



Nghiên cứu điều chỉnh điện áp và lọc sóng hài thông minh cho lưới điện với bộ lọc tích cực nối tiếp dựa trên điều khiển trượt và mạng nơ-ron

Research on intelligent voltage regulation and harmonic conditioning for power grids based series active power filter, SMC and Neural network

Nguyễn Văn Tiến^{1,*}, Đỗ Khắc Tiệp¹

¹Khoa Điện-Điện tử, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam

Từ khóa:

TÓM TẮT

Chất lượng điện năng

Lọc tích cực nối tiếp

Điều khiển trượt

Mạng nơ-ron

Sóng hài

Sự phát triển của các loại tải phi tuyến đã gây ra suy giảm chất lượng điện năng, đặc biệt là các vấn đề về sụt áp và méo hài. Bộ lọc tích cực nối tiếp SAPF (Series Active Power Filter) là một giải pháp hiệu quả để giải quyết các vấn đề này. Bài báo đề xuất một chiến lược điều khiển thông minh dựa trên sự kết hợp giữa bộ điều khiển trượt SMC (Sliding Mode Control) và mạng Nơ-ron nhân tạo ANN(Artificial Neural Network) gọi tắt là NSMC cho SAPF. Hiệu quả của bộ điều khiển NSMC đề xuất được kiểm chứng qua mô phỏng trên MATLAB & Simulink và so sánh với bộ điều khiển PI và SMC trong các điều kiện lưới điện khắc nghiệt như sụt áp và méo hài. Kết quả cho thấy phương pháp đề xuất thể hiện hiệu năng vượt trội về khả năng lọc hài và tốc độ đáp ứng.

Keywords:

ABSTRACT

Power Quality

Series active power Filter

Sliding mode control

Neural network

Harmonic

The proliferation of non-linear loads has posed significant challenges to power quality, particularly concerning issues like voltage sags, and harmonic distortion. The Series Active Power Filter (SAPF) has emerged as an effective solution to address these problems. This paper proposes an intelligent control strategy, designated as NSMC, for the SAPF, based on the integration of Sliding Mode Control (SMC) and an Artificial Neural Network (ANN). The efficacy of the proposed NSMC controller is verified through simulations in MATLAB & Simulink, and its performance is benchmarked against the conventional Proportional-Integral (PI) controller and the standard SMC under severe grid conditions, including voltage sags and harmonic distortion. The results demonstrate that the proposed method exhibits superior performance in terms of harmonic filtering capability and dynamic response.

1. Giới thiệu

Chất lượng điện năng đã trở thành một trong những mối quan tâm hàng đầu trong các hệ thống

điện hiện đại. Sự phổ biến của các thiết bị điện tử công suất như biến tần, bộ nguồn xung và các hệ thống năng lượng tái tạo như quang điện và điện gió đã đưa

* Nguyễn Văn Tiến. Khoa Điện-Điện tử, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam

Email: nguyenvantien@vamaru.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST150104>

Ngày nhận bài: 23/09/2025; Ngày nộp bài sửa: 15/12/2025 ; Ngày chấp nhận đăng: 15/12/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/01/2026

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

một lượng lớn sóng hài vào lưới điện [1]. Sóng hài gây ra nhiều tác hại nghiêm trọng cho hệ thống điện, làm giảm hiệu quả hoạt động, hư hỏng thiết bị và tăng chi phí vận hành. Với động cơ và máy biến áp, sóng hài gây quá nhiệt nghiêm trọng do từ trường do hài bậc 5 gây ra quay ngược chiều, tạo ra mô-men hãm làm động cơ rung, kêu và nóng hơn. Các sóng hài bậc 3 từ các tải sẽ cộng dồn trong dây trung tính, có thể làm dòng điện trong dây này cao gấp 2-3 lần dòng pha, gây quá tải và nguy cơ hỏa hoạn. Đối với các thiết bị điện tử, sóng hài gây nhiễu và làm sai lệch hoạt động thậm chí gây hỏng các thiết bị này.

Các hiện tượng khác như sụt áp cũng gây ảnh hưởng xấu đến hoạt động của các thiết bị. Nó làm ngưng hoạt động đột ngột các dây chuyền sản xuất do các thiết bị điều khiển nhạy cảm như PLC và biến tần, động cơ điện có nguy cơ quá nhiệt do dòng điện các pha tăng.

Để giải quyết các vấn đề này, trong hệ thống truyền tải hiện đại ngày nay các thiết bị thiết bị điện tử công suất cao được sử dụng để tăng cường khả năng điều khiển và nâng cao hiệu suất của hệ thống truyền tải, đặc biệt là bộ lọc tích cực nối tiếp SAPF được sử dụng rất rộng rãi. SAPF mắc nối tiếp với lưới điện, hoạt động như một nguồn áp điều khiển được để bù lại các sai lệch về điện áp, đảm bảo điện áp trên tải luôn ổn định và có dạng hình sin [2], [3].

Hiệu suất của SAPF phụ thuộc phần lớn vào thuật toán điều khiển của nó. Nhiều phương pháp điều khiển đã được đề xuất. Các bộ điều khiển tuyến tính kinh điển như PI trong hệ tọa độ quay d-q [4], [5] được sử dụng phổ biến do cấu trúc đơn giản. Tuy nhiên, bộ điều khiển PI được thiết kế dựa trên mô hình tuyến tính hóa của hệ thống, do đó gặp khó khăn trong việc duy trì hiệu suất khi các thông số hệ thống thay đổi, ngoài ra bộ điều khiển PI có đáp ứng động chậm trước các nhiễu loạn đột ngột.

Để cải thiện đáp ứng động và tính ổn định, các phương pháp điều khiển phi tuyến đã được áp dụng. Điều khiển trượt SMC [6]. Là một lựa chọn nổi bật nhờ tính bền bỉ cao trước sự bất định của mô hình và nhiễu loạn bên ngoài, cùng với đáp ứng nhanh. Mặc dù vậy, SMC kinh điển phải đối mặt với một nhược điểm cố hữu là hiện tượng rung tần số cao (chattering), gây ra bởi thành phần điều khiển chuyển mạch gián đoạn. chattering không chỉ làm tăng tổn hao chuyển mạch mà còn có thể kích thích các dao động không mong muốn trong hệ thống.

Để khắc phục những hạn chế trên, bài báo đề xuất một giải pháp điều khiển lai ghép tiên tiến hơn đó là kết hợp giữa điều khiển trượt và mạng nơ-ron. Bằng cách tích hợp một mạng nơ-ron nhân tạo vào cấu trúc của SMC gọi là NSMC.

