



Điều khiển bộ biến đổi MMC nối lưới sử dụng bộ điều khiển LADRC tăng cường khả năng chống nhiễu

Control of the MMC converter for grid connection enhances noise immunity using LADRC control

Phạm Việt Phương^{1*}, Nguyễn Đức Dương², Trần Hùng Cường³

¹ Đại học Bách khoa Hà Nội

² Học viện Nông nghiệp Việt Nam

³ Trường Đại học Thủy Lợi

* Corresponding author E-mail: phuong.phamviet@hust.edu.vn

Abstract

The MMC converter stands out as a promising solution for integrating distributed energy sources and HVDC systems with the grid. However, the inherent complexity of the MMC structure, characterized by a large number of submodule (SM) units, presents challenges during operation, particularly in direct modulation scenarios. These complexities manifest as dynamic processes that can induce interference, significantly impacting grid connectivity, especially in weak power grid scenarios. This paper presents a control solution aimed at mitigating linear active disturbances by leveraging the Linear Active Disturbance Rejection Control (LADRC) technique. The proposed controller, when integrated with the Nearest Level Modulation (NLM) method, enables the generation of $2N+1$ AC voltage levels with low-frequency closing pulses for the valves. This approach shows promise in enhancing system stability owing to its robust anti-interference capabilities and superior tracking performance. The methodology is rooted in a small-signal impedance model that accounts for frequency coupling dynamics. The efficacy of the proposed solution is validated through simulations conducted by using Matlab/Simulink software.

Keywords: Modular Multilevel Converter, Linear Active Disturbance Rejection Control, Extended State Observer.

Chữ viết tắt

MMC	Modular Multilevel Converter
THD	Total Harmonic Distortion
HVDC	High Voltage Direct Current
STATCOM	Static Synchronous Compensator
NLM	Nearest Level Modulation
THD	Total Harmonic Distortion
CHB	Cascaded H-bridge
NPC	Neutral-point converter

Tóm tắt

Bộ biến đổi (BBĐ) MMC là giải pháp tốt cho hệ thống kết nối các nguồn năng lượng phân tán và hệ thống HVDC với lưới điện. Tuy nhiên, với số lượng lớn các SM trong cấu trúc MMC khiến cho việc điều chế trực tiếp tạo ra nhiều quá trình động học phức tạp khi MMC hoạt động. Quá trình này sẽ gây ra nhiều ảnh hưởng rất lớn tới việc kết nối lưới điện, đặc biệt là các lưới điện yếu. Bài báo này đề xuất giải pháp điều khiển loại bỏ nhiễu chủ động tuyến tính dựa trên bộ điều khiển LADRC nhằm triệt tiêu các nhiễu dao động sinh ra không kiểm soát do hoạt động của MMC. Bộ điều khiển này được kết hợp với phương pháp điều chế NLM để tạo được $2N+1$ mức điện áp xoay chiều với xung đóng tần số thấp cho các van. Và đây là một phương pháp tiềm năng để nâng cao mức độ ổn định của hệ thống nhờ khả năng chống nhiễu cao và hiệu suất theo dõi tốt. Quá trình này dựa trên mô hình trở kháng tín hiệu nhỏ của hệ thống có tính đến việc ghép tần số được thiết lập. Các kết quả chứng minh được thực hiện trên phần mềm matlab/simulink.

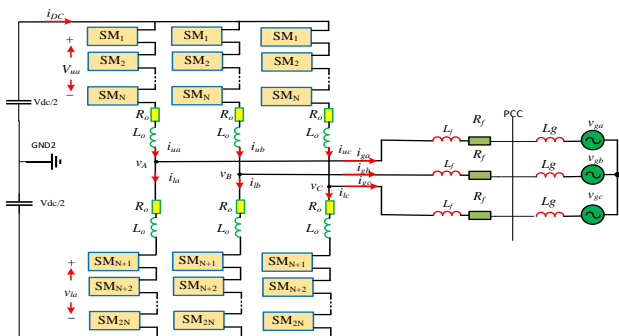
1. Đặt vấn đề

Số lượng Submodule (SM) trong BBĐ MMC có thể thay đổi để tạo ra các mức điện áp khác nhau theo yêu cầu điện áp đầu ra xoay chiều, do đó MMC có thể chuyển đổi với tổn hao thấp mà không cần sử dụng bộ lọc điện áp. Ưu điểm của cấu hình MMC là phía một chiều chỉ cần một nguồn DC duy nhất, vì vậy MMC có thể dùng để ứng dụng để kết nối các nguồn điện với điện áp cao từ các hệ thống một chiều, cụ thể như: hệ thống HVDC, thống STATCOM, hệ thống truyền động điện trung áp; [1-3]... Điểm nổi bật nhất của MMC đó là giải quyết các vấn đề về nhược điểm của các BBĐ đa mức CHB, NPC. Ví dụ như cấu hình đơn giản hơn, có thể áp dụng với số mức không giới hạn mà vẫn đảm bảo có thể sử dụng hệ thống điều khiển dễ dàng đồng thời có thể linh hoạt trong thay thế và sửa chữa [4]. Hiện nay, để đạt hiệu quả truyền dẫn năng lượng điện tốt nhất các phương thì các phương pháp điều chế, điều khiển luôn được cải tiến để áp dụng cho các BBĐ đa mức [5]. Các phương pháp điều chế được sử dụng được chia thành hai nhóm là điều chế SVM và điều chế dựa trên mức điện áp gồm: phương pháp PWM; phương pháp NLM [5-6]. Phương pháp điều chế PWM là phương pháp dễ dàng thực hiện và tạo ra được $N+1$ mức điện áp. Phương pháp NLM cũng có cách thực hiện đơn giản

