

# NGHIÊN CỨU PHƯƠNG PHÁP HÒA ĐỒNG BỘ BẰNG ĐIỆN TRỞ ẢO CHO HỆ THỐNG ĐIỆN GIÓ SỬ DỤNG MÁY PHÁT ĐIỆN KHÔNG ĐỒNG BỘ NGUỒN KÉP

## STUDY ON SYNCHRONIZATION METHOD USING VIRTUAL RESISTANCE FOR DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR BASED WIND POWER SYSTEM

Vũ Hoàng Giang\*

Trường Đại học Điện lực<sup>1</sup>

\*Tác giả liên hệ: giangvh@epu.edu.vn

(Nhận bài: 15/6/2022; Chấp nhận đăng: 12/9/2022)

**Tóm tắt** - Hòa đồng bộ là bước vận hành quan trọng cần được thực hiện đối với máy phát điện trong hệ thống điện gió nối lưới. Yêu cầu của quá trình này là không gây ra dòng điện quá độ có giá trị lớn làm ảnh hưởng tới máy phát điện và chế độ vận hành bình thường của lưới điện. Bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu sơ đồ điều khiển hệ thống điện gió và phân tích hòa đồng bộ máy phát điện gió nguồn kép vào lưới điện với mạch điều khiển sử dụng điện trở ảo phía rô to. Mạch điều khiển được thiết kế tạo ra điện áp rô to phù hợp kích thích cho máy phát điện để hạn chế dòng điện quá độ phía stato trong quá trình hòa đồng bộ. Sau đó, máy phát điện được đưa vào làm việc ở chế độ điều khiển tốc độ quay. Kết quả mô phỏng cho thấy đây là phương pháp đơn giản với dòng điện quá độ quan sát được có biên độ nhỏ và có thể điều chỉnh theo giá trị của điện trở.

**Từ khóa** - Điện trở ảo; Hòa đồng bộ; Máy phát điện không đồng bộ nguồn kép (DFIG); Tua bin gió.

### 1. Đặt vấn đề

Cùng với năng lượng mặt trời, năng lượng gió được xem là nguồn năng lượng tái tạo có tiềm năng phát triển mạnh với tổng công suất lắp đặt lớn ở nhiều quốc gia trên thế giới trong đó có Việt Nam. Theo thống kê của hiệp hội năng lượng gió quốc tế (GWEC) năm 2021, tính đến năm 2020 tổng công suất lắp đặt toàn cầu về điện gió đạt 743 GW [1] và được dự báo tiếp tục tăng nhanh trong các năm tới. Hiện nay, hai cấu hình hệ thống điện gió phổ biến sử dụng máy phát điện không đồng bộ nguồn kép (DFIG), chiếm 50% thị phần điện gió [2], và máy phát điện đồng bộ kích thích nam châm vĩnh cửu (PMSG).

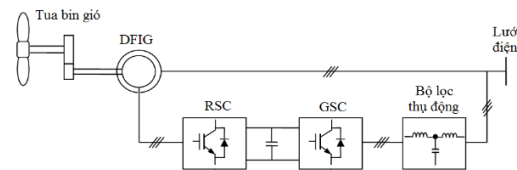
Cấu trúc của hệ thống điện gió sử dụng DFIG được thể hiện trên Hình 1, trong đó máy phát điện được nối tới lưới điện từ cả hai phía stato và rô to. Ưu điểm của cấu trúc này là có thể duy trì tần số của điện áp phát ra đồng bộ với tần số của lưới điện trong điều kiện biến động về tốc độ gió. Hơn nữa, bộ biến đổi back-to-back và bộ lọc thụ động nối tới mạch rô to có chi phí thấp vì được thiết kế với công suất định mức nhỏ, vào khoảng 25% công suất định mức của hệ thống [3].

