

# ĐIỀU KHIỂN GIÁN TIẾP TỪ THÔNG HỆ THỐNG TUABIN GIÓ MÁY PHÁT ĐIỆN CẢM ỨNG ROTOR LỒNG SÓC NỐI LƯỚI

## INDIRECT FIELD CONTROL OF THE GRID CONNECTED WIND TURBINE SQUIRREL CAGE GENERATOR SYSTEM

Phạm Thị Thùy Linh

Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 08/08/2021, Ngày chấp nhận đăng: 14/09/2021, Phản biện: TS. Nguyễn Ngọc Tuấn

**Tóm tắt:** Bài báo này trình bày một hệ thống điều khiển điện gió kết nối lưới điện với máy phát điện cảm ứng lồng sóc (SCIG). Hệ thống điều khiển dựa trên bộ chuyển đổi máy phát và bộ chuyển đổi lưới điện. Mô hình điều khiển bộ chuyển đổi phía máy phát và phía lưới được thực hiện trên phần mềm PSIM. Trong nghiên cứu này, tác giả đề xuất một phương pháp điều khiển từ thông gián tiếp, sử dụng mô hình điều khiển, để thu được điện áp đầu cuối, làm giảm số lượng cảm biến cần thiết và tiết kiệm chi phí tổng thể. Hiệu quả của phương pháp điều khiển đề xuất được kiểm chứng thông qua kết quả mô phỏng.

**Từ khóa:** Máy phát điện cảm ứng, điều khiển gián tiếp từ thông, tuabin gió.

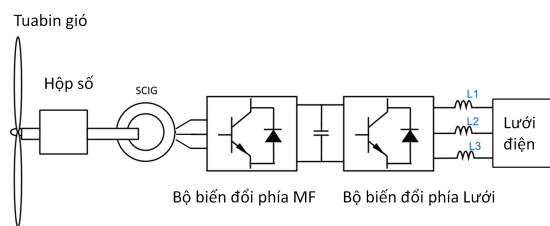
**Abstract:** This paper presents a wind power control system connected to the grid with a squirrel cage induction generator (SCIG). The control system is based on generator converter and grid converter. The vector control of generator side and grid side converters is done on PSIM software. In this study, the author proposes an indirect field control method, using a control model, to obtain the terminal voltage, reducing the number of required sensors and saving the overall cost. The effectiveness of the proposed control method is verified through simulation results.

**Keywords:** SCIG, indirect field control, wind turbine.

### I. MỞ ĐẦU

Năng lượng gió là một trong những nguồn năng lượng tái tạo có triển vọng nhất hiện nay do những tiến bộ đã đạt được trong những thập kỷ qua. Các hệ thống điện gió có thể bao gồm máy phát tốc độ cố định hoặc tốc độ thay đổi, và có thể là kiểu cảm ứng (cảm ứng nguồn kép lồng sóc và cảm ứng lồng sóc) hoặc máy đồng bộ (nam châm vĩnh cửu và rôto dây quấn). Máy phát điện cảm ứng lồng sóc (SCIG) đã được sử dụng làm máy phát cho hệ thống tốc độ cố định, hoặc cho các hệ thống công suất nhỏ [1]. Tuy nhiên, chúng cũng có thể được áp dụng cho máy phát tốc độ thay đổi, trao đổi toàn bộ công suất giữa máy phát và lưới điện qua hệ thống bộ chuyển đổi [2]. Ưu điểm chính của việc sử dụng hệ thống này là chi phí thấp, độ tin cậy tốt và hoạt động mạnh mẽ. Nhược điểm chính của nó so với máy phát điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSG) là khó chế tạo máy phát điện cảm ứng lồng sóc đa cực. Điều khiển SCIG có thể được thực hiện bằng các cách tiếp cận khác nhau: điều khiển vô hướng hoặc vectơ, điều khiển tựa từ thông trực tiếp hoặc gián tiếp, định hướng trường