với tần số đóng cắt thấp và tạo ra $2N+1$ mức điện áp, ưu điểm của NLM là có thể áp dụng với số mức bất kỳ [6]. Trong triển khai ứng dụng của BBĐ MMC, bộ điều khiển PI truyền thống được sử dụng và nghiên cứu nhiều trước đây. Điều khiển PI đáp ứng về chất lượng điều khiển, nhưng về khả năng chống nhiễu và tính ổn định trong thực tế chưa đáp ứng được [7]. Để khắc phục, bài báo này giới thiệu phương pháp điều khiển loại bỏ nhiễu chủ động (LADRC). Phương pháp LADRC áp dụng cho MMC đã được trình bày trong [8]. LADRC giúp chống nhiễu và truy xuất được nguồn gây nhiễu [9]. ADRC là một phương pháp điều khiển ưu việt cho các hệ thống có mô hình được mở rộng với một biến trạng thái mới, nghĩa là có thể áp dụng cho các hệ thống có quá trình động học thay đổi trong khi làm việc mà sự thay đổi này chưa xác định được ở thời điểm ban đầu. Việc ước tính trực tuyến của trạng thái mới này được thực hiện bằng cách sử dụng bộ quan sát trạng thái mở rộng (Extended State Observer – ESO) [9], bộ quan sát này có tác dụng theo dõi và ước lượng các nhiễu tác động trực tiếp để khử các sai số điều khiển do nhiễu sinh ra. Do đó, nếu mô hình động học của hệ thống không rõ ràng khi làm việc do các thay đổi liên tục bởi các yếu tố bên ngoài, thì bộ điều khiển LADRC vẫn có thể giải quyết được các yêu cầu điều khiển nhằm đảm bảo mục tiêu điều khiển đề ra. Khả năng này giúp cho LADRC trở thành phương pháp tin cậy khi áp dụng cho các hệ thống có mô hình động học không cố định mà bị tác động bởi các yếu tố nhiễu khi làm việc [8-9]. Gần đây, điều khiển LADRC được quan tâm nghiên cứu trong đề điều khiển MMC nhằm nâng cao chất lượng với ưu điểm là dễ dàng tính toán và có khả năng điều khiển chống nhiễu tốt, và khắc phục được các nhược điểm của bộ điều khiển PI truyền thống. Bài báo này trình bày phương pháp điều chế NLM kết hợp với điều khiển LADRC áp dụng cho MMC tạo ra $2N+1$ mức điện áp xoay chiều kết quả được với điều khiển PI cho cùng mô hình, thuật toán điều khiển và điều chế sẽ được trình bày chi tiết trong phần nội dung. Cụ thể: Trong Phần II cấu trúc và nguyên lý hoạt động của MMC được trình bày. Phần III thực hiện thiết kế hệ thống điều khiển cho MMC dựa vào bộ điều khiển ADRC và điều chế NLM. Kết quả mô phỏng của chiến lược điều khiển đề xuất và thảo luận được thể hiện trong phần IV.

2. Cấu trúc của bộ biến đổi MMC và nguyên lý hoạt động của MMC

2.1. Cấu trúc bộ biến đổi MMC nối lưới điện

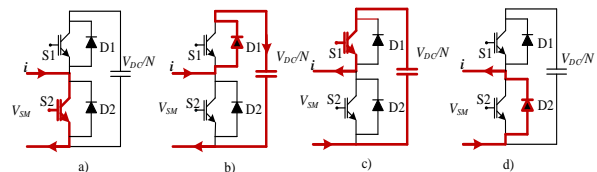


Hình 1. Cấu trúc bộ biến đổi MMC nối lưới.

Hình 1 là cấu trúc BBĐ MMC ba pha, mỗi pha có hai nhánh van trên và dưới, mỗi nhánh van là các SM được mắc nối tiếp với nhau. Phần giữa của hai nhánh van là điện cảm L_o và điện trở R_o , cả hai phần tử này có tác dụng hạn chế dòng điện vòng và các quá độ làm việc của BBĐ. Ngoài ra còn giúp tụ điện nạp tốt hơn và nhằm hạn chế sự chênh lệch điện áp của mỗi SM và giảm thiểu tăng dòng điện quá độ trong mạch, giảm tổn hao và vượt quá sự chịu đựng của các linh kiện bán dẫn [12-13]. Phía đầu vào một chiều chỉ sử dụng một nguồn V_{dc} duy nhất (có thể là acquy công suất lớn hoặc nguồn điện PV). Với N SM thì điện áp mỗi SM là V_{dc}/N . Vì trong mỗi lần chỉ có N SM được mở nên điện áp trên mỗi pha chạy từ $-V_{dc}/2$ đến $V_{dc}/2$. BBĐ MMC có tần số đóng cắt thấp bằng phương pháp điều chế NLM nên giảm tổn thất của BBĐ rất thấp [9]. Một trong những cấu trúc phổ biến của SM là sơ đồ nửa cầu H. Về mặt lý thuyết số SM có thể tăng lên không giới hạn để đáp ứng yêu cầu về chất lượng, số SM phụ thuộc vào yêu cầu của người thiết kế. Khi kết nối lưới điện, mô hình MMC không cần mắc thêm bộ lọc giúp cho giảm kích thước và giá thành hệ thống. Đây là một ưu điểm đặc biệt nổi bật mà các BBĐ đa mức khác không có được.

2.2. Nguyên lý hoạt động của MMC

Các van bán dẫn sẽ được phát xung điều khiển nhằm tạo ra điện áp AC ở đầu ra. Có hai trạng thái của SM là chèn vào (insert) hoặc bỏ qua (bypass) dựa trên trạng thái của các van trong SM: Van S1 mở và van S2 đóng; Van S1 đóng và van S2 mở. Hai van bán dẫn sẽ không được phép mở cùng lúc, vì các tụ điện trong mỗi SM sẽ được phóng hoàn toàn và trở nên không còn có tác dụng. Có bốn trạng thái làm việc khác nhau để tạo ra quá trình làm việc của MMC như hình 2.



Hình 2. Trạng thái đóng cắt của S1 và S2: (a) và (b) Khi dòng điện có chiều dương; (c) và (d) khi dòng điện có chiều âm.

Trong mỗi chu kỳ làm việc, chỉ có $1/2$ số lượng các SM được sử dụng để tạo ra điện áp xoay chiều, các chu kỳ tiếp theo thì lần lượt các SM được thêm vào và bớt đi bởi quá trình điều chế để có thể tạo ra điện áp trên phía AC luôn nằm trong khoảng $-V_{dc}/2$ đến $+V_{dc}/2$. Quá trình này diễn ra trong các pha và có độ lệch pha là 120° . Việc dao động này diễn ra liên tục kèm theo độ chênh lệch điện áp trên các nhánh của MMC sẽ tạo thành sự mất cân bằng điện áp nhánh trên và nhánh dưới. Từ đó gây ra sự xuất hiện của dòng điện vòng i_c trong các nhánh của MMC. Dòng điện này ít ảnh hưởng tới hiệu ứng bên ngoài cả phía AC. Tuy nhiên, dòng điện vòng là nguyên nhân gây ra tổn thất của BBĐ.

