

## NGHIÊN CỨU NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG NGUỒN NĂNG LƯỢNG ĐIỆN TÁI TẠO TRONG VI LƯỚI

**Trần Đức Chuyển, Roãn Văn Hóa\*, Lê Văn Anh, Lê Thị Hoàn**  
*Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp*

### TÓM TẮT

Năng lượng mặt trời hiện đang nhận được sự quan tâm đặc biệt của rất nhiều lĩnh vực vì đây là nguồn năng lượng tái tạo, sạch, dễ khai thác và có xu hướng trở thành nguồn năng lượng chính trong tương lai. Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày một giải pháp tích hợp hệ thống bánh đà lưu trữ năng lượng (FESS) với hệ thống điện mặt trời làm việc trong vi lưới nhằm cải thiện chất lượng nguồn năng lượng điện tái tạo cung cấp cho lưới. Từ đó nghiên cứu mô hình hóa và mô phỏng trên phần mềm Matlab - Simulink đã cho thấy hệ thống điện mặt trời tích hợp FESS có khả năng khắc phục sự biến động năng lượng của điện mặt trời để cung cấp một năng lượng ít biến động cho lưới. Kết quả thực nghiệm với bộ nghịch lưu ba pha để kiểm chứng cấu trúc điều khiển hệ thống luôn làm việc tốt, thỏa mãn tiêu chuẩn IEEE 519.

**Từ khóa:** *Năng lượng tái tạo; điện mặt trời; vi lưới; bánh đà lưu trữ năng lượng; FESS.*

*Ngày nhận bài: 01/4/2020; Ngày hoàn thiện: 13/4/2020; Ngày đăng: 04/5/2020*

## STUDY TO IMPROVE THE QUALITY OF RENEWABLE ENERGY ELECTRICAL POWER IN THE MICRO - GRIDS

**Tran Duc Chuyen, Roan Van Hoa\*, Le Van Anh, Le Thi Hoan**  
*University of Economics - Technology for Industries*

### ABSTRACT

Solar energy is gaining interest in many fields because this is a clean, renewable energy source and is going to be the main energy source in the future. In this paper, we present a solution to integrate Flywheel Energy Storage System (FESS) with solar power system working in micro-grid to improve the quality of renewable energy electrical sources supplied to the grid. Since then, research in modeling and simulation on Matlab - Simulink software has shown that the FESS can overcome the energy fluctuations of solar power to provide a less changing energy for the grid. Experimental results with three-phase inverters to show that the structure system control always works well, satisfied the IEEE 519 standard.

**Keywords:** *Renewable energy; solar power; microgrid; flywheel energy storage system; FESS.*

*Received: 01/4/2020; Revised: 13/4/2020; Published: 04/5/2020*

\* Corresponding author. Email: rvhoa@uneti.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Ngày nay, việc cạn kiệt nhiên liệu hóa thạch thiên nhiên; dầu mỏ, cùng với ảnh hưởng của hiệu ứng nhà kính dẫn đến một nhu cầu bức thiết về xây dựng và sử dụng năng lượng tái tạo. Trong số các nguồn năng lượng tái tạo mới, nhờ có sự phát triển nhanh chóng của kỹ thuật điện tử công suất; thì năng lượng mặt trời và năng lượng gió đang ngày càng trở nên phổ biến hơn hết, các nguồn năng lượng này đã được thay thế nguồn năng lượng hóa thạch truyền thống. Đây là một lựa chọn phù hợp của nhiều nước trên thế giới [1]-[4].

Một công nghệ lưu trữ năng lượng đang thu hút sự quan tâm rất lớn là bánh đà lưu trữ năng lượng (FESS: flywheel energy storage system) [3], [5]. Công nghệ lưu trữ này có nhiều lợi thế so với các giải pháp lưu trữ khác như vòng đời cao, mật độ lưu trữ năng lượng lớn, có thể lưu trữ lượng năng lượng không giới hạn, chi phí vận hành thấp. Chúng được áp dụng hiệu quả cho việc làm mịn công suất các hệ thống điện sử dụng năng lượng tái tạo làm việc trong vi lưới (các lưới điện công suất vừa và nhỏ; cho phép hòa với nhau hoặc hòa vào lưới điện quốc gia) mà vẫn luôn đảm bảo được tiêu chuẩn về chất lượng điện năng IEEE 519.

