arc-furnace model for the study of flicker compensation in electrical networks”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, no. 4, pp. 2026–2036, Oct. 1994.

(BBT nhận bài: 15/8/2018, hoàn tất thủ tục phản biện: 16/10/2018)