3. Điều khiển BBĐ MMC trong chế độ nối lưới

3.1. Mô hình bộ biến đổi MMC trong chế độ nối lưới

Mô hình BBĐ MMC nối lưới và hệ thống điều khiển được thể hiện hình 3. Trong đó v_{gj} ($j=a,b,c$) là điện áp lưới, i_{uj} , i_{lj} là

dòng điện trong mỗi nhánh BBD, v_{uj}, v_{lj} là điện áp trên mỗi nhánh BBD, m_{uj}, m_{lj} là hệ số điều chế trên mỗi nhánh, i_{gj} là dòng điện đầu ra của BBD tới lưới. Từ sơ đồ thay thế của MMC, có thể xây dựng được phương trình toán học của quá trình làm việc trong MMC như (1).

$$\begin{cases} L_0 \frac{di_{uj}}{dt} + R_0 i_{uj} = \frac{v_{dc}}{2} - L_f \frac{di_{gj}}{dt} - R_f i_{gj} - m_{uj} v_{uj} - v_{gj} \\ L_0 \frac{di_{lj}}{dt} + R_0 i_{lj} = \frac{v_{dc}}{2} - L_f \frac{di_{gj}}{dt} - R_f i_{gj} - m_{lj} v_{lj} + v_{gj} \end{cases} \quad (1)$$

Giả sử các tụ điện trong MMC ở trạng thái cân bằng. Khi đó phương trình mô tả hoạt động của tụ điện được biểu diễn như ở phương trình (2):

$$\begin{cases} \frac{c_{sm}}{N} \frac{dv_{uj}}{dt} = m_{uj} i_{uj} \\ \frac{c_{sm}}{N} \frac{dv_{lj}}{dt} = m_{lj} i_{lj} \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó: m_u, m_l với hệ số điều chế ba pha trong điều khiển vòng kín và điều khiển triệt tiêu dòng điện vòng, kí hiệu lần lượt là m_v, m_c và được biểu diễn như ở phương trình (3):

$$\begin{cases} m_u = 0.5 - m_v + m_c \\ m_l = 0.5 + m_v + m_c \end{cases} \quad (3)$$

Cộng và trừ hai phương trình ở (1) nhận được:

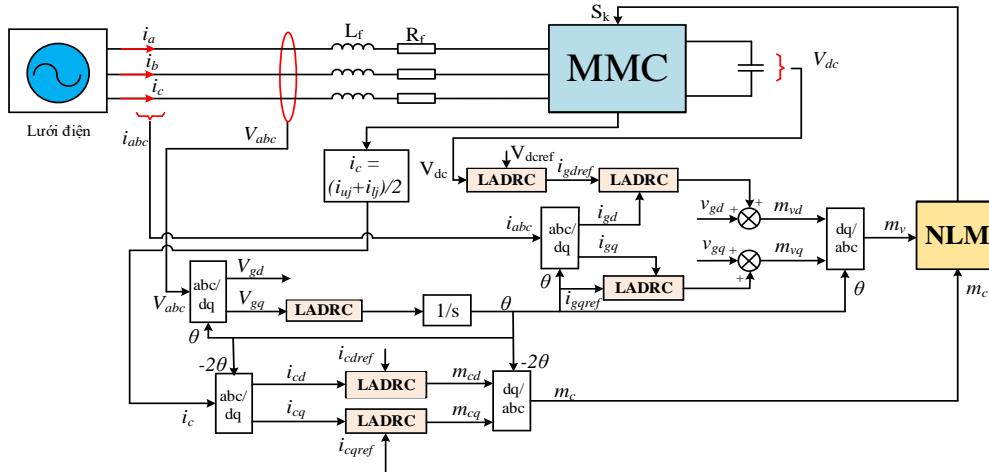
$$\begin{cases} (L_f + \frac{L_0}{2}) \frac{di_{gj}}{dt} + (R_f + \frac{R_0}{2}) i_{gj} = -v - (\frac{1}{2} + m_c) \frac{v_{uj} - v_{lj}}{2} + m_v \frac{v_{uj} + v_{lj}}{2} \\ L_0 \frac{di_{cj}}{dt} + R_0 i_{cj} = \frac{v_{dc}}{2} - (\frac{1}{2} + m_c) \frac{v_{uj} + v_{lj}}{2} + m_v \frac{v_{uj} - v_{lj}}{2} \end{cases} \quad (4)$$

Đặt $L = L_f + \frac{L_0}{2}; R = R_f + \frac{R_0}{2}; v_{comj} = \frac{v_{uj} + v_{lj}}{2}; v_{diffj} = \frac{v_{uj} - v_{lj}}{2}$;

phương trình (4) trở thành:

$$\begin{cases} L \frac{di_{gj}}{dt} + R i_{gj} = -v - (\frac{1}{2} + m_c) v_{diffj} + m_v v_{comj} \\ L_0 \frac{di_{cj}}{dt} + R_0 i_{cj} = \frac{v_{dc}}{2} - (\frac{1}{2} + m_c) v_{comj} + m_v v_{diffj} \end{cases} \quad (5)$$

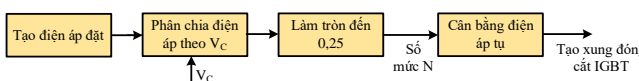
BBD MMC nối lưới được điều khiển với 2 vòng khép kín gồm có điều khiển ngoài là điện áp một chiều và mạch trong là điều khiển dòng điện. Ngoài ra còn có hai vòng điều khiển tách rời là điều khiển dòng điện vòng, và điều khiển vòng khóa pha.



Hình 3. Cấu trúc điều khiển MMC nối lưới

3.2. Điều chế NLM cho MMC

Phương pháp NLM được sử dụng để tăng số mức điện áp đầu ra của MMC lên đến $2N+1$ nhằm mục đích cải thiện chất lượng điện áp đầu ra của MMC. Quá trình thực hiện NLM cho MMC được mô tả như hình 4.



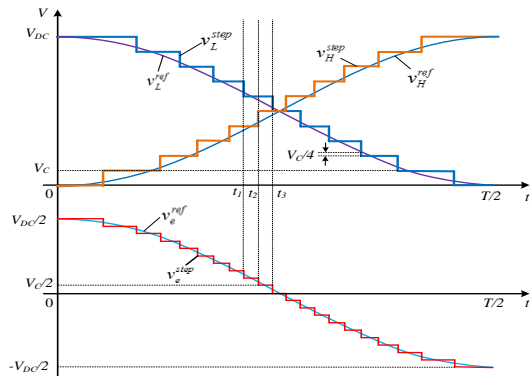
Hình 4. Sơ đồ phương pháp NLM cải tiến.

Hình 5 minh họa nguyên lý hoạt động của phương pháp NLM cho MMC với 10 SM mỗi nhánh. Hàm làm tròn có nhiệm vụ xác định số SM trên mỗi nhánh, được viết như (6).

$$\begin{cases} N_L = \text{round}_{0,25} \left\{ \frac{V_{DC}}{2V_C} [1 - m \cos(\omega t)] \right\} \\ N_H = \text{round}_{0,25} \left\{ \frac{V_{DC}}{2V_C} [1 + m \cos(\omega t)] \right\} \end{cases} \quad (6)$$

Hàm làm tròn $\text{round}_{0,25}(x)$ được giải thích như sau: Giá trị x được làm tròn tới giá trị số nguyên gần nhất kho so sánh với

0,25. Khi phần thập phân của x được xác định lớn hơn 0,25 thì x được làm tròn lên giá trị tiếp theo, ngược lại thì x được làm tròn xuống giá trị liền trước. Quá trình phân tích của phương pháp này được thể hiện như hình 5.