rôto hoặc stato [3-5]. Điều khiển vô hướng [6] đơn giản dễ thực hiện, nhưng không ổn định. Điều khiển vectơ trực tiếp có hiệu suất tốt hơn và yêu cầu các giá trị thông lượng để xác định và kiểm soát các hướng từ trường tham chiếu. Tuy nhiên, điều này có nghĩa là cần phải sử dụng cảm biến hiệu ứng trường, thực tế điều đó khá tốn kém [7]. Phương pháp định hướng trường gián tiếp nhạy hơn với các thông số máy nhưng không cần đến cảm biến thông lượng trực tiếp [8]. Bài báo này đề xuất một chiến lược điều khiển véc tơ gián tiếp ít nhạy hơn đối với các thông số máy phát so với sơ đồ thông thường [9]. Dòng điện được quy về một trục đồng bộ dq, đồng hướng với vectơ từ thông của rôto, đối với bộ biến đổi phía máy phát. Mô hình hóa hệ thống điện gió và mô phỏng được thực hiện trong PSIM, trong đó máy phát điện được sử dụng là máy phát điện cảm ứng lồng sóc (SCIG) 2kW.



Hình 1: Hệ thống điện gió

## II. PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN BỘ BIẾN ĐỔI MÁY PHÁT

Hệ thống được phân tích có thể được nhìn thấy trong Hình 1. Máy phát điện cảm ứng lồng sóc (SCIG) được gắn vào tuabin gió nhờ hộp giảm tốc. Các cuộn dây stato SCIG được kết nối với một bộ chuyển đổi toàn công suất. Tua bin gió có nhiệm vụ biến đổi sức gió thành động năng. Công suất tuabin gió có thể được xác định bằng cách sử dụng phương trình sau [10]:

$$P_{cov} = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v_w^3 \quad (1)$$

Trong đó hệ số công suất  $C_p$  phụ thuộc vào góc cánh quạt  $\beta$  và tỷ số tốc độ  $\lambda$ .

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad \lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Với: Các thông số  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  và  $C_6$  phụ thuộc vào đặc tính khí động học của tuabin.

Phương trình động lực học của hệ thống được thể hiện bằng phương trình sau:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2J} (M_d - M_{cov}) \quad (3)$$

Trong đó:  $J$  là tổng của các mô men quán tính.

Sự phát triển trong các chiến lược điều khiển do việc sử dụng máy tính thời gian thực đã cho phép trong vài năm trở lại đây, việc sử dụng máy phát

điện cảm ứng không đồng bộ dễ dàng hơn. Hầu hết các hệ thống điều khiển sử dụng một trong hai kỹ thuật sau:

- Kiểm soát thông lượng không đổi
- Điều khiển vector

Phương pháp định hướng trường là một trong những phương pháp điều khiển cho các hệ truyền động hiệu suất cao. Đặc biệt, đối với máy điện cảm ứng sử dụng trong các nhà máy điện gió đô thị. Điều khiển hướng từ thông gián tiếp là một sơ đồ đơn giản và có độ tin cậy cao đã trở thành một tiêu chuẩn công nghiệp. Loại điều khiển này ổn định tiệm cận với điều kiện biết chính xác điện trở của rôto động cơ.

Nguyên tắc điều khiển mômen điện từ theo phương pháp định hướng từ thông dựa trên kiến thức về mô hình động lực học của máy điện.

### a. Mô hình máy phát điện

Mô hình điện của máy phát điện cảm ứng SCIG được mô tả như sau:

- Đối với stato:

$$V_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} \quad (4)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq}$$

- Đối với roto:

$$V_{rd} = R_r i_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} \quad (5)$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq}$$

Với  $i_{sd}, i_{sq}$  là các dòng điện stato trục d và trục q;  $i_{rd}, i_{rq}$  là các dòng điện rôto trục d và trục q;  $\varphi_{sd}$  và  $\varphi_{sq}$  là các từ trường stato trục d và trục q;  $\varphi_{rd}$  và  $\varphi_{rq}$  là các từ trường roto trục d và trục q;  $V_{sd}$  và  $V_{sq}$  là các từ điện áp stato trục d và trục q;  $V_{rd}$  và  $V_{rq}$  là các từ điện áp roto trục d và trục q. Ngoài ra,  $R_s$

$R_s, R_r, R_r$  là điện trở của các pha của stato và rôto;  $\omega_r, \omega_r$  và  $\omega_s, \omega_s$  là tốc độ quay của rôto và tốc độ điện của stato.

