

# GIẢM SÓNG HÀI CHO LƯỚI ĐIỆN PHÂN PHỐI SỬ DỤNG MẠCH LỌC TÍCH CỰC LAI KẾT HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN PI MỜ: MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

## Harmonic Distortion Reduction in Distribution Power Network Using High-capacity Hybrid Active Power Filter with Fuzzy PI Controller: Simulation and Experiment

Võ Tiến Trung<sup>1\*</sup>, Nguyễn Thị Bích Liên<sup>2</sup>, Nguyễn Minh Thu<sup>1</sup>, Lê Thị Minh<sup>3</sup>

### Tóm tắt:

Sóng hài vẫn là một trong các chỉ tiêu quan trọng để đánh giá chất lượng điện năng. Trên cơ sở lý thuyết về sóng hài và các giải pháp cải thiện sóng hài, bài viết đã đề xuất mô hình giảm sóng hài trong lưới phân phối điện bằng việc sử dụng mạch lọc tích cực kết hợp có điều khiển bởi bộ PI mờ. Mô hình mạch lọc được tiến hành mô phỏng trên phần mềm Matlab, số liệu mô phỏng được dựa trên đặc điểm và thông số của lưới phân phối điện cụ thể của Huyện Nghi Lộc – Nghệ An. Các kết quả mô phỏng về sóng hài được tính toán, phân tích, tổng độ méo của sóng hài (TDH) được so sánh đối chiếu đáp ứng được các tiêu chuẩn về sóng hài. Ngoài ra, trên cơ sở số liệu đo đạc, bài viết còn đề xuất một mô hình thực nghiệm thiết bị lọc (bộ lọc) để giảm lượng sóng hài trong hệ thống điện.

**Từ khóa:** Chất lượng điện năng, Sóng hài, Mạch lọc tích cực lai (HHAPF), Tổng độ méo sóng hài (THD).

### Abstract:

Harmonics are still one of the important indicators to evaluate power quality. Based on the theory of harmonics and solutions to improve harmonic distortion, the article has proposed a model to reduce harmonic distortion in the distribution power network using a hybrid active power filter with fuzzy PI controller. The model of simulation by Matlab software, the simulation data is based on the characteristics and parameters of the specific distribution power network in Nghi Loc

### Article history:

Received: 21/8/2024

Accepted: 20/9/2024

Published: 01/10/2024

### Authors' affiliations:

<sup>1</sup> Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh, Nghệ An, Việt Nam

<sup>2</sup> Trường Cao đẳng nghề số 4 – Bộ Quốc Phòng, Việt Nam

<sup>3</sup> Trường Cao đẳng Cộng đồng Lai Châu, Lai Châu, Việt Nam

\* Địa chỉ e-mail tác giả liên hệ: [votientrung.vut@gmail.com](mailto:votientrung.vut@gmail.com)

\* Số điện thoại tác giả liên hệ: +84 913258858

District - Nghe An. The simulation results on harmonics are calculated and analyzed, and the total harmonic distortion (TDH) meets specified conditions by standards. In addition, based on the measurement of voltage and current harmonic at PCC, the article also proposed an experimental model of a filter to reduce the harmonic distortion in the power system.

**Keywords:** Power quality, Harmonic distortion, High-capacity Hybrid Active Power Filter (HAPF), Total harmonic distortion (THD).

## I. GIỚI THIỆU CHUNG

Sóng hài là do sự hiện diện của các phụ tải dạng phi tuyến trong hệ thống điện. Một dạng sóng bất kỳ không sin có thể miêu tả như là tổng của các dạng sóng hình sin. Khi đồng nhất từ chu kỳ này sang chu kỳ khác nó có thể được miêu tả như những sóng sin cơ bản và sóng sin bội số của tần số cơ bản, có nghĩa là bao gồm sóng sin cơ bản và chuỗi của các dạng sóng sin hài bậc cao, mà được gọi là chuỗi Fourier. Những thành phần sóng hài bậc cao này là một dạng ô nhiễm điện năng và được gọi là méo hài. Sóng hài có thể phân tích theo chuỗi phân tích Fourier của một hàm có chu kỳ  $u(t)$  như sau [1]-[4]:

$$u(t) = U_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} (U_{(n)s} \sin(n\omega t) + U_{(n)c} \cos(n\omega t)) \quad (1)$$

$$U_{(n)s} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin(n\omega t) d\omega t$$

$$U_{(n)c} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos(n\omega t) d\omega t$$

