

# ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO HỆ THỐNG LƯU TRỮ NĂNG LƯỢNG BÁNH ĐÀ TRONG VI LƯỚI

## FLYWHEEL ENERGY STORAGE SYSTEM PREDICTIVE CONTROL IN MICROGRID

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

*Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - Đại học Thái Nguyên, Việt Nam<sup>1</sup>*

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: laithithanhhoa@tnut.edu.vn

(Nhận bài / Received: 15/7/2023; Sửa bài / Revised: 18/8/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 31/8/2023)

**Tóm tắt** - Hệ lưu trữ năng lượng bánh đà (FESS) là một công nghệ lưu trữ mới và có nhiều ưu điểm so với các phương pháp lưu trữ năng lượng truyền thống. Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất thuật toán điều khiển dự báo theo mô hình (MPC) cho hệ thống lưu trữ năng lượng bánh đà lắp trên thanh cái một chiều của vi lưới có các nguồn năng lượng tái tạo (điện gió, điện mặt trời). Những biến động bất thường của nguồn năng lượng tái tạo sẽ được FESS cân bằng (thông qua việc tích hoặc phóng năng lượng), do đó duy trì một công suất không đổi cho vi lưới. Kết quả mô hình hóa và mô phỏng trên phần mềm Matlab - Simulink/Simcape ứng với các kịch bản biến động khác nhau của nguồn phát, công suất bơm vào vi lưới luôn luôn được duy trì ổn định, chứng tỏ FESS có khả năng khắc phục sự biến động năng lượng của điện mặt trời và cung cấp một năng lượng ít biến động cho lưới.

**Từ khóa** - Hệ lưu trữ năng lượng bánh đà (FESS); điện mặt trời; điện gió; vi lưới; thuật toán điều khiển dự báo theo mô hình (MPC)

### 1. Giới thiệu

Ngày nay, hệ thống điện đang phát triển nhanh chóng và cần nhiều tổ máy phát điện và đường dây truyền tải hơn. Thực tế này làm tăng tính phức tạp của công tác điều khiển và quản lý hệ thống điện. Mặt khác, sự gia tăng các loại nhu cầu điện mới dẫn đến các vấn đề khác nhau như các vấn đề về chất lượng điện đối với các nhà vận hành hệ thống [1]. Ngoài ra, với việc mở rộng hệ thống điện, việc bảo vệ các hệ thống này sẽ phức tạp hơn.

Sự gia tăng tiêu thụ năng lượng, những tiến bộ trong công nghệ phát điện và qui định về bảo vệ môi trường dẫn đến việc gia tăng sự thâm nhập của các dạng năng lượng tái tạo như các hệ thống năng lượng mặt trời và gió, các hệ thống năng lượng điện quy mô nhỏ mới như pin nhiên liệu,... Những loại tải nguyên năng lượng này, thường được phân tán trong mạng, được gọi là hệ phân tán (DG) [2]. Đặc điểm chung của các nguồn phân tán công suất nhỏ và tính chất biến ngẫu nhiên làm phát sinh nhiều vấn đề như chất lượng điện năng hoặc mất cân bằng giữa cung và cầu có thể xảy ra trong Microgrids (MG) [3], [4]. Giải pháp chung để khắc phục những nhược điểm này của DG là sử dụng hệ thống lưu trữ năng lượng (ESS). ESS có thể cung cấp hoặc lưu trữ năng lượng trong các hệ thống điện và MG khi cần thiết. ESS có thể được sử dụng trong các thiết bị Hệ thống điều khiển truyền tải điện xoay chiều linh hoạt (FACTS) [5]-[7] để tăng giới hạn truyền của đường truyền hoặc cải thiện chất lượng điện năng trong MG và hệ thống điện [8]. ESS lớn có thể cung cấp năng lượng điện trong vài giờ trong hệ thống điện. Hơn nữa, ESS có thể giải phóng năng

**Abstract** - Flywheel Energy Storage System (FESS) is a new storage technology and has many advantages over traditional energy storage methods. In this paper, we propose a Model Predictive Control algorithm (MPC) for a flywheel energy storage system mounted on a DC busbar of a microgrid with renewable energy sources (wind power, solar power). The unusual fluctuations of the renewable energy source will be balanced by FESS (through energy storage or energy discharge), thus maintaining a constant capacity for the microgrid. The results of modeling and simulation on Matlab - Simulink/Simcape software correspond to different fluctuations of the source, the pumped power into the microgrid is always maintained stably, proving that FESS has the ability to overcome the energy fluctuations of solar power and provide low volatility energy to the grid.

