

DOI:10.22144/ctu.jvn.2022.112

NGHIÊN CỨU KỸ THUẬT ĐIỀU KHIỂN BÙ DỰ ĐOÁN THÔNG MINH ỨNG DỤNG TRONG LỌC SÓNG HÀI CHO TẢI PHI TUYẾN HỆ THỐNG ĐIỆN BA PHA

Huỳnh Lê Minh Thiện^{1*}, Trần Thanh Vũ² và Hồ Văn Cừ¹

¹Khoa Điện tử viễn thông, Trường Đại học Sài Gòn

²Khoa Điện – Điện tử viễn thông, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Huỳnh Lê Minh Thiện (email: leminhthien.huynh@sgu.edu.vn)

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 18/03/2022

Ngày nhận bài sửa: 05/05/2022

Ngày duyệt đăng: 19/05/2022

Title:

Research on Predictive Smart Compensation Control Techniques Apply in Eliminating High Order Harmonic Solution for Three Phase Online Non-Linear-Load

Từ khóa:

Bộ lọc tích cực, điều khiển chất lượng điện năng, điều khiển bù dự đoán

Keywords:

Active Power Filter, power quality control, Predictive control compensation

ABSTRACT

This research proposes a combination of the smart predictive compensation control in the Active power filter to improve power quality for the three-phase-power system. Using soft computing to improve the quality of electricity for the system is the choice of our new research approach to the efficient harmonic filter. The use of a Voltage Source Inverter (VSI) for the system as an Active power filter is one of the most population solutions for power quality control and advanced software methods are also an option to upgrade the system with the new standards at a lower cost.

Filter harmonic on the three-phase system using active filter circuit with the using of predictive control algorithm makes filtration efficiency higher, especially for expansion and improvement issues concerning the three-phase Non-linear-load system, this solution becomes much simpler and more efficient than investing in a new system in terms of cost, matching with improving the quality of the system, meeting the requirements of high-quality power. The research has also improved the THD by <5%, confirming the reliability and easily of upgrading the power quality control systems.

TÓM TẮT

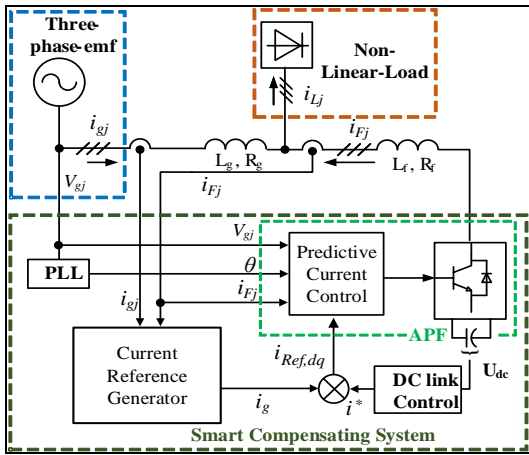
Ổn định chất lượng hệ thống điện ba pha khi nhu cầu gia tăng tải và chất lượng điện là chủ đề nghiên cứu quan trọng và giải pháp sử dụng hệ thống lọc tích cực để nâng cao chất lượng điện phổ biến hiện nay. Tuy nhiên, hướng nghiên cứu mới trong bài viết là ứng dụng bộ điều khiển bù dự đoán thông minh để nâng cao hiệu quả bộ lọc tích cực ba pha.

Hệ thống lọc tích cực có sự hỗ trợ của bộ điều khiển bù dự đoán thông minh làm cho hiệu quả lọc cao hơn và cải tiến phần cứng tốt hơn, đáp ứng được các yêu cầu về nguồn điện chất lượng cao. Kết quả mô phỏng cho thấy chỉ số méo hài dòng điện lưới ba pha đã được cải thiện với chỉ số THD < 5% khẳng định ứng dụng bộ điều khiển bù dự đoán thông minh có tính khả thi và hiệu quả cao.

1. GIỚI THIỆU

Nền tảng của điều khiển bù dự đoán thông minh là ước lượng tham số. Các phương pháp ước lượng phổ biến bao gồm bình phương đệ quy nhỏ nhất và giảm dần gradient. Cả hai phương pháp này cung cấp luật cập nhật được sử dụng để sửa đổi các ước lượng trong thời gian thực, làm cho đáp ứng bộ điều khiển tiến tới điều kiện ổn định một cách nhanh nhất. Ngoài tiêu chí ổn định Lyapunov, các tiêu chí ổn định khác như phương pháp ổn định bằng ma trận khe thời gian (Stability via Interval Matrix Method) cũng được sử dụng để rút ra các luật cập nhật và hiện thị điều kiện hội tụ đối với kích thích đầu vào liên tục, giải thuật cơ sở là thuật toán song song của Han (Zilouchian & Jamshidi, 2001), thuộc về lớp các thuật toán tham chiếu sử dụng đạo hàm. Thuật toán bao gồm các vòng lặp đại số tuyến tính và có nghiệm dạng biểu thức đơn giản, do vậy đối với các bước lấy mẫu kết quả cũng sẽ dần hội tụ về điều kiện tham chiếu. Dựa trên sự hội tụ của thuật toán, thuộc tính của khâu điều khiển được xác định. Phép tham chiếu và chuẩn hóa trong toán học thường được sử dụng để cải thiện mức độ hiệu quả của các thuật toán ước lượng. Điều khiển bù dự đoán thông minh còn được gọi là điều khiển có thể điều chỉnh để giảm thời gian điều khiển và hội tụ nhanh (Peresada, 2020).

Lựa chọn kỹ thuật điều khiển bù dự đoán thông minh ứng dụng trong lọc sóng hài cho tải phi tuyến hệ thống điện ba pha được đề xuất như Hình 1 (Iturra et al., 2018; Sharma et al., 2020).