Dấu hiệu để xác định một dạng sóng méo có thành phần hài bậc chẵn hay bậc lẻ như sau:

Đối xứng lẻ  $f(-t) = -f(t)$ , không có số hạng sin trong khai triển Fourier. Hài bậc lẻ xuất hiện khi nửa chu kỳ âm của dạng sóng méo lặp lại y hệt nửa chu kỳ dương, nhưng với chiều âm. Với chính lưu cầu xuất hiện hài bậc lẻ, còn các hài bậc chẵn bị triệt tiêu vì nửa chu kỳ dương và nửa chu kỳ âm là đối xứng nhau.

Đối xứng chẵn  $f(-t) = f(t)$ , không có số hạng cos trong khai triển Fourier. Hàm bậc chẵn xuất hiện khi nửa chu kỳ âm không lặp lại nửa chu kỳ dương. Một đặc điểm khác khi có hàm chẵn đó là phần tư chu kỳ đầu tiên và phần tư chu kỳ thứ tư là giống nhau, phần tư chu kỳ thứ hai và phần tư chu kỳ thứ ba là giống nhau.

Đối xứng nửa bước sóng  $f(t \pm T/2) = -f(t)$  có thành phần một chiều bậc 0 và khử các sóng hài bậc chẵn (2,4,6,...). Tính chất này cho phép bỏ qua các sóng hài bậc chẵn.

Mối quan hệ của bậc sóng hài với các thành phần đối xứng tương ứng như sau:

Thành phần thứ tự thuận: các sóng hài 1, 4, 7, ...,  $3k + 1$ .

Thành phần thứ tự nghịch: các sóng hài 2, 5, 8, ...,  $3k + 2$ .

Thành phần thứ tự không: các sóng hài 3, 6, ...,  $3k + 3$ .

(Với  $k = 0, 1, 2, 3 \dots$ ).

Độ méo điều hòa tổng THD là một số đo của độ méo tần số đơn vị gây ra bởi sóng hài trong hệ thống và được xác định theo công thức [1]:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}}; THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} \quad (2)$$

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} = U_{(1)} \sqrt{1 + THD_U^2}$$

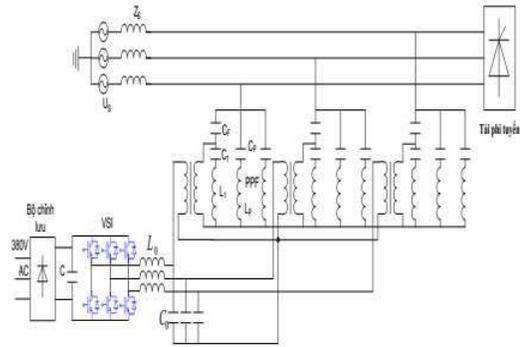
$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} = I_{(1)} \sqrt{1 + THD_I^2}$$

## II. MÔ HÌNH MẠCH LỌC TÍCH CỰC LAI KẾT HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN PI MỜ

Có nhiều phương pháp để giảm sóng hài được áp dụng như dùng các máy biến áp để cách ly sóng hài giữa nguồn và tải, sử dụng thêm cuộn dây nối tam giác trong máy biến áp để triệt tiêu sóng hài bậc 3, sử dụng các cuộn kháng điều hòa nối tiếp với các mạch chỉnh lưu, nghịch lưu, kết hợp với sử dụng các mạch chỉnh lưu nhiều xung.... Ngoài ra, một giải pháp được chú trọng hiện nay là sử dụng các bộ lọc. Trong bài viết này, sử dụng một dạng Mạch lọc tích cực kết hợp song song cải tiến gọi là High-capacity Hybrid Active Power Filter (HHAPF). Mục đích của dạng này nhằm giảm được công suất của mạch lọc tích cực (APF) do đó có thể ứng dụng được với mạng lưới có điện áp cao, công suất lớn [4].