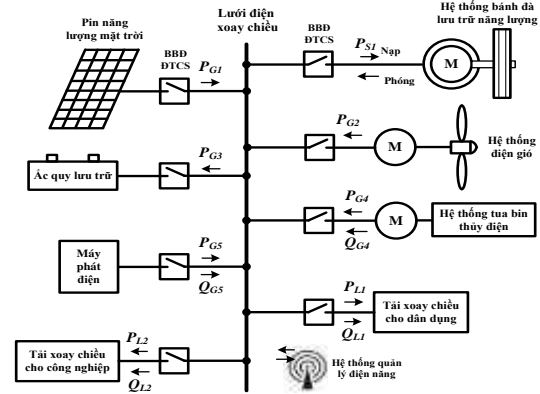
Như ở một số các công trình nghiên cứu trong nước [4] và ngoài nước đã nghiên cứu, [5], [6] chưa đi sâu nghiên cứu và mới chỉ dừng lại ở mô phỏng, chưa đi đến thực nghiệm để đánh giá chất lượng nguồn điện cho vi lưới.

Bài báo này đề xuất một hệ thống năng lượng điện tái tạo, có tích hợp bánh đà lưu trữ năng lượng (hình 1). Một máy điện được tích hợp trong bánh đà có thể làm việc ở chế độ máy phát hoặc chế độ động cơ để biến đổi năng lượng từ cơ năng sang điện năng và ngược lại nhằm ổn định công suất của hệ thống năng lượng tái tạo; điện mặt trời tích hợp FESS cung cấp cho vi lưới.

## 2. Lưu trữ năng lượng trong vi lưới và ổn định tần số lưới điện

### 2.1. Khái quát về điện năng trong vi lưới

Sơ đồ khối của lưới điện sử dụng năng lượng tái tạo có sự tham gia của phần tử lưu trữ năng lượng, được chỉ ra trong hình 1.



**Hình 1.** Thành phần chính của hệ thống lưới điện công suất nhỏ

- Hệ thống năng lượng là các nguồn năng lượng tái tạo như (năng lượng mặt trời, turbin gió, nước, pin năng lượng, v.v...).

- Hệ thống thu/phát năng lượng có nhiệm vụ nạp và cất giữ năng lượng khi có sự dư thừa và xả năng lượng khi có những biến động bất thường của lưới điện. Để làm được điều này có thể sử dụng pin, acqui, siêu tụ hoặc bánh đà lưu trữ năng lượng.

- Khối điện tử công suất là một bộ biến đổi điện tử công suất (BBD ĐTCS) được kết nối với lưới một cách linh hoạt bao gồm: Bộ biến đổi DC/AC, AC/DC,... Đối với nguồn phát năng lượng khối này làm nhiệm vụ biến đổi năng lượng tái tạo thành điện năng có điện áp, tần số và góc pha phù hợp để kết nối với vi lưới. Đối với phần tử lưu trữ năng lượng, khối điện tử công suất có khả năng làm việc 2 chiều, khi lưới làm việc ổn định năng lượng từ lưới được đưa đến cất giữ trong phần tử lưu trữ, khi có sự biến thiên đột ngột về điện áp thì năng lượng từ phần tử lưu trữ sẽ được đưa trở lại nhằm khắc phục sự biến động và ổn định lưới điện. Vấn đề khắc phục lỗi lưới và ổn định lưới không được đề cập trong bài báo này.

- Hệ thống lưới và tải tiêu thụ: Điện năng sau khi sản xuất, qua bộ biến đổi được hòa vào

lưới điện. Từ đó các phụ tải điện được cung cấp bởi điện năng của lưới.

Ngoài ra còn có các khối đo lường và khối điều hành, điều khiển có chức năng điều hành; quản lý hoạt động của toàn bộ hệ thống lưới điện như điều khiển nguồn phát điện, điều khiển bộ biến đổi điện tử công suất, điều khiển nối lưới, điều khiển quá trình nạp/xả của hệ thống lưu trữ năng lượng.

## 2.2. Lưu trữ năng lượng điện và ổn định nguồn công suất để cân bằng năng lượng

Trong vi lưới: các máy phát điện của các động cơ Diesel, thủy điện, hệ thống năng lượng tái tạo,... kết hợp với bộ biến đổi điện tử công suất để biến đổi ra điện áp xoay chiều hình sin có tần số phù hợp; kết nối trực tiếp với lưới điện xoay chiều quốc gia. Các hệ thống phát ra điện năng đều có chung một tần số lưới điện và các máy phát này đều chạy với cùng tốc độ là  $\omega_e$ . Do đó, ta có phương trình

$$(1), \quad \text{trong đó } P_G = \sum P_{Gi}, P_L = \sum P_{Li}$$

và  $P_S = \sum P_{Gi}$ . Trong phương trình (1) cũng như tất cả các phương trình động lực học của bài báo này, thì  $p(\cdot)$  được viết là toán tử đạo hàm theo thời gian.

$$J_T p(\Delta\omega_e) = P_G - P_L - \Delta P_S \quad (1)$$

Ở trạng thái làm việc bình thường công suất năng lượng từ nguồn điện mặt trời; sức gió; thủy điện,... cung cấp cho lưới đủ để duy trì trạng thái làm việc ổn định cho lưới, tuy nhiên công suất này thường thay đổi liên tục theo điều kiện môi trường [2], [4], [7].