Giống như nhiều loại máy phát điện đồng bộ truyền thống trong các nhà máy thủy điện và nhiệt điện, các máy phát điện gió cần trải qua bước vận hành hòa đồng bộ để làm việc song song với lưới điện. Yêu cầu cơ bản của quá trình này là đảm bảo không gây ra xung dòng lớn trong máy

**Abstract** - Synchronization is an important operation step that is required for the grid-connected wind power generators. The requirement of this process is not to cause a large transient current that affects the generator as well as the normal operation of the power grid. This paper presents the research on control diagram of a wind power system and analysis of the synchronization method of the doubly-fed induction generator into the power grid with a control circuit using rotor virtual resistors. The diagram is designed to generate an appropriate rotor voltage to excite the generator to restrain the stator transient current during the synchronization operation. After that, the generator is put to operate in the speed control mode. Simulation results show that this is a simple method with observed transient currents having small amplitude and can be adjusted according to the value of the resistance.

**Key words** - Virtual resistance; Synchronization; Doubly-fed induction generator (DFIG); Wind turbine.

và không gây ra các tác động xấu tới chế độ làm việc bình thường của lưới điện kết nối.



**Hình 1.** Sơ đồ cấu trúc của hệ thống điện gió với DFIG [4]

Nhiều nghiên cứu đã đề xuất các phương pháp hòa đồng bộ khác nhau cho các nguồn điện phân tán nói chung [5], và các máy phát điện gió nói riêng [6], [7]. Mạch bộ biến đổi back-to-back phía rô to được sử dụng để điều chỉnh từ thông rô to và tạo ra điện áp cảm ứng phía stato đồng bộ với điện áp của lưới điện [7]. Để bù góc lệch pha giữa hai điện áp kể trên, thành phần bù độ lệch pha được cộng vào góc trượt. Thành phần này được xác định thông qua điều khiển thành phần dọc trục của điện áp stato bằng không và bằng thành phần dọc trục của điện áp lưới điện.

Bài báo giới thiệu kết quả xây dựng hệ thống điện gió sử dụng DFIG, công suất nhỏ cỡ kW, làm việc với hai chế độ: Hòa đồng bộ bằng điện trở ảo và chế độ điều khiển tốc độ thông qua bộ biến đổi phía rô to (RSC). Hệ thống được xây dựng cho phép khảo sát hoạt động của hệ thống điện gió với hai chế độ động cơ và máy phát điện ở vùng tốc độ dưới hoặc trên đồng bộ.

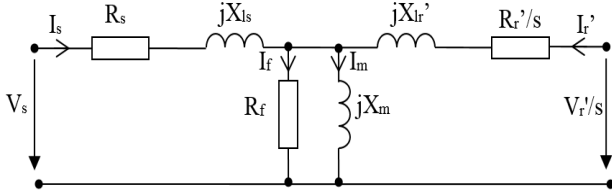
<sup>1</sup> Electric Power University (Vu Hoang Giang)



0. Vòng trong là bộ điều khiển PI cho các thành phần của dòng điện rô to kết hợp với phản hồi tín hiệu feed-forward [8].

#### 2.4. Chế độ hòa đồng bộ

Phần sơ đồ khối đơn giản nằm trong hình chữ nhật nét đứt của Hình 3 được sử dụng để điều khiển RSC trong quá trình hòa đồng bộ.



Hình 4. Mạch điện tương đương ở chế độ xác lập của DFIG

Thông thường, dòng điện mở máy theo phương pháp trực tiếp có giá trị khoảng từ 5 đến 7 lần dòng điện định mức [11]. Bên cạnh tác động lên bản thân máy điện, dòng điện lớn còn dẫn đến ảnh hưởng về điện áp đối với lưới điện được kết nối. Ở chế độ máy phát, hệ thống đang xét có công suất nhỏ và lưới điện được coi như lý tưởng thì stato được điều khiển với vòng điều khiển dòng điện để đồng bộ và nối lưới. Trong trường hợp thực tế với hệ thống điện gió có công suất lớn hơn, máy cắt đầu cực được đóng vào ứng với trạng thái điện áp, tần số, thứ tự pha đã được thiết lập, nên giá trị dòng điện hòa đồng bộ tùy thuộc vào độ lệch các trạng thái này giữa máy phát và lưới điện. Khi đó thường đòi hỏi thiết kế thêm một vòng điều khiển điện áp stato để đảm bảo điều kiện hòa đồng bộ và tránh được dòng điện quá độ lớn.

