

STUDY OF GENETIC ALGORITHM APPLICATION TO OPTIMIZE THE PARAMETER OF A THREE-PHASE SHUNT ACTIVE POWER FILTER

Phan Thanh Hien^{1*}, Nguyen Hai Binh², Vu Duy Hung²

¹TNU - University of Technology

²UNETI - University of Economics - Technology for Industries

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 22/3/2021	Shunt active power filter (SAPF) is a powerful electric device used to eliminate harmonic components which are harmful to the electric network and equipment. There are two main parameter groups of the SAPF should be optimized in order to get the better performance, and reduce the switching frequency of the devices of the inverter. The first group is the values of the DC link capacitor and coupling inductor. The second one is the parameters of the ProportionalIntegral controllers for controlling the power losses, and three-phase compensating currents. This paper presents the solution using Genetic algorithm (GA) to tune the coefficients of the PI controllers and to obtain optimum values of the capacitor and inductor of the filter at the same time. The proposed methodology is demonstrated via Matlab/Simulink environment such that the total harmonic distortion (THD) equals 1.48% while the switching frequency (fs) of the Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) bridge is only 50 kilohertz. Therefore, the obtained results contribute to the application of active power filters to improve the quality of electricity.
Revised: 23/6/2021	
Published: 25/6/2021	
KEYWORDS	
Active power filter	
Genetic Algorithm	
Harmonic filters	
Harmonic distortion	
Total harmonic distortion	

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG GIẢI THUẬT DI TRUYỀN (GA) ĐỂ TỐI ƯU HÓA THAM SỐ CỦA BỘ LỌC CÔNG SUẤT TÍCH CỰC BA PHA KIỂU SONG SONG

Phan Thanh Hien^{1*}, Nguyễn Hải Bình², Vũ Duy Hưng²

¹Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

²Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

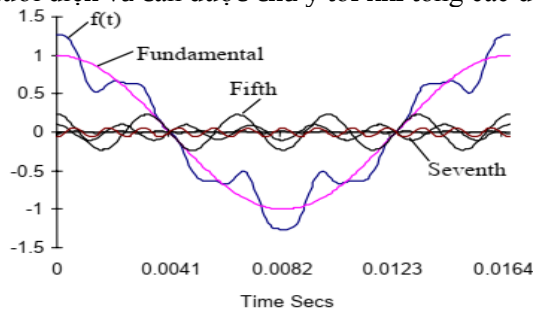
THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 22/3/2021	Bộ lọc công suất tích cực kiểu song song (SAPF- Shunt Active Power Filter) thường được sử dụng để loại bỏ các thành phần sóng hài có hại cho mạng điện và thiết bị điện. Có hai nhóm thông số chính của SAPF nên được tối ưu hóa để có được hiệu suất tốt hơn và giảm tần số đóng cắt của IGBT. Nhóm đầu tiên là giá trị của tụ điện liên kết DC và cuộn cảm ghép nối. Nhóm thứ hai là các thông số của bộ điều khiển để kiểm soát tổn thất điện năng và dòng điện bù. Bài báo này trình bày giải pháp sử dụng Giải thuật di truyền (GA) để điều chỉnh các hệ số của bộ điều khiển PI và thu được các giá trị tối ưu của tụ điện và cuộn cảm của bộ lọc cùng một lúc. Phương pháp đề xuất được chứng minh thông qua mô phỏng trên Matlab/ Simulink. Kết quả, nhóm tác giả đã tìm được bộ tham số của bộ lọc công suất tích cực kiểu song song cho hệ số tổng méo sóng hài (THD- Total Harmonic Distortion) bằng 1,48% trong khi tần số chuyển mạch (fs) của IGBT chỉ là 50 kilohert. Do đó, các kết quả thu được góp phần ứng dụng vào các bộ lọc công suất tích cực nâng cao chất lượng điện năng.
Ngày hoàn thiện: 23/6/2021	
Ngày đăng: 25/6/2021	
TỪ KHÓA	
Bộ lọc công suất tích cực	
Giải thuật di truyền	
Bộ lọc sóng hài	
Méo sóng hài	
Tổng méo hài	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4196>