Hình 5. Nguyên lý của phương pháp NLM cải tiến.

Từ hình 5, mô hình toán học thể hiện sự thay đổi các bước của điện áp nhánh trong MMC được xác định như (7).

$$\begin{cases} v_L^{step} = MV_C \\ v_H^{step} = (N - M + 1)V_C \\ v_e^{step} = (M - 0,5N - 0,5)V_C \end{cases} \quad (7)$$

3.3. Bộ điều khiển LADRC

Trong nội dung bài báo này chỉ xét đến bộ điều khiển LADRC tuyến tính cho các đối tượng bậc nhất [8-9]. Xét một quá trình bậc một đơn giản $P(s)$, với độ lợi DC (K), và hằng số thời gian (T):

$$P(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{Ts+1} \Rightarrow T \cdot \dot{y}(t) + y(t) = K \cdot u(t) \quad (8)$$

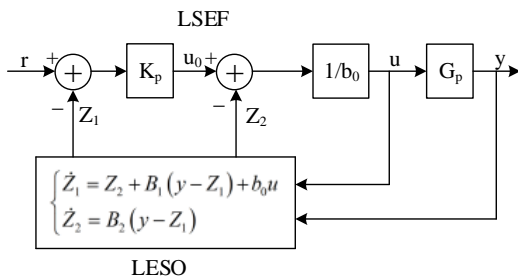
Thêm nhiễu đầu vào $d(t)$ vào quá trình, đặt $b = \frac{K}{T}$ ta được:

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= -\frac{1}{T} \cdot y(t) + \frac{1}{T} \cdot d(t) + \frac{K}{T} \cdot u(t) \\ &= -\frac{1}{T} \cdot y(t) + \frac{1}{T} \cdot d(t) + b \cdot u(t) \end{aligned}$$

Thay thế $b = b_0 + \Delta b$, trong đó b_0 sẽ biểu thị phần đã biết của $b = K/T$ và Δb là sai số mô hình (chưa xác định) thu được phương trình (9).

$$\dot{y}(t) = \underbrace{\left(-\frac{1}{T} \cdot y(t) + \frac{1}{T} \cdot d(t) + \Delta b \cdot u(t) \right)}_{=f_d(t)} + b_0 \cdot u(t) = f(t) + b_0 \cdot u(t) \quad (9)$$

Ý tưởng của LADRC là triển khai một bộ quan sát trạng thái mở rộng (ESO) ước tính $\hat{f}_{(t)}$, sao cho có thể bù đắp tác động của $f(t)$ lên quá trình bằng cách loại bỏ nhiễu như hình 6.



Hình 6. Cấu trúc điều khiển ADRC bậc nhất.

Để có công cụ ước tính, cần phải mô tả không gian trạng thái của $f(t)$ như (10).

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}}_x + \underbrace{\begin{pmatrix} b_0 \\ 0 \end{pmatrix}}_B \cdot u(t) + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}}_C \cdot \dot{f}(t) \quad (10)$$

$$y(t) = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix}}_C \cdot \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}$$

Do không thể đo được đầu vào $\dot{f}_{(t)}$, nên bộ quan sát trạng thái cho loại quá trình này chỉ có thể được xây dựng bằng cách sử dụng đầu vào (u) và đầu ra (y). Trạng thái ước lượng $\hat{x}_2(t)$ sẽ cung cấp giá trị gần đúng của $f(t)$ (tức là $\hat{f}_{(t)}$) nếu nhiễu tổng quát thực tế $f(t)$ được coi là hằng số từng phần. Bộ quan sát trạng thái mở rộng (Luenberger) như (11).

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_0 \\ 0 \end{pmatrix} u(t) + \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \end{pmatrix} \cdot y(t) - \hat{x}_1(t) \quad (11)$$

$$= \underbrace{\begin{pmatrix} -l_1 & 1 \\ -l_2 & 0 \end{pmatrix}}_{A-LC} \cdot \begin{pmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} b_0 \\ 0 \end{pmatrix}}_B u(t) + \underbrace{\begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \end{pmatrix}}_L \cdot y(t)$$

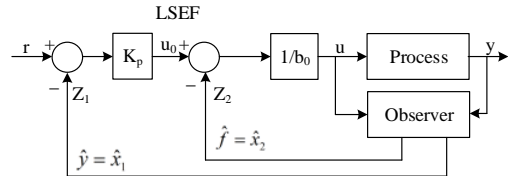
Sử dụng các biến ước lượng: $\hat{x}_1(t) = \hat{y}(t)$, $\hat{x}_2(t) = \hat{f}(t)$, để loại bỏ nhiễu:

$$u(t) = \frac{u_0(t) - \hat{f}(t)}{b_0} \quad \text{với } u_0(t) = K_p \cdot (r(t) - \hat{y}(t)) \quad (12)$$

Từ đây có thể thấy $u_0(t)$ biểu thị đầu ra của bộ điều khiển tỷ lệ tuyến tính. Áp dụng công thức (12) vào (9) ta được:

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= f(t) + b_0 \cdot \frac{u_0(t) - \hat{f}(t)}{b_0} = (f(t) - \hat{f}(t)) + u_0(t) \\ &\approx u_0(t) = K_p \cdot (r(t) - \hat{y}(t)) \end{aligned} \quad (13)$$

Từ biểu thức (13), ta xây dựng được cấu trúc mạch vòng điều khiển LADRC cho khâu quán tính bậc nhất như hình 7.



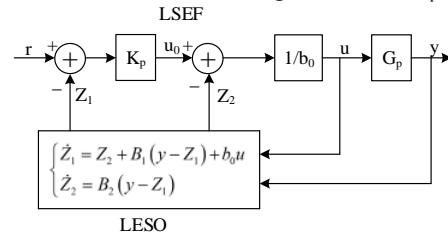
Hình 7. Cấu trúc vòng điều khiển với ADRC cho quy trình bậc nhất.

3.4. Cấu trúc điều khiển MMC dựa trên LADRC

Đối với một hàm bậc nhất, có thể được biểu diễn:

$$\dot{y} = \underbrace{-a_1 y + w}_{f_d} + (b - b_0)u + b_0 u \quad (14)$$

Trong đó: u , y , w là đầu vào, đầu ra và nhiễu loạn bên ngoài chưa biết; a_1 đại diện cho tham số của không xác định; b đại diện cho độ lợi đầu vào chưa biết, b_0 đại diện cho giá trị đã biết; f_d là nhiễu loạn tổng quát, chứa cả nhiễu loạn bên trong và bên ngoài. Hình 8 là cấu trúc điều khiển của LADRC bậc nhất, gồm: LESO, LSEF; đối tượng điều khiển G_p .