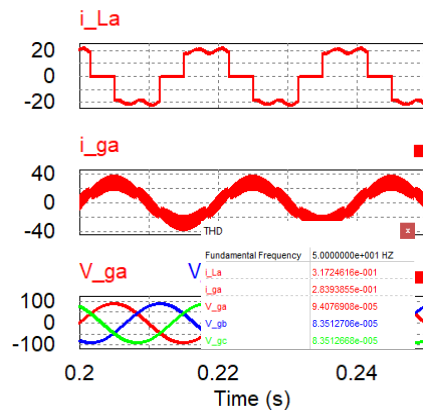


Hình 1. Cấu trúc điều khiển hệ thống APF với bộ điều khiển dự đoán

Trong đó, khối nguồn dùng máy phát điện ba pha, điện áp ngõ vào 220 Volts/50-60 Hz, tần số tín hiệu ngõ ra từ 0 đến 400 Hz, đại lượng đặc trưng gồm các dòng điện lưới (grid) của ba pha i_{gj} ($j=a,b,c$), các điện áp lưới của ba pha v_{gj} ($j=a,b,c$)

và pha lưới ký hiệu θ ; Khối Non-Linear-Load đại diện cho tải phi tuyến là phần tử tải biến động và tạo sóng hài, công suất 5 kW, đại lượng đặc trưng cho tải là các dòng điện tải i_{Lj} ; Khối Active Power Filter đại diện cho hệ thống lọc tích cực sử dụng bộ điều khiển bù hài dự đoán thông minh. Nguyên lý hoạt động của khối này là tạo ra các đại lượng dòng điện i_{Fj} với ($j=a,b,c$) để bù dòng điện hài bậc cao một cách chính xác nhất có thể để triệt sóng hài do tải phi tuyến sinh ra trên lưới điện (Iturra et al., 2019). Khối Phase-locked-loop (PLL) dùng để bắt pha giữa lưới và khối bù hài với đại lượng pha ký hiệu θ , phân tạo dòng điện tham chiếu (Current Reference Generator) kết hợp với khối điều khiển điện áp tụ DC (DC link Control) để tạo ra các dòng điện tham chiếu $i_{Ref,dq}$ đã được biến đổi sang hệ trục $d-q$, ta liên kết giữ mức năng lượng U_{dc} để duy trì hoạt động ổn định hệ cho bộ nghịch lưu nguồn áp (Voltage Source Inverter-VSI). Phần tử chính trong hệ thống bù hài thông minh là lọc bộ lọc tích cực APF (Active Power Filter) với cấu trúc VSI được điều khiển bởi giải thuật điều khiển dòng dự đoán Predict Current control để tạo ra dòng điện bù sóng hài i_{Fj} với ($j=a, b, c$). Ngoài ra hệ thống còn sử dụng các phần tử trở kháng lọc thụ động hỗ trợ ở phía hệ thống lọc hài L_f, R_f và phía nguồn L_g, R_g .

Trong trường hợp không sử dụng các giải pháp lọc nguồn, hệ thống như Hình 1 cho đáp ứng dạng sóng chứa nhiều hài bậc cao rất lớn, so với THD < 5% theo tiêu chuẩn quy định về độ méo hài IEEE-STD519-1992 (Damon, 1981; Blooming & Carnovale, 1992), thì hệ thống thường không đạt được tiêu chuẩn của chỉ số này, ở phía tải do tính chất của tải không lý tưởng gây ra hài, ở phía máy phát cũng phát sinh nhiều hài bậc cao do ảnh hưởng bởi tải phi tuyến, nhiều phía máy phát và phía tải có dạng sóng như Hình 2.



Hình 2. Méo hài dòng điện trên tải phi tuyến

Trên Hình 2 là dạng sóng của điện áp máy phát ba pha: v_{ga} , v_{gb} và v_{gc} ; dạng sóng dòng điện pha a của máy phát i_{ga} ; và dạng sóng dòng điện pha a của phía tải i_{La} . Trên đó cho thấy tại tần số cơ bản 50 Hz chỉ số THD của điện áp lưới pha a v_{ga} là 0,0378%; THD của dòng điện lưới i_{ga} là 68,4% và THD của dòng điện phía tải i_{La} là 31,3%. Dòng điện của các pha trên lưới biến động theo trạng thái năng lượng sử dụng trên hệ thống, các sóng hài tồn tại trong dòng điện cũng theo đó biến động liên tục, vì vậy cần loại bỏ hài bậc cao phát sinh trong hệ thống một cách tự động theo thời gian thực.

Theo giả định, nguồn tạo ra từ máy phát ba pha là nguồn đối xứng, tại điểm nối lưới bộ lọc tích cực xem như kết nối với tải phi tuyến (Non-Linear Load), phân tích trên một pha của hệ thống, tại điểm nối lưới bộ lọc tích cực, theo định luật Kirchhoff 1 ta có

$$i_{ga} = i_{La} - i_{Fa} \quad (1)$$

Với i_{ga} là dòng điện pha a của máy phát ba pha, i_{La} là dòng điện tải pha a và i_{Fa} là dòng điện của bộ lọc tích cực bơm lên pha a của lưới tại điểm nối lưới PCC (Point of Common Coupling). Nhiệm vụ của bộ lọc tích cực là tạo ra i_{Fa} sao cho triệt tiêu được các thành phần hài bậc cao tồn tại trong phân tích Fourier của i_{La} . Tương tự cho pha b và pha c còn lại, ta cũng có

$$\begin{aligned} i_{gb} &= i_{Lb} - i_{Fb} \\ i_{gc} &= i_{Lc} - i_{Fc} \end{aligned} \quad (2)$$

Hài sinh ra do tải phi tuyến chính bằng độ lớn và ngược pha với dòng điện được tạo ra bởi hệ thống lọc tích cực i_{Fj} . Để điều này xảy ra, bộ điều khiển của hệ thống lọc tích cực phải đáp ứng nhanh về mặt thời gian đồng thời phải chính xác về pha và về biên độ.

2. PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN BÙ SÓNG HÀI SỬ DỤNG MÔ HÌNH ĐIỀU KHIỂN DÒNG DỰ ĐOÁN THÔNG MINH

2.1. Mô hình hoá cấu trúc điều khiển bù dự đoán thông minh

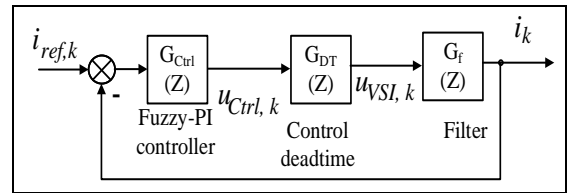
Mô hình điều khiển phản hồi của bộ VSI sử dụng khâu điều khiển Fuzzy-PI ($G_{Ctrl}(z)$) và cuộn cảm lọc L_f (Lai et al., 2016; X. Zhang et al., 2016), còn được xem như là tải cảm ứng điện trở (L_f, R_f) như Hình 3. $G_{CCL}(z)$ là hàm truyền kín và k là chỉ số trạng thái lấy mẫu.