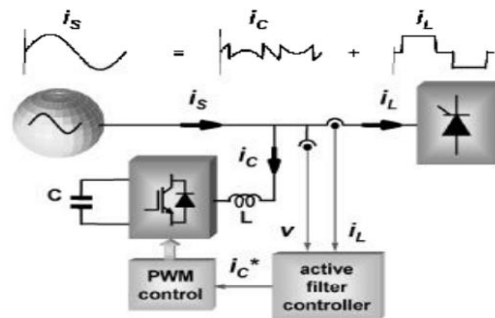
* Corresponding author. Email: phanthanhvien@tnut.edu.vn

1. Đặt vấn đề

Sóng hài là sóng điều hòa bậc cao có tần số là bội số của tần số sóng cơ bản [1]. Trong lưới điện sóng cơ bản của nguồn cấp là sóng sin tần số 50Hz, các sóng có tần số 150Hz, 250Hz lần lượt là các sóng hài bậc 3, bậc 5 (hình 1). Sóng hài gây nhiễu, ảnh hưởng trực tiếp tới chất lượng lưới điện và cần được chú ý tới khi tổng các dòng điện hài cao hơn mức độ giới hạn cho phép.



Hình 1. Sóng cơ bản và các sóng hài



Hình 2. Cấu trúc cơ bản của bộ lọc công suất tích cực kiểu song song

SAPF (Shunt Active Power Filter) là bộ lọc công suất tích cực kiểu song song [2], được sử dụng để ổn định hiệu suất của hệ thống công suất bằng việc tạo ra các dòng điện tham chiếu cho mạch cầu IGBT nhằm làm giảm hoặc triệt tiêu các sóng hài bậc cao và bù công suất phản kháng, minh họa như trên hình 2.

Trong đó:

- i_s là dòng điện của nguồn phát
- i_c là dòng điện của bộ lọc tích cực
- i_L là dòng điện tải.

Ta có:

$$i_s = i_c + i_L \quad (1)$$

Để thực hiện chức năng này bộ lọc SAPF hoạt động như một bộ nguồn ba pha tạo ra dòng điện thích hợp bơm lên đường dây. Dòng điện này sẽ triệt tiêu các sóng điều hòa bậc cao sinh ra bởi tải phi tuyến là thành phần ngược pha với tổng sóng điều hòa dòng điện bậc cao.

Hiệu suất của SAPF được đánh giá thông qua chỉ số méo hài tổng (THD) của hệ thống điện:

$$THD = 100 \times \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (2)$$

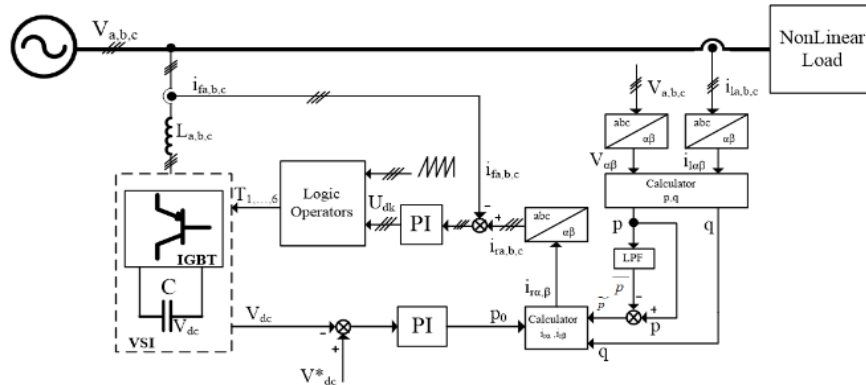
Cấu trúc và chất lượng bộ điều khiển dòng i_c ảnh hưởng chính đến chất lượng bộ lọc SAPF, có rất nhiều phương pháp điều khiển được giới thiệu như bộ điều khiển dải trễ [3], deadbeat [4], fuzzy logic [5], kỹ thuật điều khiển mạng nơ-ron [6], v.v. Tuy nhiên, bộ điều khiển (PI) được biết đến là bộ điều khiển thông dụng, đơn giản và hiệu quả đã được ứng dụng rộng rãi.

