

ỔN ĐỊNH CÔNG SUẤT TỨC THỜI VI LƯỚI SỬ DỤNG BÁNH ĐÀ LƯU TRỮ NĂNG LƯỢNG VỚI THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN BACKSTEPPING

INSTANTANEOUS POWER STABILIZATION OF MICROGRID USING FLYWHEEL ENERGY STORAGE WITH BACKSTEPPING CONTROL ALGORITHM

Lại Thị Thanh Hoa*, Đỗ Trung Hải, Lại Khắc Lãi

Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên

*Email: laithithanhhoa@tnut.edu.vn

TÓM TẮT

Hệ thống lưu trữ năng lượng bánh đà tích hợp máy điện cảm ứng (IM-FESS) là một hệ thống cơ, điện, điện tử lưu trữ năng lượng dưới dạng động năng. Quá trình trao đổi năng lượng giữa IM-FESS và lưới điện được thực hiện thông qua hai bộ chuyển đổi điện tử công suất mắc theo cấu trúc back-to-back. Bài báo trình bày kết quả phân tích thiết kế chiến lược điều khiển phi tuyến Backstepping nhằm điều khiển hoạt động của IM-FESS góp phần ổn định công suất tức thời vi lưới. Chiến lược Backstepping được áp dụng cho cả bộ điều khiển phía lưới (GSC) và bộ điều khiển phía máy (MSC) bằng cách phân rã hệ thống thành các lớp con, sau đó lựa chọn tín hiệu điều khiển cho từng lớp, đảm bảo thỏa mãn ổn định Lyapunov. Hiệu quả của thuật toán được kiểm chứng thông qua mô phỏng trên phần mềm Matlab – Simulink, cho thấy khả năng cải thiện đáng kể hiệu năng điều khiển.

Từ khóa: IM-FESS; Backstepping; Vi lưới; Công suất tức thời.

ABSTRACT

The Induction Machine-Based Flywheel Energy Storage System (IM-FESS) is a mechanical, electrical, and electronic system that stores energy in the form of kinetic energy. The energy exchange process between the IM-FESS and the power grid is carried out through two power electronic converters connected in a back-to-back configuration. This paper presents the analysis and design results of a nonlinear Backstepping control strategy to regulate the operation of the IM-FESS, contributing to the stabilization of the instantaneous power of the microgrid. The Backstepping strategy is applied to both the Grid-Side Converter (GSC) and the Machine-Side Converter (MSC) by decomposing the system into sub-layers and then selecting control signals for each layer while ensuring Lyapunov stability. The effectiveness of the proposed algorithm is validated through simulations in Matlab – Simulink, demonstrating significant improvements in control performance.

Keywords: IM-FESS; Backstepping; Microgrid; Instantaneous power.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, việc tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo như điện gió và điện mặt trời vào lưới điện đã gia tăng đáng kể [1]. Tuy nhiên, do tính chất dao động và không liên tục của các nguồn năng lượng này, lưới điện dễ bị ảnh hưởng bởi các biến động công suất tức thời, ảnh hưởng đến chất lượng điện năng và độ tin cậy của hệ thống [1-2].

Hệ thống lưu trữ năng lượng bánh đà tích hợp máy điện cảm ứng (IM-FESS) là một hệ thống lưu trữ năng lượng điện dưới dạng cơ học, một trong những công nghệ tiềm năng giúp cân bằng công suất tức thời trong lưới điện. Nhờ vào đặc tính phản ứng nhanh và khả năng vận hành bền bỉ, IM-FESS đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì ổn định công suất tức thời và hỗ trợ điều chỉnh tần số lưới điện [3].

Mặc dù IM-FESS có nhiều ưu điểm, nhưng việc điều khiển hệ thống này không hề đơn giản do tính phi tuyến cao của máy điện, ảnh hưởng của các bất định và sự thay đổi tham số hệ thống. Sự tương tác giữa IM-FESS và lưới điện, đòi hỏi hệ thống phải có khả năng phản ứng nhanh và chính xác để duy trì công suất ổn định. Vì vậy, cần có một chiến lược điều khiển tiên tiến để đảm bảo hiệu suất và độ tin cậy của hệ thống IM-FESS.