Thời gian trễ do lấy mẫu của khâu đo lường và thời gian tính toán của bộ điều khiển gọi chung gọi là thời gian chết $G_{DT}(z)$. Cuộn cảm lọc $G_f(z)$ như là một bộ lọc thông thấp (LPF) vì bản chất nó là trở và kháng. Hàm truyền trên miền rời rạc z như sau:

$$\begin{aligned} G_{Ctrl}(z) &= \frac{z.b_{1,Ctrl} + b_{0,Ctrl}}{z.a_{1,Ctrl} + a_{0,Ctrl}}; \\ G_{DT}(z) &= \frac{1}{z}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$G_f(z) = K_f \cdot \frac{z}{z + a_{0,f}}.$$

trong đó: $K_f = \frac{1}{R_f}$; $a_{0,f} = -e^{-T_{sw}/\tau_f}$; $\tau_f = \frac{L_f}{R_f}$



Hình 3. Vòng điều khiển dòng dự đoán

Do đáp ứng tần số của bộ điều khiển Fuzzy-PI và độ trễ (delay) gây ra bởi thời gian chết của các van điều khiển và cuộn cảm lọc, nên không thể đạt được mức sai số bằng 0 trong giá trị ổn định xoay chiều. Việc bù thời gian trễ này được thực hiện bởi sơ đồ điều khiển Hình 4.

Sai số ước lượng e_k được tính bởi hàm truyền hệ kín và dòng điện tham chiếu $i_{ref,k}$. Thông qua hàm truyền nghịch của hệ kín để tính dòng điện tham chiếu của sai số e_k là $e_{ref,err,k}$, dòng điện này dùng để hiệu chỉnh dòng điện tham chiếu. Điện áp ngõ ra của bộ điều khiển dự đoán $V_{Pred,k}$ được tính toán bằng cách sử dụng hàm truyền của khâu Fuzzy-PI. Giá trị này thể hiện sai số của điện áp ngõ ra u_{VSI} , mà cũng chính là v_{Fj} điện áp tại ngõ ra bộ VSI, và được sử dụng để tính toán bù sai số. Theo công thức (4) hàm truyền của bộ điều khiển dự đoán như sau:

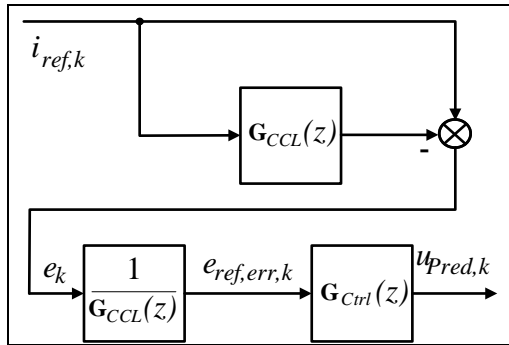
$$\begin{aligned} G_{Pred}(z) &= \frac{u_{Pred}(z)}{i_{Pred}(z)} = \frac{1}{G_{DT}(z).G_f(z)} \\ &= \frac{1}{K_f(z)} \cdot (z^{-1} - a_{0,f}) \end{aligned} \quad (4)$$

Trong trạng thái ổn định, dòng điện tham chiếu có tính chất tuần hoàn và có cùng tần số với tín hiệu cơ bản, dòng điện tham chiếu $i_{ref,k}$ được biểu diễn như sau:

$$i_{ref,k} = i_{ref,(k-N)}, \quad (5)$$

Trong công thức số (5), N là số mẫu đã lấy mẫu trên một chu kỳ tín hiệu cơ bản. Đối với ứng dụng bộ lọc tích cực, chu kỳ của dòng điện tham chiếu chính là chu kỳ của dòng điện tải, từ đó cho thấy giá trị kế tiếp trong tương lai sẽ được gán bằng với giá trị tương quan trong quá khứ tại đúng chu kỳ lấy mẫu, như công thức sau:

$$i_{ref,(k+1)} = i_{ref,(k+1-N)}, \quad (6)$$



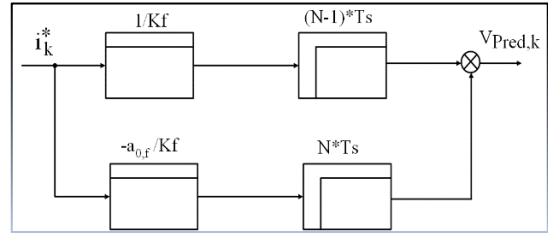
Hình 4. Cấu trúc rời rạc của bộ điều khiển dự đoán

Giá trị trong quá khứ tại cùng thời điểm lấy mẫu, giả sử cùng là mẫu thứ $(k+1)$, được sử dụng như là trạng thái ổn định xét trong chu kỳ tín hiệu cơ bản. Điều này là cần thiết để kiểm chứng tính hợp lệ của trạng thái ổn định, xem xét trạng thái ổn định có tồn tại hay không bằng công thức sau:

$$\left| i_{(k+1)}^* - i_{(k+1-N)}^* \right| < e_{Pred,max} \quad (7)$$

Nghĩa là điều kiện kiểm nghiệm hợp lý cho sự ổn định phải thỏa mãn điều kiện bất đẳng thức, trong đó $e_{Pred,max}$, max là giá trị sai biệt tối đa cho phép giữa hai giá trị của dòng điện tham chiếu cách nhau một chu kỳ của tín hiệu cơ bản trước đó. Nếu công thức (7) không được đáp ứng, thì bộ điều khiển dự đoán phải được dừng để không gây ra các ảnh hưởng tiêu cực đến việc điều khiển. Cấu trúc bộ điều khiển dự đoán thông minh được mô tả như Hình 5 (Han & Xu, 2011). Trong đó chỉ cần hai bộ trễ, hai bộ nhân

và một bộ cộng. $T_s=1/f_s = 1/10.000=10^{-4}$ là thời gian lấy mẫu.