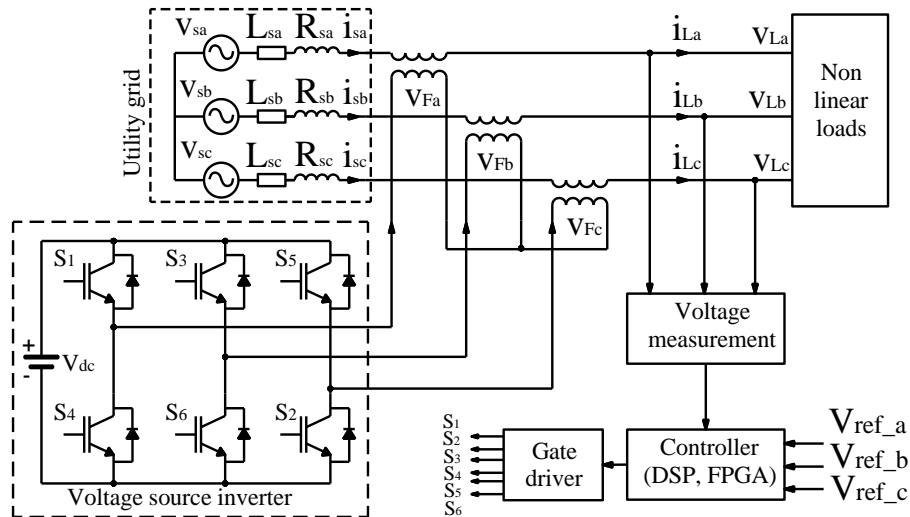
Bộ điều khiển mới có ưu điểm là khả năng học và xấp xỉ các thành phần động lực học phi tuyến và không chắc chắn của hệ thống. Thành phần nơ-ron giúp tạo ra một tín hiệu điều khiển mượt mà, trong khi thành phần trượt vẫn được giữ lại để đảm bảo tính ổn định và đáp ứng nhanh. Cách tiếp cận này hứa hẹn sẽ đạt được hiệu suất cao của SMC và đồng thời giảm thiểu đáng kể hiện tượng chattering.

2. Cấu trúc và mô hình hóa bộ lọc tích cực nối tiếp

2.1. Cấu trúc bộ lọc tích cực nối tiếp

Cấu trúc các thành phần của SAPF [7], [8] được minh họa trong Hình 1. SAPF được nối với lưới điện thông qua một biến áp ghép (coupling transformer), chúng có nhiệm vụ đưa điện áp bù do bộ nghịch lưu tạo ra vào lưới điện, đồng thời cách ly mạch điều khiển khỏi lưới điện cao áp.

Bản chất hoạt động chính của SAPF là loại bỏ các thành phần hài điện áp ở phía tải bằng cách tạo ra các thành phần hài điện áp ngược pha và đưa điện áp đó vào lưới điện thông qua biến áp ghép.



Hình 1. Sơ đồ kết nối SAPF với lưới điện.

SAPF hoạt động như một bộ điều chỉnh điện áp và bộ cách ly hài giữa tải phi tuyến (Non-linear loads) và lưới điện (Utility grid). SAPF sẽ phát hiện điện áp trên tải bị biến đổi bất bình thường nhờ bộ đo điện áp (Voltage measurement). Bộ điều khiển (Controller) so sánh điện áp thực tế này với điện áp tham chiếu (V_{ref}) để điều khiển bộ nghịch lưu nguồn áp (Voltage source inverter) tạo ra chính xác điện áp bù cho lưới điện.

2.2. Mô hình hóa bộ lọc tích cực nối tiếp

Để đơn giản hóa việc phân tích từ hệ thống ba pha, chúng ta sử dụng sơ đồ mạch tương đương một pha. Sơ đồ này bao gồm các thành phần chính sau:

- Nguồn lưới v_s : Nguồn điện áp lý tưởng;
- Tổng trở lưới R_s, L_s : Điện trở và điện cảm nội của lưới điện và đường dây;
- Bộ lọc tích cực nối tiếp: Được mô hình hóa như một nguồn điện áp điều khiển được (v_F), điện áp này được bơm vào lưới qua một máy biến áp ghép;
- Điện áp trên tải là v_L và dòng điện đi qua là i_L .

Dựa trên sơ đồ Hình 1, ta áp dụng Định luật Kirchhoff 2 cho vòng mạch để tìm ra mối quan hệ động học của hệ thống như sau:

$$v_s(t) - \left(R_s i_s(t) + L_s \frac{di_s(t)}{dt} \right) - v_L(t) + v_F(t) = 0 \quad (1)$$

Phương trình (1) cho thấy điện áp trên tải v_L được quyết định bởi điện áp nguồn (v_s) sụt áp trên đường dây, và điện áp bù mà bộ lọc tạo ra là (v_F). Mục tiêu điều khiển chính là tạo ra v_F sao cho v_L luôn là một sóng sin hoàn hảo.

Phương trình vi phân ở trên là của hệ thống xoay chiều AC (Alternating current voltage), chứa các thành phần \sin và \cos , làm cho việc thiết kế bộ điều khiển trở nên phức tạp. Để giải quyết vấn đề này cần sử dụng phép biến đổi Park [9] để chuyển các đại lượng xoay chiều 3 pha thành các đại lượng một chiều DC (Direct current voltage) trong một hệ quy chiếu quay đồng bộ với vector điện áp lưới gọi là hệ d-q.

Sau khi áp dụng phép biến đổi d-q, hệ phương trình vi phân mô tả dòng điện i_{sd} và i_{sq} của hệ thống sẽ trở thành:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_{sd}}{dt} = -R_s i_{sd} + \omega L_s i_{sq} + v_{sd} - v_{Ld} + v_{Fd} \\ L_s \frac{di_{sq}}{dt} = -R_s i_{sq} - \omega L_s i_{sd} + v_{sq} - v_{Lq} + v_{Fq} \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó:

- Các chỉ số d và q đại diện cho các thành phần trên trục d và q ;
- ω là tần số góc của lưới điện;
- Các thành phần $\omega L_s i_{sq}$ và $\omega L_s i_{sd}$ là các thành phần ghép chéo xuất hiện do sự quay của hệ tọa độ;

- Chọn biến trạng thái x là dòng điện;
- Chọn tín hiệu điều khiển u là điện áp bù của bộ lọc;
- Nhiễu d là các thành phần ngoại lai tác động lên hệ thống, ở đây là điện áp lưới và tải.

$$x = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} v_{Fd} \\ v_{Fq} \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} v_{sd} - v_{ld} \\ v_{sq} - v_{lq} \end{bmatrix}$$

Từ hệ phương trình (2), mô hình không gian trạng thái trên hệ tọa độ d - q như sau:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} v_{Fd} \\ v_{Fq} \end{bmatrix} + E \begin{bmatrix} v_{sd} - v_{ld} \\ v_{sq} - v_{lq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Trong đó, các ma trận của mô hình không gian trạng thái là:

$$A = \begin{bmatrix} -R_s / L_s & \omega \\ -\omega & -R_s / L_s \end{bmatrix}, \quad B = E = \begin{bmatrix} 1 / L_s & 0 \\ 0 & 1 / L_s \end{bmatrix}$$

Mô hình (4) được sử dụng để thiết kế các bộ điều khiển.