**Key words** - Flywheel Energy Storage System (FESS); solar power; Wind power; microgrids; Model Predictive Control algorithm (MPC)

lượng rất lớn trong vài giây cho các ứng dụng dùng trong quân sự [9], [10].

Hệ thống lưu trữ năng lượng bánh đà (FESS), là một trong những ESS phổ biến, là một ESS phản ứng nhanh và là một trong những công nghệ được thương mại hóa sớm để giải quyết nhiều vấn đề trong MG và hệ thống điện [12]. Công nghệ này, với tư cách là một nguồn năng lượng sạch, đã được áp dụng trong các ứng dụng khác nhau nhờ các đặc tính đặc biệt của nó như mật độ năng lượng cao, không yêu cầu bảo trì định kỳ, không gây ô nhiễm, tuổi thọ cao, hiệu suất chu kỳ cao (khoảng 85%)... [9]. Mặc dù, hệ thống lưu trữ năng lượng này có chi phí vốn tương đối cao (5000 \$/kWh), nhưng nó có chi phí vận hành và bảo trì hàng năm thấp (19 \$/kW-năm) [9].

Hệ thống lưu trữ năng lượng bánh đà có nhiều ưu điểm so với các công nghệ lưu trữ năng lượng truyền thống (pin, acquy,...) như mật độ lưu trữ năng lượng lớn, có thể lưu trữ năng lượng không giới hạn, vòng đời cao, chi phí vận hành thấp. FESS có một số đặc điểm khiến nó trở thành một hệ thống lưu trữ đáng mơ ước trong số các hệ thống lưu trữ khác. FESS hoàn toàn thân thiện với môi trường và không gây ô nhiễm. Nó có thể sạc/xả trong nhiều chu kỳ mà không bị khấu hao, do đó có tuổi thọ cao và yêu cầu bảo trì thấp [1]. Các đặc điểm trên làm cho nó phù hợp với các ứng dụng cần hệ thống lưu trữ năng lượng ngắn hạn hoặc trung hạn.

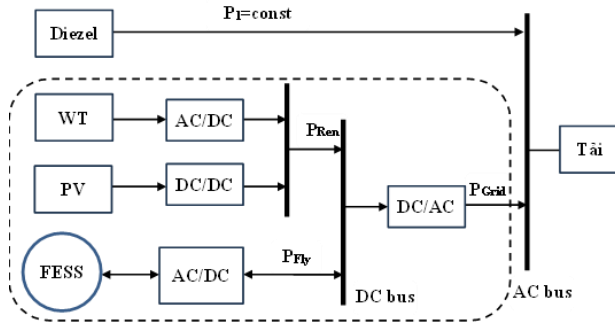
Ngày nay, ứng dụng của ESS này đã được tăng lên trong các khía cạnh khác nhau của cuộc sống con người. Xe điện, dự án không gian, thiết bị quân sự và ứng dụng hệ thống điện là một số trường hợp ứng dụng khác nhau của

<sup>1</sup> Thai Nguyen University of Technology, Vietnam (Hoa Thi Thanh Lai, Hai Do Trung, K.L.Lai)

nó. Do vậy, cần có một đánh giá toàn diện về FESS và ứng dụng của nó nhằm định hướng cho các nghiên cứu, phát triển và ứng dụng FESS trong tương lai.

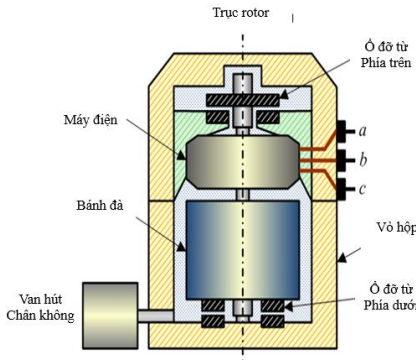
**2. Cấu trúc và hoạt động của FESS trong vi lưới**

Xét một vi lưới có sơ đồ khối như Hình 1, hệ thống gồm điện từ máy phát điện Dezel được nối trực tiếp với thanh cái xoay chiều, cung cấp một công suất không đổi cho thanh cái xoay chiều (AC Bus); hệ thống điện gió, điện mặt trời được kết nối với nhau tại thanh cái DC (DC Bus), chung cung cấp một công suất  $P_{Ren}$  cho AC Bus, công suất này luôn biến động ngẫu nhiên theo điều kiện môi trường; hệ thống lưu trữ năng lượng bánh đà được kết nối với hệ thống năng lượng tái tạo tại DC Bus, sau đó chúng được nối với thanh cái xoay chiều thông qua bộ chuyển đổi DC/AC.