### A. Mô hình mạch lọc tích cực kết hợp

Mạch lọc tích cực kết hợp là một tổ hợp của các mạch lọc thụ động và mạch lọc tích cực, chính vì sự tổ hợp này mà nó kế thừa được ưu điểm của cả mạch lọc thụ động và mạch lọc tích cực. Cấu trúc của HHAPF được biểu diễn ở Hình 1 gồm các phần chính sau: nguồn, tải phi tuyến, các mạch lọc thụ động (PPF), mạch lọc tích cực APF (APF bao gồm: bộ nghịch lưu nguồn áp VSI, biến áp, mạch lọc đầu ra của VSI và bộ chỉnh lưu không điều khiển) [5].



Hình 1. Cấu trúc của Mạch lọc tích cực kết hợp song song cải tiến.

Trong đó:

$U_s$  và  $Z_s$  là điện áp nguồn và trở kháng của lưới;

$C_p$  và  $L_p$  là các điện dung và điện cảm tạo nên các mạch lọc thụ động;

$C_1$  và  $L_1$  là điện dung và điện cảm cộng hưởng tại tần số cơ bản;

$C_F$  là điện dung được thêm vào nhằm lọc hài và bù công suất phản kháng;

Máy biến áp có tỉ số  $n:1$  nhằm bảo vệ, cách ly giữa nguồn và VSI;

$L_0, C_0$  là mạch lọc đầu ra của VSI.

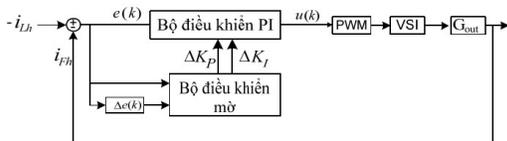
Tải phi tuyến được xem như là nguồn phát ra hài, trong khi đó bộ nghịch lưu nguồn áp VSI có thể xem như một nguồn áp có khả năng điều khiển được. Các hài tần số thấp do tải phi tuyến tạo ra phần lớn sẽ được loại bỏ bởi các mạch lọc thụ động, còn lại các hài bậc cao sẽ được loại bỏ bởi APF. APF phát ra các hài để bù vào lưới nhằm triệt tiêu các hài do tải phi tuyến tạo ra. Chính vì vậy mà hài trên lưới được loại trừ. Nhánh  $C_F-C_1-L_1$  được thêm vào nhằm mục đích khử hài, bù công suất phản kháng và giảm được công suất của APF. Do đó mà mạch này ứng dụng được ở các lưới điện áp cao, công suất lớn. Quá trình điều khiển đóng mở các IGBT của VSI được thực hiện bám theo sự thay đổi của dòng hài tải. Do đó, việc tính toán đúng các thông số và chọn phương pháp điều khiển là rất quan trọng.

B. Bộ điều khiển

Để điều khiển cho mạch lọc công suất tích cực lai có tụ cao áp cải tiến (HHAPF), thường sử dụng các phương pháp như: điều khiển hysteresis, so sánh, tiên đoán, trượt, PI, tích phân tổng quát, điều chế vectơ không gian,... và phương pháp thường được sử dụng nhất là phương pháp điều khiển hysteresis và phương pháp điều khiển PI. Phương pháp điều khiển Hysteresis [5], [6] có ưu điểm là đơn giản, đáp ứng nhanh nhưng khuyết điểm là phụ thuộc vào tần số chuyển mạch, việc khắc phục nhược điểm này cũng được nhưng mạch điều khiển hơi phức tạp.

Với phương pháp điều khiển PI truyền thống thì rất đơn giản, dễ thực hiện thực nghiệm [6]. Tuy nhiên, khuyết điểm của điều khiển PI là các thông số KP, KI là cố định, nếu chọn một giá trị KP quá lớn thì đáp ứng sẽ nhanh nhưng rất dễ mất ổn định và ngược lại. Hơn nữa, trong lĩnh vực khử hài thì quá trình điều khiển là phi tuyến. Do đó, nếu chỉ sử dụng điều khiển PI truyền thống thì rất khó để đạt được kết quả tốt. Để giải quyết khuyết điểm này người ta thường dùng điều khiển mờ, neural, hoặc dạng kết hợp PI với mờ, neural, ... [5]-[7].