3. Thiết kế bộ điều khiển trượt

Điều khiển trượt SMC [6] là một kỹ thuật điều khiển phi tuyến mạnh mẽ. Ý tưởng chính của SMC là thiết kế một mặt trượt (sliding surface) trong không gian trạng thái của hệ thống. Mặt trượt này được định nghĩa sao cho nếu trạng thái của hệ thống nằm trên mặt trượt, thì hệ thống sẽ hội tụ về trạng thái mong muốn.

3.1. Xác định mặt trượt

Từ (3) chúng ta có thể thấy, mô hình SAPF là bậc một đối với mỗi biến trạng thái, chính vì vậy chúng ta có thể chọn mặt trượt đơn giản nhất dạng tỉ lệ. Tuy nhiên, để tăng độ chính xác và tốc độ của mặt trượt, trong nghiên cứu này sử dụng mặt trượt dạng PI:

$$s = e + \Lambda \int e dt \quad (4)$$

Trong đó:

- Λ là ma trận hằng số dương, quyết định đến tốc độ tính tích phân và $\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_d & 0 \\ 0 & \lambda_q \end{bmatrix}$;
- e là vector sai số, là sự khác biệt giữa giá trị tham chiếu và giá trị thực tế của điện áp.

$$e = x_d - x = \begin{bmatrix} v_{sd.ref} - v_{sd} \\ v_{sq.ref} - v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

Thành phần điều khiển chuyển mạch u_{sw} của SMC có nhiệm vụ đẩy hệ thống về mặt trượt:

$$u_{sw} = \begin{bmatrix} u_{swd} \\ u_{swq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_d \cdot sat(s_d) \\ K_q \cdot sat(s_q) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Trong đó:

- K_d, K_q là các hằng số dương, quyết định đến tốc độ mà tín hiệu điều khiển tác động để đưa mặt trượt về 0.
- $sat(s_d), sat(s_q)$: là hàm bão hòa, được sử dụng thay thế cho hàm $sign$ để làm giảm hiện tượng chattering.

3.2. Xây dựng luật điều khiển NSMC

Luật điều khiển tổng thể cho vector điều khiển $u = [v_{Fd}, v_{Fq}]$ là:

$$u = u_{nn} + u_{sw} \quad (7)$$

Thành phần điều khiển nn -ron u_{nn} là thành phần thông minh, có nhiệm vụ học và bù lại động lực học của hệ thống. Nó sẽ ước tính thành phần điều khiển tương đương. Dựa trên mô hình, thành phần này được tính toán để khử các thành phần phi tuyến và ghép chéo.

$$u_{nn} = -B^{-1} \hat{F}_{nn} \quad (8)$$

- \hat{F}_{nn} là đầu ra của mạng nn -ron, có nhiệm vụ học toàn bộ phần động lực học phức tạp của hệ thống, bao gồm cả ma trận A và các nhiễu loạn.
- Ma trận B mô tả mức độ ảnh hưởng, giữa tín hiệu điều khiển và tốc độ thay đổi trạng thái của hệ thống.

Việc sử dụng ma trận nghịch đảo B^{-1} là bước quan trọng để tính toán chính xác tín hiệu điều khiển cần thiết. Bởi vì mạng nn -ron \hat{F}_{nn} đã học và tính toán ra được những động lực học của hệ thống. Do đó, để triệt tiêu các động lực học không mong muốn \hat{F}_{nn} của hệ thống, cần một hành động

ngược lại. Phép toán này chính là nhân với ma trận nghịch đảo B^{-1} .

Hàm mục tiêu mà Mạng Nơ-ron cần học được xác định bởi (9):

$$\hat{F}_{nn} \approx Ax + Ed - \dot{x}_d - \Lambda e \quad (9)$$

trong đó:

- $[x, e] = [i_{sd}, i_{sq}, e_d, e_q]^T$: Đầu vào của mạng nơ-ron là vector trạng thái của hệ thống và sai số.
- $\hat{F}_{nn} = [\hat{f}_{nn,d}, \hat{f}_{nn,q}]^T$ là vector đầu ra của mạng nơ-ron.

Kết hợp ta có tín hiệu điều khiển Nơ-ron (9) cụ thể là:

$$u_{nn} = \begin{bmatrix} u_{nn,d} \\ u_{nn,q} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{f}_{nn,d} \\ \hat{f}_{nn,q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_s \hat{f}_{nn,d} \\ -L_s \hat{f}_{nn,q} \end{bmatrix} \quad (10)$$

3.3. Thiết kế luật thích nghi cho mạng nơ-ron và nguyên lý học thích nghi trực tuyến

Đây là luật cập nhật trọng số của mạng nơ-ron, giúp nó học theo thời gian thực. Dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov [10], luật cập nhật được thiết kế để đảm bảo sai số hội tụ cần thỏa mãn (11), nói cách khác luật cập nhật này đảm bảo rằng các trọng số được điều chỉnh theo hướng giảm thiểu sai số trên mặt trượt)

$$\dot{W} = \Gamma \cdot s \cdot \phi(x, e)^T \quad (11)$$

trong đó

- \hat{W} : là ma trận trọng số ước tính;
- Γ : là tốc độ học;
- s : là mặt trượt từ bộ điều khiển SMC;
- $\phi(x, e)$: Vector hàm cơ sở, là một vector cột mà mỗi phần tử là đầu ra của một nơ-ron trong lớp ẩn.

Điểm mạnh nhất của bộ điều khiển NSMC đó nó không cần một bộ dữ liệu huấn luyện từ trước. Nó học hỏi một cách thích nghi trực tuyến (online adaptive learning), tức là nó học trong chính quá trình hoạt động.