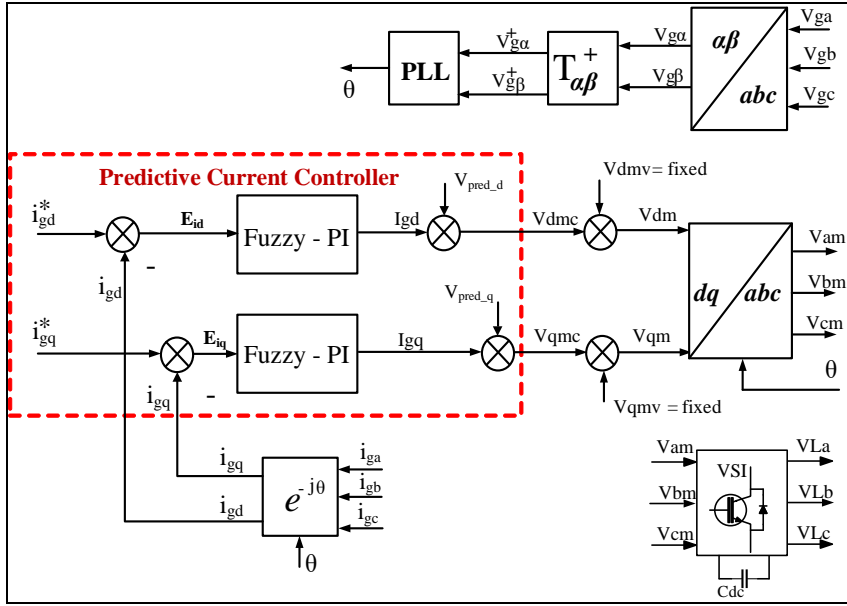
Hình 5. Cấu trúc tổng quát của bộ điều khiển dự đoán thông minh

2.2. Cấu trúc mô hình dự đoán thông minh áp dụng trong bộ lọc tích cực

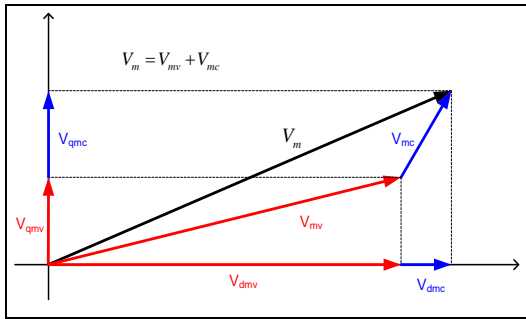
Đề xuất giải pháp sử dụng bộ điều khiển bù dự đoán thông minh vào bộ lọc tích cực để giảm sóng hài dòng điện (THDi) và kiểm soát chất lượng nguồn năng lượng phục vụ cho tải phi tuyến trong cấu trúc liên kết của bộ nghịch lưu nguồn áp VSI để kiểm soát chất lượng điện toàn hệ thống nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng điện, tiết kiệm chi phí vận hành và tăng tuổi thọ cho các tải sử dụng trong cùng hệ thống cung cấp điện, như Hình 6.

Nguyên lý làm việc trên sơ đồ này có hai bộ Fuzzy-PI (Dehini & Benachaiba, 2020), một bộ dùng cho đáp ứng bù dự đoán thông minh dòng điện trên trục “d” và một bộ dùng cho đáp ứng bù dự đoán thông minh dòng điện trên trục “q” trong hệ toạ độ d-q. Sau các bộ Fuzzy-PI là đại lượng bù dự đoán thông minh tương ứng trên trục “d” và trục “q” là $V_{pred,d}$ và $V_{pred,q}$ để bù suy hao và bù trễ trong quá trình hoạt động của hệ thống. Tín hiệu ra khỏi khối điều khiển dòng dự đoán (Predictive Current Controller) được điều chỉnh biên độ một lần nữa bởi đại lượng cố định V_{dmv} và V_{qmv} để phù hợp với biên độ tín hiệu tức thời trên thanh cái tại điểm nối lưới với hệ thống lọc tích cực (Zhang et al., 2016). Các khối chức năng này là chi tiết của các khối chức năng nguyên lý trên Hình 1.

Ngõ ra của bộ điều khiển điện áp V_{dmv} , V_{qmv} là các giá trị cố định theo mức điện áp dạng d-q không đổi. Khi bộ điều khiển dòng điện được duy trì trong quá trình hoạt động trên lưới, ngõ ra của cả hai bộ điều khiển cùng được kết nối, các dòng điện d-q có thể được điều khiển bởi các ngõ ra của bộ điều khiển dòng điện d-q V_{dmc} , V_{qmc} xung quanh V_{dmv} , V_{qmv} cố định, bù pha tín hiệu được minh họa như Hình 7.



Hình 6. Sơ đồ nguyên lý bù hài dự đoán thông minh hệ thống lọc nguồn tích cực ba pha

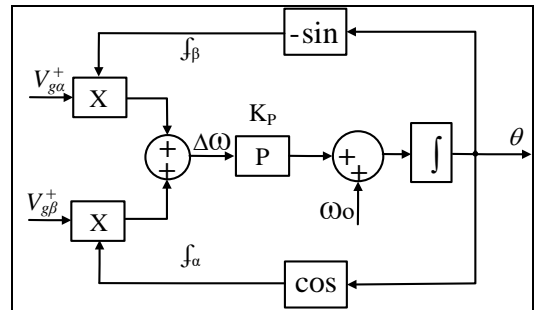


Hình 7. Sơ đồ Pha trong chế độ điều khiển dòng

Mặc dù dạng sóng điện áp lưới là hình sin và cân bằng trong điều kiện hoạt động bình thường, nhưng tín hiệu được sử dụng để đồng bộ hóa thường bị lệch do sụt áp hoặc tăng áp và do sóng hài. Việc phát hiện thành phần điện áp thứ tự thuận ở tần số cơ bản là điều cần thiết để loại bỏ các tác động của sự thiếu chính xác của tín hiệu đồng bộ khi điện áp lưới bị méo và không cân bằng. Một số kỹ thuật để phát hiện điện áp thứ tự thuận theo điều kiện lưới không cân bằng và méo hài được đề xuất trong Zhang et al. (2008), Dehini and Benachaiba (2020).