Một bộ điều khiển PI-mờ được đưa ra trong nội dung này, nhiệm vụ của nó là nhằm điều khiển bộ nghịch lưu nguồn áp phát ra dòng bù như mong muốn. Kết quả mô phỏng chứng minh được rằng phương pháp điều khiển PI-mờ cho kết quả tốt hơn phương pháp điều khiển PI truyền thống.



Hình 2. Sơ đồ khối điều khiển của HHAPF dùng PI-mờ.

Các thông số  $K_P$ ,  $K_I$  ban đầu của bộ điều khiển PI được tính toán offline dựa vào phương pháp Ziegler-Nichols [6] và không thay đổi trong quá trình điều khiển. Bộ điều khiển mờ sẽ hiệu chỉnh các giá trị  $\Delta K_P$  và  $\Delta K_I$ , do đó các thông số  $K_P$ ,  $K_I$  của bộ điều khiển PI sẽ được điều chỉnh hợp lý theo sự thay đổi của tải.

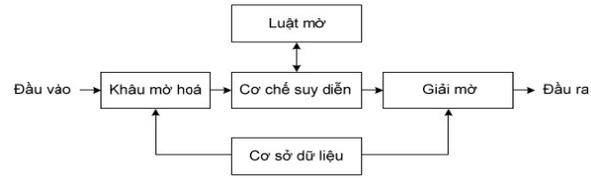
$$\begin{cases} K_{P-new} = K_{P-old} + \Delta K_P \\ K_{I-new} = K_{I-old} + \Delta K_I \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó,  $K_P$  và  $K_I$  lần lượt là độ lợi tỉ lệ và độ lợi tích phân của bộ điều khiển.

Nhiệm vụ của người thiết kế bộ điều khiển PI là chọn lựa bộ giá trị  $\{K_P, K_I\}$  thỏa mãn các yêu cầu

về chất lượng điều khiển. Các thông số độ lợi  $K_P$  và  $K_I$  ảnh hưởng đến thời gian tăng (rise time), độ tăng (overshoot) và thời gian xác lập (settling time) của đáp ứng. Các thông tin này được xem là cơ sở tri thức để xác định luật chỉnh định mờ bộ điều khiển PI.

Cấu trúc của một bộ điều khiển mờ có thể được biểu diễn như Hình 3.



Hình 3. Cấu trúc của bộ điều khiển mờ.

Ở đây các đầu vào của bộ điều khiển mờ là  $e(k)$  và  $\Delta e(k)$ :

$$\begin{aligned} e(k) &= -i_{Lh} - i_{Fh} \\ \Delta e(k) &= e(k) - e(k-1) \end{aligned} \quad (4)$$

Giá trị của  $e(k)$  và  $\Delta e(k)$  thay đổi theo hệ thống thực. Các luật mờ này cho phép suy diễn giá trị đầu ra. Chọn luật hợp thành theo nguyên tắc min-max và giải theo phương pháp trọng tâm. Hàm thuộc cuối cùng thu được bằng cách tổ hợp tất cả các hàm thuộc. Giá trị này là trọng tâm của các hàm thuộc và được tính bởi công thức sau:

$$\begin{cases} K_{P-new} = K_{P-old} + \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(e(k), \Delta e(k)) \cdot \Delta K_{P_i}}{\sum_{i=1}^n \mu_i(e(k), \Delta e(k))} \\ K_{I-new} = K_{I-old} + \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(e(k), \Delta e(k)) \cdot \Delta K_{I_i}}{\sum_{i=1}^n \mu_i(e(k), \Delta e(k))} \end{cases} \quad (5)$$

III. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để minh họa thể hiện các ưu điểm trong chế độ xác lập và trong các đáp ứng động của hệ thống khi sử dụng bộ điều khiển PI mờ so với bộ PI truyền thống, tiến hành mô phỏng cho một trường hợp phụ tải trong lưới điện phân phối, các số liệu cho việc mô phỏng được lấy từ lưới phân phối điện tại Huyện Nghi Lộc – Nghệ An.