Nguyên lý thích nghi trực tuyến thực hiện trên cơ sở việc sửa sai liên tục cho mặt trượt s . Khi bộ điều khiển hoạt động hoàn hảo, hệ thống sẽ nằm trên mặt trượt và $s = 0$. Nếu có bất kỳ sai lệch nào (do nhiễu hoặc tín hiệu đặt thay đổi), hệ thống sẽ lệch khỏi mặt trượt và s sẽ khác không. Nếu ($s \neq 0$), luật thích nghi của mạng nơ-ron nó sẽ ngay lập tức tự động điều chỉnh các nơ-ron để lần tính toán tiếp theo sẽ đưa s về gần 0 hơn, tốc độ điều chỉnh được đặc trưng bởi \dot{W} theo công thức (11). Quá trình này diễn ra liên tục ở mỗi bước thời gian lấy mẫu, giúp bộ điều khiển nhanh chóng tìm động lực học của hệ thống mà không cần huấn luyện trước trước. Việc thích nghi trực tuyến mang lại nhiều lợi ích:

- Không tốn công thu thập dữ liệu;
- Khả năng thích nghi cao khi thông số của hệ thống thay đổi;
- Tính bền vững nhờ có cấu trúc SMC và khả năng thích nghi thông số của ANN.

Chính vì khả năng học không cần giám sát và thích nghi trong thời gian thực này mà NSMC được xem là một kỹ thuật điều khiển thông minh và rất có giá trị trong nghiên cứu khoa học.

3.4. Thiết kế NSMC trong MATLAB & Simulink

Bộ điều khiển NSMC được thiết kế bằng MATLAB & Simulink cần thực hiện các bước sau:

- Tính sai số: Lấy tín hiệu điện áp tham chiếu trừ v_{ref} đi điện áp tải đo được đo được v_{ref} để tìm vector sai số e ;
- Từ vector sai số e và \dot{e} để tính mặt trượt s và theo công thức (4);
- Tính thành phần chuyển mạch u_{sw} của bộ điều khiển trượt bằng cách áp dụng hàm $sat(s_d), sat(s_q)$ và nhân với hệ số khuếch đại K_d, K_q theo công thức (6);
- Tính thành phần điều khiển nơ-ron u_{nn} gồm các bước nhỏ sau:
 - Đưa các tín hiệu trạng thái $(i_{sq}, i_{sd}, e_d, e_q)$ vào mạng nơ-ron;

- Mạng nơ-ron tính toán và cho ra đầu ra \hat{F}_{nn} là ước lượng của các thành phần phi tuyến và nhiễu trong hệ thống;

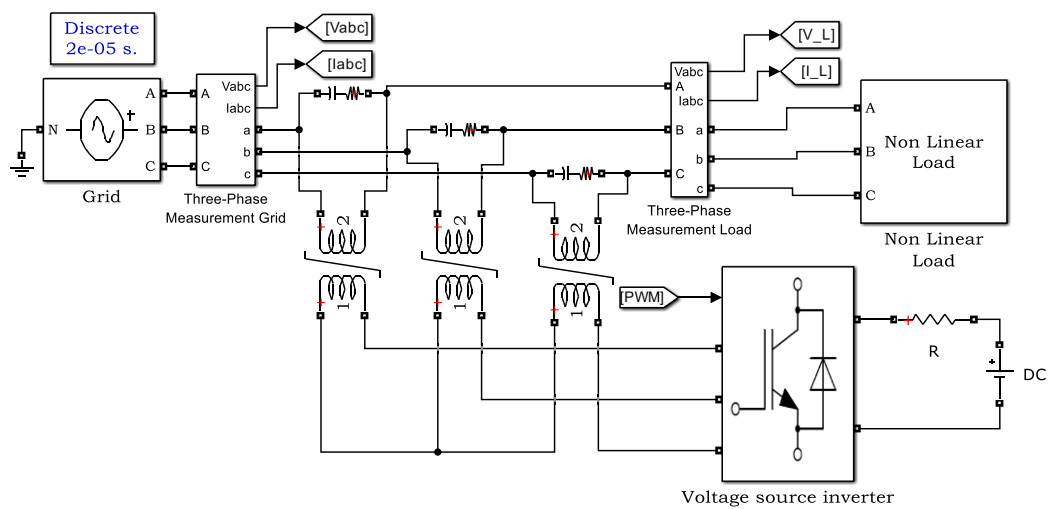
- Nhân giá trị \hat{F}_{nn} này với $-L_S$ để có được u_{nn} .

• Tính giá trị điều khiển u bằng cách cộng giá trị u_{sw} và u_{nn} theo công thức (7) để ra được tín hiệu điều khiển cuối cùng $[v_{Fd}, v_{Fq}]^T$;

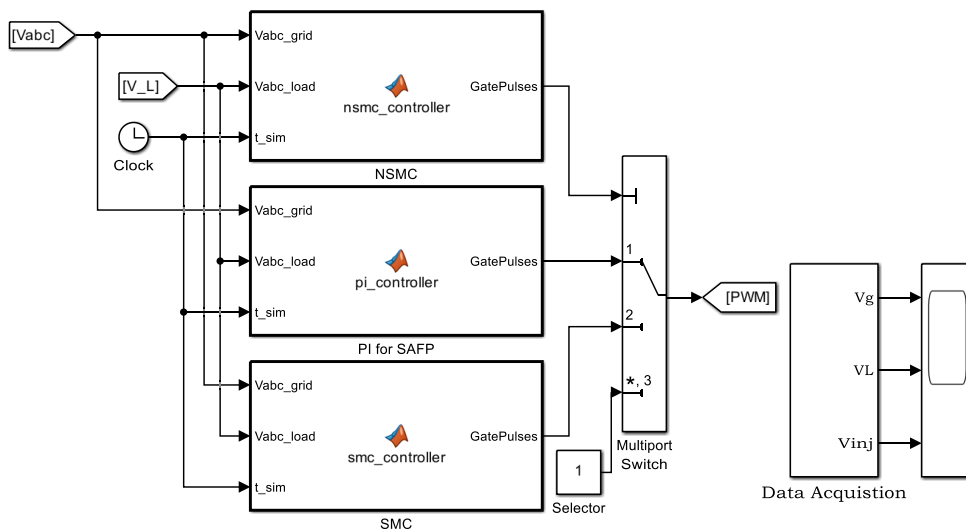
• Sử dụng s và đầu ra lớp ẩn ϕ để cập nhật trọng số \hat{W} cho bước lặp tiếp theo bằng công thức (11);

• Tín hiệu điều khiển $[v_{Fd}, v_{Fq}]^T$ sau đó được chuyển ngược về hệ tọa độ $a-b-c$ để tạo xung đóng/cắt cho các van công suất của bộ nghịch lưu.

