

# On a Matlab/Simulink of Power Quality Issues in Distribution System with the Presence of Electric Arc Furnaces and Mitigation Solution Using Active Filter

Ngo Van Thai<sup>1,2</sup>, Bach Quoc Khanh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Vinh Thanh Trading & Service Company Ltd., Hanoi, Vietnam

\*Email: thainv@vinhthanh ltd.vn

## Abstract

The non-linearity of the conductance of the electric arc furnace causes voltage flicker and harmonics in power systems. Nowadays, the application of electric arc furnaces in the steel production industry in Vietnam also results in the aforementioned power quality issues and it has been critical to find appropriate solutions for mitigation of those issues recently. This paper develops a time-domain simulation of electric arc furnace that can show power quality issues such as voltage flicker and harmonics in the distribution system and the solution using an active filter for power quality improvement in MATLAB/SIMULINK and thus, it is possible to assess the influences of different parameters of electric arc furnace on the design of active filter. The comparison of simulation results and experimental results obtained from the distribution system of the factory of Thien Phat Company has been conducted.

Keywords: Active filter, distribution system, electric arc furnace, harmonics, power quality.

## 1. Giới thiệu

Lò hồ quang điện – Electric Arc Furnace (EAF) được dùng khá phổ biến trong lĩnh vực sản xuất thép, một trong những ngành kinh tế phát triển ở Việt Nam trong nhiều năm qua. Bản chất phi tuyến và bất định của điện dẫn của EAF là nguyên nhân sinh ra nhiều vấn đề về chất lượng điện năng (CLĐN) như dao động điện áp và sóng hài [1]. Công suất của các phụ tải này thường lại rất lớn đã làm xấu đi CLĐN của lưới điện và gây ra nhiều tranh chấp giữa các hộ dùng điện với các đơn vị quản lý vận hành lưới điện, đặc biệt lưới phân phối. Trong thời gian qua, tại Việt Nam đã có một số nghiên cứu về mô phỏng các vấn đề CLĐN và các giải pháp [2], nhưng việc hiểu rõ bản chất, cơ chế phát sinh các vấn đề CLĐN của EAF, phân tích các yếu tố ảnh hưởng và đặc biệt các giải pháp khắc phục các vấn đề CLĐN sinh ra bởi EAF vẫn còn rất thiếu. Bài báo này là một sự cố gắng mô phỏng sự vận hành của EAF trong nhà máy đúc gang cầu Thiên Phát nối với lưới phân phối, các vấn đề CLĐN sinh ra và giải pháp sử dụng bộ lọc tích cực để cải thiện CLĐN. Kết quả mô phỏng sẽ được so sánh và đánh giá với kết quả đo thực tế. Mô phỏng cũng cho phép đánh giá một cách hiệu quả các yếu tố ảnh hưởng đến CLĐN và giải pháp sử dụng thiết bị lọc tích cực. Bài báo gồm các phần như sau: phần 2 - mô phỏng lò hồ quang điện, phần 3 - xây dựng mô phỏng bộ lọc tích cực, phần 4 – mô phỏng lưới điện của nhà máy Thiên Phát có sử dụng EAF và giải pháp cải thiện CLĐN.

## 2. Mô phỏng lò hồ quang điện

### 2.1. Phương trình mô tả đặc tính làm việc của lò hồ quang điện

Nghiên cứu các vấn đề về CLĐN do EAF sinh ra được dựa trên mô phỏng điện dẫn của EAF. Các mô hình điện dẫn của EAF trong giai đoạn nguy hiểm và bất định nhất (giai đoạn nấu chảy phôi thép) cả trong miền thời gian và miền tần số đã được phân tích ở [3]. Trong nghiên cứu này, điện dẫn EAF được mô phỏng dựa trên sự kết hợp các mô hình Cassie và Mayr để mô tả điện dẫn của EAF trong hai chế độ dòng điện cao và thấp [4] trong miền thời gian. Phương trình độ dẫn hồ quang  $G$  của EAF như sau.

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

trong đó:

$i, v$ : Dòng điện và điện áp của EAF,

$G_{min}$ : Điện dẫn ban đầu giữa hai điện cực khi không có hồ quang.

$E_0$ : Điện áp hồ quang ở trạng thái ổn định không đổi.

$P_0$ : Hằng số tổn hao năng lượng.

$I_0$ : Dòng điện dịch chuyển.

$\theta$ : Hằng số thời gian năng lượng hồ quang.

$\theta = \theta_0 + \theta_1 e^{-\alpha|i|}$  với  $\theta_1 \gg \theta_0$  và  $\alpha > 0$  là tham số cho trước. Khi hồ quang cháy và tắt,  $i$  nhỏ thì  $\theta \approx \theta_1$ , khi  $i$  lớn thì  $\theta \approx \theta_0$  [3].