Bộ điều khiển PI bao gồm các tham số tỷ lệ và tích phân, điều khiển để đảm bảo giá trị $i_c = i_c^*$ dựa trên sai số của tín hiệu tham chiếu so với tín hiệu phản hồi. Ngoài ra, bộ điều khiển PI không chỉ được sử dụng để tạo ra dòng điện bù mà còn để ổn định điện áp tụ điện liên kết DC. Để điều khiển dòng điện bù, tín hiệu dòng điện đặt cho bộ điều khiển được xác định từ lý thuyết công suất tức thời $p-q$ [7], trong khi tín hiệu dòng điện phản hồi được đo từ đầu ra của bộ nghịch lưu. Như vậy, có thể thấy rằng chất lượng của SAPF còn phụ thuộc vào các thông số của bộ nghịch lưu, cuộn cảm ghép và tụ điện liên kết DC.

Do đó, bài báo trình bày cách tối ưu hóa các tham số của bộ điều khiển PI và thông số cuộn cảm ghép và tụ điện liên kết DC bằng thuật toán di truyền (GA). Thuật toán di truyền là một trong số các kỹ thuật tìm kiếm các tham số để làm cho hệ thống có được hiệu suất cao nhất.

2. Cấu trúc bộ lọc công suất tích cực kiểu song song, thiết kế trên cơ sở bộ điều khiển PI

2.1. Cấu trúc điều khiển bộ lọc công suất tích cực sử dụng bộ điều khiển PI



Hình 3. Cấu trúc điều khiển bộ lọc tích cực sử dụng bộ điều khiển PI

Cấu trúc của bộ lọc công suất tích cực điển hình như trên hình 3. Trong đó, sử dụng bộ điều khiển PI. Sách lược điều khiển bộ lọc công suất tích cực gồm hai mạch vòng: Mạch vòng ngoài dùng để xác định dòng điện đặt cần bù i_{cref} dựa trên dòng tải i_l , dòng điện cần bù này là lượng đặt cho mạch vòng trong hay dòng điện mong muốn mà bộ inverter phải tạo ra được để đưa lên lưới nhằm mục đích bù sóng hài và công suất phản kháng; mạch vòng trong có nhiệm vụ điều khiển tạo ra dòng bù i_c sao cho bám được dòng điện cần bù i_{cref} bằng cách điều chỉnh nghịch lưu cầu ba pha toàn phần nguồn áp [8].

Giả thiết dòng điện qua tải phi tuyến bị méo do sóng hài i_l , bộ lọc công suất tích cực sẽ đo dòng i_l và tính toán để đưa lên lưới dòng điện bù i_c sao cho dòng điện qua nguồn $i_s = i_l + i_c$ luôn là hình sin. Có nghĩa là các nguồn hài của tải sinh ra sẽ được bù hết bằng i_c .

2.2. Ứng dụng lý thuyết công suất tức thời trong tính toán dòng bù sóng hài.

Một trong những cách phổ biến nhất để xác định dòng điện tham chiếu là dựa trên lý thuyết (p-q) [7] do Akagi đề xuất. Lý thuyết này trước hết biến đổi điện áp nguồn và dòng tải của hệ thống từ hệ tọa độ abc sang hệ tọa độ $\alpha\beta$ bằng cách sử dụng phép biến đổi Clarke [9].