Hình 2 là mô hình mạch động lực SAPF, các thành phần bao gồm: khối nguồn lưới; bộ biến đổi công suất gồm 6 van IGBT; khối tải phi tuyến là bộ chỉnh lưu cầu 3 pha tải R-L.



Hình 2. Mô hình mạch động lực bộ lọc tích cực nối tiếp SAPF trên Simulink.



Hình 3. Mô hình bộ điều khiển cho SAPF trên Simulink.

4. Kết quả mô phỏng

Nhằm mô phỏng hiệu quả của bộ điều khiển NSMC, trong nghiên cứu này thực hiện so sánh bộ điều khiển NSMC với bộ điều khiển PI và bộ SMC truyền thống. Thông số của các bộ điều khiển được cho trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số của các bộ điều khiển so sánh.

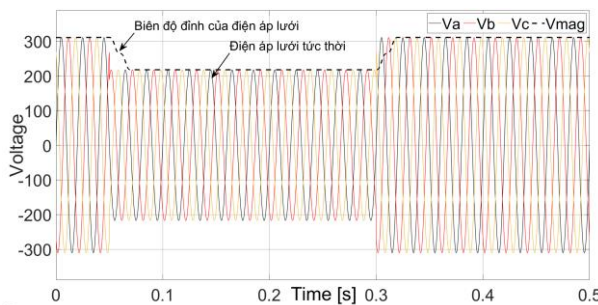
Bộ điều khiển	Thông số
PI	$K_p = 5; K_i = 0.1$
SMC	$\lambda = 25; K = 12; \Delta = 0.1$
NSMC	$\lambda = 25; K = 12; W_m = 2$ $n = 5; \gamma = 50; \Delta = 0.1$

Bộ điều khiển SMC được thiết kế với hệ số mặt trượt $\lambda = 25$, hệ số khuếch đại $K = 12$, độ rộng lớp biên của hàm $sat(s)$ là $\Delta = 0.1$. Mạng nơ-ron được thiết kế với 5 lớp ẩn $n = 5$, độ rộng của các hàm cơ sở xuyên tâm $W_m = 2$.

Các kịch bản thử nghiệm bao gồm sụt áp 30% trong 0.1 giây và lưới điện bị méo hài với Chất lượng của bộ điều khiển PI, SMC và NSMC, được đánh giá bằng sai số tuyệt đối trung bình MAE (Mean Absolute Error), độ quá điều chỉnh, thời gian xác lập, tổng méo hài THD (Total Harmonic Distortion).

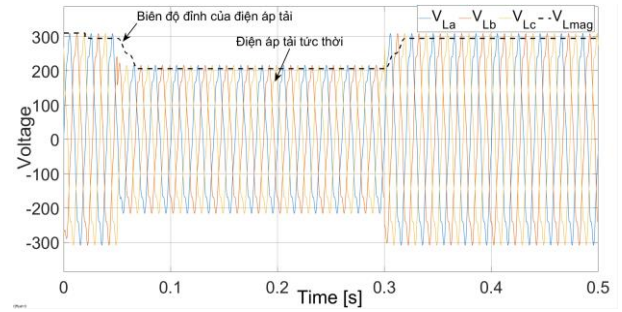
4.1. Kịch bản lưới điện sụt áp 30%

Trong kịch bản này, điện áp nguồn giảm 30% ở thời điểm 0.05 giây và phục hồi lại 100% ở thời điểm 0.3 giây như Hình 4.



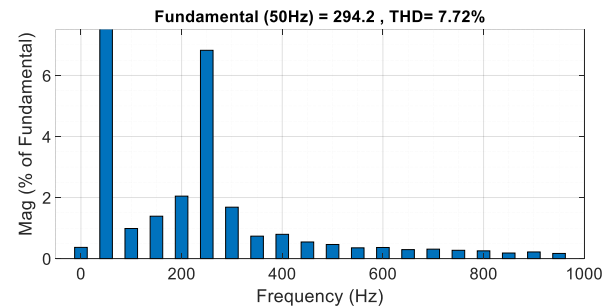
Hình 4. Kịch bản điện áp lưới bị sụt 30%.

Khi chưa có SAPF, điện áp trên tải sụt giảm nghiêm trọng như Hình 5. Điện áp trên tải không *sin* do tải phi tuyến.



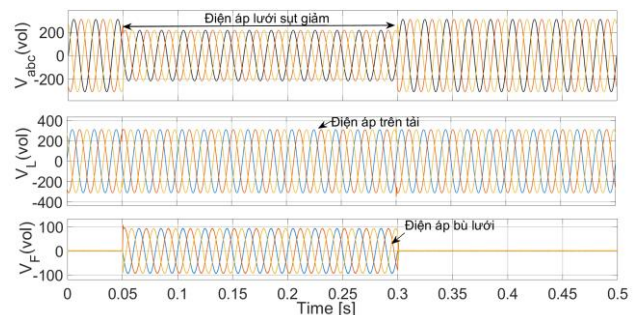
Hình 5. Điện áp trên tải khi chưa có SAPF.

Phân tích sóng hài bằng công cụ FFT Analysis trong Simulink cho thấy trong điện áp tải tồn tại nhiều sóng hài bậc lẻ đặc biệt là thành phần bậc 5, điều đó khiến cho chỉ số méo hài cao lên đến 7.72% điều chứng tỏ điện áp tải đang bị méo nghiêm trọng.



Hình 6. Phân tích tổng méo hài của điện áp tải khi chưa có SAPF.

Khi có SAPF với bộ điều khiển NSMC, biên độ và dạng điện áp được cải thiện đáng kể có thể thấy điều đó thông qua đồ thị trên Hình 7.



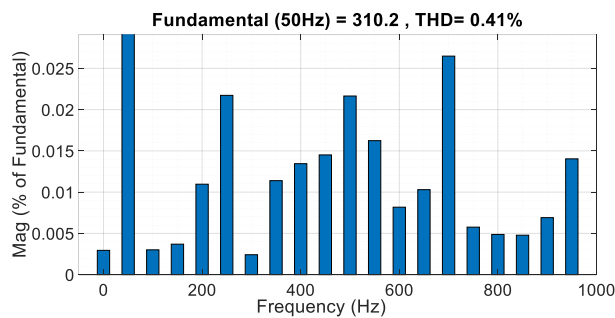
Hình 7. Điện áp trên tải và điện áp bù của SAPF khi sử dụng bộ điều khiển NSMC.