Bộ PLL như đã trình bày ở Hình 1, ngoài chức năng ổn định tần số, khối PLL cũng dùng để kiểm soát số lượng mẫu được lấy trong một chu kỳ tín hiệu cơ bản (Suul et al., 2011). Để sử dụng bộ điều khiển đã được đề xuất, cần phải xác định tần số lấy mẫu (số mẫu N) trong một chu kỳ cơ bản. Với thời gian lấy mẫu cố định T_s , N sẽ thay đổi nếu tần số cơ bản bị thay đổi, điều này dẫn đến việc so sánh các

giá trị mẫu tham chiếu được so sánh không chính xác. Vấn đề này được khắc phục bằng cách sử dụng vòng khóa pha để đồng bộ tần số cơ bản. Bộ PLL sẽ làm cho thời gian lấy mẫu T_s và thời gian đóng ngắt T_{sw} tương ứng với nhau, làm cho N không đổi và việc dự đoán trở nên chính xác. Như vậy, trong sơ đồ được đề xuất, Hình 1 thì PLL cung cấp góc pha chính xác tại điểm nối lưới của hệ thống lọc với lưới điện như Hình 8.



Hình 8. Vòng khóa pha (PLL)

Để đồng bộ góc ngõ ra PLL θ với góc điện áp lưới θ_g , điện áp α - β được tính từ điện áp lưới ba pha đo được, ký hiệu là V_{gab} , V_{gbc} , V_{gca} qua các công thức sau:

$$V_{g\alpha} = \frac{2}{3}V_{gab} - \frac{1}{3}V_{gca} \tag{8}$$

$$V_{g\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}V_{gbc} \tag{9}$$

Để có thể xác định pha chính xác, điện áp cơ bản có thể được trích xuất thành phần thứ tự thuận trên khung tham chiếu tĩnh (Moor Neto et al., 2009; Tian et al., 2013; Jian et al., 2019) như sau:

$$\begin{bmatrix} V_{g\alpha}^+ \\ V_{g\beta}^+ \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{g\alpha} \\ V_{g\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{\alpha\beta}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{g\alpha} \\ V_{g\beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Trong đó q là toán tử dịch pha 90 độ, $q = e^{-j\frac{\pi}{2}}$.

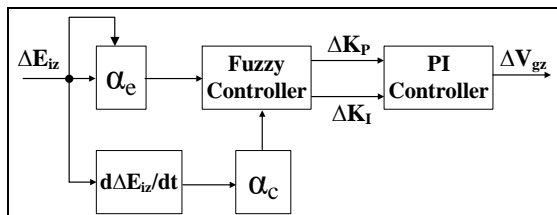
Điện áp α - β thứ tự thuận $V_{g\alpha}^+$, $V_{g\beta}^+$ trong (2) có thể thu được bằng cách kết hợp phương trình (19) và (15) như sau:

$$\begin{cases} V_{g\alpha}^+(n) = \frac{1}{2}(V_{g\alpha}(n) - V_{90g\beta}(n)) \\ V_{g\beta}^+(n) = \frac{1}{2}(V_{g\beta}(n) + V_{90g\alpha}(n)) \end{cases} \quad (11)$$

Điện áp α - β thứ tự thuận $V_{g\alpha}^+$, $V_{g\beta}^+$ được gán làm điện áp ngõ vào PLL tại điểm được nối lưới để tạo ra tín hiệu đồng bộ thích hợp ngay cả khi điện áp lưới tuột áp hoặc tăng.

Sau khi tham chiếu ta có:
$$\begin{cases} i_{gd}^* - i_{gd} = \Delta E_{id} \\ i_{gq}^* - i_{gq} = \Delta E_{iq} \end{cases}$$

thì ΔE_{id} và ΔE_{iq} được gọi chung là ΔE_{iz} , kết quả tính toán sau khâu điều khiển Fuzzy-PI cho ΔV_{gd} và ΔV_{gq} , gọi chung là ΔV_{gz} . Khâu điều khiển Fuzzy – PI được mô tả như Hình 9.



Hình 9. Khâu điều khiển Fuzzy-PI

Môi trường của hệ thống biến động liên tục như sóng hài, độ gợn sóng của điện áp một chiều và xoay chiều, và sự lệch pha giữa pha dòng điện và điện áp khiến việc cài đặt tham số của bộ điều khiển PI thông thường trực tiếp xác định không đáp ứng được hiệu suất của hệ thống. Vì vậy, bộ điều khiển PI bù dự đoán thông minh mờ được sử dụng để thay thế bộ điều khiển PI thông thường nhằm tăng thêm tốc độ đáp ứng động của bộ điều khiển dòng (17). Trong cấu trúc này, ΔE_{iz} là độ sai lệch dòng điện trên hệ trục d - q , $d\Delta E_{iz}/dt$ là tốc độ sai lệch dòng điện trên hệ quy chiếu d - q , α_e và α_c theo thứ tự là hệ số lượng tử của ΔE_{iz} và $d\Delta E_{iz}/dt$, K_I^* và K_P^* theo thứ tự là giá trị

hệ số tích phân ban đầu của K_I và hệ số tỉ lệ ban đầu của K_P . Luật Fuzzy được dùng để mối quan hệ giữa hai cặp hệ số (K_I và K_P) and ($d\Delta E_{iz}/dt$ và ΔE_{iz}).

Quy trình tính toán của bộ Fuzzy-PI lần lượt được mô tả bởi các phương trình sau:

Đầu tiên tính ΔE_{iz} và $d\Delta E_{iz}/dt$.

$$\begin{cases} \Delta E_{iz} = i_{gz}^* - i_{gz} \\ d\Delta E_{iz}(k)/dt = \Delta E_{iz}(k) - \Delta E_{iz}(k-1) \\ \Delta E_{iz}(k) = \Delta E_{iz}(k-1) \end{cases} \quad (12)$$

Trong đó “z” đại diện cho “d” hoặc “q”. Sau đó suy ra ΔE_{iz} và $d\Delta E_{iz}/dt$, ΔK_P và ΔK_I được tính toán bởi quy tắc mờ Mamdani.

$$\begin{cases} \Delta K_P = f_1(\Delta E_{iz}, d\Delta E_{iz}/dt) \\ \Delta K_I = f_2(\Delta E_{iz}, d\Delta E_{iz}/dt) \end{cases} \quad (13)$$

Tiếp theo là xác định các hệ số tỉ lệ và tích phân.

$$\begin{cases} K_P = K_P^* + \Delta K_P \\ K_I = K_I^* + \Delta K_I \end{cases} \quad (14)$$