Các thông số mô phỏng:

Nguồn: 22kV-50Hz;  $R_s = 0.5\Omega$ ,  $L_s = 0.2mH$ .

$C_F = 20.65\mu F$ ;  $C_1 = 690\mu F$ ;  $L_1 = 14.75mH$ ;  $R_1 = 0.0168\Omega$ .

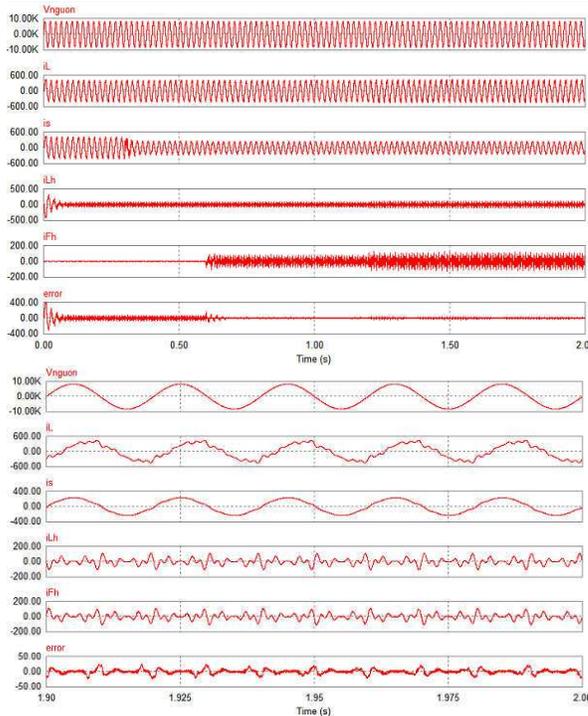
Mạch lọc thụ động:  $C_{P1} = 49.75\mu F$ ;  $L_{P1} = 1.77mH$ ;  $Q = 50$ ;  $C_{P2} = 44.76\mu F$ ;  $L_{P2} = 1.37mH$ ;  $Q$

= 50CF = 19.65μF; C<sub>1</sub> = 690μF; L<sub>1</sub> = 14.75mH; R<sub>1</sub> = 0.0168Ω.

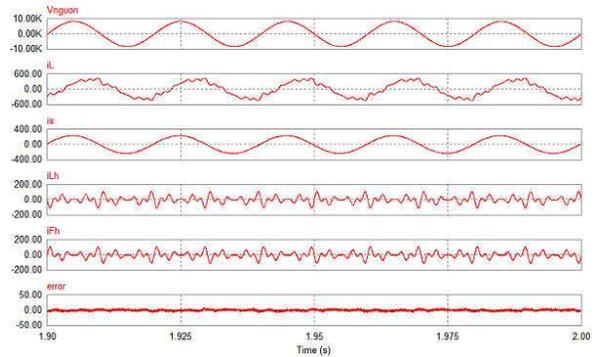
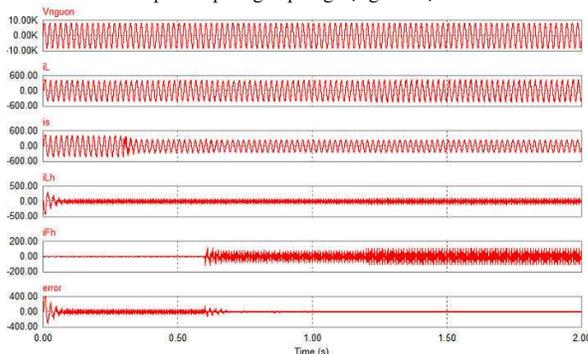
Bộ nghịch lưu nguồn áp: L<sub>o</sub> = 0.2mH; R<sub>o</sub> = 0.005Ω; C<sub>o</sub> = 60μF; V<sub>C</sub> = 600V. V<sub>nguồn</sub>, i<sub>L</sub>, i<sub>s</sub>, i<sub>Lh</sub>, i<sub>Fh</sub>, error lần lượt là điện áp nguồn, dòng tải, dòng nguồn, dòng hài tải, dòng bù vào hệ thống và sai số bù tương ứng.