Hình 1. Sơ đồ khối một vi lưới có FESS

Cấu trúc của bánh đà được biểu diễn trên Hình 2 bánh đà tích trữ năng lượng trong một khối quay bằng vật liệu composite đặt trong một hình trụ rỗng được nâng bởi ổ đỡ từ để giảm tối đa ma sát giữa trục và mặt chân đế. Trục của bánh đà nối với trục rotor của máy điện, máy điện được thiết kế để vận hành ở tốc độ cao và giảm tối thiểu ma sát, chúng có thể hoạt động ở chế độ động cơ hoặc ở chế độ máy phát điện.



Hình 2. Cấu trúc của bánh đà lưu trữ năng lượng

Nguyên tắc hoạt động của FESS trong vi lưới có thể được tóm tắt như sau: Trong điều kiện làm việc bình thường, máy điện trong bánh đà làm việc ở chế độ động cơ (chế độ chờ - Standby), thực hiện việc lưu trữ năng lượng dưới dạng động năng tỉ lệ với mô men quán tính rotor và bình phương tốc độ quay

$$E_{fly} = \frac{1}{2} J_{fly} \omega_F^2 \tag{1}$$

Trong đó,  $E_{fly}$  là động năng;  $J_{fly}$  là mô men quán tính bánh đà,  $\omega_F$  là vận tốc góc của bánh đà.

Khi có một dao động ở nguồn hoặc tải, ví dụ khi công suất của một nguồn phát năng lượng tái tạo ( $P_{Ren}$ ) tăng FESS tăng tốc hấp thụ sự tăng của công suất  $P_{Ren}$ , lúc này máy điện trong bánh đà làm việc trong vùng suy yếu từ thông. Khi  $P_{Ren}$  giảm máy điện hoạt động như một máy phát điện cung cấp thêm năng lượng cần thiết để giữ ổn định hệ thống. Trong quá trình xả năng lượng tốc độ của bánh đà giảm dần.

Quan hệ giữa công suất và năng lượng lưu trữ trong bánh đà được xác định:

$$P_{fly} = \frac{dE_{fly}}{dt} \tag{2}$$

Với  $P_F$  (W) là công suất tối đa có thể cấp bởi hệ thống lưu giữ (bằng công suất danh định máy điện không đồng bộ tích hợp trong bánh đà); E là năng lượng được cất giữ, đơn vị (J). Từ (1) và (2) ta có mối quan hệ giữa năng lượng, mô men quán tính và tốc độ quay của bánh đà là:

$$\frac{dE_{flywell}}{dt} = \frac{1}{2} J_{flywell} \frac{d\omega_F^2}{dt} \tag{3}$$

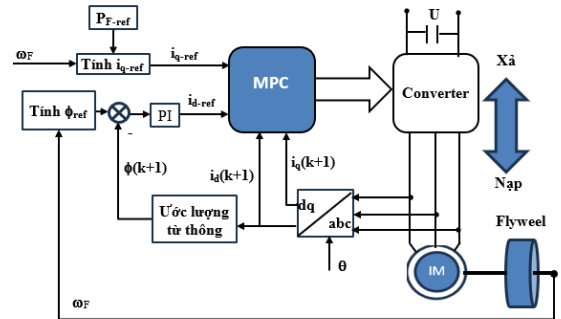
Biểu thức (3) cho thấy, năng lượng mà FESS có thể tích trữ hoặc giải phóng được biểu diễn theo công thức

$$\Delta E = \frac{1}{2} J (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \tag{4}$$

Trong đó,  $\omega_{max}$  và  $\omega_{min}$  là tốc độ góc quay cực đại và cực tiểu của bánh đà. Thông thường, FESS không được xả hết để bảo toàn năng lượng ta thường chọn  $\omega_{min} = \frac{1}{2} \omega_{max}$ .

Từ (4) ta thấy, năng lượng dự trữ có thể tăng lên bằng cách tăng mô men quán tính hoặc tốc độ góc cực đại của bánh đà. Với góc độ điều khiển, ta thực hiện việc tăng năng lượng dự trữ bằng cách tăng vận tốc góc của bánh đà trong phạm vi cho phép. Vì vậy, việc điều chỉnh tốc độ trong một phạm vi rộng có ý nghĩa rất quan trọng đối với khả năng lưu trữ năng lượng và độ sâu xả của FESS.