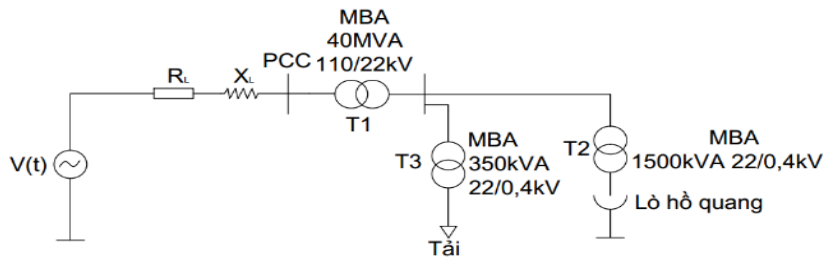
Mô hình này cho phép nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số của EAF đến sự CLĐN trong vận hành của lưới và thiết kế các giải pháp cải thiện CLĐN như:

- Điều chỉnh các thành phần thụ động hạn chế tác động của EAF như trở kháng của nguồn;
- Sử dụng các thiết bị bù thông qua các thyristor, các thành phần thụ động, các thiết bị FACTS;

- Thiết kế các bộ lọc sóng hài để giảm thiểu tác động của sóng hài lên hệ thống điện...

### 2.2. Lưới điện mẫu và mô hình mô phỏng

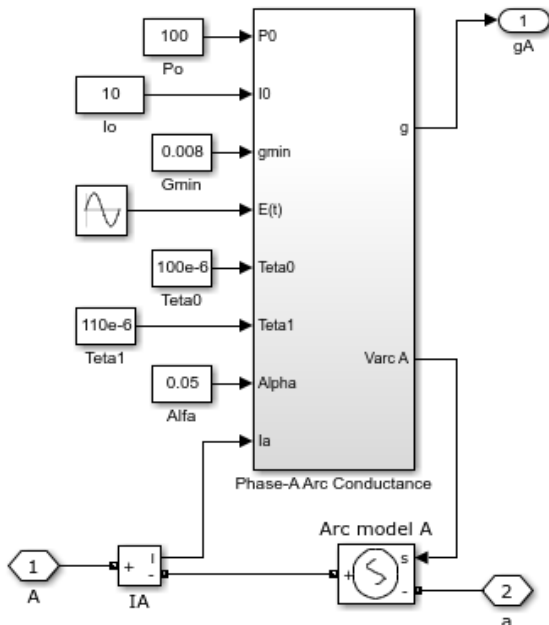
Lưới điện mẫu được sử dụng trong mô phỏng là lưới điện trong nhà máy đúc gang cầu của công ty Thiên Phát, điển hình cho một phụ tải EAF trên lưới phân phối Việt Nam với các thông số lưới, phụ tải và EAF dựa trên thực tế được cho trong Bảng 1. Nhà máy được cấp điện qua trạm biến áp trung gian 110/22kV. EAF được cấp bởi máy biến áp 22/0,4kV riêng. Phụ tải của nhà máy được đăng trị như một tải thụ động được cấp điện qua một máy biến áp phân phối như Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ một sợi lưới điện mẫu

### 2.3 Mô hình mô phỏng lò hồ quang điện

Trong Simulink, EAF ba pha được mô phỏng bởi ba hệ thống con tương ứng. Hình 2 là mô phỏng hệ thống con 1 pha của EAF với dữ liệu đầu vào được đưa ra trong Bảng 1. Hình 3 là mô phỏng phương trình độ dẫn ba pha của EAF (1).