Đồ thị trên cùng của Hình 7 là điện áp lưới. Từ 0 giây đến 0.05 giây điện áp ở trạng thái bình thường, có biên độ đỉnh 310V. Từ 0.05 giây đến 0.3 giây xảy ra sự cố sụt áp trên lưới. Biên độ của cả ba pha đã giảm mạnh, chỉ còn khoảng 200V. Từ 0.3 giây trở đi lưới điện phục hồi, điện áp trở lại trạng thái bình thường.

Đồ thị ở giữa là điện áp trên tải, đây là điện áp mà tải tiêu thụ nhận được sau khi đã đi qua bộ lọc SAPF. Có thể thấy trong suốt khoảng thời gian từ 0s đến 0.5 giây, điện áp trên tải hoàn toàn ổn định và không bị ảnh hưởng. Biên độ của nó luôn được duy trì ở mức đỉnh 310V, ngay cả trong giai đoạn lưới bị sụt áp. Điều này chứng tỏ bộ lọc đã hoạt động thành công trong việc bảo vệ tải khỏi sự cố của lưới.

Đồ thị dưới cùng là điện áp bù của bộ lọc, đây là điện áp do chính bộ lọc SAPF tạo ra và bơm trực tiếp vào lưới điện. Trước 0.05 giây và sau 0.3 giây, khi lưới điện bình thường, điện áp bù bằng 0, bộ lọc ở trạng thái chờ và không can thiệp. Trong khoảng 0.05 giây đến 0.3 giây, ngay khi phát hiện sụt áp, SAPF đã phản ứng tức thời bằng cách tạo ra một điện áp bù. Biên độ của điện áp bù này khoảng 110V, giúp cho điện áp tải duy trì ở 310V.

Kết quả phân tích tổng méo hài của điện áp tải khi sử dụng NSMC cho SAPF được mô tả như trên Hình 8.

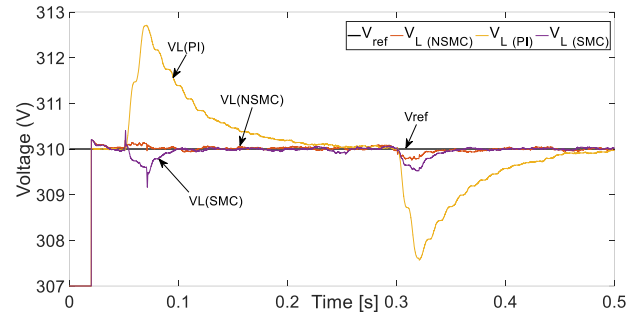


Hình 8. Phân tích tổng méo hài của điện áp tải VL khi sử dụng bộ điều khiển NSMC cho SAPF.

Kết quả cho thấy, mức THD chỉ 0.41% là cực kỳ thấp, cho thấy tín hiệu gần như là hình sin hoàn hảo, đáp ứng các tiêu chuẩn chất lượng điện năng khắt khe nhất theo tiêu chuẩn quốc tế IEEE 519 [11] là 5% hoặc 6.5% theo tiêu chuẩn Việt Nam [12].

So sánh đáp ứng bộ điều khiển NSMC so với PI và SMC được cho trên Hình 9.

Đáp ứng của bộ điều khiển PI cho thấy sai số rất lớn khi có nhiễu loạn. Tại thời điểm 0.05 giây, điện áp vọt lên tới gần 313V, cao hơn nhiều so với mức tham chiếu 310V.



Hình 9. So sánh biên độ điện áp đỉnh trên tải khi sử dụng PI, SMC và NSMC.

Tại 0.3 giây, điện áp sụt, sau mỗi nhiễu loạn, PI mất một khoảng thời gian dài để ổn định lại điện áp về điện áp tham chiếu (V_{ref}). Rõ ràng là bộ điều khiển kinh điển PI không đủ nhanh và chính xác cho các ứng dụng đòi hỏi đáp ứng động cao như SAPF.

Đáp ứng của SMC bám cực kỳ sát với điện áp tham chiếu V_{ref} . Khi có nhiễu loạn, điện áp chỉ sụt nhẹ và hồi phục gần như tức thời. Không hề có hiện tượng vọt lố hay dao động kéo dài như PI. Chính vì SMC là một bộ điều khiển phi tuyến mạnh mẽ, có tính bền vững cao, cho kết quả tốt hơn rất nhiều so với PI cả về độ chính xác và chất lượng điện áp, tuy nhiên vẫn tồn tại đỉnh nhọn khá lớn của đáp ứng trong giai đoạn quá độ, điều này là do tốc độ chuyển mạch mạnh mẽ của SMC.

Bộ điều khiển NSMC có độ quá điều chỉnh thấp hơn SMC và PI và tốc độ đáp ứng nhanh hơn PI và SMC truyền thống. Ngoài ra NSMC cũng không xuất hiện những điểm chuyển mạch đột ngột như SMC, mà chuyển mạch mềm mại hơn. Điều này có được là do mạng nơ-ron đã tự học và tối ưu các hệ số của nó một cách phù hợp để cải thiện hiệu năng. Bảng 2, so sánh các chỉ số chất lượng của bộ điều khiển NSMC so với PI và SMC

Bảng 2. So sánh các chỉ số chất lượng của bộ điều khiển NSMC so với PI và SMC.

Bộ điều khiển	PI	SMC	NSMC
MEA	0.6944	0.1816	0.1585
THD(%)	0.58	0.6	0.41
Quá điều chỉnh (%)	0.96	0.36	0.12
Thời gian xác lập(giây)	0.2	0.07	0.04

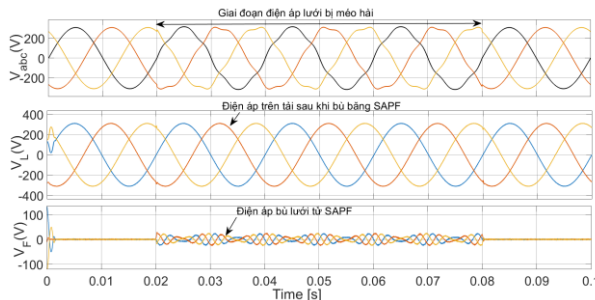
Theo kết quả Bảng 2, cả hai bộ điều khiển SMC và NSMC đều cho kết quả tốt hơn rất nhiều so với bộ điều khiển PI kinh điển. Chỉ số MAE là 0.1816 và

0.1585, thấp hơn của PI là 0.6944, cho thấy độ chính xác và khả năng bám theo tín hiệu tham chiếu cao hơn hẳn.