Cuối cùng là tinh chỉnh ΔV_{gz} được thực hiện bởi khâu điều khiển PI kinh điển.

$$\Delta V_{gz} = k_p \Delta E_{iz} + k_i \int_0^t \Delta E_{iz} dt \quad (15)$$

Dòng điện tham chiếu của dòng điện bù được tạo ra bởi việc tách thành phần dòng điện cơ bản của dòng điện tải. Phần còn lại là thành phần hài bậc cao, theo nguyên lý tách sóng hài. Nguyên lý của giải thuật tách hài bậc cao là phân tách hài cơ bản ra khỏi tín hiệu tổng hợp dùng Fourier, khi đó đại lượng xoay chiều hài cơ bản trở thành đại lượng dòng điện một chiều (DC) được ký hiệu I_{LP} , đại lượng còn lại sẽ đại diện cho sóng hài cần bù hoặc triệt tiêu đại diện bởi tín hiệu xoay chiều ký hiệu là $I_{LN} \cdot e^{jq\theta}$, trong đó $e^{jq\theta}$ đặc trưng cho tần số hài bậc cao và I_{LN} đặc trưng cho biên độ hài bậc cao.

Dòng điện tham chiếu dạng i^* dựa trên bộ điều khiển điện áp tự liên kết DC và dòng điện được tạo ra từ bộ tạo dòng điện tham chiếu i_g được dùng để tạo ra dòng điện tham chiếu chính xác cho bộ điều khiển dòng bù dự đoán $i_{Ref,dq}$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

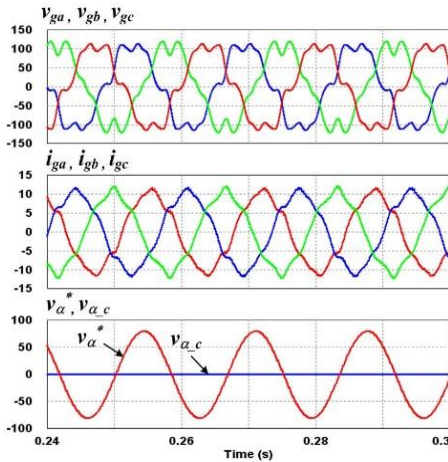
Để minh chứng cho kết quả nghiên cứu đối với phương án nâng cao hiệu suất của cấu trúc bộ lọc tích cực đã đề xuất, kết quả thực hiện mô phỏng trên Psim đã xác minh tính khả thi của giải pháp đã đề

xuất. Đánh giá mạch và các thông số được sử dụng trong mô phỏng sau được thực hiện với các thông số hệ thống đã được trình bày như trên. Bảng 1 trình

bày đối sánh kết quả mô phỏng và các hình bên dưới mô tả chi tiết:

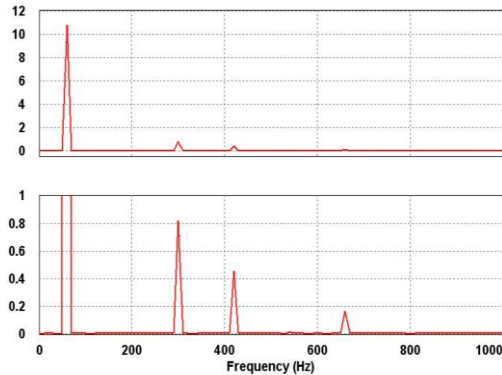
Bảng 1. Bảng đối sánh kết quả mô phỏng

Thông số (THD)	Không sử dụng predictive control	Áp dụng predictive control	Ghi chú
THD	18,7%	2,3%	< 5%, Hình 14,15
Thay đổi thuần trở là 0.5 đến 3.5 Ω			
THD	> 18,7%	Từ 1,6% đến 3,97%	< 5%, Hình 16
Thay đổi điện dung, giới hạn trên thay đổi điện dung là 0,47 mF đến 6,6 mF			
THD	> 18,7%	Từ 1,6% lên 3,1%	< 5%, Hình 17
Khi tải thay đổi điện cảm, giới hạn trên thay đổi điện cảm là 0,0003 (H) đến 0,95 (H)			
THD	> 18,7%	Từ 1,6% lên 4,8%	< 5%, Hình 18
Khi tải thay đổi giá trị tổng hợp của tải ở giới hạn trên 5 kW			
THD	> 18,7%	≤ 5,5%	Chấp nhận được, Hình 19, 20



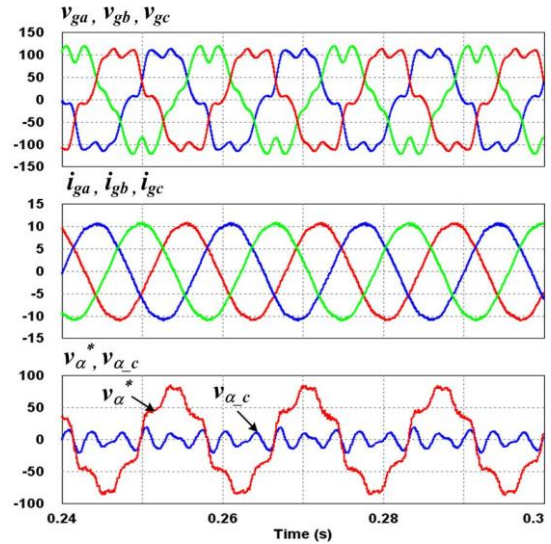
Hình 10. Kết quả mô phỏng chưa sử dụng giải pháp bù dự đoán thông minh

Hình 10 là kết quả mô phỏng khi chưa áp dụng giải thuật bù dòng dự đoán, các thông số chất lượng rất kém, THD > 18,7%. Hình 11 thể hiện cột hài bậc cao có giá trị rất lớn.