**3. Thiết kế điều khiển MPC cho FESS**



Hình 3. Sơ đồ khối hệ thống điều khiển FESS

Từ Hình 3 bài toán điều khiển đặt ra ở đây là điều khiển hoạt động của bánh đà sao cho khi có sự biến động của năng lượng tái tạo thì tổng công suất do hệ thống điện năng lượng tái tạo và hệ thống bánh đà bơm vào lưới là ít biến động nhất, nghĩa là cần duy trì:

$$P_{Grid} = P_{Ren} + P_{Fly} \approx \text{const} \tag{5}$$

Sơ đồ khối hệ thống điều khiển hoạt động của FESS được chỉ ra trên Hình 3.

Trong sơ đồ bộ chuyển đổi (Converter) là bộ chuyển đổi hai chiều, việc điều khiển hoạt động của Converter được thực hiện bởi bộ điều khiển dự báo (MPC). Tốc độ bánh đà thay đổi tùy theo sự thay đổi của công suất năng lượng tái tạo cung cấp cho vi lưới. Ở chế độ chờ, tốc độ của FESS bằng tốc độ định mức của máy điện.

### 3.1. Mô hình toán học hệ thống

Mô hình toán học máy điện không đồng bộ 3 pha biểu diễn trong không gian trạng thái trong hệ tham chiếu (dq) được mô tả bởi [12]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_r}{L_r} & (\omega_s - p\omega_r) & \frac{MR_r}{L_r} & 0 \\ (\omega_s - p\omega_r) & \frac{-R_r}{L_r} & 0 & \frac{MR_r}{L_r} \\ \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{Mp\omega_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{-R_{sr}}{\sigma L_s} & \omega_s \\ \frac{-Mp\omega_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r} & -\omega_s & \frac{-R_{sr}}{\sigma L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{Với: } R_{sr} = R_s + \frac{M^2}{L_r} R_r \quad \text{và} \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

Trong đó:  $R_s, R_r$  là điện trở pha stator và rotor;  $L_s, L_r$  là điện cảm pha stator và rotor;  $M$  là hệ cảm;  $u_{ds}, u_{qs}$  là các thành phần vuông góc của điện áp stator;  $i_{ds}, i_{qs}$  là các thành phần vuông góc của dòng điện stator;  $\phi_{dr}, \phi_{qr}$  là các thành phần vuông góc của từ thông rotor;  $p$  là số đôi cực;  $\omega_s$  là tốc độ quay của từ trường stator.

Giả thiết:

$$\phi_{dr} = \phi; \quad \phi_{qr} = 0 \quad (7)$$

Hệ phương trình trạng thái (6) trở thành:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{dr} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_r}{L_r} & \frac{MR_r}{L_r} & 0 \\ \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{-R_{sr}}{\sigma L_s} & \omega_s \\ \frac{-Mp\omega_r}{\sigma L_s L_r} & -\omega_s & \frac{-R_{sr}}{\sigma L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{dr} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \end{bmatrix} \quad [8]$$

Từ thông tham chiếu được xác định theo biểu thức:

$$\phi_{f-ref} = \begin{cases} \phi_m & \text{khi } |\omega_f| \leq \omega_m \\ \phi_m \frac{\omega_m}{|\omega_f|} & \text{khi } |\omega_f| > \omega_m \end{cases} \quad (9)$$

$$\phi_m = \frac{L_r}{M} \phi_{sn} \quad (10)$$

$\phi_m$  là từ thông định mức của rotor;  $\phi_{sn}$  là từ thông định mức của stator

$$\phi_{sn} = \sqrt{3} \frac{u_s}{\omega_s} \quad (11)$$

Với  $u_s$  là trị hiệu dụng của điện áp pha stator;  $\omega_s$  tốc độ góc điện áp lưới có giá trị bằng 314,16 rad/s, ta có:

$$\phi_m = \sqrt{3} \frac{L_r}{M} \frac{u_s}{\omega_s} \quad (12)$$

Dòng điện stator tham chiếu được xác định:

$$i_{ds-ref} = PI(\phi_{f-ref} - \phi_{r-est}) \quad (13)$$

$PI$  là quy luật điều chỉnh tỉ lệ tích phân. Giá trị ước lượng của từ thông rotor là:

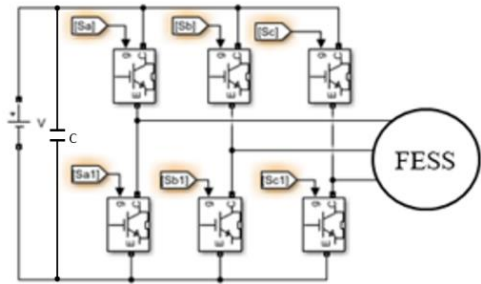
$$\phi_{dr-est} = \frac{M}{1 + \frac{L_r}{R_r} s} i_{ds} \quad (14)$$

Trong đó:  $s$  là toán tử laplace.