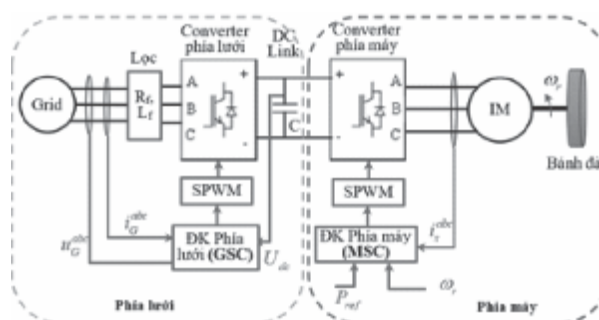
Phương pháp điều khiển Backstepping là một kỹ thuật điều khiển phi tuyến dựa trên lý thuyết Lyapunov [4], bằng cách “phân rã” hệ thống điều khiển thành nhiều lớp và thiết kế từng lớp để đảm bảo hệ thống đạt trạng thái mong muốn một cách ổn định.

Mục tiêu của nghiên cứu này là thiết kế và đánh giá bộ điều khiển Backstepping cho hệ

thống IM-FESS nhằm ổn định công suất tức thời trong lưới điện. Những đóng góp chính của bài báo bao gồm là xây dựng mô hình toán học chi tiết của hệ thống IM-FESS; Thiết kế bộ điều khiển Backstepping cho bộ điều khiển phía lưới (GSC) và điều khiển phía máy (MSC).

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

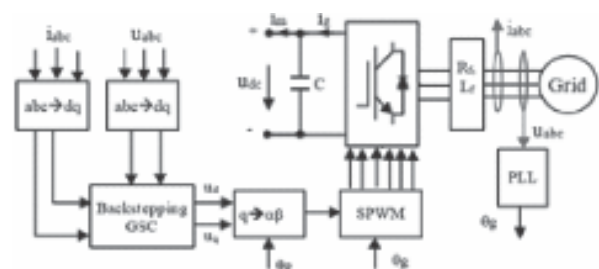
2.1. Cấu trúc hệ thống IM-FESS nối lưới



Hình 1. Cấu trúc hệ thống IM-FESS nối lưới

Cấu trúc của hệ thống IM-FESS được biểu diễn trên Hình 1. IM-FESS được kết nối với lưới điện thông qua máy biến áp (BA), bánh đà có tích hợp máy điện cảm ứng (IM), hai bộ chuyển đổi điện tử công suất, là bộ chuyển đổi phía phía lưới (GSC) và bộ chuyển đổi phía máy (MSC) liên kết nhau theo kiểu “back to back” thông qua DC-link với tụ điện C.

2.2. Thiết kế điều khiển Backstepping cho IM-FESS nối lưới



Hình 2. Sơ đồ khối điều khiển phía lưới

Bộ biến đổi phía lưới (GSC) có nhiệm vụ điều khiển công suất trao đổi giữa hệ thống lưu trữ và lưới điện. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển bộ chuyển đổi phía lưới theo phương pháp Backstepping như Hình 2. Trục d của hệ trục dq chọn trùng với vectơ điện áp lưới ($u_d = |u|$, $u_q = 0$). Do đó, thành phần dòng điện (i_d) đại diện cho công suất tác dụng tức thời và thành phần dòng điện (i_q) đại diện cho công suất phản kháng tức thời.

Bộ điều khiển phía lưới được chia thành ba lớp: Lớp ngoài chịu trách nhiệm xác định sự trao đổi công suất tác dụng và phản kháng giữa lưới và IM-FESS; lớp trung gian duy trì đầu ra dự kiến bám các giá trị tham chiếu được thiết lập bởi cấp ngoài; lớp trong có nhiệm vụ tạo tín hiệu chuyển mạch SPWM cho bộ chuyển đổi VSI phía lưới (cấp trong không được mô tả chi tiết trong luận án này).