Do đó,  $\Delta P_S = 0$ . Vì  $P_G = P_L$ ,  $p(\Delta\omega_e) = 0$  không có sự biến thiên của tần số hệ thống lưới điện. Khi đó, máy điện tích hợp trong FESS làm việc ở chế độ động cơ và chúng tích trữ năng lượng  $P_S$  là công suất của hệ thống bánh đà;  $P_G$  là công suất bơm vào lưới, để lưới điện làm việc ổn định thì công suất này luôn cần được giữ cố định với ( $P_G = const$ ).

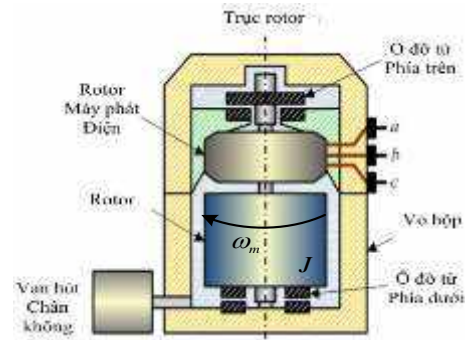
$$\text{ta có: } \Delta P_S \approx P_G - P_L \quad (2)$$

Biểu thức (2) thể hiện việc kiểm soát tần số của lưới điện và tần số của nguồn năng lượng điện tái tạo, nhằm tránh sự chênh lệch tần số của FESS lệch nhau so với lưới.

## 3. Mô hình hóa và điều khiển bánh đà lưu trữ năng lượng

### 3.1. Nguyên lý hoạt động

Xét hệ thống như hình 1 có tích hợp bánh đà lưu trữ năng lượng, sơ đồ khối hệ thống bánh đà lưu trữ năng lượng như trong hình 2 [4]. Trong điều kiện làm việc bình thường máy điện trong bánh đà làm việc ở chế độ động cơ, bánh đà thực hiện việc lưu trữ năng lượng dưới dạng động năng. Mặt khác, khi có một dao động bất thường ở nguồn hoặc tải máy điện trong bánh đà 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 dẫn đến tần số điện áp liên tục thay đổi.



**Hình 2.** Sơ đồ cấu trúc hệ thống bánh đà lưu trữ năng lượng trong vi lưới [4]

Mật độ năng lượng được lưu trữ  $E_{vol}$  được cho bởi (3) trong đó  $\sigma_r = \rho(l\omega_m)^2$  là ứng suất kéo xuyên tâm được sinh ra bởi bánh đà,  $\rho$  là mật độ vật liệu,  $\omega_m$  tốc độ góc quay,  $l$  bán kính đường tròn thể tích của FESS [4], [5]. Hệ số liên kết  $K_F$  liên quan đến hình dạng bánh đà. Bằng cách kết hợp mật độ khối lượng và khối lượng, năng lượng lưu trữ tối đa được cho bởi biểu thức (4), trong đó  $V$  là thể tích bánh đà và  $J$  mô men quán tính.

$$E_{vol} = 0.5 K_F \sigma_r \quad (3)$$

$$E_{kmax} = 0.5J\omega_{Rmax}^2 \quad (4)$$

$$\text{Suy ra } E_{kmax} = 0.5K_F \cdot V \cdot \sigma_{rmax} \quad (5)$$

Liên quan đến vấn đề nạp và xả năng lượng của bánh đà được cho bởi biểu thức (6):

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_R \quad (6)$$

trong đó,  $T_m$  là mômen của máy điện,  $T_R$  là mômen ma sát tổng; có thể được giảm thiểu thông qua việc sử dụng gối đỡ từ (thiết kế không chịu lực) [3], [8].

### 3.2. Mô hình hóa máy điện xoay chiều

Máy điện xoay chiều KĐB rôto lồng sóc nhờ có đặc điểm là làm việc ổn định; độ tin cậy cao, chi phí thấp. Để điều khiển chính xác mômen (hoặc công suất) của máy điện này, các phương trình động học của nó được viết trong hệ tọa độ tham chiếu dq, và mô hình tương ứng của máy điện này đã được trình bày rõ trong [8], [9]. Các thành phần điện áp, từ thông cơ bản của máy điện này được đưa ra theo biểu thức (7) và (8) tương ứng.