Công suất đặt (tham chiếu) của máy điện không đồng bộ được xác định theo công thức (1). Từ đó có thể tính được mô men điện từ tham chiếu:

$$M_{F-ref} = \frac{P_{F-ref}}{\omega_F} \quad (15)$$

Bộ biến đổi điện từ công suất hai chiều là bộ nghịch lưu nguồn áp gồm 6 IGBT có sơ đồ nguyên lý như Hình 4, trong đó các tín hiệu Sa1, Sb1 và Sc1 là phủ định của Sa, Sb và Sc. Chúng có 8 trạng thái đóng mở khả dĩ được liệt kê trong Bảng 1.



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý bộ biến đổi của FESS

Bảng 1. Bảng trạng thái đóng cắt của bộ biến đổi

TT	Sa	Sb	Sc	Véc tơ điện áp
1	0	0	0	$V_0 = 0$
2	1	0	0	$V_1 = 2*V_{dc}/3$
3	1	1	0	$V_2 = \frac{V_{dc}}{3} + j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
4	0	1	0	$V_3 = -\frac{V_{dc}}{3} + j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
5	0	1	1	$V_4 = -2*V_{dc}/3$
6	0	0	1	$V_5 = -\frac{V_{dc}}{3} - j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
7	1	0	1	$V_6 = \frac{V_{dc}}{3} - j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
8	1	1	1	$V_7 = 0$

### 3.2. Thiết kế MPC cho FESS

Để thiết kế điều khiển dự báo theo mô hình cho FESS, ta cần tìm các trạng thái  $S_A, S_B, S_C$  sao cho cực tiểu hóa hàm mục tiêu đặt ra và thỏa mãn các ràng buộc. thực hiện rời rạc hóa (8) ta thu được công thức tính các đại lượng dự báo:

$$\phi_{dr}(k+1) = \frac{-R_r}{L_r} \phi_{dr}(k) + \frac{MR_r}{L_r} i_{dr}(k) \quad (16)$$

$$i_{ds}(k+1) = \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r} \phi_{dr}(k) - \frac{R_{sr}}{\sigma L_s} i_{dr}(k) + \omega_s i_{qs}(k) + \frac{1}{\sigma L_s} u_{ds}(k) \quad (17)$$

$$i_{qs}(k+1) = \frac{-Mp\omega_r}{\sigma L_s L_r} \phi_{dr}(k) - \omega_s i_{dr}(k) - \frac{R_{sr}}{\sigma L_s} i_{qs}(k) + \frac{1}{\sigma L_s} u_{qs}(k) \quad (18)$$

Với mục tiêu từ thông và các thành phần  $i_{ds}, i_{qs}$  bám tín hiệu tham chiếu, ta có hàm mục tiêu

$$J = |\phi_{dr-ref} - \phi_{dr}(k+1)| + \alpha |i_{ds-ref} - i_{ds}(k+1)| + \alpha |i_{qs-ref} - i_{qs}(k+1)| \rightarrow \min \quad (19)$$

Trong đó,  $\alpha$  là trọng số nói lên sự khác nhau giữa các số hạng trong hàm mục tiêu.

Các ràng buộc đảm bảo cho động cơ hoạt động an toàn, muốn vậy trong quá trình khởi động, dòng điện khởi động không được vượt quá 2,5 lần dòng định mức, nghĩa là:

$$I_{max} < I_n \quad (20)$$

Các bước thiết kế MPC như sau:

- Bước 1: Cập nhật các thông số hệ thống, chọn chu kỳ  $T_s$ , giá trị hàm mục tiêu tối ưu ban đầu bất kỳ  $J_0$  (giá trị này thường chọn khá lớn).

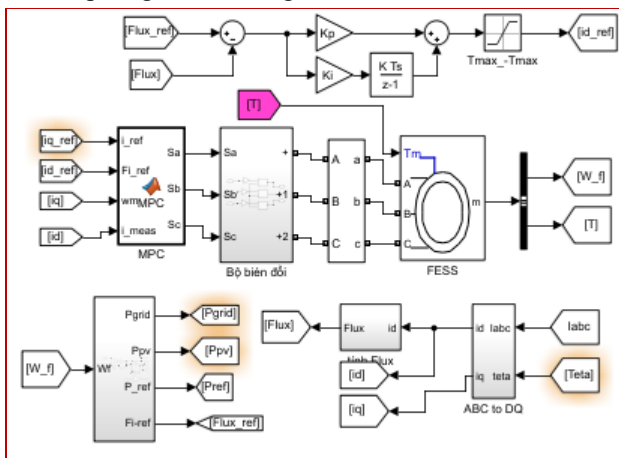
- Bước 2: Tính từ thông dự báo theo (16) và các thành phần của dòng điện dự báo theo (17), (18).