Giả thiết hệ thống điện ba pha đối xứng, mô hình toán của bộ điều khiển phía lưới được trong hệ tọa độ dq với $u_{gd} = U_g$ và $u_{gq} = 0$ [4] là:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_f} (-R_f i_d + \omega_s L_f i_q + u_d - U_g) \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_f} (-R_f i_q - \omega_s L_f i_d + u_q) \quad (2)$$

$$\frac{dU_{\hat{x}}}{dt} = \frac{3}{2C} \frac{(i_d u_d + i_q u_q)}{U_{\hat{x}}} - i_m \quad (3)$$

Cần xác định các luật điều khiển sao cho các biến trạng thái bám theo giá trị tham chiếu $i_{d,ref}$, $i_{q,ref}$, $U_{dc,ref}$.

a) Luật điều khiển dòng điện i_d

Từ (1) đặt sai số theo tín hiệu tham chiếu là: $e_d = i_d - i_{d,ref}$

Chọn hàm Lyapunov: $V_i = \frac{1}{2} e_d^2$.

Đạo hàm hàm Lyapunov, ta có:

$$\dot{V}_1 = e_d \dot{e}_d = e_d \left[\frac{1}{L_f} (-R_f i_d + \omega_s L_f i_q + u_d - U_g) - \dot{i}_{d,ref} \right] \quad (4)$$

Chọn luật điều khiển:

$$u_d = U_g + R_f i_d - \omega_s L_f i_q + L_f \dot{i}_{d,ref} - k_1 e_d \quad (5)$$

Với $k_1 > 0$. Thay (5) vào (4), ta có:

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_d^2 \leq 0$$

→ Vậy hệ thống con ổn định theo Lyapunov.

b) Luật điều khiển dòng điện i_q

Từ (2) đặt sai số theo tín hiệu tham chiếu là: $e_q = i_q - i_{q,ref}$

Chọn hàm Lyapunov mở rộng:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_q^2$$

Đạo hàm hàm Lyapunov V_2 :

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_d^2 + e_q \left[\frac{1}{L_f} (-R_f i_q - \omega_s L_f i_d + u_q) - \dot{i}_{q,ref} \right] \quad (6)$$

Chọn luật điều khiển:

$$u_q = R_f i_q + \omega_s L_f i_d + L_f \dot{i}_{q,ref} - k_2 e_q \quad (7)$$

Với $k_2 > 0$. Thay (7) vào (6), ta có:

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_d^2 - k_2 e_q^2 \leq 0$$

→ Vậy hệ thống mở rộng ổn định theo Lyapunov. 

c) Luật điều khiển điện áp DC-link (U_{dc})

Từ (3) đặt sai số theo tín hiệu tham chiếu là: $e_{dc} = U_{dc} - U_{dc,ref}$

Chọn hàm Lyapunov mở rộng:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} e_{dc}^2$$

Đạo hàm V_3 , ta có:

$$\dot{V}_3 = -k_1 e_d^2 - k_2 e_q^2 + e_{dc} \left[\frac{3}{2C} \left(\frac{i_d u_d + i_q u_q}{U_{dc}} - i_m \right) - \dot{U}_{dc,ref} \right] \quad (8)$$

Chọn luật điều khiển:

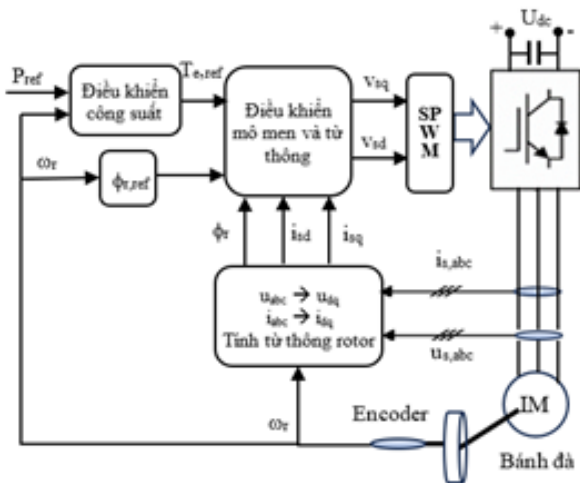
$$i_m = \frac{3}{2C} \left(\frac{i_d u_d + i_q u_q}{U_{dc}} \right) - \dot{U}_{dc}^* - k_3 e_{dc} \quad (9)$$

Với $k_3 > 0$. Thay (9) vào (8), ta có:

$$\dot{V}_3 = -k_1 e_d^2 - k_2 e_q^2 - k_3 e_{dc}^2 \leq 0$$

→ Vậy hệ thống ổn định toàn cục theo Lyapunov.