**Bảng 1. Kết quả mô phỏng với phương pháp điều khiển PI truyền thống và PI mờ**

Phương pháp	Chưa thay đổi tải						Thay đổi tải	
	THD chưa bù	cosp chưa bù	THD khi chỉ có PPF	cosp khi chỉ có PPF	THD khi có APF+PPF	cosp khi có APF+PPF	THD khi có APF+PPF	cosp khi có APF+PPF
Điều khiển PI truyền thống								
i <sub>L</sub>	10,97	0,61	10,97	0,61	10,97	0,61	15,74	0,65
i <sub>s</sub>	10,97	0,61	14,2	0,96	6,2	0,96	6,3	0,94
Điều khiển PI mờ								
i <sub>L</sub>	10,97	0,61	10,97	0,61	10,97	0,61	15,74	0,65
i <sub>s</sub>	10,97	0,61	14,2	0,96	6,0	0,96	6,1	0,96



**Hình 4. Kết quả mô phỏng đáp ứng động với bộ điều khiển PI.**



**Hình 5. Kết quả mô phỏng đáp ứng động với bộ điều khiển PI mờ.**

Hình 4 thể hiện đáp ứng động của hệ thống khi sử dụng bộ điều khiển PI truyền thống. Trước thời điểm 0.3s hệ thống chưa có PPF và APF thì i<sub>L</sub> và i<sub>s</sub> là như nhau và có độ méo dạng hài tổng THD = 10.97%, hệ số công suất là 0.61. Khoảng thời gian từ 0.3s đến 0.6s các mạch lọc PPF được đóng vào hệ thống: THD của i<sub>s</sub> tăng lên đến 14.2%, tuy nhiên hệ số công suất của nguồn tăng được tăng lên đến 0.96 từ 0.61. Khoảng thời gian từ 0.6s đến 1.2s các mạch lọc PPF và APF được đóng vào hệ thống: THD của i<sub>L</sub> là 10.97%, THD của i<sub>s</sub> giảm xuống còn 6,2% từ 14.2%, sai số bù được giảm đến ±20A trong 0.07s, hệ số công suất của nguồn là 0.96. Khoảng thời gian từ 1.2s đến 2s, tải thay đổi (THD của tải tăng lên đến 15.74% từ 10.97%), các mạch lọc PPF và APF vẫn ở trạng thái như trước đó: THD của i<sub>L</sub> là 15.74%, THD của i<sub>s</sub> tăng từ 6,2% lên 6,3%, sai số bù tăng lên đến ±25A từ ±20A.

Hình 5 thể hiện đáp ứng động của hệ thống khi sử dụng bộ điều khiển PI-mờ. Trước thời điểm 0.3s hệ thống chưa có PPF và APF thì i<sub>L</sub> và i<sub>s</sub> là như nhau và có độ méo dạng hài tổng THD = 10.97%, hệ số công suất là 0.61. Khoảng thời gian từ 0.3s đến 0.6s các mạch lọc PPF được đóng vào hệ thống: THD của i<sub>s</sub> tăng lên đến 14.2%, tuy nhiên hệ số công suất của nguồn tăng được tăng lên đến 0.96 từ 0.61. Khoảng thời gian từ 0.6s đến 1.2s các mạch lọc PPF và APF được đóng vào hệ thống: THD của i<sub>L</sub> là 10.97%, THD của i<sub>s</sub> giảm xuống còn 6,0% từ 14,2%, sai số bù được giảm đến ±7A trong 0.06s. Khoảng thời gian từ 1.2s đến 2s, tải thay đổi (THD của tải tăng lên đến 15.74% từ 10.95%), các mạch lọc PPF và APF vẫn ở trạng thái như trước đó: THD của i<sub>L</sub> là 15.74%, THD của i<sub>s</sub> là 6.1%, sai số bù tăng lên đến ±10A từ ±7A.