- Bước 3: Tính hàm mục tiêu (19) cho 8 trạng thái khả dĩ của bộ biến đổi và chọn trạng thái tối ưu, từ trạng thái tối ưu đã chọn ta thu được các giá trị  $S_A, S_B, S_C$  theo Bảng 1.

Quá trình tính toán được lặp lại cho các chu kỳ tiếp sau.

### 4. Kết quả mô phỏng

Để thấy rõ hoạt động của hệ thống bánh đà trong việc bù đắp sự thiếu hụt bất thường năng lượng do hệ thống điện gió và mặt trời sinh ra ta tiến hành mô phỏng hệ thống trong Matlab-Simulink với sơ đồ mô phỏng như Hình 5. Kích bản mô phỏng và các thông số như sau:



Hình 5. Sơ đồ mô phỏng

#### 4.1. Kích bản mô phỏng

Ở trạng thái làm việc bình thường công suất hệ thống điện mặt trời + gió cung cấp đủ công suất để duy trì trạng thái làm việc ổn định hệ thống  $P_{Ren} = P_{Grid}$ . Giả thiết rằng do sự biến động bất thường của bức xạ mặt trời, hoặc gió công suất do chúng sinh ra biến động một lượng  $\pm 60$  kW, khi đó hệ thống FESS sẽ hấp thụ hoặc phát công suất để duy trì một công suất gần như không thay đổi cho vi lưới. Sự biến động công suất của FESS được tính:

$$P_{Fly} = P_{Grid} - P_{Re} = 500kW \quad (21)$$

$P_{Fly}$  được sử dụng làm tín hiệu tham chiếu (tín hiệu đặt) điều khiển hoạt động của FESS.

#### 4.2. Thông số mô phỏng

Các thông số mô phỏng được liệt kê trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số mô phỏng

Công suất máy điện $P_m$ (kW)	: 50
Số đôi cực p	: 2
Điện trở Stator ( $\Omega$ )	: 0,05
Điện Trở rotor ( $\Omega$ )	: 0,043
Điện cảm Stator (H)	: $40,7 \cdot 10^{-3}$
Điện cảm Rotor (H)	: $40,1 \cdot 10^{-3}$
Hỗ cảm giữa stator và rotor (H)	: $40 \cdot 10^{-3}$
Thời gian mô phỏng (s)	: 2
PI ( $K_p, K_i$ )	: 166, 277
$\alpha$	: 1,2

- Công suất hệ thống cần cung cấp cho vi lưới cần giữ không thay đổi

$$P_{Grid} = 600kW = \text{const}$$

- Công suất hệ thống năng lượng tái tạo bơm vào lưới thay đổi theo thời gian  $P_{Ren}(t)$ , ứng với 2 trường hợp:

- a) Trường hợp 1:  $P_{Ren}(t)$  thay đổi dạng răng cưa;
- b) Trường hợp 2:  $P_{Ren}(t)$  thay đổi ngẫu nhiên.

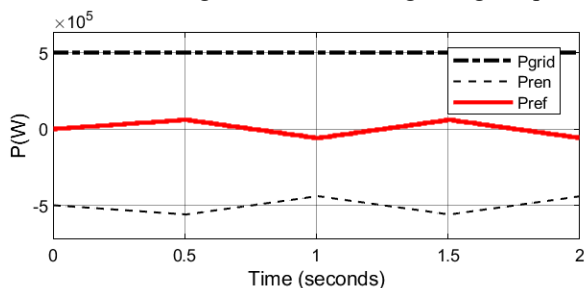
- Công suất FESS phải cung cấp tại thanh cái một chiều là:

$$P_{Fly}(t) = P_{Grid} - P_{Ren}(t) = P_{Fly-ref}$$

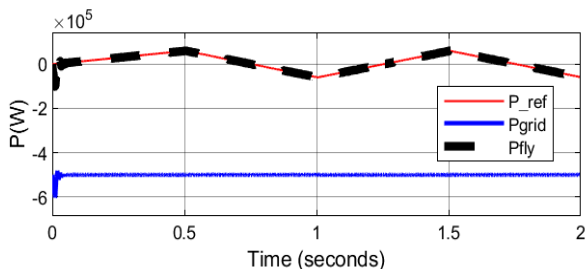
$P_{Fly}(t)$  được sử dụng làm tham chiếu để điều khiển FESS.