2.3. Thiết kế điều khiển Backstepping bộ chuyển đổi phía máy (MSC)



Hình 3. Sơ đồ khối điều khiển phía máy

Bộ điều khiển phía máy của IM-FESS (Hình 3) có nhiệm vụ điều khiển quá trình phóng/nạp năng lượng thông qua mô men điện từ để duy trì công suất trao đổi mong muốn. Phân tích bài toán thành ba lớp: Lớp điều khiển công suất, lớp điều khiển mô men và lớp điều khiển từ thông. Chọn trục d trùng với trục rotor thì từ thông rotor chỉ có thành phần d ($\phi_{rd} = \phi_r$, $\phi_{rq} = 0$).

a) Luật điều khiển công suất

Phương trình công suất của (IM-)FESS được tính:

$$\dot{P} = \frac{T_e - T_L}{J} T_e + \omega_r \dot{T}_e$$

Với: J là mô men quán tính bánh đà, T_e là mô men điện từ, T_L là mô men tải, ω_r là tốc độ quay của bánh đà.

Đặt sai số công suất: $e_p = P - P_{ref}$ và chọn

hàm Lyapunov: $V_1 = \frac{1}{2} e_p^2$

Đạo hàm V_1 theo thời gian:

$$\dot{V}_1 = e_p \dot{e}_p = e_p \left(\frac{1}{J} (T_e - T_L) + \omega_r \dot{T}_e \right) \quad (10)$$

Chọn luật điều khiển:

$$T_{e,ref} = \frac{J}{T_e} (-k_1 e_p - \omega_r \dot{T}_{e,ref}) + T_L \quad (11)$$

Với $k_1 > 0$. Thay (11) vào (10), ta thu được:

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_p^2 \leq 0. \text{ Vậy hệ con ổn định Lyapunov.}$$

b) Thiết kế điều khiển mô men

Phương trình mô men điện từ của máy điện cảm ứng:

$$T_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} \phi_r i_{sq} \quad (12)$$

Đạo hàm mô men theo thời gian, ta được:

$$\dot{T}_e = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\dot{\phi}_r i_{sq} + \phi_r \dot{i}_{sq})$$

Đặt sai số mô men: $e_T = T_e - T_{e, \text{ref}}$

Chọn hàm Lyapunov:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_T^2$$

Đạo hàm V_2 theo thời gian:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_T \dot{e}_T = \dot{V}_1 + e_T \left(\frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (\dot{\phi}_r i_{sq} + \phi_r \dot{i}_{sq}) \right)$$

Chọn luật điều khiển:

$$v_{sq} = R_r i_{sq} + L_r \left(\frac{\dot{T}_e^*}{\frac{3}{2} p L_m / L_r} - \dot{\phi}_r i_{sq} \right) - k_2 (T_e - T_e^*) \quad (13)$$

Với $k_2 > 0$. Thay (13) vào (12), ta thu được:

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_p^2 - k_2 e_T^2 \leq 0. \text{ Vậy hệ con ổn định Lyapunov.}$$

c) Thiết kế điều khiển từ thông

Phương trình điện áp mạch rotor IM:

$$\frac{d\phi_r}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} \phi_r + \frac{L_m}{L_r} v_{sd} \quad (14)$$

Đặt sai số từ thông: $e_\phi = \phi_r - \phi_{r, \text{ref}}$ chọn hàm Lyapunov:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} e_\phi^2$$

Đạo hàm V_3 theo thời gian, ta được:

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + e_\phi \dot{e}_\phi = \dot{V}_2 + e_\phi \left(-\frac{R_r}{L_r} \phi_r + \frac{L_m}{L_r} v_{sd} \right)$$

Chọn luật điều khiển:

$$v_{sd} = \frac{L_r}{L_m} \left(\frac{R_r}{L_r} \phi_r + \dot{\phi}_r^* - k_3 (\phi_r - \phi_r^*) \right) \quad (15)$$

Với $k_3 > 0$. Thay (15) vào (14), ta thu được:

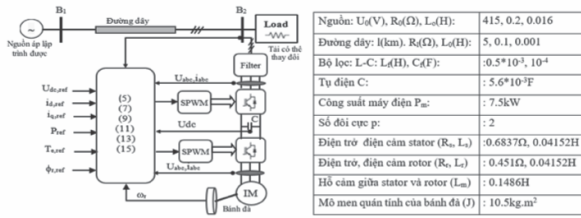
$$\dot{V}_3 = -k_2 e_T^2 - k_3 e_\phi^2 \leq 0. \text{ Vậy hệ con ổn định Lyapunov.}$$

Cuối cùng, ta thu được các luật điều khiển phi tuyến cho IM-FESS nối lưới bao gồm (5), (7), (9), (11), (13) và (15).