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Trong đó, i_{la} , i_{lb} , i_{lc} là dòng tải và V_a , V_b and V_c là điện áp nguồn cấp đến. Theo lý thuyết công suất tức thời p-q, công suất tác dụng và công suất phản kháng được tính trên hệ tọa độ $\alpha\beta$ như sau:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$p_0 = v_0 \cdot i_0 \quad (6)$$

Biểu diễn công suất tức thời dưới dạng thành tổng của thành phần một chiều và thành phần xoay chiều như sau:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Trong đó:

+ $\bar{p}$ and $\bar{q}$ lần lượt là thành phần một chiều của công suất tác dụng và công suất phản kháng, được tạo ra từ thành phần cơ bản của dòng tải [7].

+ $\tilde{p}$ and $\tilde{q}$ lần lượt là thành phần xoay chiều của công suất tác dụng và công suất phản kháng, được tạo ra từ thành phần sóng hài bậc cao của dòng tải.

Giá trị dòng điện đặt cho bộ nghịch lưu biểu diễn theo hệ tọa độ $\alpha\beta$ được tính như (8):

$$\begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -p \\ -q \end{bmatrix} \quad (8)$$

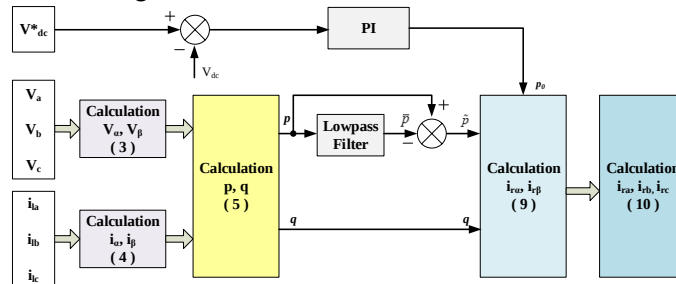
Điện áp trên tụ điện không ổn định nên cần bổ sung công suất (p_0) để đảm bảo điện áp trên tụ không đổi. Do vậy, giá trị dòng điện tham chiếu được tính theo công thức (9).

$$\begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} + p_0 \\ -q \end{bmatrix} \quad (9)$$

Chuyển hệ trục tọa độ $\alpha\beta$ sang hệ tọa độ abc ta có (10):

$$\begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

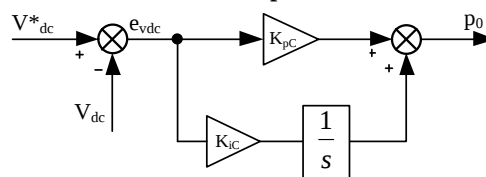
Từ đó ta có thể tính toán dòng điện tham chiếu theo sơ đồ cấu trúc hình 4.



Hình 4. Sơ đồ tính toán dòng điện tham chiếu

2.3. Bộ điều khiển PI trong SAPF

Bộ điều khiển PI trong hình 5 để ổn định điện áp trên tụ C.



Hình 5. Cấu trúc bộ điều khiển PI ổn định điện áp trên tụ C

Phương trình hàm truyền của bộ điều khiển PI được mô tả (11).

$$H(s) = K_{pC} + K_{iC} \times \frac{1}{s} \quad (11)$$

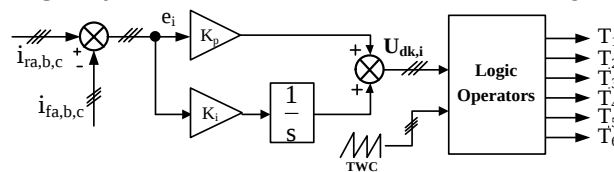
Điện áp liên kết DC được so sánh với giá trị đặt để tính sai lệch và bộ điều khiển PI có chức năng tạo ra công suất bù tổn thất cần thiết (p_0) của VSI [10]. Sau đó được thêm vào công suất thực của sóng hài như trong (9) xác định dòng điện tham chiếu.