#### 4.3. Kết quả mô phỏng và thảo luận

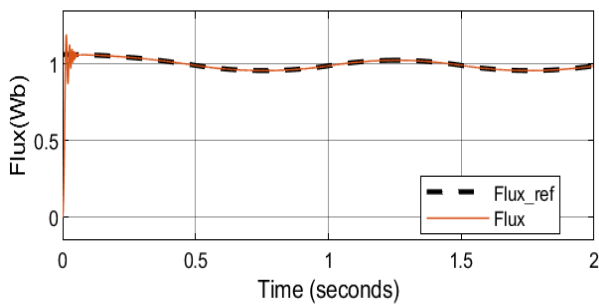
Các kết quả mô phỏng trong trường hợp 1 được biểu diễn trên các hình từ 6 đến 8. Trong đó, Hình 6 biểu diễn sự biến đổi của công suất hệ thống năng lượng tái tạo cung cấp cho lưới ( $P_{grid}$ ), tương ứng là tín hiệu tham chiếu cho hệ thống FESS (đường nét đậm); Hình 7 biểu diễn đường cong công suất đặt ( $P_{ref}$ ), công suất của FESS ( $P_{Fly}$ ) và công suất hệ thống năng lượng tái tạo + bánh đà bơm vào vi lưới ( $P_{grid}$ ). Ta thấy, sau thời gian quá độ, công suất FESS luôn bám sát công suất tham chiếu (công suất đặt), từ đó duy trì một công suất gần như không thay đổi cho vi lưới. Hình 8 biểu diễn đáp ứng từ thông của máy điện so với từ thông tham chiếu, từ thông có nhiễu nhẹ trong thời gian quá độ.



Hình 6. Tín hiệu tham chiếu khi công suất điện tái tạo thay đổi dạng răng cưa

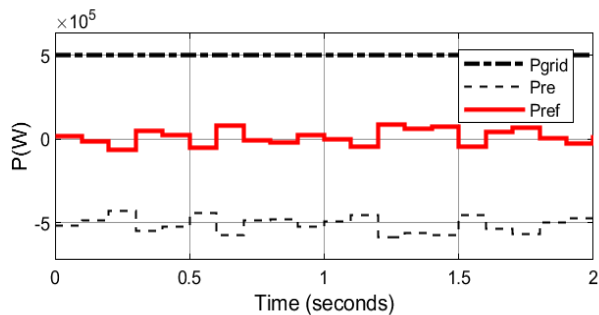


Hình 7. Đáp ứng công suất của FESS so với tín hiệu đặt

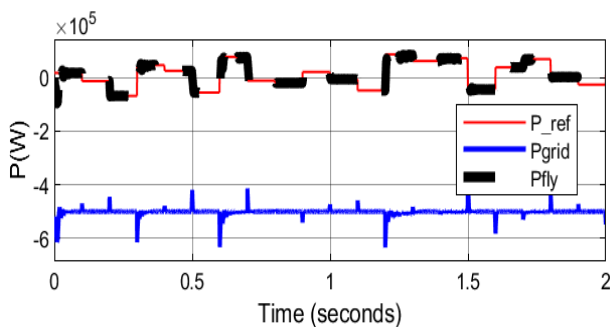


**Hình 8.** Đáp ứng từ thông máy điện

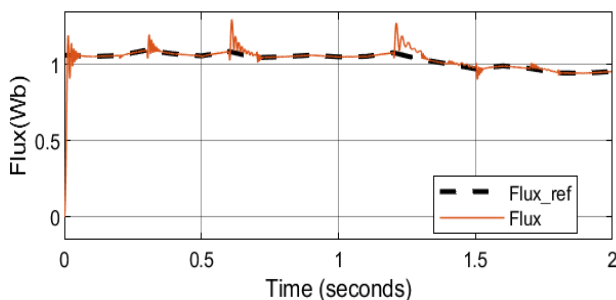
Các kết quả mô phỏng trong trường hợp 2 được biểu diễn trên các hình từ 9 đến 11. Tương tự như trường hợp 1 ta thấy, ở trạng thái xác lập công suất của FESS luôn bám sát tín hiệu đặt (Hình 10). Tuy nhiên, đáp ứng từ thông trong trường hợp này bám quỹ đạo tham chiếu kém hơn (Hình 11), do tốc độ biến thiên công suất trong mô phỏng này quá cao (điều này hiếm gặp trong thực tế).