Hình 8. Cấu trúc điều khiển của LADRC bậc nhất.

LESO có thể thực hiện quan sát thời gian thực các biến hệ thống thực y và f_d , là các biến có thể được thiết kế như (15).

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1 (y - z_1) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = \beta_2 (y - z_1) \end{cases} \quad (15)$$

Trong đó z_1 and z_2 là các ước lượng của y và f_d ; β_1 và β_2 là các bộ quan sát. LSEF có thể khuếch đại lượng điều khiển phản hồi thông qua bộ điều khiển tỷ lệ, cải thiện đáp ứng quá độ của hệ thống. LSEF có thể được tổ chức như (16).

$$\begin{cases} u_0 = k_p (r - z_1) \\ u = \frac{1}{b_0} (u_0 - z_2) \end{cases} \quad (16)$$

Trong đó: k_p , u_0 và r lần lượt là hệ số sai lệch phản hồi, đầu ra LSEF và tín hiệu điều khiển tham chiếu. Để tạo thuận lợi cho việc điều chỉnh tham số, bộ LADRC tham số đơn được sử dụng, trong đó xuất hiện tham số ωL và được định nghĩa là băng thông của LADRC. Các thông số k_p , β_1 và β_2 khi đó có thể được biểu thị thông qua ωL như sau:

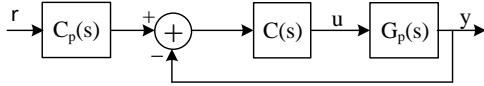
$$\begin{cases} k_p = \omega_L \\ \beta_1 = 2\omega_L \\ \beta_2 = \omega_L^2 \end{cases} \quad (17)$$

Do đó, bộ LADRC tham số đơn chỉ cần điều chỉnh bằng thông ω_L . Hơn nữa, bằng thông của LADRC tương ứng với bằng thông của bộ điều khiển PI. Cấu trúc như vậy có thể làm giảm số lượng tham số, giúp đơn giản hóa đáng kể quá trình điều chỉnh. Theo hình 8 và (17), có thể thu được các mối quan hệ của LADRC như sau:

$$\begin{cases} \frac{U(s)}{Y(s)} = -\frac{(\beta_2 + \beta_1 k_p)s + \beta_2 k_p}{b_0 s^2 + (b_0 \beta_1 + b_0 k_p)s} = -\frac{\omega_L^2(3s + \omega_L)}{b_0(s^2 + 3\omega_L s)} \\ \frac{U(s)}{R(s)} = \frac{k_p s^2 + \beta_1 k_p s + \beta_2 k_p}{b_0 s^2 + (b_0 \beta_1 + b_0 k_p)s} = \frac{\omega_L(s^2 + 2\omega_L s + \omega_L^2)}{b_0(s^2 + 3\omega_L s)} \end{cases} \quad (18)$$

Trong đó $U(s)$, $Y(s)$ và $R(s)$ đại diện cho các biến đổi Laplace của u , y và r tương ứng. Dựa trên hình 8 và (18), LADRC được đơn giản hóa thành hệ thống điều khiển hai bậc tự do. Cấu trúc đơn giản của nó được thể hiện trong hình 9, trong đó $C(s)$ và $C_f(s)$ có thể được viết như (19).

$$\begin{cases} C(s) = -\frac{U(s)}{Y(s)} = -\frac{\omega_L^2(3s + \omega_L)}{b_0(s^2 + 3\omega_L s)} \\ C_f(s) = \frac{U(s)}{R(s)C(s)} = \frac{s^2 + 2\omega_L s + \omega_L^2}{\omega_L(3s + \omega_L)} \end{cases} \quad (19)$$



Hình 9. Cấu trúc đơn giản hoá của LADRC.

Trong điều khiển phản hồi thông thường, $C(s)$ đóng một vai trò tương tự như bộ điều khiển PI. Các đặc tính thông thấp của LADRC cho phép bộ điều khiển lọc ra các thành phần nhiễu có tần số cao hơn tần số cắt. Nó ngăn bộ điều khiển khuếch đại nhiễu trong dải tần này. $C(s)$ hoạt động như một bộ khởi động làm mềm và đóng vai trò lọc trước, với mục đích giảm quá mức ở phản ứng bước bằng cách làm giảm tín hiệu từ tần số cắt. LADRC bậc nhất rời rạc được thực hiện bằng phương pháp dựa trên không gian trạng thái, phương pháp dựa trên rời rạc Euler. Dựa trên các nguyên tắc thiết kế của LADRC bậc nhất, CCSC, vòng trong dòng điện, vòng ngoài điện áp DC và PLL của MMC được thực hiện như dưới đây. Từ (5) và biến đổi Park, mô hình toán học của MMC trên trục dq có thể được suy ra như (20).

$$\frac{L_0 di_{cd}}{dt} = -V_{dcref} m_{cd} - 2L_0 \omega_i c_q - R_0 i_{cd} \quad (20)$$

$$\frac{L di_{gd}}{dt} = V_{dcref} m_{vd} + L \omega_i g_q - R i_{gd} - v_d$$

Với các giá trị ổn định có thể coi $v_{com} = V_{dc} = V_{dcref}$, $v_{dif} = 0$, ω là tần số góc của điện áp lưới, i_q trên trục q tác dụng với cuộn cảm theo công thức $U = L \omega i_q$.

$$\frac{di_{cd}}{dt} = -\frac{V_{dcref}}{L_0} m_{cd} - \frac{R_0}{L_0} i_{cd} - 2\omega_i c_q \quad (21)$$

$$\frac{di_{gd}}{dt} = \frac{V_{dcref}}{L} m_{vd} - \frac{R}{L} i_{gd} - \frac{1}{L} v_d + \omega_i g_q \quad (22)$$

Theo (14)-(16), (21), CCSC có thể được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} y_c = i_{cd} \\ u_c = m_{cd} \\ b_{0,c} = -\frac{V_{dcref}}{L_0} \\ f_{d,c} = -\frac{R_0}{L_0} i_{cd} - 2\omega_i c_q \end{cases} \quad (23)$$

Các chỉ số dưới c , i , v và PLL đại diện cho CCSC, vòng trong dòng điện, vòng ngoài điện áp và PLL tương ứng.