Phương trình (5) cho thấy sự liên hệ giữa  $V_{sd}$  và  $\phi_{sd}$  và giữa  $V_{sq}$  và  $\phi_{sd}$ .

• Đối với từ thông:

$$\begin{aligned}\phi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \phi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \phi_{rd} &= L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \phi_{rq} &= L_r i_{rq} + L_m i_{sq}\end{aligned}\quad (6)$$

Vậy phương trình (5) trở thành:

$$\begin{aligned}V_{sd} &= R_s i_{sd} + L_s \frac{d}{dt} i_{sd} + L_m \frac{d}{dt} i_{rd} - \omega_s (L_s i_{sq} + L_m i_{rq}) \\ V_{sq} &= R_s i_{sq} + L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + L_m \frac{d}{dt} i_{rq} + \omega_s (L_s i_{sd} + L_m i_{rd})\end{aligned}\quad (7)$$

Trong đó:  $L_m$  là hệ cảm và  $L_s, L_r$  lần lượt là độ tự cảm của stato và của rôto. Mô men điện từ của máy phát cảm ứng được biểu diễn bởi công thức sau:

$$M_d = p \frac{L_m}{L_r} (\phi_{rd} i_{sq} - \phi_{rq} i_{sd}) \quad (8)$$

Trong đó:  $p$  là số đôi cực của máy phát.

#### b. Điều khiển hướng dòng điện

Có thể quan sát thấy sự kết hợp giữa dòng điện stato và các thành phần của từ thông rôto. Tuy nhiên, trong các ứng dụng yêu cầu biểu diễn động lực học, cần phải điều khiển giá trị tức thời của mômen.

Nguyên tắc của điều khiển hướng dòng bao gồm tách mômen và dòng điện bằng cách triệt tiêu

thành phần thông lượng trên trục  $q$  hoặc  $\phi_{rq} = 0$ . Do đó, sẽ có:

$$\begin{cases} \phi_{rq} = 0 \\ \phi_{rd} = \phi_r \end{cases} \quad (9)$$

Lúc đó:

$$M_d = p \frac{L_m}{L_r} \phi_{rd} i_{sq} \quad (10)$$

Sự điều chỉnh của từ thông có thể trực tiếp hoặc gián tiếp:

- Điều khiển trực tiếp: thông lượng được điều khiển bởi một mạch vòng kín. Do đó, nó phải được đo lường hoặc ước tính.
- Điều khiển gián tiếp: thông lượng không được đo lường hoặc ước tính. Nó được thiết lập trong một mạch vòng hở.

#### c. Ước lượng các biến điều khiển

Ta phải đi tìm các tham số ước lượng từ các biến đo được.

##### c.1. Ước lượng $\phi_{rd}$

Sử dụng phương trình của từ thông rôto ta có:

$$\phi_{rd} = \frac{L_m}{1 + p \cdot \tau_R} \cdot i_{sd} \quad (11)$$

Trong đó hằng số thời gian rôto:  $\tau_R = \frac{L_R}{R_R}$

##### c.2. Ước lượng $\omega_{slip}, \theta_r, \theta_s$ .

Sử dụng các phương trình trước, ta có thể chỉ ra rằng tốc độ trượt:

$$\omega_{slip} = \omega_s - \omega_r = \frac{L_m}{\tau_R} \cdot \frac{i_{sq}}{\phi_r} \quad (12)$$

Góc  $\theta_s$  của stato:

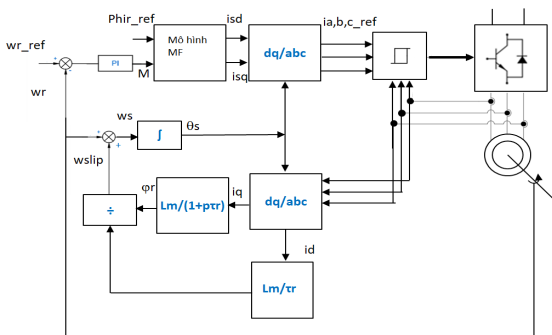
$$\theta_s = \int \omega_s dt = \int (\omega_r + \omega_{slip}) dt = \theta_r + \theta_{slip} \quad (13)$$

c.3. Ước lượng mô men điện từ  
Biểu thức ước lượng của Mđ từ phương trình sau:

$$M_d^* = p \frac{L_m}{L_r} \varphi_{rd}^* i_{sq} \quad (14)$$

Rõ ràng là nhược điểm chính của các ước lượng này liên quan đến sự biến đổi của các thông số theo nhiệt độ, tần số (điện trở rôto) hoặc hiện tượng bão hòa từ.