Từ sơ đồ tương đương của DFIG trong Hình 4 có thể thấy, nếu điều khiển bộ biến đổi RSC để tạo ra điện áp  $\underline{V}_r = -R\underline{I}_r$ , thì có thể tạo ra mạch điện tương đương với điện trở phụ có giá trị bằng R trong mạch rô to. Phương pháp sử dụng điện trở phụ để mở máy và điều chỉnh tốc độ quay của động cơ điện không đồng bộ rất phổ biến hiện nay [11]. Nhờ có điện trở phụ mà dòng điện mở máy được hạn chế đáng kể trong quá trình khởi động. Giá trị của điện trở phụ được lựa chọn tùy theo mức độ mong muốn giảm giá trị dòng điện mở máy trong stato. Ở chế độ động cơ điện, điện trở có giá trị càng lớn thì dòng điện mở máy càng được hạn chế nhưng khi tốc độ tăng lên thì mô men của máy bị giảm.

Ở chế độ máy phát điện, giá trị của điện trở được lựa chọn để điện áp của stato phù hợp với điện áp của lưới điện và được tính theo công thức [6], [10]:

$$R = \frac{v_{\text{grid}q}}{\omega_{\text{grid}}L_m} \quad (15)$$

Trong đó,  $v_{\text{grid}q}$  là thành phần ngang trục của điện áp lưới điện,  $v_{\text{grid}q} = |v_{\text{grid}}| \sin \alpha$ ;  $\omega_{\text{grid}}$  là tần số góc của lưới điện và  $L_m$  là thông số hỗ cảm của máy điện.

### 3. Kết quả mô phỏng và bàn luận

Mô phỏng được thực hiện ứng với cấu trúc Hình 2, trong đó:

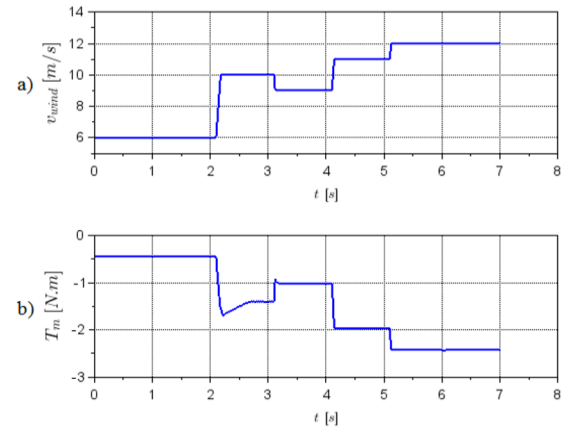
- DFIG được mô phỏng theo các phương trình (1) – (10), thông số của máy được cho trong Phụ lục;
- Tua bin được gió được mô phỏng tạo ra mô men cơ theo các phương trình (11) – (14).

#### 3.1. Chế độ máy phát điện

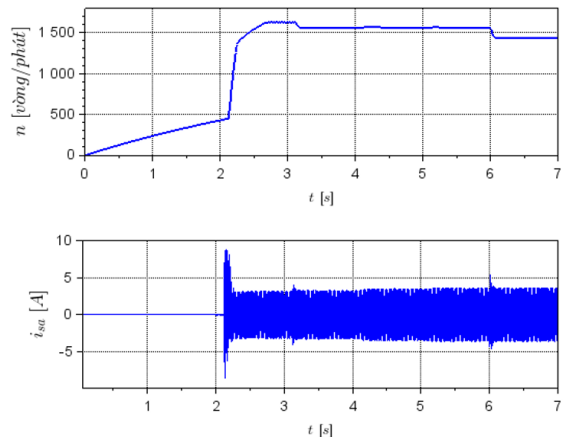
Trình tự vận hành của hệ thống như sau, Hình 2:

- Đóng CB1;
- Kích hoạt bộ điều khiển GSC; Điện áp của dc-link được điều khiển tới giá trị định mức;
- Kích hoạt RSC, sơ đồ điều khiển Hình 3 làm việc ở chế độ hòa đồng bộ ( $v_{\text{dqr}^*}$  đang được nối tới vị trí 1). Khi tốc độ của máy điện hoặc tốc độ gió lớn hơn giá trị nhất định thì CB2 được đóng vào để nối DFIG với lưới điện;
- DFIG chuyển sang làm việc ở chế độ điều khiển tốc độ ( $v_{\text{dqr}^*}$  đang được nối tới vị trí 2).