Mạch vòng dòng điện dựa trên LADRC: Mạch vòng dòng điện là vòng điều khiển bên trong của bộ điều khiển chính để điều khiển có phản hồi dòng điện, qua đó gián tiếp công suất truyền tải theo công suất mong muốn. Theo (14)-(16), (22) mạch vòng dòng điện được thiết kế như (24)

$$\begin{cases} y_i = i_{gd}; \\ u_i = m_{vd} \\ b_{0,i} = -\frac{V_{dcref}}{L} \\ f_{d,i} = -\frac{R}{L} i_{gd} - \frac{1}{L} v_d + \omega_i g_q \end{cases} \quad (24)$$

Mạch vòng điện áp DC dựa trên LADRC: Mạch vòng điện áp là vòng điều khiển bên ngoài của bộ điều khiển chính để điều khiển có phản hồi điện áp theo điện áp đặt. Dựa vào hình 3, mạch liên kết AC và DC của MMC là P_{ac} và P_{dc} được biểu diễn như (25).

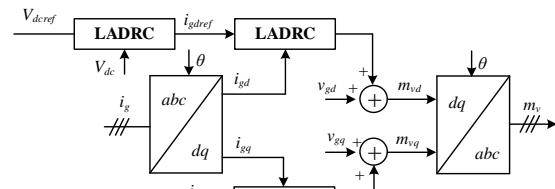
$$\begin{cases} P_{ac} = \frac{3}{2} Re\{u_i i^*\} = \frac{3}{2} (v_{gd} i_{gd} + v_{gq} i_{gq}) = \frac{3}{2} V_1 i_{gd} \\ P_{dc} = V_{dc} i_{dc} = V_{dc} \left(I_{dc} - C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} \right) \end{cases} \quad (25)$$

Trong đó V_1 là cường độ cơ bản của điện áp lưới; và C_{dc} là tụ điện MMC phía DC. Để thiết kế mạch vòng điện áp DC

dựa trên LADRC, mối quan hệ giữa V_{dc} và i_{gdref} cần được xác định. Do đó, giả định tổn thất điện năng của MMC có thể được bỏ qua, tức là $P_{ac} = P_{dc}$; điện áp liên kết DC và dòng điện nối lưới có thể được kiểm soát tốt, tức là $V_{dc} = V_{dcref}$ và $i_{gd} = i_{gdref}$. Theo (25) thu được mối quan hệ như (26)

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = -\frac{3V_1}{2C_{dc}V_{dcref}} i_{gdref} + \frac{I_{dc}}{C_{dc}} \quad (26)$$

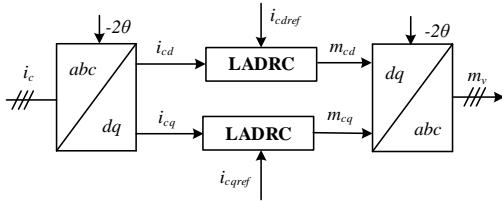
Từ (14)-(16) và (26), mạch vòng điện áp được thiết kế như hình 10.



Hình 10. Mạch vòng điều khiển dòng điện và điện áp.

$$\begin{cases} y_v = v_{dc} \\ u_v = i_{gdref} \\ b_{0,v} = -\frac{3V_1}{2C_{dc}V_{dcref}} \\ f_{d,v} = \frac{I_{dc}}{C_{dc}} \end{cases} \quad (27)$$

Mạch vòng điều khiển dòng điện vòng: Quá trình nạp xả trong các tụ điện ở nhánh trên và nhánh dưới của MMC sẽ gây ra sự mất cân bằng điện áp của các nhánh và các tụ điện với nhau. Quá trình này sẽ tạo nên dòng điện móc vòng giữa nhánh trên và nhánh dưới mỗi pha và được gọi dòng điện vòng. Dòng điện này làm biến dạng dòng điện nhánh, làm tăng giá trị đỉnh của dòng điện nhánh và tăng tổn thất điện năng của hệ thống [6]. Từ đó ta thiết kế điều khiển LADRC để giới hạn được dòng điện vòng như hình 11.



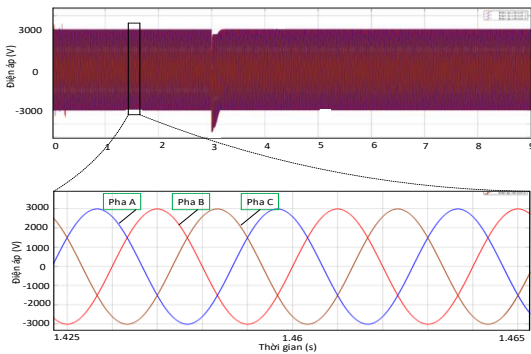
Hình 11. Mạch vòng triệt tiêu dòng điện tuần hoàn (CCSC).

4. Kết quả mô phỏng

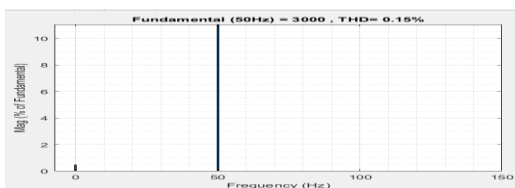
Để kiểm chứng hoạt động của hệ thống theo thuật toán đề xuất. Mô hình trong hình 3 được mô phỏng trên phần mềm matlab/simulink. Thông số mô phỏng của hệ thống được thể hiện như trong bảng 1. Kích bản mô phỏng của LADRC là nối lưới với tỷ lệ ngắn mạch SCR (short-circuit ratio) thấp từ lúc bắt đầu SCR=33, sau 3s thay đổi SCR=1,5.

Bảng 1: Thông số mô phỏng

Ký hiệu	Giá trị	Ký hiệu	Giá trị
N	6	L_f (H)	0,01
f_0 (Hz)	50	L_g (H)	0,0106; 0,212
P (kW)	500	$b_{a,c}$	$-1,3 \cdot 10^9$
V_{dc} (V)	6000	$b_{o,i}$	$4,56 \cdot 10^{-6}$
I_{dc} (A)	83,3	$b_{o,v}$	-1,08
V_1 (V)	3000	$b_{o,pll}$	-3000
C_{sm} (F)	1,39	$k_{p,i}; k_{i,i}$	3; 45
R_o (Ω)	0,1	$k_{p,v}; k_{i,v}$	83333; $3,125e6$
L_o (H)	$4,56 \cdot 10^{-6}$	$k_{p,pq}; k_{i,pq}$	$8,33 \cdot 10^{-4}$; 0,25
R_f (Ω)	0,1	$k_{p,pll}; k_{i,pll}$	0,1; 0,5



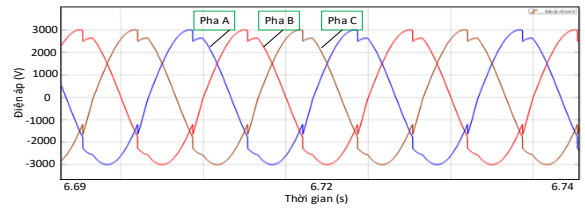
Hình 12. Hình dạng điện áp nối lưới khi SCR=33.