Với nguyên lý điều khiển gián tiếp đề xuất dòng rôto được đặt trong một vòng lặp hở như một biến điều khiển như mô tả ở hình 2:



Hình 2 Mạch điều khiển bộ biến đổi phía máy phát  
Điều khiển có được bằng cách kiểm soát các dòng điện stato và do đó kiểm soát dòng điện isd và isq. Sử dụng giá trị mong muốn của Mđ (mômen điện từ) và giá trị danh định của từ thông, mô hình máy phát có thể được sử dụng để tái tạo lại dòng isd và isq (tương ứng là Isd\_ref và Isq\_ref). Các giá trị này được so sánh với các giá trị đo được để tạo ra tín hiệu điều khiển của bộ nghịch lưu nguồn áp (thông qua nghịch đảo biến đổi Park).

Tần số góc của rôto cũng được tái tạo để đảm bảo tính tự điều khiển của máy và tham chiếu góc ( $\omega_s = p\Omega + \omega_r$ ). Cần lưu ý rằng trong thực tế, ta thường sử dụng một cảm biến vị trí (encoder) cho phép hiệu chỉnh góc rôto so với  $\theta_s$ .

Giả sử rằng việc điều khiển vectơ có hiệu quả:

- $I_{sd\_ref}$  được sử dụng để thiết lập thông lượng.
- $I_{sq\_ref}$  được sử dụng để đặt mô-men.

Bảng 1: Các thông số mạch điều khiển bộ biến đổi phía máy phát

Các tham số mạch điều chỉnh	Kp	Ki
-----------------------------	----	----

Điều khiển tốc độ	6	100
-------------------	---	-----

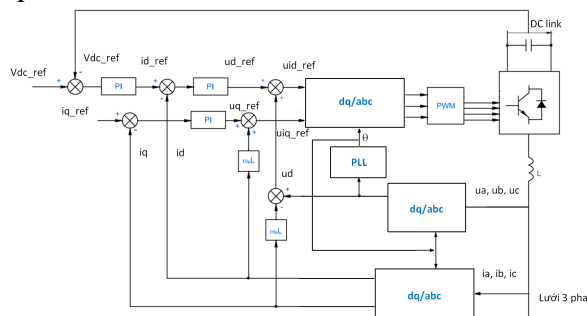
Sau khối điều khiển gián tiếp từ thông, ta sẽ xác định được tham chiếu dòng điện ba pha phía máy phát. Sai lệch giữa hai tín hiệu dòng ba pha tham chiếu  $i_{a,b,c\_ref}$  và các dòng điện  $i_{a,b,c}$  đo sẽ được kết nối với khâu điều khiển dòng trễ có dải điều chỉnh cố định, điều này sẽ tạo ra tín hiệu điều khiển cho bộ biến đổi phía máy phát.

### III. ĐIỀU KHIỂN BỘ BIẾN ĐỔI PHÍA LƯỚI

Điều khiển hệ thống điện lưới được cấu hình để điều khiển điện áp bus một chiều và công suất phản kháng do bộ biến đổi phía lưới tiêu thụ hoặc cung cấp. Tham chiếu điện áp bus DC và mức điện áp lưới được sử dụng để xác định tham chiếu dòng điện, xác định được điện áp đặt lên phía lưới.

Hình 3 mô tả sơ đồ khối của điều khiển phía lưới. Bộ chuyển đổi phía lưới là một bộ nghịch lưu ba pha DC/AC, điều khiển điện áp bus DC không đổi và dòng điện đưa vào lưới. Trong đó bao gồm mạch vòng điều khiển dòng điện và mạch vòng điều khiển điện áp.

PLL (vòng khóa pha) chịu trách nhiệm duy trì sự đồng bộ giữa điện áp của lưới và điện áp do nghịch lưu tạo ra, tạo thành một góc  $\theta$  cùng pha với điện áp lưới, trong đó UA, UB và UC là điện áp lưới.