#### IV. THỰC NGHIỆM MẠCH LỌC TÍCH CỰC KẾT HỢP

Nội dung này thực hiện các công việc mô phỏng mạch lọc tích cực kết hợp HHAPF trên Matlab sử dụng toolbox Target Package TC2 và thực nghiệm. Nguồn cấp cho hệ thống thực nghiệm là nguồn điện 3 pha, hạ áp 380V, với mục tiêu giảm độ méo sóng hài xuống dưới 6,5% theo TCVN. Cụ thể tại huyện Nghi Lộc (nguồn cấp là máy biến áp phân phối 22/0,4-công suất 750 kVA) thì tỷ số  $I_s/I_L$  có giá trị 48,6 (nằm trong khoảng giá trị 20-50), có nghĩa là tổng độ méo dạng hài dòng điện nguồn (THD) cho phép đến 8% [8]. Tuy nhiên, giá trị này có ý nghĩa thời điểm (thực nghiệm vào giờ thấp điểm, cao điểm), có những thời điểm, đặc biệt các phụ tải lân cận có phụ tải phi tuyến công suất cao (máy hàn, công suất đến 50 kVA) vượt quá năng lực của thiết bị thiết kế (đến 20 kVA) sẽ có thể cho giá trị vượt quá mức cho phép.



Hình 6. Hình ảnh thực nghiệm.

Bộ nguồn ba pha (Programable Power Ametek Model 2003RP): được sử dụng để giả nguồn lưới điện 3 pha 50Hz. Với khả năng thay đổi điện áp đầu vào, cho phép hệ thí nghiệm xây dựng từ mức điện áp thấp đến mức điện áp cao.

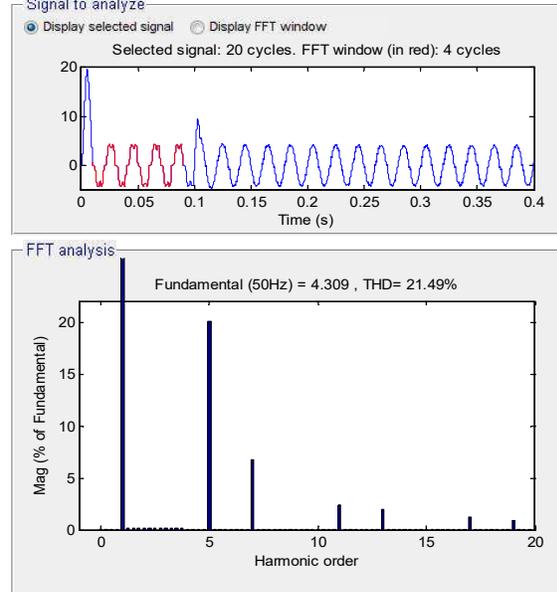
Khối giả tải: bao gồm 1 chỉnh lưu cầu diode 3 pha mắc song song với bộ tải một chiều lập trình được cho phép bộ lọc chạy với các dạng tải và công suất khác nhau.

Bộ phân tích chất lượng điện năng: cho phép quan sát dạng lưới điện 3 pha trên lưới điện, dạng dòng tải và dòng bù từ bộ lọc. Bộ phân tích chất lượng điện năng có chức năng tính toán chỉ số THD đánh giá chất lượng bộ lọc.

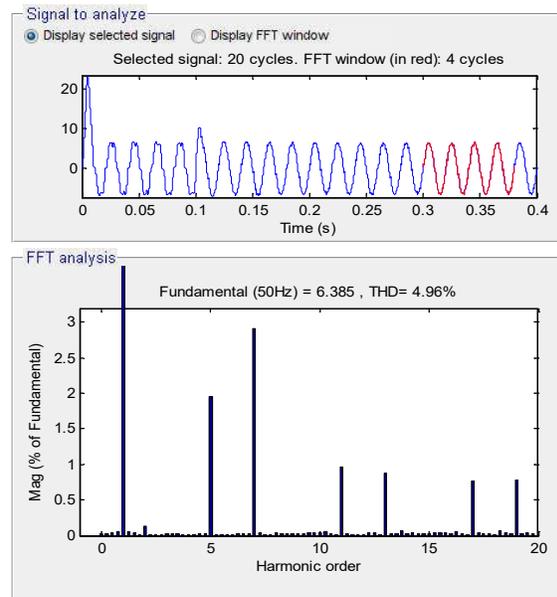
Khối Debug chương trình: bao gồm bộ Emulator XDS100 trên cad điều khiển và máy tính cho phép quan sát các giá trị tính toán trong DSP ví dụ như các giá trị đầu vào đầu ra bộ điều

khiển, thông tin góc pha, khoảng điều chế... Các biến trong chương trình cũng có thể quan sát thông qua hàm chức năng ePWMDAC và hiển thị trên Oscilloscope Agilent 54622D.