Hình 13. THD của điện áp nối lưới khi SCR=33.

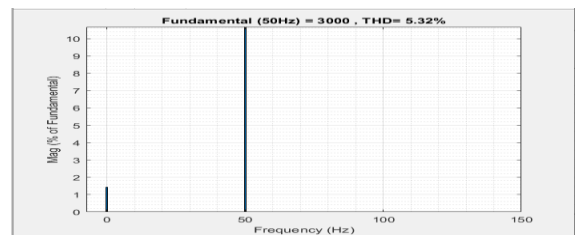
Hình 12 là kết quả điện áp nối lưới, khi SCR của lưới là 33 (từ 0 đến 3 giây), ta thấy hình dạng điện áp có dạng hình sin

chuẩn và đạt giá trị 3000V theo đúng lý thuyết và chất lượng điện áp tốt với THD=0,15% thể hiện trên hình 13.

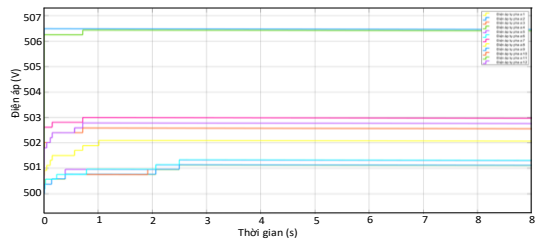


Hình 14. Hình dạng điện áp nối lưới khi SCR=1,5.

Khi SCR của lưới là 1,5 (từ 3 giây trở đi), cho thấy điện áp không còn hình sin như hình 14 và chất lượng điện áp đã giảm với THD=5,32% như hình 15. Từ dạng điện áp tụ trên hình 16 đại diện cho các SM của Pha A, cho thấy sự chênh lệch các tụ điện là 7V, giá trị cao nhất gần 507V, giá trị thấp nhất là 500V. Đạt yêu cầu của sự chênh lệch là dưới 10%.

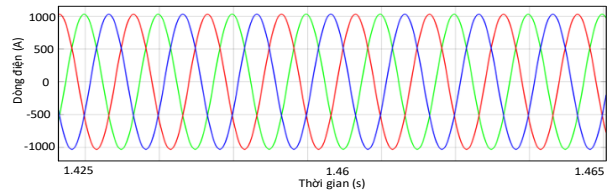


Hình 15. THD của điện áp nối lưới khi SCR=1,5.

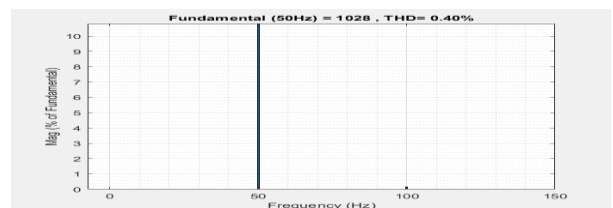


Hình 16. Điện áp tụ của pha A.

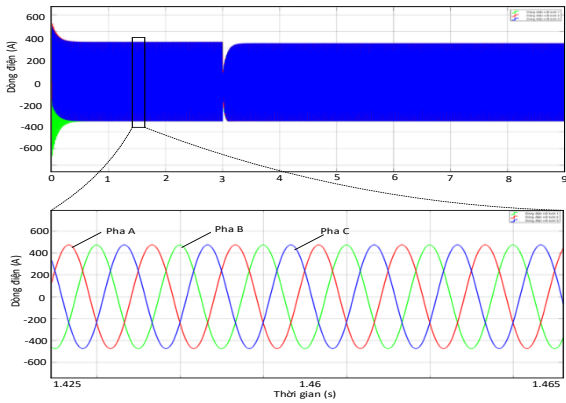
Trên hình 17 và hình 18 là kết quả dòng điện xoay chiều AC, ta thấy bộ điều khiển PI điều khiển tốt ở SCR=33 với THD = 0,4% như hình 17, Quá trình đầu vẫn có sự quá độ lớn. Trên hình 18 bộ điều khiển LADRC điều khiển tốt ở SCR=33 với THD=0,16% như hình 20, kết quả này cho thấy bộ điều khiển LADRC cho điện áp hình sin và chất lượng dòng điện nối lưới tốt.



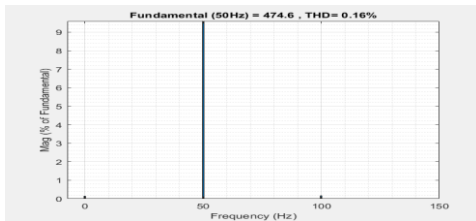
Hình 17. Hình dạng dòng điện với bộ điều khiển PI ở SCR=33.



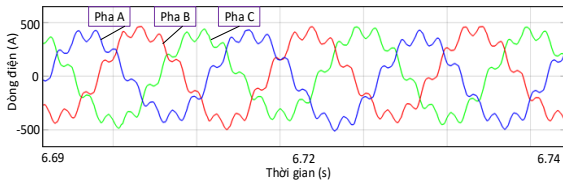
Hình 18. THD của dòng điện nối lưới với bộ điều khiển PI ở SCR=33.



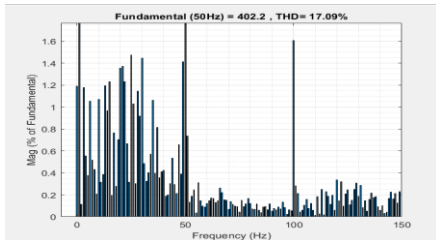
Hình 19. Hình dạng dòng điện với bộ điều khiển LADRC ở SCR=33.



Hình 20. THD của dòng điện với bộ điều khiển LADRC ở SCR=33.

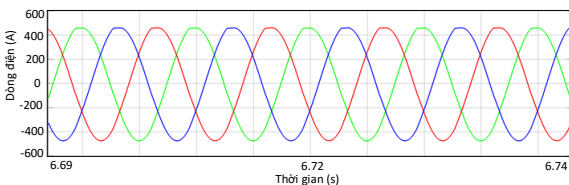


Hình 21. Hình dạng dòng điện với bộ điều khiển PI ở SCR=1,5.

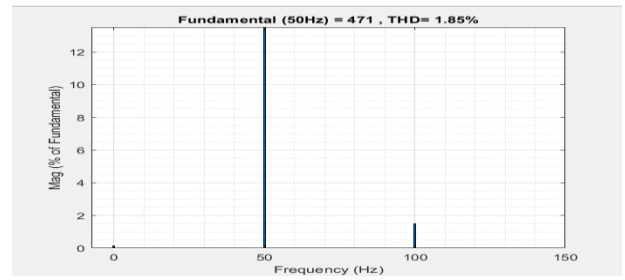


Hình 22. THD của dòng điện nối lưới với bộ điều khiển PI ở SCR=1,5.