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ BÌNH LUẬN

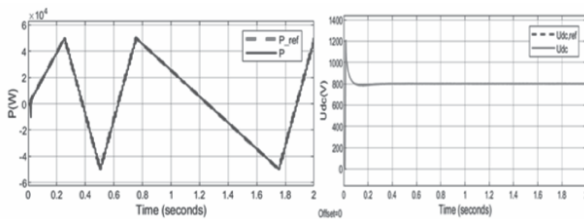
Sơ đồ và số liệu mô phỏng chỉ ra trên Hình 4, bao gồm: Nguồn phát 415V (có thể lập trình); tải 3 pha cũng có thể thay đổi được; đường dây có chiều dài 5 km (đường dây có thông số tập trung); 2 thanh cái xoay chiều B_1 và B_2 ; tải và thiết bị IM-FESS nối lưới được nối tại thanh cái B_2 .





Hình 4. Sơ đồ khối mô phỏng và thông số mô phỏng

Việc kiểm tra khả năng cung cấp/hấp thụ công suất tức thời của IM-FESS được thực hiện bằng cách đặt tham chiếu P_{ref} thay đổi tùy ý có phần dương và phần âm. Khi $p_{ref} > 0$, thiết bị sẽ nhận năng lượng từ lưới điện và lưu trữ trong bánh đà. Khi $p_{ref} < 0$, năng lượng lưu trữ được đưa ra cung cấp cho tải. Kết quả mô phỏng trong Hình 5a cho thấy công suất đầu ra của thiết bị luôn bám sát công suất tham chiếu, thiết bị đề xuất đáp ứng tốt với yêu cầu lưu trữ và cung cấp năng lượng tác dụng. Hình 5b cho thấy điện áp một chiều trên DC-Link luôn được duy trì không đổi trong suốt quá trình nạp/xả năng lượng của IM-FESS.



Hình 5. a) Công suất thực và công suất tham chiếu; b) Điện áp DC-Link

4. KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Bài báo trình bày kết quả phân tích thiết kế chiến lược điều khiển phi tuyến Backstepping bộ điều khiển phía lưới và bộ điều khiển phía máy của IM-FESS. So với các phương pháp điều khiển PID truyền thống, phương pháp Backstepping có khả năng xử lý tốt các hệ thống phi tuyến, đảm bảo tính ổn định toàn cục. Kết quả nghiên cứu sẽ giúp cải

thiện hiệu quả điều khiển hệ thống IM-FESS, góp phần nâng cao độ tin cậy và tính ổn định của lưới điện trong điều kiện có năng lượng tái tạo. Nội dung cần tiếp tục nghiên cứu là xây dựng mô hình thực nghiệm để khẳng định tính khả thi và ưu việt của thuật toán đề xuất.

Lời cảm ơn:

Tác giả xin gửi lời cảm ơn tới Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên đã hỗ trợ kinh phí để thực hiện nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: **12/3/2025**

Ngày phản biện: **02/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Pratikshya Tiwari, Abishek Kafle, Pawan Bijukchhe, Aasma Bhattarai, "A review on Energy Storage Systems". Journal of Physics: Conference Series 2629 (2023) 012024.
- [2]. Anton Stepanov, Hani Saad, Jean Mahseredjian, "Modeling of MMC-based STATCOM with embedded energy storage for the simulation of electromagnetic transients". Electric Power Systems Research, 220 (2023) 109316, pp.1-8.
- [3]. L.K.Lai, Roan Van Hoa, "Flywheel Energy Storage in Electrical System Integrates Renewable Energy Sources". SSRG - IJEE – Volume 3, Issue 5 (2020), pp.1-7.
- [4]. Luay T. Rasheed a, Mohammed K. Hamzah, "Design of an Optimal Backstepping Controller for Nonlinear System under Disturbance". Engineering and Technology Journal, Vol. 39, Part A (2021), No. 03, Pages 465-476.