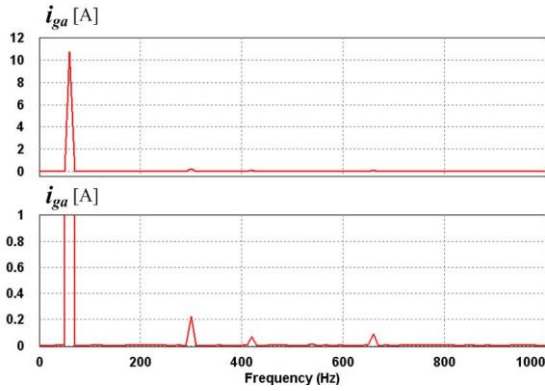
Hình 11. Phân tích phổ chưa sử dụng giải thuật bù dự đoán thông minh

Hình 10 và Hình 11 cho thấy kết quả mô phỏng không sử dụng phương pháp bù tối ưu. Điện áp tham chiếu trực α dạng sóng hình sin, vì điện áp bù bằng không. Dòng điện lưới có các sóng hài bậc thấp như bậc 5, 7 và 11 do sóng hài điện áp lưới, và do đó THD của dòng điện lưới được tính bằng phân tích FFT là 18,7%.

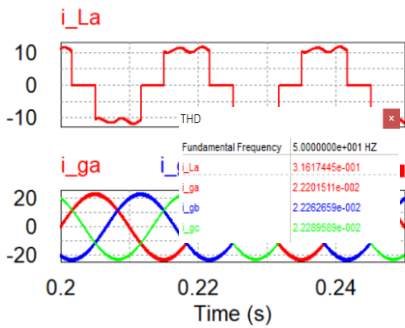


Hình 12. Kết quả mô phỏng sử dụng giải pháp thích nghi dự đoán

Hình 12 và Hình 13 cho thấy kết quả mô phỏng khi áp dụng phương pháp bù dự đoán thông minh. Điện áp tham chiếu trực α không phải là hình sin vì là điện áp bù trực α . THD của dòng điện lưới giảm xuống còn 2,3%.

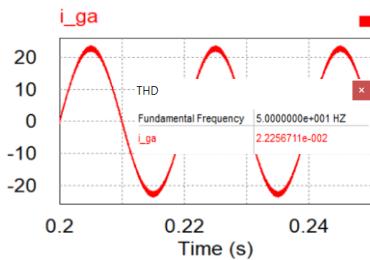


Hình 13. Phân tích phổ sử dụng giải thuật bù dự đoán thông minh

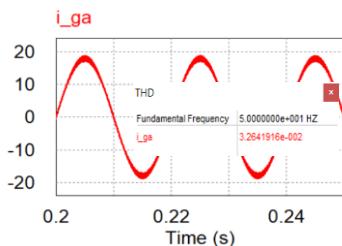


Hình 14. Load hệ thống với thông số tải

Trong đó, giới hạn trên thay đổi thuần trở là 0,5 đến 3,5 Ω , méo hài THD tăng từ 2,2% lên 3,26% < 5% (Hình 14, Hình 15 và Hình 16).

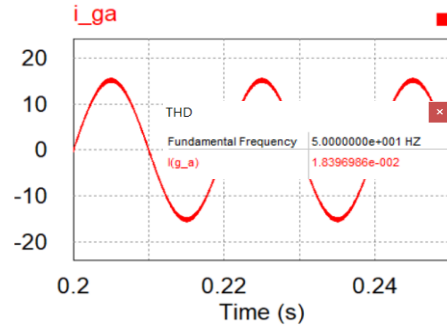


Hình 15. Méo hài giới hạn khi tải biến động thông số thuần trở giới hạn dưới

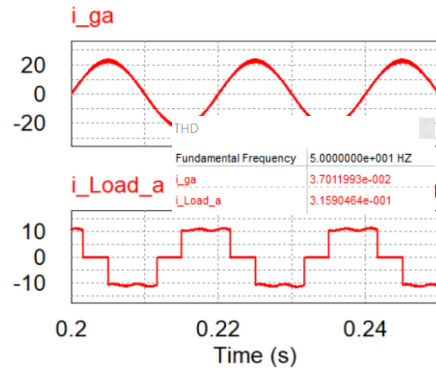


Hình 16. Méo hài giới hạn khi tải biến động thông số dung kháng giới hạn trên

Hình 17 và Hình 18 khi tải thay đổi điện dung, giới hạn trên thay đổi điện dung là 0,47 mF đến 6,6 mF, méo hài THD tăng từ 1,83% lên 3,7% < 5%.

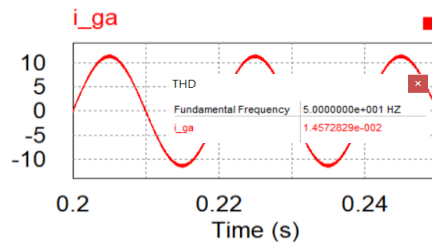


Hình 17. Méo hài giới hạn khi tải biến động thông số cuộn cảm giới hạn dưới

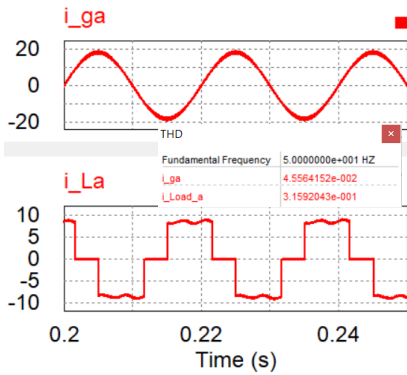


Hình 18. Méo hài giới hạn khi tải biến động thông số cuộn cảm giới hạn trên

Hình 19 khi tải thay đổi điện cảm, giới hạn trên thay đổi điện cảm là 0,0003 (H) đến 0,95 (H), méo hài THD của dòng điện lưới pha a tăng từ 1,45% lên 4,55% < 5%, được thể hiện chi tiết trong phần đo đạt THD của Hình 20 tại tần số cơ bản.

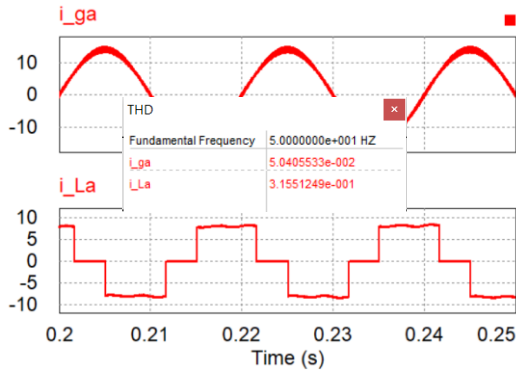


Hình 19. Méo hài giới hạn khi tải biến động thông số cảm kháng giới hạn dưới



Hình 20. Méo hài giới hạn khi tải biến động thông số cảm kháng giới hạn trên

Hình 21 mô tả tổng hợp các giới hạn ngưỡng trên của các thông số tải, dòng điện lưới có chỉ số tổng méo hài THD = 5,04%, một con số chấp nhận được theo tiêu chuẩn của IEEE và IEC.