Kết quả chạy thử nghiệm thực tế:



Hình 7. THD trước khi lọc.



Hình 8. THD sau khi lọc.

Từ kết quả chạy thực nghiệm, thể hiện trên các Hình 7 đến Hình 8 nhận thấy: dòng điện đầu ra đã khử được các thành phần hài bậc cao (3, 5, 7, 11, ..) dòng điện đã có dạng sin. Dòng điện có trị số THD ở mức thấp (từ giá trị 21,6% xuống còn 4,96%). Kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy mục tiêu đề ra đã hoàn toàn đạt yêu cầu, với kết quả thử nghiệm đạt mức 4,96%.

## V. KẾT LUẬN

Bài viết này đã đề xuất một giải pháp giảm sóng hài bằng việc sử dụng một dạng mạch lọc tích cực kết hợp song song cải tiến có điều khiển bằng bộ PI mờ. Mô hình được tiến hành mô phỏng dựa trên thông số của một lưới điện phân phối thực tế tại Nghệ An. Kết quả mô phỏng cho thấy việc ứng dụng mạch lọc này có thể cải thiện được sóng hài. Kết quả khi trạng thái xác lập của HHAPF sử dụng bộ điều khiển PI truyền thống: THD giảm xuống còn 6,2% từ 15,74% và hệ số công suất tăng lên đến 0.94 từ 0.65. Khi sử dụng bộ điều khiển PI-mờ: THD giảm xuống còn 6,0% từ 15,74% và hệ số công suất tăng lên đến 0.96 từ 0.65. Đối với phần thực nghiệm, kết quả chạy cho thấy hiệu quả của bộ lọc khi đạt được kết quả 4,96% từ 21,49%. Các kết quả này cho thấy hiệu quả của việc sử dụng mạch lọc là tốt và đáp ứng được tiêu chuẩn về sóng hài theo tiêu chuẩn TCVN là giảm THD xuống dưới 6,5% đối với lưới điện trung áp 35 kV trở xuống.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] David Chapman (2001), *Power Quality Application Guide – Harmonics Causes and Effects*, Copper Development Association, CDA.
- [2] Trần Đình Long (2013), *Sách tra cứu về chất lượng điện năng*, Nhà xuất bản Bách Khoa-Hà Nội.
- [3] Tien Trung Vo, Paleček Josef, Kolář Václav, “Influence of AC Electric Traction on Harmonic Distortion in 110 kV Supply Voltage Network: Measurement and Simulation”, *Journal Przeglad elektrotechnyczny*, ISSN 0033-2097.
- [4] Tien Trung Vo and Minh Thu Nguyen (2021), “Harmonic Distortion Reduction in High Power Systems Supplying AC Electric Railway using SVC”, *2021 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*, 4/2021.
- [5] Trần Trọng Minh, Vũ Hoàng Phương, Nguyễn Duy Thức (2013), “Điều khiển lọc tích cực ba pha theo phương pháp lựa chọn thành phần sóng hài”, *Hội nghị toàn quốc lần thứ 2 về Điều khiển và Tự động hoá - VCCA-2013*.
- [6] Bùi Quốc Khánh (2009), “Thiết kế bộ lọc tích cực cho việc giảm hài dòng điện và bù công suất phản kháng” *Tạp chí KHCN, Đại học Đà Nẵng*, số 4(33).2009.
- [7] Sangamesh Bukka, Mohammad Yunus M Hakim, Sanjeev T.M, S. G. Ankaliki (2014), “Performance Analysis Of Three Phase Shunt Hybrid Active Power Filter”, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 03, 2014.
- [8] IEEE Std 519-1992, “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” © Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1993.