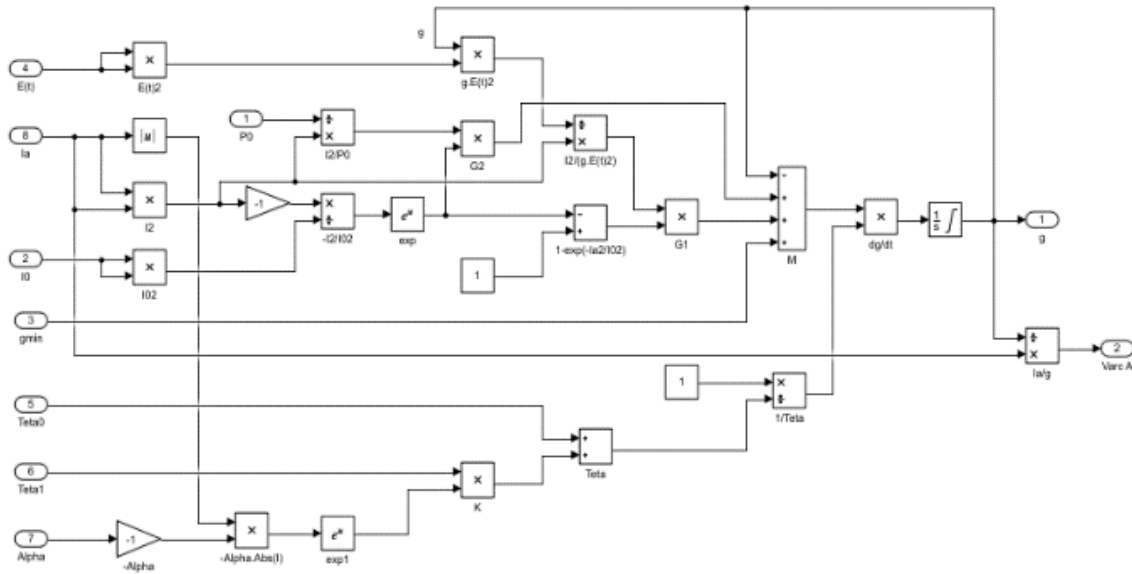
Hình 2. Mô hình điện dẫn pha A của EAF

Bảng 1. Thông số hệ thống điện thử nghiệm

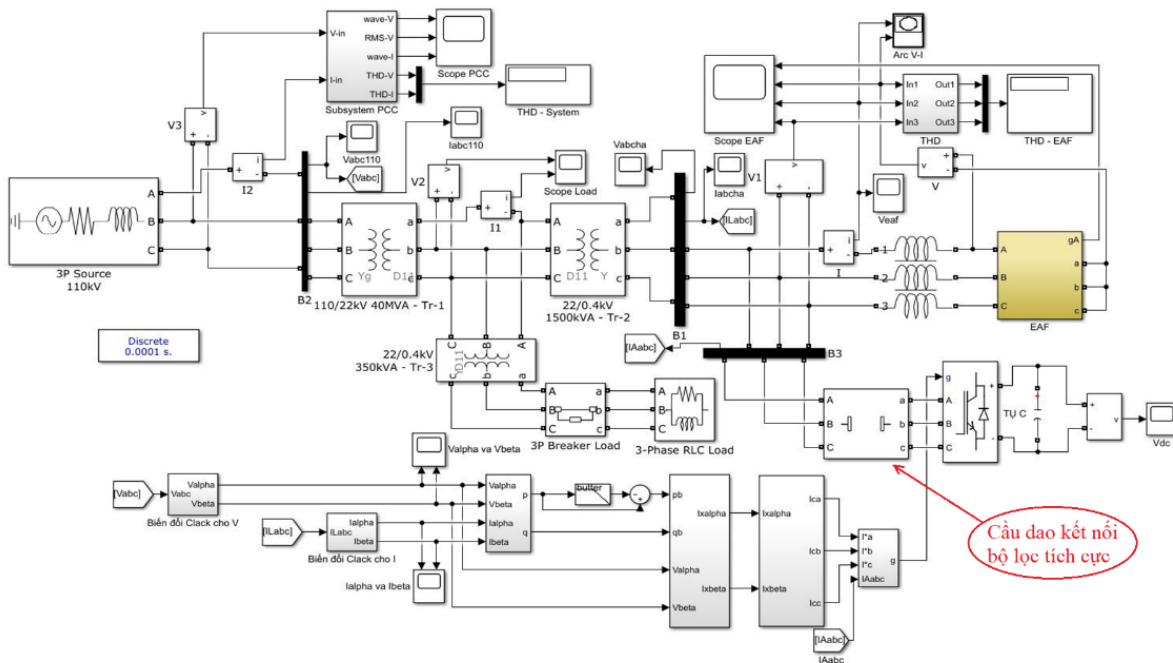
Phần tử	Thông số
Nguồn	Điện áp: 110kV; Tần số: 50Hz Công suất: 500MVA Tỷ số X/R: 7
Trạm biến áp 110kV	Tỷ số điện áp: 110kV/22kV Công suất: 40MVA; Tần số: 50Hz Thông số cuộn dây máy biến áp: Phía cao áp: $R_{HV}=0,002pu$ ; $L_{HV}=0,04pu$ Phía hạ áp: $R_{LV}=0,002pu$ ; $L_{LV}=0,004pu$
Lò hồ quang	Lò hồ quang kết hợp máy biến áp: Công suất: $S_n=1500kVA$ ; Tần số: 50Hz Thông số cuộn dây máy biến áp: Cao áp: $R_{HV}=0,002pu$ ; $L_{HV}=0,04pu$ Hạ áp: $R_{LV}=0,002pu$ ; $L_{LV}=0,04pu$ Cáp từ máy biến đến lò hồ quang: $R_A = R_B = R_C = 0,0004\Omega$ $L_A=L_B=L_C=1.6 \times 10^{-5}H$ Các thông số của lò hồ quang: $\theta_0=110.10^{-6}$ ; $\theta_1=100.10^{-6}$ ; $P_o=100$ ; $I_o=10$ ; $E_o=200$ ; $G_{min}=0,008$ ; $\alpha=0,005$ [5]
Đường dây 110kV	$R_l=0.1\Omega$ ; $L=1.10^{-3}(H)$

Sơ đồ một sợi của lưới điện mẫu (Hình 1) được mô phỏng trên Matlab/Simulink như Hình 4. Chạy mô phỏng trong thời gian 0,4 giây, ta thu được biên dạng sóng của dòng điện và sóng hài dòng điện của hệ thống tại các cấp điện áp 110kV và 0,4kV được thể hiện trên Hình 5, 6, 7. Hình 8 vẽ đặc tính v-i của EAF và điện áp của PCC cho pha A. Tại đầu cực EAF (Hình 5), dao động điện áp và sóng hài lớn. Tại điểm nối với hệ thống (Hình 6), dao động điện áp và sóng hài ít hơn do tổng