Hình 21. Méo hài giới hạn khi tải biến động thông số tổng hợp giới hạn trên

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Blooming, T. M., & Carnovale, D. J. (1992). Application of IEEE STD 519-1992 harmonic limits. *IEEE*, 1–9.

Damon, R. W. (1981). IEEE Standards. *IEEE Power Engineering Review, PER-1*(11), 1. <https://doi.org/10.1109/MPER.1981.5511873>

Dehini, R., & Benachaiba, C. (2020). Improving the active power filter performance by robust self-tuning face to sudden change of load. *Journal of Electrical Engineering*, 1–9.

Han, Y., & Xu, L. (2011). Design and implementation of a robust predictive control scheme for active power filters. *Journal of Power Electronics, 11*(5), 751–758. <https://doi.org/10.6113/JPE.2011.11.5.751>

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đề xuất mô hình điều khiển bù dự đoán thông minh để cải thiện chất lượng điện trong các hệ thống điện ba pha nhằm khắc phục nhiễu sóng hài bậc cao, nâng hiệu năng lọc hài của hệ thống lọc nguồn tích cực. Hệ thống lọc tích cực được trình bày dựa trên xử lý tín hiệu sóng hài bởi giải thuật trích sóng hài phân tích Fourier làm tham chiếu cho mạch lọc tích cực để mạch lọc này triệt tiêu hài trên lưới ba pha với việc dự đoán đại lượng biến động của từng thành phần hài bậc cao trên hệ trục xoay $d-q$ được quy đổi, đại lượng $V_{pred,(d,q)}$ đã góp phần nâng cao hiệu quả lọc hài cho hệ thống và đạt được các tiêu chuẩn chất lượng điện theo quy định IEEE-STD519-1992 (Damon, 1981; Blooming & Carnovale, 1992).

Sử dụng phần mềm Psim kết hợp với thiết kế các khâu nguyên lý được lập trình hóa trong bộ lọc tích cực được hỗ trợ bởi các khối giả lập ngõ vào và ngõ ra trên Vi điều khiển trong Psim, như C-block và DLL-block, đã bước đầu hiện thực hóa việc xây dựng mô hình ứng dụng cho bộ điều khiển bù dự đoán thông minh đã được đề xuất. Giải thuật đã sử dụng cho phương án nghiên cứu này rất phù hợp cho các hệ thống cũ muốn cải tiến chất lượng, mà không gặp nhiều khó khăn trong vấn đề kỹ thuật và giá thành. Nó cũng phù hợp cho các giải pháp mang tính hoàn thiện và cập nhật hệ thống theo thời gian.

Các dạng sóng mô phỏng cho thấy sự chuẩn xác của giải pháp nâng cao chất lượng điện cho hệ thống điện ba pha. Với các thành phần sóng hài giảm đi đáng kể đã thu được trong nghiên cứu này (THD <5%) nằm trong tầm thay đổi tải cho phép. Hướng nghiên cứu tiếp theo là chế tạo hoàn chỉnh mô hình phần cứng thực nghiệm.

Iturra, R. G., Cruse, M., Mutze, K., Dresel, C., Soleimani, I., & Thiemann, P. (2018). Model predictive control for shunt active power filter with harmonic power recycling capability. *2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, SEST 2018 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/SEST.2018.8495890>

Iturra, R. G., Cruse, M., Mutze, K., Thiemann, P., & Dresel, C. (2019). The power balance of shunt active power filter based on voltage detection: A harmonic power recycler device. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, 2019-March*, 1835–1842. <https://doi.org/10.1109/APEC.2019.8722037>

- Jian, L., Xingrui, L., Jiangfeng, Z., Hao, Z., & Li, F. (2019). Dual closed-loop current controller for a 4-leg shunt APF based on repetitive control. *International Journal of Electronics*, 106(3), 349–364. <https://doi.org/10.1080/00207217.2018.1537403>
- Lai, J., Zhou, H., & Hu, W. (2016). New adaptive fuzzy PID control method and its application in FCBTM. *International Journal of Computers, Communications, and Control*, 11(3), 394–404. <https://doi.org/10.15837/ijccc.2016.3.753>
- Moor Neto, J. A., Lovisololo, L., França, B. W., & Aredes, M. (2009). Grid synchronization system for power converters. *2009 Brazilian Power Electronics Conference, COBEP2009*, 749–755. <https://doi.org/10.1109/COBEP.2009.5347692>
- Peresada, S. (2020). *Selective Estimation of Three-Phase Mains Current for Shunt Active Power Filter*. 68–72.
- Sharma, B., Swarnkar, N. K., & Sharma, R. (2020). PI CONTROLLER SVPWM SHUNT ACTIVE POWER FILTER FOR HARMONICS REDUCTION IN POWER SYSTEM. *Journal of Engineering and Technology*, 5(1), 1–27.
- Suul, J. A., Ljøkelsoy, K., Midtsund, T., & Undeland, T. (2011). Synchronous reference frame hysteresis current control for grid converter applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(5), 2183–2194. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2161738>
- Tian, X., Jiang, Q., & Wei, Y. (2013). Research on novel railway uninterruptible flexible connectors with series-connected transformers and back-to-back converters. *2013 IEEE ECCE Asia Downunder - 5th IEEE Annual International Energy Conversion Congress and Exhibition, IEEE ECCE Asia 2013*, 111–116. <https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia.2013.6579082>
- Zhang, H. B., Finney, S. J., Massoud, A. M., Fletcher, J. E., & Williams, B. W. (2008). *Operation of a three-level NPC active power filter with unbalanced and nonlinear loads*. 22–26. <https://doi.org/10.1049/cp:20080476>
- Zhang, X., Wang, Y., Yu, C., Guo, L., & Cao, R. (2016). Hysteresis model predictive control for high-power grid-connected inverters with output LCL filter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(1). <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2477060>
- Zilouchian, A., & Jamshidi, M. (2001). *Intelligent Control Systems Using Soft Computing Methodologies*. CRC. <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>