Đầu ra của bộ bù điện áp liên kết DC được tính (12).

$$p_0 = \left(K_{pC} + K_{iC} \times \frac{1}{s} \right) \times e_{vdc} \quad (12)$$

Bộ điều khiển PI điều khiển dòng bù sóng hài

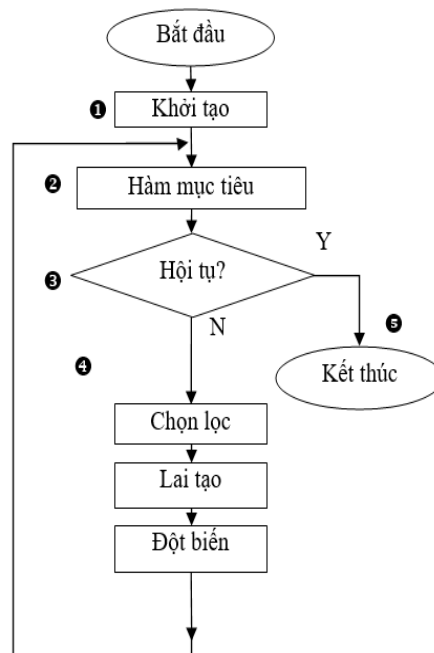
Bộ điều khiển dòng điện ở đây khác với các phương pháp phổ biến như bộ điều khiển dải trễ. Bài báo này giới thiệu bộ điều khiển PI kết hợp với sóng mang sóng tam giác (TWC) và các toán tử logic để tạo ra các xung chuyển mạch IGBT [11], để điều khiển dòng điện như trên hình 6.



Hình 6. Cấu trúc bộ điều khiển PI điều khiển dòng bù sóng hài.

Giả thiết nguồn cấp cân bằng 3 pha và tải đối xứng 3 pha nên tham số (K_p , K_i) của 3 pha là giống nhau. Tín hiệu điều khiển một pha được tính theo công thức sau:

$$U_{dk,a} = U_{dk,b} = U_{dk,c} = \left(K_p + K_i \times \frac{1}{s} \right) \times e_i \quad (13)$$



Hình 7. Cấu trúc tổng quát của giải thuật di truyền (GA)

3. Sử dụng giải thuật di truyền (GA) để tối ưu hóa tham số của bộ lọc công suất tích cực ba pha kiểu song song

3.1. Tối ưu hóa tham số của bộ lọc công suất tích cực ba pha kiểu song song sử dụng GA

Như đã trình bày ở trên, một số tham số của hệ thống SAPF cần được tối ưu hóa để lưu trữ giá trị tối thiểu của tổng méo hài. Các tham số này bao gồm cuộn cảm L_f , tụ điện liên kết DC C_{dc} , điện áp liên kết DC V_{dc}^* , K_{pC} , K_{iC} của liên kết DC - DC bộ bù điện áp và K_p , K_i của bộ điều khiển dòng PI. Nguyên tắc làm việc GA để tối ưu hóa các tham số của SAPF được minh họa thông qua sơ đồ được hiển thị trong hình 7 theo trình tự các bước như sau:

Bước 1: Khởi tạo các tham số của giải thuật di truyền như kích thước quần thể (N), số thế hệ (G), xác suất lai tạo (P_c), xác suất đột biến (P_m). Khởi tạo ngẫu nhiên một quần thể gồm N cá thể, mỗi cá thể là một bộ 7 biến cần tối ưu (L_f , C_{dc} , V_{dc}^* , K_{pC} , K_{iC} , K_p , K_i). khoảng giá trị của các biến là $L_f = [0.7 \div 1.5] \text{ mH}$, $C_{dc} = [0.5 \div 5] \text{ mF}$, $V_{dc}^* = [600 \div 1200] \text{ V}$, $K_{pC} = [50 \div 1000]$, $K_{iC} = [50 \div 1000]$, $K_p = [50 \div 1000]$, $K_i = [50 \div 1000]$;