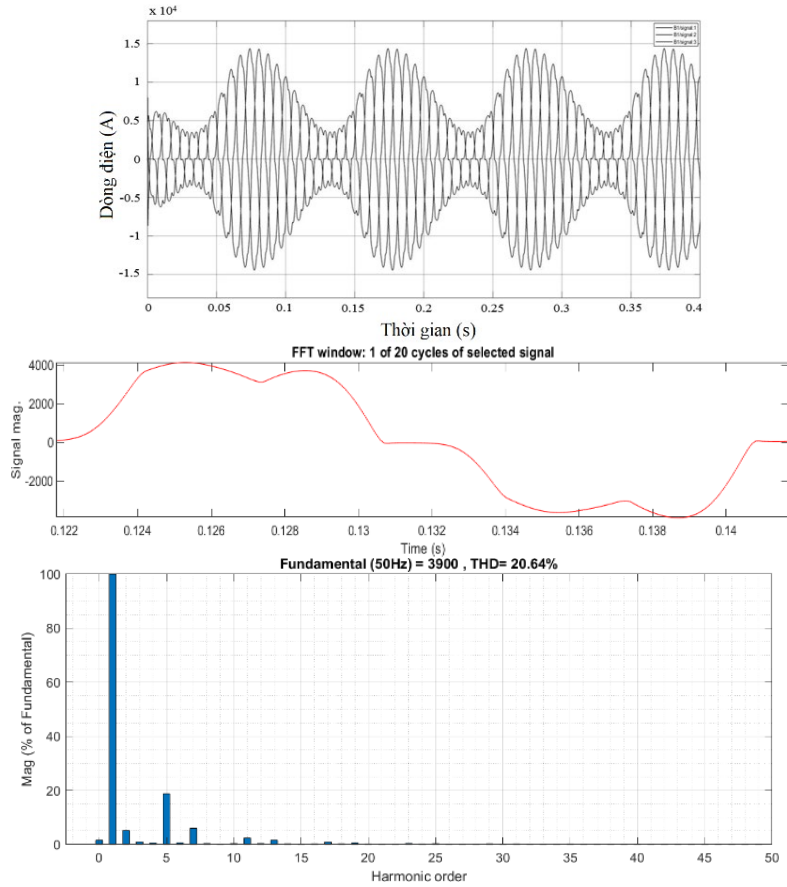
trở cao của các máy biến áp cấp cho EAF và máy biến áp trung gian, tuy nhiên THD và sóng hài dòng điện của lưới tương đối lớn (khoảng 17,08%). Trong lưới điện thực tế nhà máy sử dụng bộ đo CLĐN Chauvin Arnoux CA8336 để đo biên độ sóng và sóng hài dòng điện của nhà máy tại thanh cái 0,4kV ta thu được hình ảnh như ở Hình 9 và THD của 3 pha lần lượt là 22,1%; 22,68% và 22,4% [6]. So sánh kết quả mô phỏng và kết quả đo thực tế tương đối phù hợp.



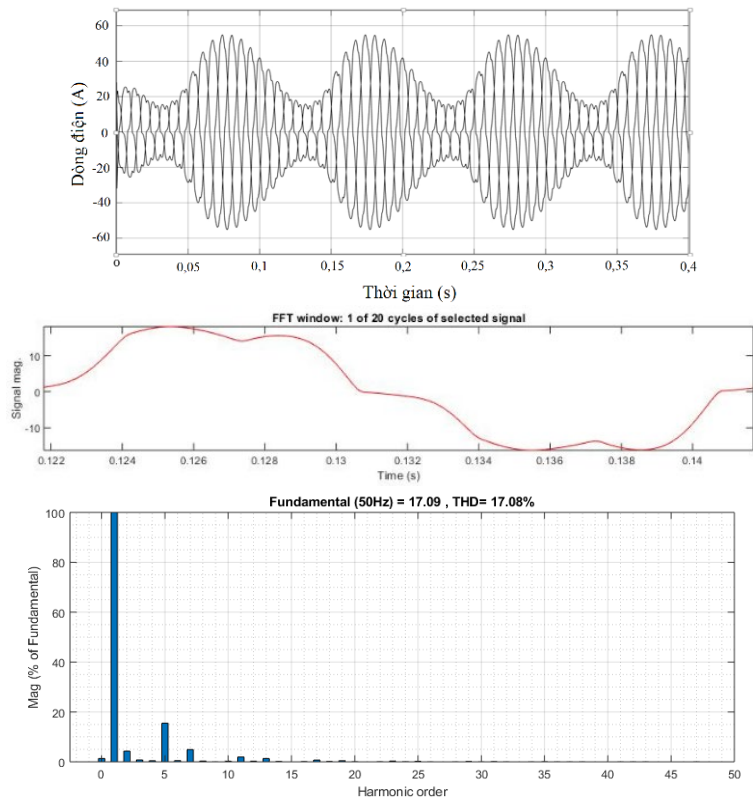
Hình 3. Mô phỏng phương trình điện dẫn pha A của EAF



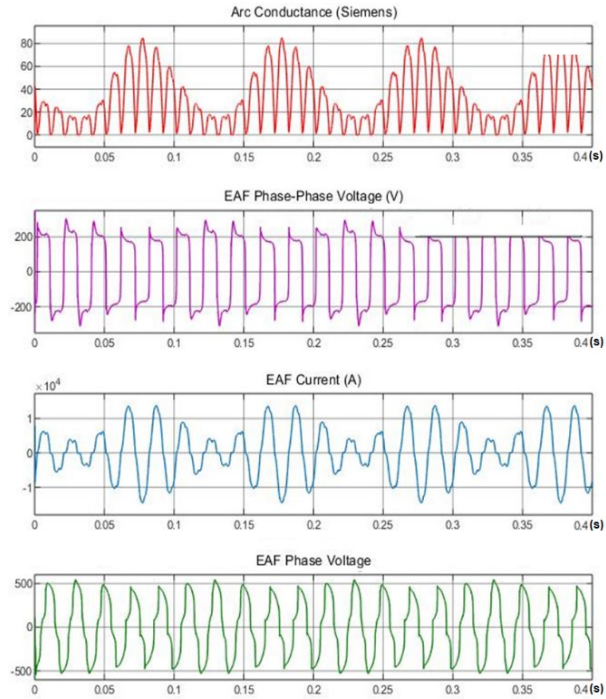
Hình 4. Mô phỏng Simulink lưới điện mẫu và giải pháp sử dụng bộ lọc tích cực