Hình 3 Mạch điều khiển bộ biến đổi phía lưới  
Mạch vòng điều khiển dòng điện  $I_d$  (dòng điện trục d) hiển thị  $I_{d\_ref}$  (dòng điện tham chiếu trục d) như một tham chiếu từ vòng điều khiển điện áp bus DC. Trong vòng điều khiển dòng điện  $I_q$  (dòng điện trục q), giả định  $I_{q\_ref}$  (dòng điện tham chiếu trục q) bằng không, làm cho bộ chuyển đổi hoạt động với hệ số công suất bằng một  
Bảng 2: Các thông số mạch điều khiển bộ biến đổi phía lưới

Các tham số mạch điều chỉnh	$K_p$	$K_i$
Điều khiển dòng $I_d$	10	0,0625
Điều khiển dòng $I_q$	10	0,0625
Điều khiển điện áp bus DC	0,25	

#### IV. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

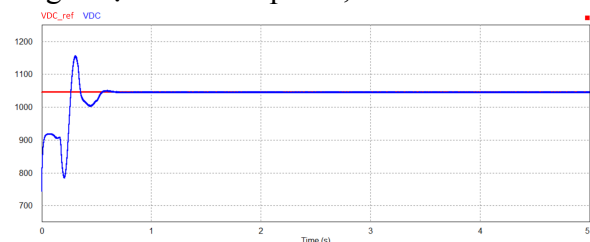
Hệ thống điện gió như chỉ ra ở Hình 1 được thực hiện trong phần mềm PSIM. Các tham số hệ thống được sử dụng trong mô phỏng được thể hiện trong Bảng 3. Tần số chuyển mạch của bộ chuyển đổi phía lưới là 2,5 kHz.

Bảng 3: Các thông số mô phỏng

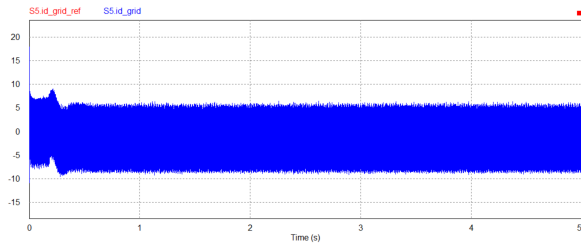
Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Công suất danh định	P <sub>dm</sub>	20000	W

Tốc độ góc định mức	$\omega_{dm}$	10	m/s
Tỷ lệ truyền		50	
Điện trở stato	$R_s$	0,09	$\Omega$
Điện cảm stato	$L_s$	0,9	mH
Điện trở roto	$R_r$	0,23	$\Omega$
Điện cảm roto	$L_r$	0,9	mH
Hỗ cảm	$L_m$	35	mH

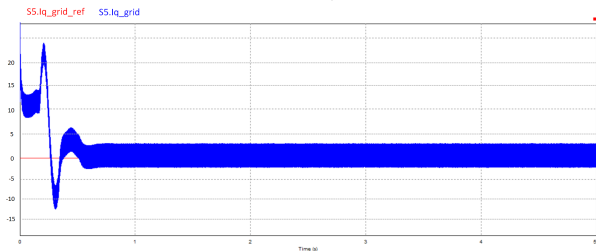
Điều khiển phía lưới bao gồm các thành phần: điều khiển điện áp bus DC và điều khiển dòng điện. Hình 4, 5 và 6 cho thấy các kết quả thu được đối với điều khiển điện áp bus DC và điều khiển dòng điện. Hình 4 cho thấy điện áp tham chiếu của bus DC và điện áp đo được trên bus DC. Kết quả cho thấy rằng điều khiển điện áp bus DC vẫn ổn định và được điều chỉnh ở điện áp tham chiếu 1050V. Thời gian đạt giá trị xác lập tương đối ngắn có giá trị nhỏ hơn 1s và độ vọt của điện áp có giá trị khá nhỏ xấp xỉ 1,9%.