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s & 0 & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(\omega_s - \omega_m) & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega_m) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Các thành phần trong mô hình máy điện được thể hiện bằng hệ đơn vị SI. Trong đó:  $R_a$  và  $R_A$  là điện trở cuộn stator và rô to,  $L_s = L_a + L_m$  cuộn cảm stator,  $L_r = L_A + L_m$  cuộn cảm rô to và  $L_m$  là cuộn dây từ hóa.  $\omega_s$  là tốc độ quay trên tọa độ dq.

Từ  $I_r = [i_{rd} \ i_{rq}]^T$ ,  $\psi_s = [\psi_{sd} \ \psi_{sq}]^T$  và bằng cách lấy ma trận từ thông ở biểu thức (7) là sự biểu diễn các thành phần từ thông của stator, dòng điện rôto được tính toán và cho bởi biểu

thức (9), trong đó  $\sigma$  tổng các thành phần từ thông rò.

$$\begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_r} \begin{bmatrix} \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} - \frac{L_m}{L_r} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \sigma L_s \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{L_m}{L_r} \begin{bmatrix} \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{trong đó, } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (10)$$

ta thay biểu thức (9) vào biểu thức (8) ta được biểu thức (11) như sau:

$$p \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_a} & \omega_s & \frac{1-\sigma}{\sigma L_m T_r} & \frac{(\sigma-1)\omega_m}{\sigma L_m} \\ -\omega_s & -\frac{1}{T_a} & \frac{(\sigma-1)\omega_m}{\sigma L_m} & \frac{1-\sigma}{\sigma L_m T_r} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -g\omega_s \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -g\omega_s & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (11)$$

trong đó,

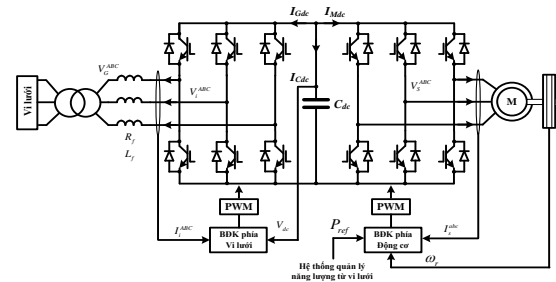
$$T_a = \frac{\sigma T_r T_r}{T_r + (1-\sigma)T_s}; T_s = \frac{1}{R_a}; T_a = \frac{L_r}{R_A} \quad (12)$$

$$T_{em} = \frac{3n_p}{2} \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd}) \quad (13)$$

Mômen điện từ được tạo ra bởi máy điện xoay chiều được cho bởi biểu thức (13). Thành phần mômen này được sinh ra từ tốc độ quay của bánh đà đã được viết bởi phương trình (6).

### 3.3. Mô hình chuyển đổi năng lượng

Sơ đồ cấu trúc bộ biến đổi được cho bởi hình 3. Bao gồm hai bộ nghịch lưu nguồn điện áp (VSI) được kết nối bởi một cầu nối DC có tụ lọc tần số cao  $C_{dc}$ .



Hình 3. Bộ biến đổi công suất back-to-back

Từ đó, ta thiết kế mô hình bộ điều khiển trên cơ sở phía máy điện (động cơ) và phía vi lưới, với bộ điều khiển VSI, bằng cách sử dụng việc biến đổi hệ trục tọa độ dq thành DQ, theo [8]. Mô hình phía FESS chủ yếu được điều khiển bởi mômen của máy điện xoay chiều như trong biểu thức (6), như điều khiển trực tiếp mômen (DTC) và phương pháp điều khiển FOC, là hai vấn đề điều khiển thường được sử dụng cho mô hình điều khiển VSI ở phía động cơ [2], [8]. Ưu điểm nổi bật của phương pháp FOC là điều khiển tách biệt thành phần từ thông rô to  $\psi_r$  và mômen điện từ  $T_m$  của máy điện xoay chiều để đạt được hiệu suất cao [3], [8]. Theo (13) trong hệ tọa độ dq thành phần  $\psi_r$  được lấy thẳng hàng với trục d khi đó  $\psi_{rd} = \psi_r$  và  $\psi_{rq} = 0$ . Từ đó ta có:

$$T_m = K_\psi i_{sq}; \quad K_\psi = \frac{3n_p L_m}{2 L_r} \psi_r \quad (14)$$

$$\psi_r = \frac{L_m}{1 + sT_r} i_{sd} \quad (15)$$

Như vậy, ta cũng có được thành phần dòng điện  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  và điện áp  $v_{sd}$ ,  $v_{sq}$  như sau:

$$i_{sd} = \frac{K_a}{1 + sT_a} v_{cd} \text{ và } i_{sq} = \frac{K_a}{1 + sT_a} v_{cq} \quad (16)$$

$$\text{trong đó, } K_a = \frac{T_a}{\sigma L_s} \quad (17)$$

$$v_{sd} = v_{cd} - \sigma L_s \omega_m i_{sq} \text{ và } v_{sq} = v_{cq} - \sigma L_s \omega_m i_{sd} \quad (18)$$