**Hình 9.** Tín hiệu tham chiếu khi công suất điện gió + mặt trời thay đổi ngẫu nhiên



**Hình 10.** Đáp ứng công suất của FESS so với tín hiệu đặt ngẫu nhiên



**Hình 11.** Đáp ứng từ thông máy điện khi tín hiệu đặt ngẫu nhiên

Tóm lại, trong cả hai trường hợp, đường cong đáp ứng công suất của FESS luôn bám sát đường cong tham chiếu.

Do đó, công suất đưa đến lưới luôn được giữ ổn định mặc dầu có sự biến đổi công suất của nguồn phát ( $P_{Fly}$  và  $P_{ref}$  trong Hình 6 và Hình 9).

## 5. Kết luận

Việc tích hợp FESS trong hệ thống điện gió và mặt trời cho phép duy trì sự ổn định của năng lượng điện gió và mặt trời. Các kết quả mô phỏng đã cho thấy, tính đúng đắn và khả thi của giải pháp đề xuất. Hệ thống này có thể được sử dụng cân bằng cung - cầu năng lượng trong các hệ thống sử dụng năng lượng tái tạo làm việc độc lập hoặc nối với vi lưới. Một số vấn đề cần nghiên cứu tiếp theo là xây dựng mô hình thực nghiệm để kiểm tra và hoàn thiện những kết quả đã đề xuất; tìm ra thuật toán mới điều khiển hệ thống FESS hiệu quả hơn. Ngoài ra, có thể nghiên cứu ứng dụng FESS trong các thiết bị điều khiển truyền tải điện xoay chiều linh hoạt như bộ điều khiển bù tĩnh (STATCOM), thiết bị UPS.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Singh, Bt. students, and A. Professor, "Review on different control techniques of Unified Power Qualityconditioner (UPQC)", *Conference on Recent Innovations in Emerging Technology & Science*, 2018. pp. 362-369 [Online]. Available: [www.ijcrt.orgwww.ijcrt.org](http://www.ijcrt.orgwww.ijcrt.org). [Accessed 10/4/2023].
- [2] K. Bachovchin and M. Ilić, "Transient Stabilization of Power Grids Using Passivity- Based Control with Flywheel Energy Storage Systems", *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 15502134, 2015, DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286526.
- [3] M. Ilić, M. Cvetkovic, K. Bachovchin, and A. Hsu, "Toward a Systems Approach to Power-Electronically Switched T&D Equipment at Value", *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 12303537, 2011, DOI: 10.1109/PES.2011.6039509.
- [4] R. Takahashi, A. Umemura, and J. Tamura, "Stability Enhancement of Small-Scale Power Grid with Renewable Power Sources by Variable Speed Diesel Power Plant", *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 1-17, 2020, doi: 10.4236/jpee.2020.83001.
- [5] S. Li, L. Xu, and T. A. Haskew, "Control of VSC-based STATCOM using conventional and direct-current vector control strategies", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 45, no. 1, pp. 175-186, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.08.060.
- [6] L. Trilla, F. Bianchi, and O. Gomis-Bellmunt, "Optimal Control of VSC for STATCOM Applications", *IFAC Proceedings Volumes*, Vol. 45, No. 21, pp 588-594, 2012.
- [7] W. L. Chen, W. G. Liang, and H. S. Gau, "Design of a mode decoupling statcom for voltage control of wind-driven induction generator systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1758-1767, Jul. 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2035915.
- [8] S. Hossain, R. Khan, and J.-E.-Noor, "Design of STATCOM for Power System Stability Improvement", *Global Journal of Research In Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 105-116, 2014.
- [9] A. A. K. Arani, H. Karami, G. B. Gharehpetian, and M. S. A. Hejazi, "Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 9-18, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.166.
- [10] M. E. Amiryar, and K. R. Pullen, "A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications", *Applied Sciences*, vol. 7, no. 3, 286, pp. 1-21, 2017.
- [11] Y. Xiao, X. Ge, and Z. Zheng, "Analysis and Control of Flywheel Energy Storage Systems", *Energy Storage - Technologies and Applications*, InTech. pp. 132-147, 2013, doi: 10.5772/52412.
- [12] I. Alan and T. A. Lipo, "Induction Machine Based Flywheel Energy Storage System", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* vol. 39, no. 1, pp. 151-163, january 2003.