Khi so sánh NSMC với SMC, thì NSMC có cả chỉ số MAE và THD (0.41%) đều thấp hơn. Điều này chứng tỏ việc tích hợp mạng nơ-ron đã giúp cải thiện độ chính xác và giảm độ méo hài, mang lại chất lượng điện áp đầu ra sạch nhất.

4.2. Kích bản lưới điện bị méo hài

Trong kịch bản này, điện áp nguồn bị méo bởi sóng hài, bằng cách thêm các sóng hài bậc 5 và bậc 7 vào điện áp lưới tại thời điểm 0.02 giây và kết thúc tại 0.08 giây. Điều này mô phỏng một kịch bản thực tế khi lưới điện gặp sự cố, ví dụ như có một phụ tải lớn, phi tuyến (lò hồ quang, biến tần công suất lớn) hoạt động và bơm các sóng hài ngược trở lại lưới. Trên Hình 10, mô tả điện áp lưới trước và sau khi sử dụng bộ lọc tích cực nối tiếp SAPF.



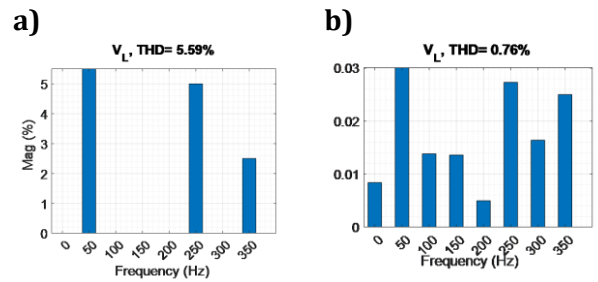
Hình 10. Đồ thị điện áp lưới, điện áp trên tải và điện áp bù khi sử dụng SAPF với bộ điều khiển NSMC.

Từ 0 giây đến 0.02 giây đến sau 0.08 giây, điện áp lưới có dạng hình sin. Trong khoảng thời gian từ 0.02 giây đến 0.08 giây, các sóng hài bậc 5 và 7 được thêm vào dạng sóng điện áp bị biến dạng.

Đồ thị ở giữa Hình 10 là điện áp trên tải sau khi bù (V_L). Có thể nhận thấy dạng sóng điện áp ở cả ba pha luôn là hình sin và ổn định trong suốt quá trình mô phỏng, kể cả trong giai đoạn lưới điện bị méo hài.

Điều này có được là do bộ điều khiển NSMC đã nhận dạng được sóng hài và bơm thêm một lượng sóng hài ngược pha với biên độ phù hợp vào lưới như chúng ta có thể thấy trên đồ thị hình dưới cùng của Hình 10.

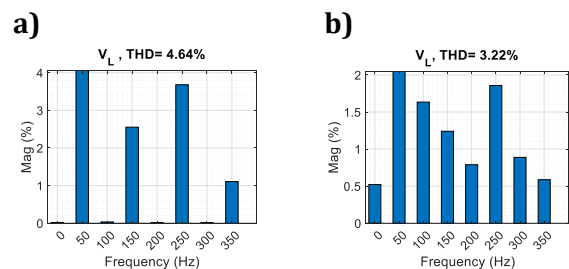
Phân tích tổng hài của điện áp trên tải trước và sau khi được bù (Hình 11) chúng ta thấy có sự cải thiện rõ rệt.



Hình 11. Phân tích sóng hài trong điện áp tải trước và sau khi được bù bằng SAPF với bộ điều khiển NSMC. (a) Điện áp tải trước khi bù, (b) Sau khi bù bằng SAPF với bộ điều khiển NSMC.

Có thể nhận thấy trước khi bù điện áp tải tồn tại các sóng hài bậc 5 (250Hz) và bậc 7 (350Hz) có biên độ lớn gây ra méo hài với THD=5.59%. Sau khi bù THD được cải thiện rõ rệt xuống còn 0.76%. Các thành phần bậc 5 và bậc 7 vẫn còn, tuy nhiên biên độ của chúng rất nhỏ (0.01% đến 0.03%) không ảnh hưởng đến tải và có thể loại trừ dễ dàng bằng các bộ lọc đơn giản.

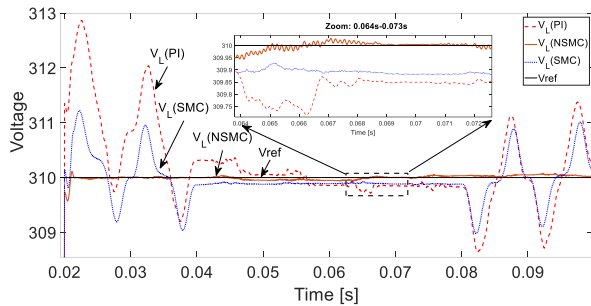
Bộ điều khiển PI chỉ cải thiện được một chút chất lượng điện áp. Tổng méo hài chỉ giảm nhẹ từ 5.59% xuống 4.64% (Hình 12). Bộ điều khiển SMC có sự cải thiện so với PI, tổng méo hài THD giảm xuống còn 3.22%, tuy nhiên hiệu quả vẫn chưa tốt như NSMC.



Hình 12. Phân tích tổng sóng hài trong điện áp tải sau khi bù bằng SAPF với bộ điều khiển PI và SMC. (a) SAPF với bộ điều khiển PI, (b) SAPF với bộ điều khiển SMC.

Có thể nhận thấy, SMC và NSMC tạo ra nhiều các sóng hài mới (mặc dù biên độ rất thấp) hơn hẳn so với PI. Đó là vì chúng là các bộ điều khiển phi tuyến, được thiết kế để có phản ứng cực nhanh và mạnh mẽ do vậy tạo ra nhiều tín hiệu đóng cắt ở tần số cao hơn hẳn PI. Ngược lại, PI là một bộ điều khiển tuyến tính với phản ứng chậm rãi nên không tạo ra nhiều nhiễu động tần số cao như của SMC và NSMC.

Biên độ đỉnh của điện áp tải khi sử dụng SAPF với các bộ điều khiển PI, SMC và NSMC được thể hiện như trên Hình 13.



Hình 13. So sánh biên độ đỉnh của điện áp tải khi sử dụng SAPF bộ điều khiển PI, SMC và NSMC.

Bộ điều khiển PI có độ quá điều chỉnh lớn. Ngay sau thời điểm 0.02 giây, điện áp đã vọt lên gần 313V (cao hơn 3V so với giá trị đặt) và sau đó sụt xuống dưới 309V. Trong suốt khoảng thời gian quan sát, đáp ứng của PI liên tục dao động với biên độ lớn và không ổn định tại giá trị 310V và tồn tại sai lệch tĩnh lớn khoảng 0.2V ở trạng thái xác lập.