Bước 2: Tính toán giá trị thích nghi của mỗi cá thể trong quần thể. Ở đây, giá trị THD được chọn làm hàm mục tiêu:

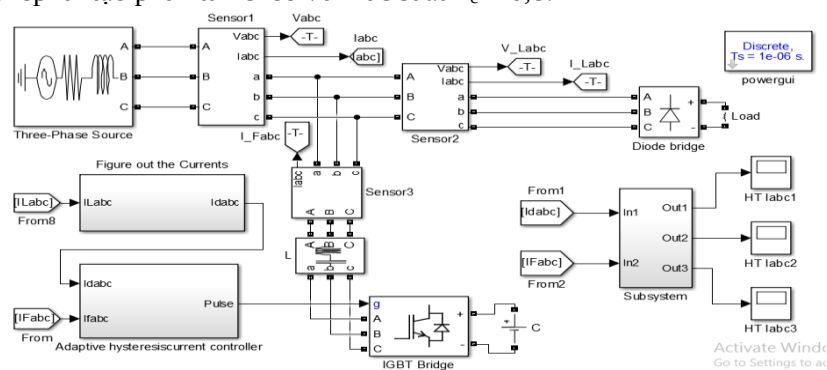
$$\text{Fitness} = \text{THD}(L_f, C_{dc}, V_{dc}^*, K_{pC}, K_{iC}, K_p, K_i) \quad (14)$$

Bước 3: Kiểm tra điều kiện dừng của giải thuật. Điều kiện dừng ở đây là khi THD nhỏ hơn một giá trị cho trước hoặc giải thuật đạt đến số thế hệ G . Nếu điều kiện thỏa mãn thì dừng lại và trả về cá thể tốt nhất cùng với giá trị hàm mục tiêu, nếu không thì tiếp tục thực hiện bước 4;

Bước 4: Thực hiện các phép toán của GA như chọn lọc, lai tạo, đột biến để tạo ra quần thể mới [12]. Sau đó, giải thuật được lặp lại từ bước 2 cho đến khi đạt đến điều kiện dừng.

Hoạt động của GA phụ thuộc vào việc lựa chọn một số tham số như kích thước quần thể N , số thế hệ G , phương pháp biểu diễn các cá thể, phép toán chọn lọc, phép toán lai tạo cùng với xác suất lai tạo P_c , phép toán đột biến và xác suất đột biến P_m . Trong quá trình cài đặt giải thuật di truyền để tối ưu hóa tham số của bộ lọc công suất tích cực ba pha kiểu song song, tác giả đã thử nghiệm thay đổi một số tham số của giải thuật theo phương pháp “thử sai” và tìm ra các tham số phù hợp cho giải thuật GA như sau:

- Số lượng thế hệ tối đa $G = 40$, kích thước quần thể là $N = 40$, các cá thể được biểu diễn bằng số thực;
- Phép chọn lọc được tiến hành theo phương pháp giải đấu;
- Lựa chọn phép đột biến đồng nhất với xác suất $P_m = 0,08$;
- Lựa chọn phép lai tạo phân tán chéo với xác suất $P_c = 0,8$.



Hình 8. Mô hình của bộ lọc tích cực ba pha mắc song song dựa theo lý thuyết công suất tức thời $p-q$ thực hiện trên phần mềm Matlab/Simulink

Cấu trúc mô phỏng của bộ lọc tích cực ba pha mắc song song dựa theo lý thuyết công suất tức thời $p-q$ thực hiện trên phần mềm Matlab/Simulink được minh họa như trên hình 8.

Thông số mô hình mô phỏng được mô tả trong Bảng 1.