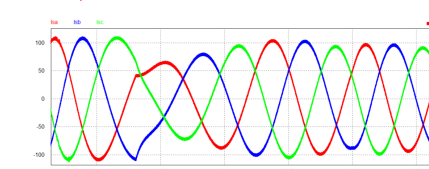
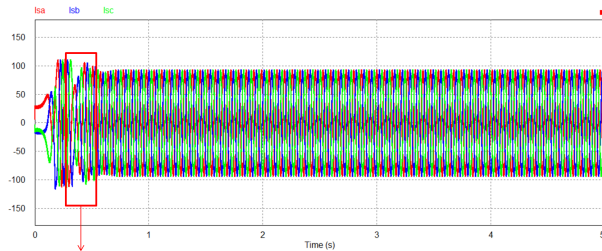
Hình 4 Điện áp tham chiếu và điện áp đo của bus một chiều



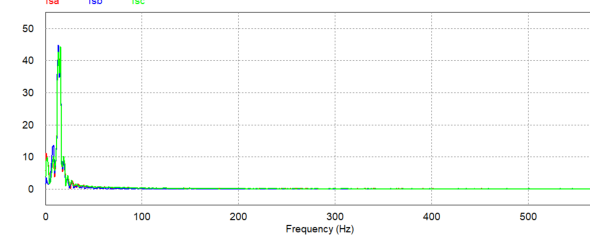
Hình 5 Dòng điện tham chiếu và đo trực d của lưới điện



Hình 6 Dòng điện tham chiếu và đo trực q của lưới điện



a)

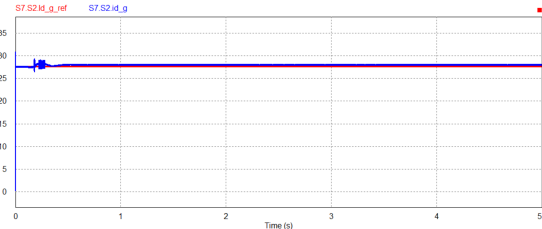


b)

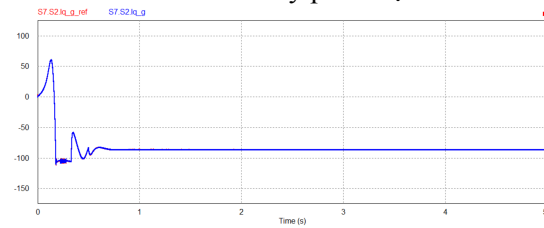
Hình 7 a) Dòng ba pha phía lưới và b) THD dòng điện phía lưới

Hình 5 và 6 cho thấy các phản hồi của điều khiển dòng phía lưới,  $i_d$  và  $i_q$ , bám theo các giá trị tham chiếu của chúng,  $i_{d\_grid\_ref}$  và  $i_{q\_grid\_ref}$ ; cho thấy sự hoạt động tốt của điều khiển. Dòng điện  $i_q$  được duy trì ở 0A, giữ cho công suất phản kháng đưa lên lưới bằng 0, là công suất phản kháng do  $i_q$  điều khiển. Kết quả dòng điện ba pha phía lưới  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  được trình bày ở hình 7a, tính toán

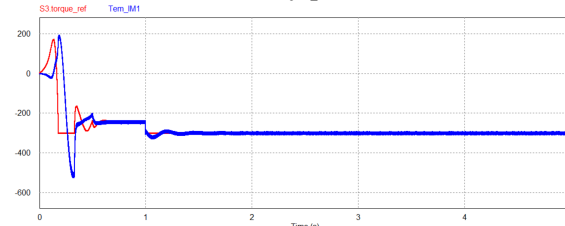
THD dòng điện cho kết quả rất tích cực 1,4% đảm bảo tiêu chuẩn nối lưới. Hình 8 và 9 minh họa dòng điện từ hóa đo được của máy phát điện và tham chiếu của nó, và mômen đo được của máy phát và tham chiếu của nó (Hình 10). Như có thể thấy, dòng điện từ hóa và mô-men bám theo các tham chiếu tương ứng, điều này chứng tỏ sự hoạt động phù hợp của bộ điều khiển. Ta cũng quan sát thấy mômen quay thay đổi theo sự biến thiên của tốc độ máy phát.