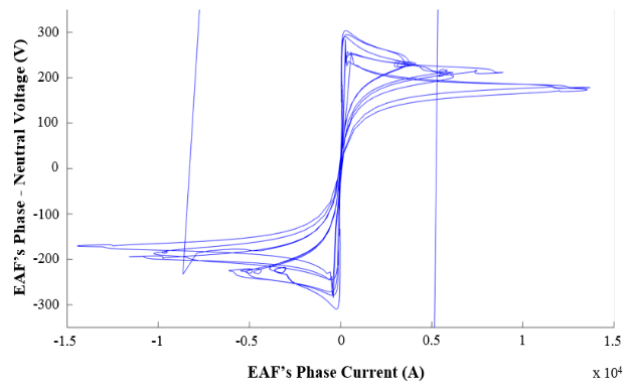
Hình 5. Biên dạng sóng và sóng hài của dòng điện phía 0,4kV



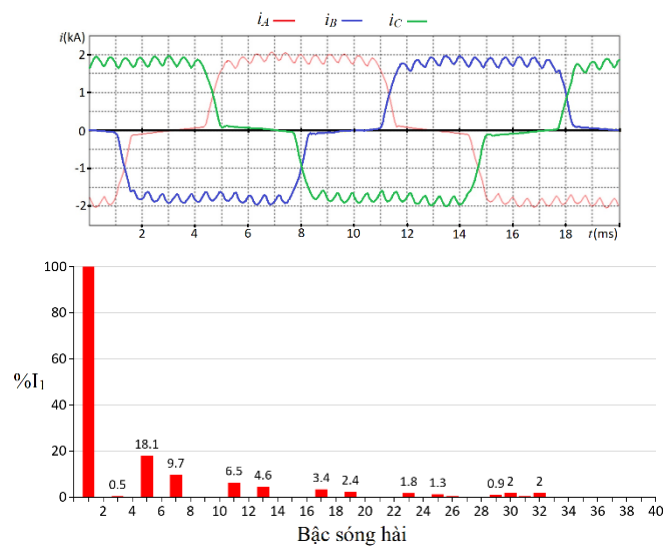
Hình 6. Biên dạng sóng và sóng hài của dòng điện phía 110kV



Hình 7. Điện dẫn, điện áp, dòng điện của EAF và điện áp pha A của PCC



Hình 8. Đặc tính v-i pha A của EAF



Hình 9. Kết quả đo thực tế biến dạng dòng điện 3 pha và phổ sóng hài dòng điện pha A khi chưa lắp bộ lọc

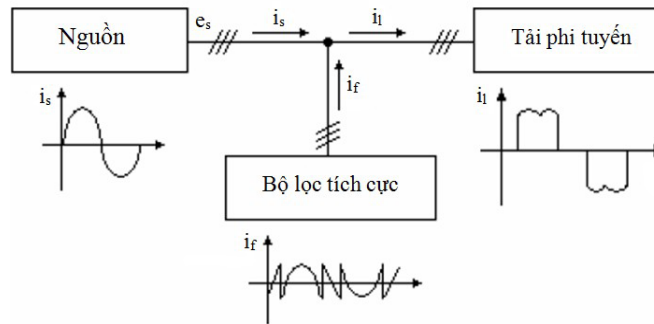
### 3. Xây dựng mô hình bộ lọc tích cực

Bộ lọc tích cực – Active filter (AF) là thiết bị sử dụng các bộ inverter để khử đồng thời nhiều bậc sóng hài và bù đắp các biến dạng sóng [7]. Các AF được kết nối song song với các nguồn phát sinh sóng hài (Hình 10) để ngăn chặn việc bơm sóng hài lên lưới.

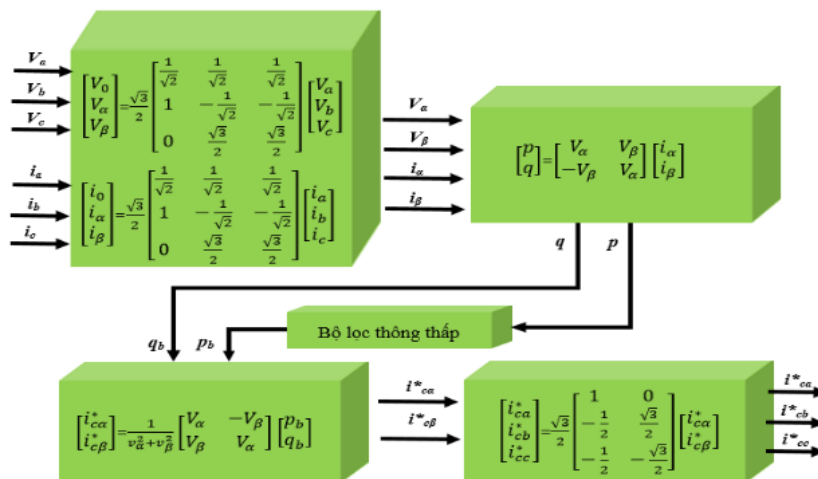
Thuật toán điều khiển AF để đảm bảo lọc sóng hài và bù đắp biến dạng sóng được diễn giải theo sơ đồ

khối Hình 11 [8]