Bảng 1. Tham số mạch mô phỏng

Nguồn cấp	Tải phi tuyến
$V_s = 380$	Chỉnh lưu cầu diot và tải RL
$f = 50 \text{ Hz}$	($R_{load} = 60 \Omega$, $L_{load} = 0.2 \text{ mH}$)

3.2. Kết quả

Đề xuất sử dụng giải thuật di truyền (GA) tối ưu tham số bộ lọc tích cực với cấu trúc bộ điều khiển tỷ lệ - tích phân bằng mô phỏng như sau:

- Số liệu đầu vào

Hàm mục tiêu: Độ méo sóng hài THD theo đơn vị phần trăm (%)

Kích thước quần thể = 40.

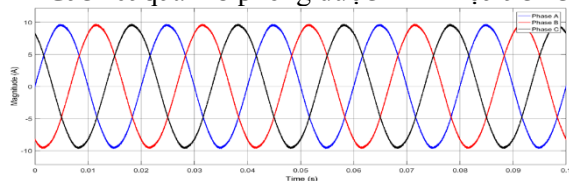
Số lượng tham số được lựa chọn chỉnh định = 7 bao gồm (L_f , C_{dc} , V_{dc}^* , K_{pC} , K_{iC} , K_p , K_i).

Số lần gieo cho giải thuật di truyền GA = 40

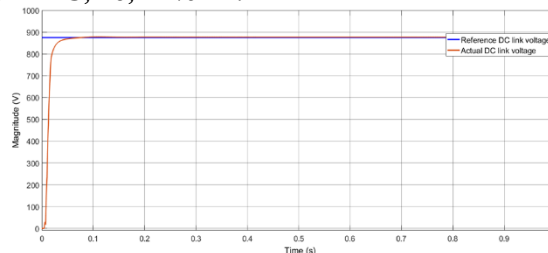
- Kết quả

Thông số sau khi chạy GA: Giá trị THD tốt nhất = 0.0148 (1,48%). Các tham số tối ưu của bộ lọc tích cực SAPF: $L_f = 2.05mH$; $C_{dc} = 4.9mF$; $V_{dc}^* = 875$; $K_{pC} = 30$; $K_{iC} = 40$; $K_p = 0.5$; $K_i = 5$.

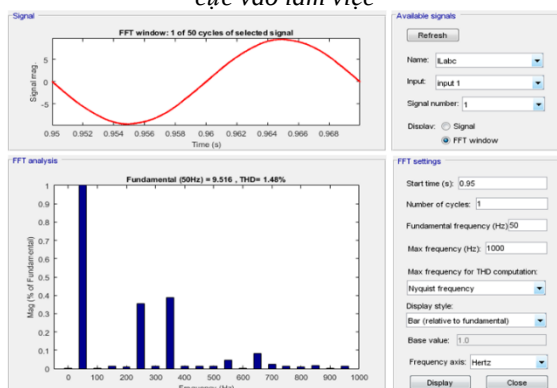
Các kết quả mô phỏng được minh họa trên các hình 9, 10, 11 và 12.



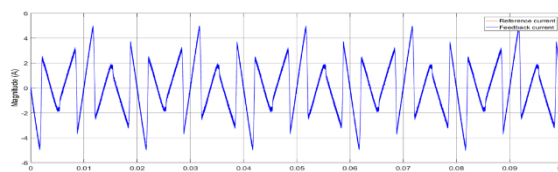
Hình 9. Dòng điện 3 pha sau khi đưa bộ lọc tích cực vào làm việc



Hình 11. Đáp ứng điện áp trên tụ (V_{dc}) sau khi có bộ điều khiển PI



Hình 10. Phân tích FFT tín hiệu dòng điện



Hình 12. Dòng bù sóng hài

3.3. Nhận xét

- Bộ điều khiển PI là bộ điều khiển kinh điển. Do vậy, khi sử dụng nó là muốn khai thác để có thể hiểu và phân tích hoạt động của bộ lọc tích cực một cách rõ ràng. Mô phỏng bộ lọc tích cực trên Matlab/Simulink từ đó có thể thiết kế các bộ điều khiển nâng cao ứng dụng vào bộ lọc tích cực;

- Đề xuất sử dụng giải thuật di truyền (GA) để tối ưu các tham số bộ lọc tích cực. Thực hiện mô phỏng tìm được bộ tham số tối ưu cho bộ lọc tích cực sử dụng bộ điều khiển PI;

- Kết quả mô phỏng cho thấy, khi hệ thống không sử dụng bộ lọc tích cực giá trị THD = 29,97% và sau khi sử dụng bộ lọc tích cực thiết kế trên cơ sở bộ điều khiển PI với tham số được tối ưu bằng giải thuật di truyền (GA) thì THD = 1,48%.