Từ (11) với hệ tọa độ dq thì  $\omega_s$  và thành phần góc pha tương ứng được viết trong (19):

$$\omega_s = \frac{L_m}{T_r \psi_r^{ref}} i_{sq} + \omega_m \text{ và } \theta_s = \int \omega_s dt \quad (19)$$

Khi đó năng lượng lưu trữ trong bánh đà được đưa ra bởi phương trình (17) như sau:

$$E_K = \frac{J}{2} \omega_m^{*2} = \int P_{ref} dt \Rightarrow \omega_m^* = \sqrt{\frac{2}{J} \int P_{ref} dt} \quad (20)$$

Toàn bộ mô hình vi lưới được xem như một máy phát đồng bộ có  $L_f$  và  $R_f$  là điện cảm và điện trở của stato. Từ đó, ta có biểu thức (21). Hệ trục tọa độ DQ phía lưới có từ thông lưới và dòng điện  $I_i = [i_{iD} \ i_{iQ}]^T$  được kích bởi bộ

VSI, từ đó ta có (22), (23). Phương trình này gần giống với phương trình trạng thái của dòng điện thu được từ máy điện xoay chiều ở trong biểu thức (13).

$$P(\psi_G^{ABC}) = V_G^{ABC} \quad (21)$$

$$P \begin{bmatrix} i_{iD} \\ i_{iQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_f} & \omega_e \\ -\omega_e & \frac{1}{T_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{iD} \\ i_{iQ} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} 0 & \omega_e \\ -\omega_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{GD} \\ \psi_{GQ} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f} \begin{bmatrix} 0 & \omega_e \\ -\omega_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{iD} \\ v_{iQ} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\text{trong đó, } T_f = \frac{L_f}{R_f} \quad (23)$$

Thành phần từ thông  $\psi_G$  được định hướng theo hướng hệ trục tọa độ D sao cho  $\psi_G = \psi_D$  và  $\psi_{GQ} = 0$ , khi đó bộ VSI phía lưới được cho bởi (24). Theo đó, công suất hoạt động  $P_G$  có thể được điều khiển bởi  $i_{iQ}$  và công suất phản kháng  $Q_G$  bởi  $i_{iD}$ , như biểu thức (25). Các giá trị điện áp tham chiếu của VSI được cung cấp cho bộ điều chế PWM và cho bởi (26), (27). Biến đổi hệ trục tọa độ và tính toán ta được biểu thức (31), các biểu thức lần lượt được viết:

$$P_G = \frac{3\omega_e \psi_G}{sC_{cd}} i_{iQ}; \quad Q_G = \frac{3\omega_e \psi_G}{2} i_{iD} \quad (24)$$

$$i_{iD} = \frac{1/R_f}{1 + sT_f} v_{cD}; \quad i_{iQ} = \frac{1/R_f}{1 + sT_f} v_{cQ} \quad (25)$$

$$v_{iD} = v_{cD} - L_f \omega_e i_{iQ} \quad (26)$$

$$v_{iQ} = v_{cQ} - L_f \omega_e i_{iD} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{G\alpha} \\ \psi_{G\beta} \end{bmatrix} = \int \left( \begin{bmatrix} v_{i\alpha} \\ v_{i\beta} \end{bmatrix} - R_f \begin{bmatrix} i_{i\alpha} \\ i_{i\beta} \end{bmatrix} \right) dt - L_f \begin{bmatrix} i_{i\alpha} \\ i_{i\beta} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\psi_G = \sqrt{\psi_{G\alpha}^2 + \psi_{G\beta}^2}; \quad \theta_G = \tan^{-1} \frac{\psi_{G\beta}}{\psi_{G\alpha}} \quad (29)$$

Khi đó ta có:

$$E_{dc} = \frac{-3\omega_e \psi_G}{sC_{dc}} i_{iQ}; \quad E_{dc} = V_{dc}^2 \quad (30)$$

Giá trị tham chiếu dòng điện trục Q được cung cấp bởi vòng điều khiển của điện áp liên kết một chiều (dc - link). Thành phần biến thiên  $E_{dc}$  là thành phần đo được từ năng lượng lưu trữ trong tụ điện dc - link.