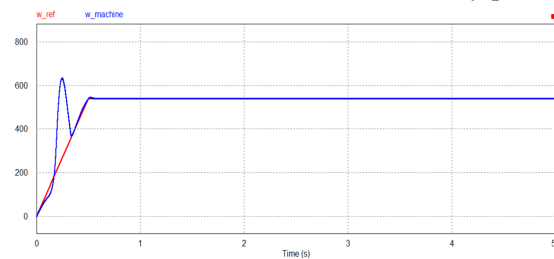
Hình 8 Dòng điện stato tham chiếu và đo trực d của máy phát điện



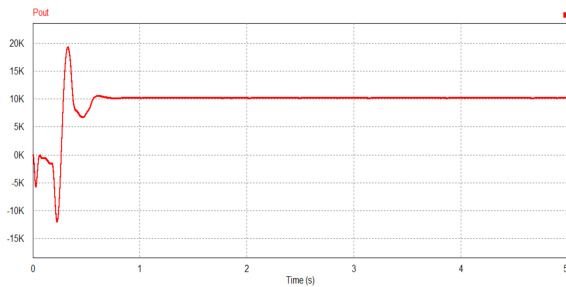
Hình 9 Dòng điện stato tham chiếu và đo trực q của máy phát điện



Hình 10 Mô men tham chiếu và đo của máy phát điện



Hình 11 Tốc độ tham chiếu và đo của máy phát điện



Hình 12 Công suất phát lên lưới của máy phát điện

Hình 12 có thể quan sát được sự khác nhau của các giá trị công suất trong quá trình vận hành của hệ thống. Công suất tăng khi tốc độ tăng và kết quả cho thấy cho thấy tốc độ vận hành của máy phát càng cao thì công suất phát vào lưới càng cao (Hình 11 và Hình 12).

## VI. KẾT LUẬN

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. A. Sikorski, A. Kuzma, Cooperation of induction squirrel-cage generator with grid connected ac/dc/ac converter, Bulletin of the Polish Academy of Sciences; Technical Sciences 57 (2009) 317–322.
2. N. Caliao, Dynamic modeling and control of fully rated converter wind turbines, Renewable Energy 36 (8) (2011) 2287–2297.
3. Rosmin, N., & Watson, S. J. (2012). Performance analysis of indirect vector control algorithms for small-sized wind turbine induction generators. Energy Procedia, 14, 964–970.
4. Ismael. A. de Azevedo, Luciano. S. Barros, Caio. D. Cunha, Model Reference Adaptive Control for Squirrel-Cage Induction Generator-Based Wind Energy Conversion Systems, International Conference on Power Systems Transients (IPST2019) in Perpignan, France June 17-20, 2019.
5. Nicholas Hawkins, Bhagyashri Bhagwat and Michael L. McIntyre, Nonlinear Current-Mode Control of SCIG Wind Turbines, Energies 2021, 14, 55.
6. V. Vongmanee, Emulator of wind turbine generator using dual inverter controlled squirrel-cage induction motor, in: The Eighth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Taipei, Taiwan, 2009.
7. R. Leidhold, G. Garca, M.I. Valla, Field-oriented controlled induction generator with loss minimization, IEEE Transactions on Industrial Electronics 49 (2002) 147–156.
8. P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, second ed., IEEE Press, 2002.
9. N. Caliao, Dynamic modelling and control of fully rated converter wind turbines, Renewable Energy 36 (8) (2011) 2287–2297
10. Granza, M. H., Voltolini, H., Ivanqui, J., & Miranda, P. L. K. (2014). Wind power generation control system with squirrel cage induction generator. 2014 11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications.

**Pham Thi Thuy Linh** received the Master degree from Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Hydraulique de Toulouse, Toulouse, France in 2008 and PhD degree from Institut National Polytechnique de Toulouse, France in 2011. She works at Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie, Toulouse proposed a solution of new converter more reliable and performance for the electrical system in the new version of Airbus. After then, she worked at Strasbourg, France in the company It link System which cooperates with the company Socomec. Here, she worked in the team of developers of the new versions of Uninterruptible Power Supply.



She is actually Lecturer and Researcher at Electric Power University, Hanoi, Vietnam working in the area of multilevel converters for high power and high performance applications. Her fields of interest are power electronics, series multicell converters for high power and high performance application, digital control signal, and diagnostic of converter.