Với bộ điều khiển SMC, độ quá điều chỉnh thấp hơn PI nhưng vẫn có sai số xác lập dưới dạng chattering. Điện áp dao động ở tần số cao hơn nhưng với biên độ nhỏ hơn PI (khoảng $\pm 0.1V$). Đây là đặc tính cố hữu của bộ điều khiển trượt SMC.

Bộ điều khiển NSMC có đường đáp ứng gần như là một đường thẳng nằm ngay trên giá trị đặt 310V, cho thấy độ chính xác vượt trội. Mặc dù bộ điều khiển NSMC vẫn còn hiện tượng chattering nhưng với biên độ nhỏ hơn nhiều và bám sát giá trị đặt, chúng ta có thể thấy điều này thông qua cửa sổ phóng to trong Hình 13. Điều này có được là do mạng nơ-ron đã nhận dạng được các sóng hài và điều khiển bộ biến đổi tạo ra các sóng điện áp bù phù hợp.

So sánh chất lượng của các bộ điều khiển thông qua đáp ứng điện áp đỉnh của điện áp tải được định lượng như trong Bảng 3.

Bảng 3. So sánh thông số các bộ điều khiển.

Bộ điều khiển	PI	SMC	NSMC
MEA	0.5159	0.2667	0.031
THD(%)	4.64	3.22	0.76
Quá điều chỉnh (%)	0.96	0.36	0.1

Thời gian xác lập (giây)	0.025	0.021	0.011
Sai lệch tĩnh (V)	0.16	0.1	0.02

Trong cả kịch lưới điện bị méo hài nặng, NSMC đã giảm tổng méo hài THD của điện áp tải từ 5.59% xuống chỉ còn 0.76%, tốt hơn nhiều so với với mức 4.64% của PI và 3.22% của SMC.

Về đáp ứng động, NSMC cho thấy tốc độ đáp ứng nhanh nhất với thời gian xác lập chỉ 0.011 giây, độ quá điều chỉnh và sai số xác lập lần lượt là 0.1% và 0.02V. Điều này cho thấy khả năng duy trì điện áp ổn định và bám sát giá trị đặt một cách xuất sắc.

5. Kết luận

Bài báo này đã trình bày thành công việc thiết kế và mô phỏng một bộ điều khiển thông minh NSMC, lai ghép giữa bộ điều khiển trượt SMC và mạng nơ-ron, nhằm nâng cao hiệu suất của bộ lọc tích cực nối tiếp SAPF. Các kết quả mô phỏng trên MATLAB & Simulink đã chứng minh rằng bộ điều khiển NSMC đề xuất mang lại hiệu quả vượt trội so với các bộ điều khiển kinh điển như PI và SMC thông thường trong việc cải thiện chất lượng điện năng.

Những kết quả đạt được khẳng định tiềm năng to lớn của phương pháp điều khiển NSMC như một giải pháp tiên tiến và hiệu quả cho các bài toán về chất lượng điện năng trong lưới điện hiện đại. Các hướng nghiên cứu trong tương lai có thể tập trung vào việc triển khai bộ điều khiển trên các hệ thống phần cứng thực nghiệm để kiểm chứng hiệu quả trong điều kiện vận hành thực tế.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Nguyễn Văn Tiến: Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển. **Đỗ Khắc Tiệp:** Xây dựng mô hình mô phỏng, tổng hợp kết quả.

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Chúng tôi không có bất kỳ xung đột lợi ích với bất kỳ tổ chức, cá nhân nào và chịu hoàn toàn trách nhiệm về tính chính xác, trung thực và hợp pháp của nội dung công trình này.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ không được cung cấp theo yêu cầu.

1st Nguyen Van Tien*. *Vietnam Maritime University*

2nd Do Khắc Tiệp. *Vietnam Maritime University*

*Corresponding author: nguyenvantien@vimaru.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] S. Santoso, M. F. McGranaghan, R. C. Dugan, and H. W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality, 3rd ed", New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2012. [Online]. Available: <https://accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071761550>.
- [2] H. Akagi, "Active harmonic filters," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141, Dec. 2005, Doi: 10.1109/JPROC.2005.859603.
- [3] A. Q. Al-Shetwi, M. A. Hannan, K. Jern, M. Mansur, and P. J. Ker, "Grid-connected renewable energy sources: A review of the recent control strategies for mitigating power quality issues," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, p. 110713, 2021, Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119831.
- [4] S. Buso, L. Malesani, and P. Mattavelli, "Comparison of current control techniques for active filter applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 5, pp. 722-729, Oct. 1998, Doi: 10.1109/41.720328.
- [5] S. Musa, M. A. M. Radzi, H. Hisham and N. I. Abdulwahab, "Fuzzy logic controller based three phase shunt active power filter for harmonics reduction," *2014 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, Johor Bahru, Malaysia, 2014, pp. 371-376, Doi: 10.1109/CENCON.2014.6967532
- [6] L. Wu, J. Liu, S. Vazquez and S. K. Mazumder, "Sliding Mode Control in Power Converters and Drives: A Review," in *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 9, no. 3, pp. 392-406, March 2022, Doi: 10.1109/JAS.2021.1004380.
- [7] B. Singh, K. Al-Haddad and A. Chandra, "A new control approach to three-phase active filter for harmonics and reactive power compensation," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 133-138, Feb. 1998, Doi: 10.1109/59.651624.
- [8] S. N. Manias, *Power Electronics and Motor Drive Systems*, Academic Press, 2017, pp. 807-842. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128117989/power-electronics-and-motor-drive-systems>.
- [9] P. Krause, O. Wasynczuk, S. Sudhoff, and S. Pekarek, "Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 3rd ed," *Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press*, 2013, Doi: 10.1002/9781118524336.ch3.
- [10] S. Haykin, "Neural Networks and Learning Machines, 3rd ed". Pearson, 2009. [Online]. Available: https://books.google.com.vn/books/about/Neural_Networks_and_Learning_Machines.html?hl=pt-BR&id=K7P36lKzI_QC&redir_esc=y.
- [11] IEEE, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", IEEE Std 519-2022, 2022, Doi: 10.1109/IEEESTD.2014.6826459.
- [12] Bộ Công Thương, "Thông tư số 39/2015/TT-BCT: Quy định hệ thống điện phân phối," Hà Nội, Việt Nam, 18/11/2015. [Online]. Available: <https://vanban.chinhphu.vn/default.aspx?pageid=27160&docid=182779>. Accessed: Sept. 20, 2025.