**4. Mô phỏng và thực nghiệm**

**4.1. Mô phỏng**

Sau khi nghiên cứu tính toán, thuật toán và mô hình hóa để điều khiển hệ thống bánh đà lưu trữ năng lượng. Ta xây dựng hệ thống trên Matlab-Simulink với các thông số như sau: Giả thiết rằng khi có sự biến động công suất điện mặt trời, hệ thống điện có tích hợp bánh đà lưu trữ năng lượng cần bơm vào vi lưới một công suất 50kW, với:

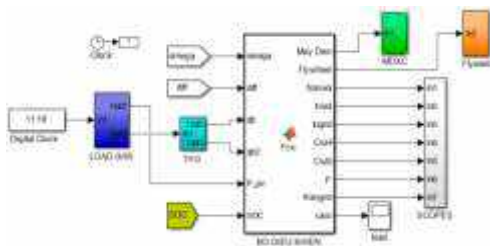
$$P_f = P_g - P_{pv} = 50kW \quad (31)$$

Ở trạng thái làm việc bình thường công suất pin quang điện cung cấp cho lưới đủ để duy trì trạng thái làm việc ổn định của vi lưới là  $P_{pv} = P_g$ . Khi đó, máy điện tích hợp trong bánh đà làm việc ở chế độ động cơ và chúng tích trữ năng lượng 50kW trong thời gian 5 giây sau đó chúng sẽ xả năng lượng trong 5 giây tiếp theo để bù vào sự thiếu hụt năng lượng đó. Các thông số mô phỏng như sau:

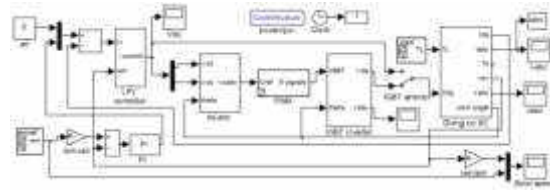
Phía máy điện: máy điện KĐB tích hợp trong bánh đà có  $P = 50kW$ ,  $p = 2$ ,  $R_s = 0,065\Omega$ ,  $R_r = 0,051\Omega$ ,  $L_s = 42,6.10^{-3}H$ ,  $L_r = 42,5.10^{-3}H$ ,  $M = 43.10^{-3}H$ , với mômen quán tính bánh đà  $J_f = 160kgm^2$ . Vận tốc ban đầu của bánh đà: 1500 vòng/phút (157 rad/s) và công suất tham chiếu bằng công suất danh định của máy điện (50kW).

Phía lưới: điện áp 3 pha tần số 50Hz, bộ lọc có:  $L_f = 11,5mH$ ,  $R_f = 0,125\Omega$ ,  $C_{dc} = 15000\mu F$ , điện áp ở dc-link  $V_{dc}^{ref} = 1200V$ , tần số làm việc PWM  $f_{PWM} = 5kHz$ .

Mô hình mô phỏng trên Matlab simulink của máy điện xoay chiều được tích hợp bánh đà lưu trữ năng lượng như trong hình 4.

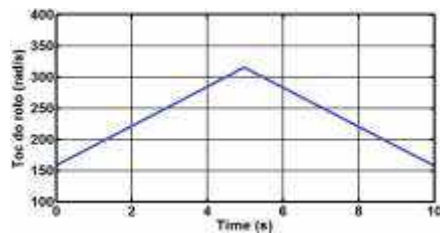


**Hình 4.** Sơ đồ mô phỏng hệ thống được xây dựng trên Matlab Simulink

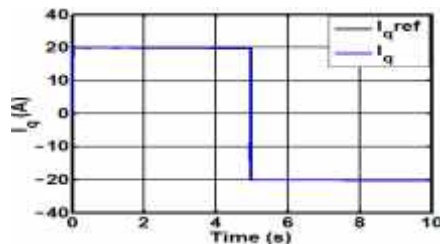


**Hình 5.** Khai triển cấu trúc mô phỏng MĐXC được xây dựng trên Matlab Simulink từ hình 5

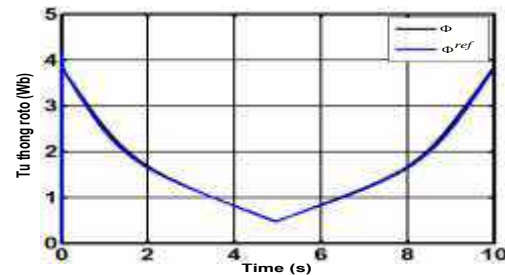
Thời gian mô phỏng trong 10s, trong đó 5s đầu bánh đà được tăng tốc độ từ 1500 vòng/phút đến 3000 vòng/phút, sau đó giảm tốc độ từ 3000 vòng/phút đến 1500 vòng/phút ở thời gian còn lại. Các kết quả mô phỏng được chỉ ra trên các hình từ hình 6, 7, 8, 9. Trong đó: hình 6 là đường cong đặc tính tốc độ của máy điện được tích hợp trong bánh đà; hình 7 là các đường cong thành phần  $i_q$  của dòng điện đặt và dòng thực của máy điện; hình 8 là các đường cong từ thông đặt và từ thông thực của máy điện được nối với bánh đà; hình 9 là công suất thu - phát của hệ thống bánh đà.