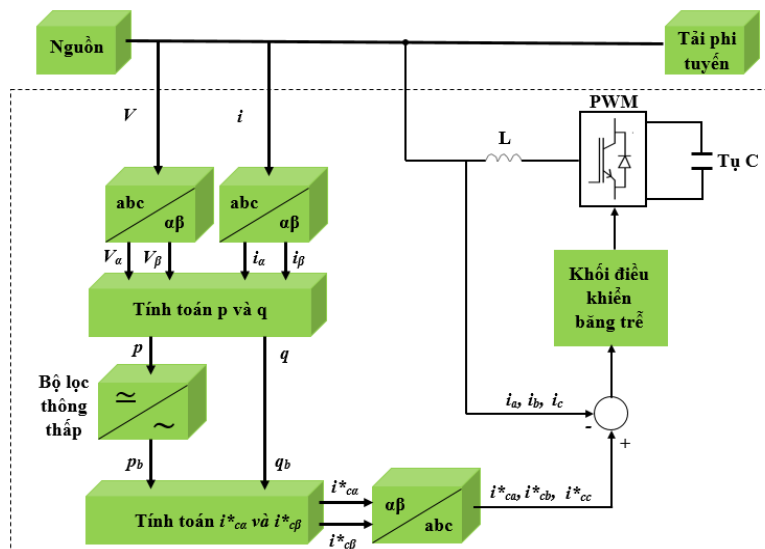
Thuật toán điều khiển AF dựa trên lý thuyết công suất tức thời với biến đổi Park sang hệ tọa độ quay  $p-q$  [9, 10] để bù sóng hài được xây dựng dựa trên lý thuyết này đơn giản, dễ dàng thực hiện và hiệu quả cao. Hình 11 trình bày sơ đồ khối bộ điều. Hình 12 là sơ đồ khối kết nối AF vào lưới điện.



Hình 10. Mô hình cấu trúc của hệ thống



Hình 11. Các khối thuật toán điều khiển bộ lọc tích cực kiểu song song



Hình 12. Sơ đồ khối lưới điện mẫu

#### 4. Mô phỏng Matlab/Simulink lưới điện mẫu với bộ lọc tích cực

Thông số lưới mẫu được thiết lập như Bảng 1. Từ kết quả đo đếm thực tế tại thanh cái 0,4kV của nhà máy đúc gang cầu Thiên Phát ta có dòng điện lớn nhất tại đầu cực máy biến áp EAF là 1539A và  $THD_I$  lớn nhất là 22,67% [6] tính toán được các thông số của AF.

Từ điện áp của điểm kết nối AF ta tính chọn được nguồn điện một chiều cho bộ nghịch lưu [11]

$$U_{DC} = 1,2 \times 2,45 \times U_{pha} = 645(V) \quad (2)$$

Chọn  $U_{DC} = 660V$ .

Điện cảm và điện dung của AF được tính theo công thức [10]:

$$L_f = \frac{U_f - U_s}{4 \cdot \zeta \cdot f_c} = \frac{660 - 220}{4 \times 10 \times 10000} = 0,11mH \quad (3)$$

$$C = \frac{S_n}{U_{DC} \times \Delta U_{DC}} \times \frac{1}{2w} = \frac{3U_s \times THD_I \times I_{max}}{U_{DC} \times \Delta U_{DC} \times 4\pi f} \quad (4)$$

trong đó:

$S_n$ : là công suất biểu kiến của bộ lọc

$w, f$ : Tốc độ góc và tần số cơ bản của lưới điện

$\Delta U_{DC}$ : Độ biến thiên điện áp DC ( $=5\%U_{DC}$ ).

$U_f, U_s$ : Điện áp bộ nghịch lưu và điện áp pha tại PCC

$\zeta, f_c$ : Biên độ và tần số của xung tam giác.

$THD_I, I_{max}$ : Tổng sóng hài dòng điện và dòng điện cực đại tại PCC.

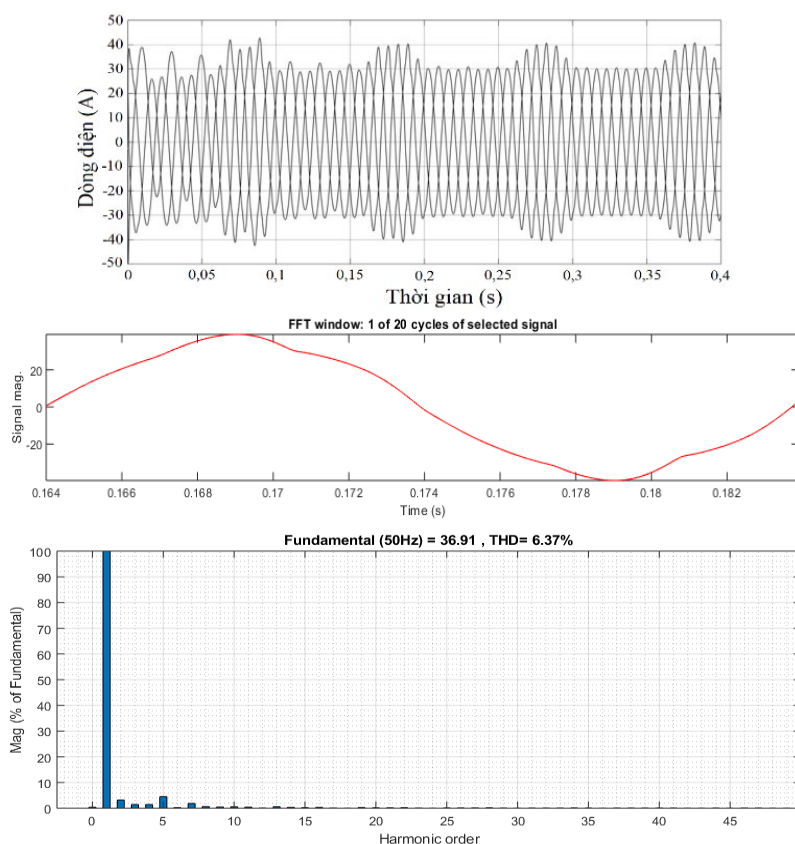
Từ các thông số đo đếm tại nhà máy đúc gang cầu Thiên phát ta tính được dung lượng tụ điện của AF có giá trị bằng 16,8mF theo công thức (4).