4. Kết luận

Ứng dụng giải thuật di truyền (GA) tối ưu hóa các tham số cho bộ lọc tích cực và bộ điều khiển PI mà nhờ đó bộ điều khiển PI đạt chỉ tiêu THD = 1,48%.

Nghiên cứu về điều khiển bộ lọc tích cực còn tiếp tục thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học chuyên ngành và các nghiên cứu sinh với các vấn đề sau: Thiết kế các bộ lọc tích cực phù

hợp cho các tải phi tuyến không đối xứng gây nên THD [%] lớn; Vừa lọc sóng hài vừa kết hợp bù $\cos\phi$ cho lưới điện,...

Lời cảm ơn

Tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – Đại học Thái Nguyên đã hỗ trợ mọi mặt cho nghiên cứu này để đạt được kết quả tốt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] S. R. Durdhavale, and D. D. Ahire, “A Review of Harmonics Detection and Measurement in Power System,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 143, no. 10, pp. 975-8887, 2016.
- [2] L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen, and P. Thøgersen, “Adaptive compensation of reactive power with shunt active power filters,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 3, pp. 867-877, 2008, doi: 10.1109/TIA.2008.921366.
- [3] M. H. Antchev, M. P. Petkova, H. M. Antchev, V. T. Gourgoulitsov, and S. S. Valtchev, “Study of a single-phase series active power filter with hysteresis control,” *Proceeding Int. Conf. Electr. Power Qual. Util. EPQU*, pp. 138-143, 2011, doi: 10.1109/EPQU.2011.6128921.
- [4] J. Mossoba, and P. W. Lehn, “A controller architecture for high bandwidth active power filters,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 18, no. 1 II, pp. 317-325, 2003, doi: 10.1109/TPEL.2002.807101.
- [5] N. Gotherwal, S. Ray, N. Gupta, and D. Saxena, “Performance comparison of PI and fuzzy controller for indirect current control based shunt active power filter,” *1st IEEE Int. Conf. Power Electron. Intell. Control Energy Syst. ICPEICES 2016*, 2017, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853460.
- [6] M. Qasim and V. Khadkikar, “Application of artificial neural networks for shunt active power filter control,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 3, pp. 1765-1774, 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2322580.
- [7] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Published 2007, doi:10.1002/0470118938
- [8] J. Fei, *Advanced Design and Control of Active Power Filters*, Nova Science Pub Inc; UK ed. edition, (December 30, 2013).
- [9] A. H. Budhrani, K. J. Bhayani, and A. R. Pathak, “Design Parameters of Shunt Active Filter for Harmonics Current Mitigation,” *PDEU Journal of Energy and Management* (ISSN 2581-5849), vol. 2, no. 2, pp. 59-65, April 2018.
- [10] S. K. Khadem, M. Basu, and M. F. Conlon, “Harmonic power compensation capacity of shunt active power filter and its relationship with design parameters,” *IET Power Electron.*, vol. 7, no. 2, pp. 418-430, 2014, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0098.
- [11] S. Kim, and P. N. Enjeti, “A new hybrid active power filter (APF) topology,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 1, pp. 48-54, 2002, doi: 10.1109/63.988669.
- [12] D. Grabowski, and M. Maciazek, “Cost effective allocation and sizing of active power filters using genetic algorithms,” *12th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC 2013*, pp. 467-472, 2013, doi: 10.1109/IEEEIC.2013.6549561.