**Hình 6.** Tốc độ của máy điện tích hợp trong bánh đà

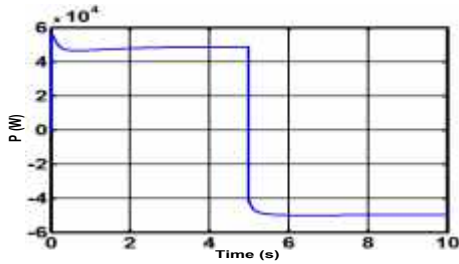


**Hình 7.** Đường cong thành phần dòng điện  $i_q$  đặt và dòng  $i_q$  thực



**Hình 8.** Đường cong từ thông đặt và từ thông thực của máy điện nối với bánh đà năng lượng





**Hình 9.** Công suất thu - phát của hệ thống bánh đà năng lượng

Nhận xét: Quan sát kết quả mô phỏng ở trên ta thấy, trong khoảng thời gian từ 0 đến 5 giây tốc độ bánh đà xuất phát từ giá trị ban đầu 1500 vòng/phút tương ứng (157 rad/s) được tăng tốc lên 3000 vòng/phút trong thời gian 5 giây. Trong khoảng thời gian này máy điện làm việc ở chế độ động cơ (công suất dương). Trong khoảng thời gian còn lại, tốc độ bánh đà giảm từ 3000 vòng/phút xuống 1500 vòng/phút, máy điện làm việc ở chế độ máy phát (công suất âm), năng lượng lưu trữ trong bánh đà dưới dạng động năng được đưa ra bù vào phần năng lượng hao hụt của hệ thống.

**4.2. Thực nghiệm**

Nghiên cứu thực nghiệm với hệ thống nghịch lưu ba pha như hình 10, bao gồm: động cơ AC 3 pha, P = 2,2kW, U = 380V, I = 8,6A, tốc độ 1500 vòng/phút, số đôi cực p = 2, động cơ được nối cứng với tải: máy phát một chiều: P = 4kW, U = 220V, I = 8,6A, tốc độ 1750 vòng/phút, tần số 50Hz. Các thiết bị trên bàn nghịch lưu: biến dòng 50A/5A, module công suất IGBT 25A/1200V, module điều khiển số dsPIC30F4011, module hiển thị LCD-ICEA, máy hiện sóng, biến áp nguồn công suất,... Hệ thống thử nghiệm với bảng tham số bộ nghịch lưu như trong bảng 1:

**Bảng 1.** Tham số lựa chọn thiết bị bộ nghịch lưu

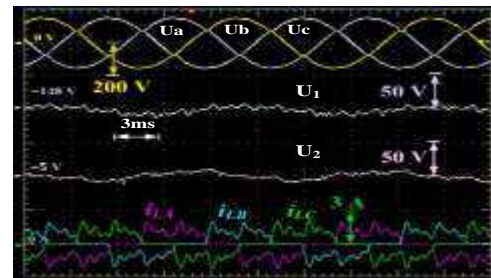
Mô tả	Giá trị
Công suất định mức tiêu thụ	10 kW
Điện áp PV	60-150VDC
Điện áp DC - link	700 V
Tần số phát xung	10 kHz
Tần số cắt bộ lọc fc	25 Hz
Tụ điện C của bộ lọc	4700 μF
Cuộn kháng lọc L	2,5 mH

Ở đây ta coi như điện áp độc lập được lấy từ hệ thống năng lượng điện mặt trời trong vi lưới, được đưa vào bộ tích trữ năng lượng (ắc quy, hoặc bánh đà lưu trữ năng lượng), sau đó được nối với bộ nghịch lưu, bộ lọc nhằm cung cấp điện năng cho phía tải.

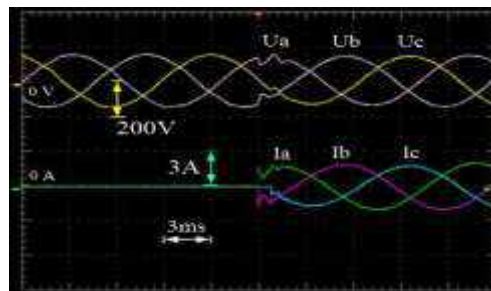


**Hình 10.** Hình ảnh cấu trúc thực nghiệm nghịch lưu ba pha trong phòng thí nghiệm

Mô hình thực nghiệm bài báo áp dụng là các kết quả thực nghiệm được giới thiệu trong hình 11 và hình 12.