Bộ lọc thông thấp có bậc lọc: 7

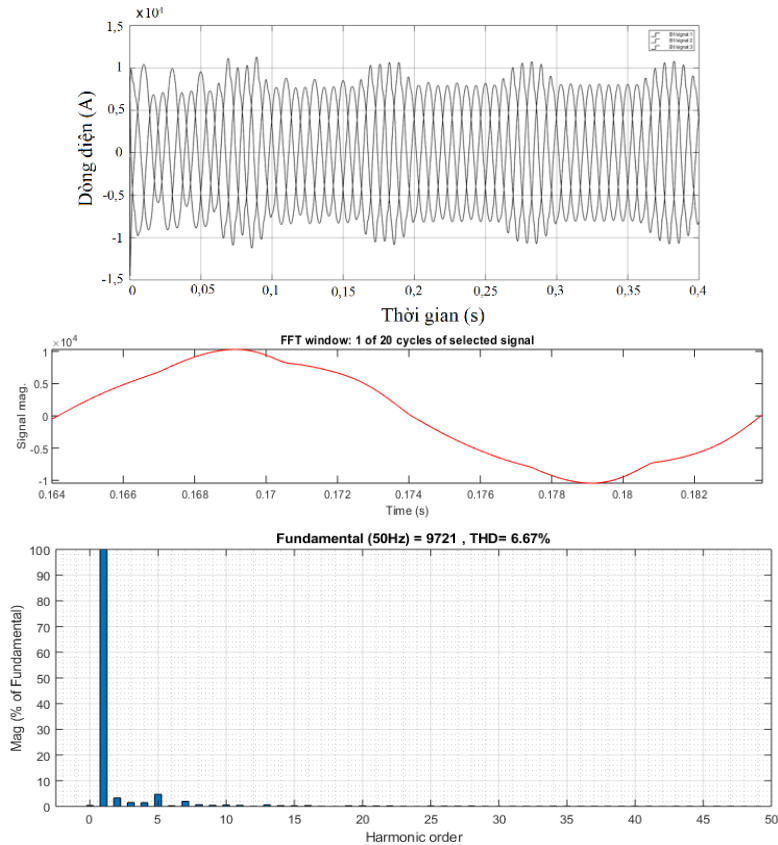
Giới hạn băng thông:  $20 \times \pi$  rad/s

Mô phỏng Matlab/Simulink lưới điện mẫu có AF như Hình 4. Chạy mô phỏng và đo lại các biến dạng sóng, sóng hài của dòng điện và điện áp, điện dẫn, điện áp và dòng điện EAF kết quả thể hiện trên các Hình 14-17.

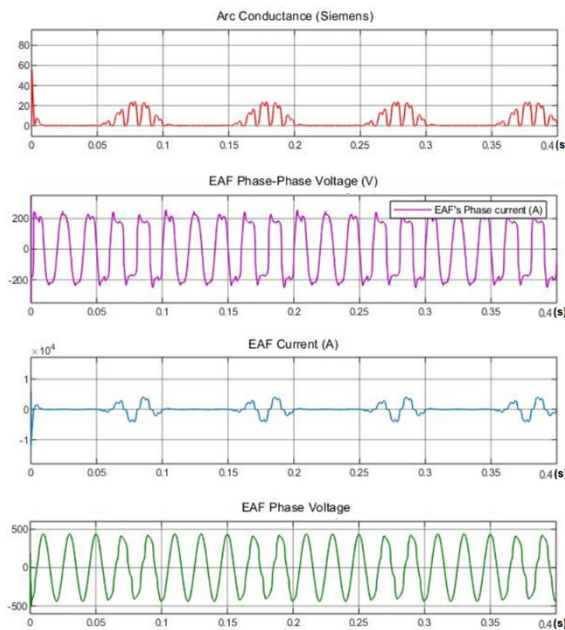
Kết quả cho thấy hiệu quả sử dụng AF để giảm thiểu sóng hài.  $THD$  tại đầu cực EAF giảm còn 6,67%. Theo kết quả đo thực tế thì  $THD_I$  trên 3 pha cũng được cải thiện lần lượt là 8,7%; 9,6%; 8,7% [6] và cũng thỏa mãn yêu cầu về chất lượng điện năng. Kết quả đo thực tế cũng phù hợp với kết quả mô phỏng.