Từ 3s trở đi SCR=1,5, với bộ điều khiển PI thì dòng điện trong hình 21 không còn là hình sin và chất lượng dòng điện giảm khi THD=17,09% như hình 22, hệ thống không ổn định và xuất hiện nhiễu. Hình 23 là đáp ứng của bộ điều khiển LADRC khi SCR=1,5 cho thấy dòng điện có dạng sin và chất lượng dòng điện tốt khi THD=1,85% như hình 24, điều này cho thấy hệ thống ổn định với dạng sin chuẩn.

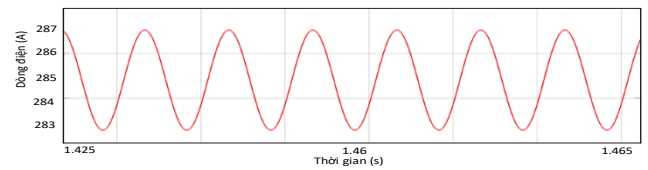


Hình 23. Hình dạng dòng điện với bộ điều khiển LADRC ở SCR=1,5.



Hình 24. Hình dạng dòng điện với bộ điều khiển LADRC ở SCR=1,5.

Từ các kết quả trên có thể thấy rằng bộ điều khiển LADRC có thời gian đáp ứng nhanh và độ quá điều chỉnh nhỏ. Bộ điều khiển LADRC có thể truy xuất và loại bỏ nhiễu nên hệ thống ổn định khi SCR thấp và chất lượng điện áp, dòng điện tốt. Trong hình 24 hình dạng điện áp khi SCR=1,5 không còn hình sin cần phải có bộ lọc hoặc hiệu chỉnh thông số điều khiển.



Hình 25. Dòng điện vòng trong của pha A.

Hình 25 là kết quả của dòng điện vòng đã được giới hạn với độ dao động là 207A, và hình dạng dòng điện có dạng hình sin giá trị này tương ứng 41% giá trị dòng điện đầu ra. Tuy dòng điện vòng đã có hình sin nhưng chỉ số dòng điện còn cao, nên cần tăng giá trị R₀. Khi đó giá trị dòng điện vòng sẽ giảm và sự chênh lệch điện áp trong mỗi tụ sẽ giảm.

5. Kết luận

Dựa trên nguyên tắc làm việc của MMC với phương pháp điều chế NLM, bài báo đã đề xuất mô hình BBĐ MMC kết nối với lưới điện dựa trên thuật toán điều khiển LADRC sử dụng cho các mạch vòng điều khiển điện áp, dòng điện, triệt tiêu dòng điện vòng. Từ các kết quả dựa trên việc mô phỏng cho thấy rằng: LADRC có khả năng truy tìm nguyên nhân gây ra nhiễu và chống nhiễu rất tốt. Thời gian đáp ứng của hệ thống được cải thiện bằng cách áp dụng LADRC, giúp tăng cường sự ổn định của hệ thống. Bộ điều khiển LADRC hoạt động tốt trong điều kiện lưới điện yếu và có nhiễu. LADRC có thể truy xuất đến các yếu tố gây nhiễu và loại bỏ trong khi PI chưa làm được. So với bộ điều khiển PI, MMC dựa trên LADRC có thời gian quá độ và thời gian đáp ứng tốt hơn. Các kết quả đã chứng minh rằng có thể đề xuất một ý tưởng cho việc tăng cường sự ổn định tạm thời của hệ thống nối các nguồn điện phân tán với lưới điện.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Bách Khoa Hà Nội trong đề tài mã số T2023-PC-025.

References

- [1] T. M. Hùng, "Nghiên cứu các phương pháp điều chế và điều khiển bộ biến đổi bán dẫn công suất đa mức kiểu module hóa," Trường đại học Bách Khoa Hà Nội, 2020.
- [2] Y. J. Z.Gao, "An alternative paradigm for control system design," *Proceedings of 40th IEEE Conference on Decision and control*, pp. 4578-4585, 2001.
- [3] L. G. W. Z. T. W. Y. G. v. C. S. Chao Chen, "A Novel Damping Control of Grid-Connected Converter Based on Optimal Split-Inductor Concept," *MDPI*, 2022.
- [4] T. V. K. Phạm Văn Tuynh, "BÀN VỀ PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TÍCH CỰC LOẠI BỎ NHIỀU (ADRC)," *TẠP CHÍ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ ĐẠI HỌC ĐÁ NẮNG*, no. 7, 2015.
- [5] G. Herbst, "A Simulative Study on Active Disturbance Rejection Control(ADRC) as a Control Tool for Practitioners," *Electronics*, vol. 2, no. 3, pp. 246-279, 08.2013.
- [6] H. R. I. A. R. A. a. A. B. Fazal Muhammad, "Design and Control of Modular Multilevel Converter for Voltage Sag Mitigation," *Electronics*, vol. 15, p. 1681, 02.2022.
- [7] G. Herbst, "A minimum-footprint implementation of discrete-time ADRC," *Proceedings of 2021 European Control Conference (ECC) Delft, Netherlands*, pp. 107-112, Jun. 2021.
- [8] Hailiang Xu, Mingkun Gao, and Jiabing Hu, "Linear Active Disturbance Rejection Control and Stability Analysis for Modular Multilevel Converters Under Weak Grid," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 68, no. 12, pp. 1272-1284, 11.2022.
- [9] F. J. R. Miguel Moranchel, "A comparison of Modulation techniques for Modular Multilevel Converters," *MDPI*, Dec. 2016.
- [10] H. Xu, M. Gao, P. Ge and J. Hu, "Linear Active Disturbance Rejection Control and Stability Analysis for Modular Multilevel Converters Under Weak Grid," *IEEE Transactions on Power Electronic*, vol. 11, no. 6, pp. 2028 - 2042, 11.2023.
- [11] K.-Y. C. a. R.-Y. K. M. Saleem, "Resonance damping for an LCL filter type grid-connected inverter with active disturbance rejection control under grid impedance uncertainty," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, no. 109, pp. 444-454, 07.2019.
- [12] N. X. Việt, "Nghiên cứu ứng dụng bộ nghịch lưu đa mức cấu trúc module cho các ứng dụng với lưới điện," Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, 2017.
- [13] T. H. C. Phạm Việt Phương, "Áp dụng phương pháp điều chế NLM (Nearest - Level - Modulation) cho bộ biến đổi đa mức cấu trúc Module MMC," in *Chuyên san kỹ thuật điều khiển & tự động hóa số 4 năm 2017*.