**Hình 11.** Đáp ứng điện áp ba pha, dòng điện các pha khi chưa có bộ lọc



**Hình 12.** Giá trị điện áp và dòng điện của hệ thống với tải thay đổi: từ không tải đến có tải

Hiệu suất ổn định tải khi thay đổi 50% giá trị điện áp và dòng điện. Khi chưa qua bộ biến đổi và bộ lọc, thì ta đo được giá trị điện áp trên tải  $U_a; U_b; U_c$  vẫn luôn là dạng hình sin (do chất lượng của bộ nghịch lưu có môđun bộ điều khiển số: Driver HCPL A3120; dsPIC

30F4011, .v.v...), giá trị dòng điện trên tải  $i_{LA}$ ,  $i_{LB}$ ,  $i_{LC}$ , thay đổi đáng kể (khi thay đổi tần số); hơn nữa giá trị điện áp  $U_1$ ,  $U_2$  là hai giá trị điện áp pha của pha thứ nhất và pha thứ hai bị thay đổi 50%. Ở đây, thời gian đáp ứng từ 0 đến 30ms như trong hình 11.

Đáp ứng đo được là điện áp và dòng điện ở phía sau của bộ nghịch lưu, khi đã qua bộ lọc. Tại thời điểm hệ thống làm việc với tải thay đổi từ không tải đến có tải, thời gian thay đổi là 15ms trong tổng thời gian đáp ứng 30ms.

Qua các kết quả nghiên cứu ta thấy, hệ thống được xây dựng đã góp phần nâng cao chất lượng nguồn năng lượng điện tái tạo cho vi lưới luôn luôn ổn định; đạt được cả tiêu chuẩn về chất lượng điện năng, đây là vấn đề khoa học có tính mới, hoàn toàn áp dụng được vào trong thực tế sản xuất, dân dụng quốc phòng và an ninh.

So sánh kết quả với các nghiên cứu trong [4], và trong các nghiên cứu trước đó [5], [6] thì kết quả đạt được của bài báo tốt hơn với phần mô phỏng có thời gian đạt tới giá trị cân bằng nhỏ cả về giá trị dòng điện, điện áp, công suất và đã có thực nghiệm với hệ thống từ nguồn năng lượng tái tạo thu được, đã được lưu trữ nối vào hệ thống nghịch lưu ba pha điều khiển tải hoạt động tốt.

## 5. Kết luận

Việc nâng cao chất lượng nguồn năng lượng điện tái tạo trong vi lưới không thể sử dụng công nghệ lưu trữ truyền thống (pin, acquy, tụ,...), mà cần có sử dụng công nghệ mới có nhiều ưu điểm so với các công nghệ lưu trữ năng lượng trước kia. Các kết quả nghiên cứu đã cho thấy tính đúng đắn và khả thi của giải pháp đề xuất. Hệ thống này có thể được sử dụng để “làm mịn” và 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. Kết quả đưa ra trong bài báo này phù hợp với tiêu chuẩn chất lượng điện năng IEEE 519.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1]. M. C. Vo, Q. H. Pham, and T. M. Tran, *Power electronics*. Science and Technics Publishing House, 2007.
- [2]. D. C. Tran, and X. K. Tran, *Power electronics and application*. Science and Technics Publishing House, 2017.
- [3]. D. P. Nguyen, *Enhance control theory*. Science and Technics Publishing House, 2009.
- [4]. K. L. Lai, T. T. H. Lai, and V. H. Nguyen, "Fly wheel energy storage system in the microgrid with the renewable energy sources," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 173, no. 12, pp. 87- 91, 2017.
- [5]. A. A. KhodadoostArani, 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*, IEEE, Nov. 2016, pp. 9-18,
- [6]. A. F. Tai-Ran Hsu, "On a Flywheel-Based Regenerative Braking System for Regenerative Energy Recovery," in *Proceedings of Green and Systems Conference*, Long Beach, 2013.
- [7]. J. Peronnet, *Electrical Installation Guide: Calculations for Electricians and Designers According to IEC international standards*, France, 2018.
- [8]. P. Q. Nguyen, and D. Jörg – Andreas, *Vector Control of Three - Phase AC Machines*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [9]. J. Chiasson, *Modeling and high performance control of electric machines*. Wiley-IEEE Press. Published by Inc., Hoboken, New Jersey, Printed in the United States of America, 2005.