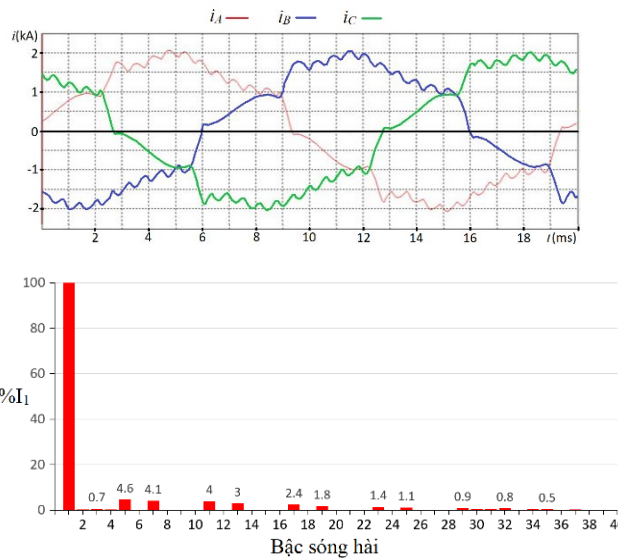
Hình 14. Biên dạng sóng và sóng hài dòng điện phía 110kV sau khi lắp bộ lọc



Hình 15. Biên dạng sóng và sóng hài dòng điện phía 0,4kV sau khi lắp bộ lọc



Hình 16. Điện dẫn, điện áp, dòng điện của EAF và điện áp pha A của PCC sau khi lắp bộ lọc



Hình 17. Kết quả đo thực tế biến dạng dòng điện 3 pha và phổ sóng hài dòng điện pha A sau khi lắp bộ lọc

## 5. Kết luận

Bài báo xây dựng mô phỏng Matlab/Simulink EAF để phân tích các hiện tượng CLĐN sinh ra bởi EAF cũng như giải pháp sử dụng bộ lọc tích cực để hạn chế các vấn đề CLĐN sinh ra bởi EAF. Bài báo sử

dụng lưới điện mẫu là lưới điện trong nhà máy của công ty Thiên Phát như một trường hợp điển hình của lưới điện công nghiệp có EAF. Kết quả mô phỏng được so sánh với kết quả đo thực tế để kiểm nghiệm mô phỏng. Tính chất phi tuyến và bất định của điện



dẫn EAF là nguyên nhân dẫn đến biến dạng, sóng hài và dao động điện áp. Kết quả mô phỏng hoàn toàn phù hợp với kết quả kiểm nghiệm đo đạc thực tế. Mô phỏng này là công cụ tham khảo tốt để thiết kế giải pháp nâng cao CLĐN của lưới điện có các lò hồ quang điện.

#### **Tài liệu tham khảo**

- [1] Angelo Baggini, Handbook of Power Quality, John Wiley & Sons Ltd, (2008).  
<https://doi.org/10.1002/9780470754245>
- [2] Bach Quoc Khanh, Matlab/simulink of Power Quality Issues in Industrial Distribution System with the Presence of Electric Arc-Furnace, Tạp chí Khoa Học Công Nghệ, Đại Học Công Nghiệp Hà Nội, 41 (2017) 15-17.
- [3] T. Zheng, E.B. Makram, A.A. Girgis, Effect of different arc furnace models on voltage distortion, in Proc. IEEE 8th International Conference On Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece (1998).
- [4] King-Jet Tseng, Yaoming Wang and D. Mahinda Vilathgamuwa, An Experimentally Verified Hybrid Cassie-Mayr Electric Arc Model for Power Electronics Simulations, IEEE Transactions on Power Electronics, 12.3 (1997) 429-436.  
<https://doi.org/10.1109/63.575670>
- [5] A. Tavakkoli, Mehdi Ehsan, M. T. Batahiee, Mousa Marzband, A SIMULINK study of electric arc furnace power quality improvement by using STATCOM, Proceedings, IEEE International Conference on Industrial Technology, 2008. ICIT 2008.  
<https://doi.org/10.1109/ICIT.2008.4608655>
- [6] Biên bản thí nghiệm giám sát CLĐN tại nhà máy sản xuất gang cầu của Công ty Thiên Phát (2019).
- [7] Niklesh Das1, Sandeep Mude, Power quality improvement of three phase system using shunt active power filter, International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, 5.3 (2017) (Online) 2321 – 2004, (Print) 2321 – 5526.  
<https://doi.org/10.17148/IJREEICE.2017.5305>
- [8] Akagi, Hirofumi, Edson Hirokazu Watanabe, Mauricio Aredes. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. John Wiley & Sons, 2017.  
<https://doi.org/10.1002/0470118938>
- [9] Leszek S. Czarnecki, Instantaneous reactive power p-q theory and Power properties of 3-phase system, IEEE Transactions on Power Delivery, 21.1 (2006) 362-367.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.852348>
- [10] J. Afonso, C. Couto, J. Martins, Active filters with control based on p-q theory, IEEE Industrial Electronics Society Newsletter, 47.3 (2000) 5-10.
- [11] Jiang Zheng Rong, From Passive to Active Harmonic and Reactive Power Control (in Chinese), China Machine Press (2014).