Giả thiết tốc độ gió biến thiên như Hình 5a, tốc độ gió được duy trì bằng 6 m/s trong khoảng (0-2,1)s, sau đó trong mỗi 1s tiếp theo tăng lên 10 m/s, giảm xuống 9 m/s và tăng trở lại 11 m/s. Kết quả là mô men cơ tạo ra bởi tua bin gió cũng biến thiên tương ứng, Hình 5b. Chú ý, ở chế độ máy phát, mô men cơ có giá trị âm.



Hình 5. Tốc độ gió và mô men tạo ra trên trục DFIG

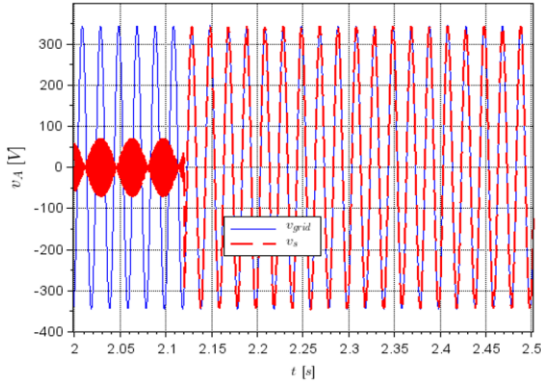


Hình 6. Tốc độ của rô to và dòng điện stato pha A của DFIG

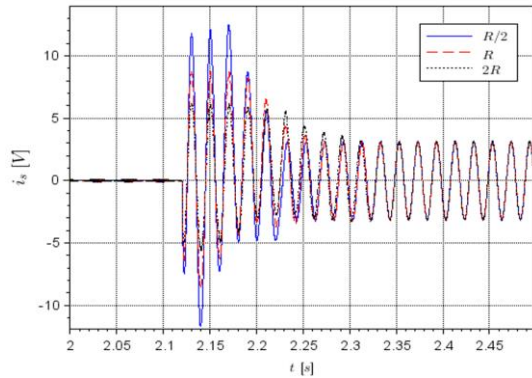
Trong mô phỏng, DFIG bắt đầu được hòa đồng bộ khi tốc độ gió vượt quá 7 m/s. Lưu ý giá trị này có thể lựa chọn bất kỳ trong mô phỏng theo yêu cầu vùng tốc độ gió bắt đầu hoạt động. Như vậy trong khoảng (0-2,1) s đầu tiên, máy phát tăng tốc và đồng thời được kích thích từ mạch rô to ứng với chế độ hòa đồng bộ theo trình tự ở trên. Tại thời điểm  $t = 2,1$  s, CB2 được đóng vào để hòa đồng bộ, tốc độ của máy tiếp tục tăng và được duy trì trong 1 s, sau đó chuyển sang chế độ điều chỉnh tốc độ. Sự biến thiên của

tốc độ rô to và dòng điện stato được thể hiện trên Hình 6.

Tại thời điểm đóng CB2, dòng điện tăng cao sau đó giảm dần và ổn định ở giá trị xác lập. Tuy nhiên, điện áp ghi nhận được không có sự thay đổi đột biến như được thể hiện trên Hình 7. Kết quả thu được về điện áp có thể được lý giải một phần vì công suất của hệ thống điện gió nhỏ nên không gây ra biến động lớn tới điện áp của lưới điện.



Hình 7. Điện áp lưới điện pha A và điện áp stato trong quá trình hòa đồng bộ



Hình 8. So sánh dòng điện stato pha A khi hòa đồng bộ với các giá trị điện trở ảo khác nhau: R/2; R và 2R (chế độ máy phát điện)

Như vậy có thể thấy, vấn đề chủ yếu đối với máy phát điện gió công suất bé là xung dòng điện chạy trong stato. Để đánh giá về ảnh hưởng của giá trị điện ảo tính theo công thức (15), mô phỏng được lập lại cho 3 trường hợp với các giá trị tương ứng là R/2, R và 2R. Kết quả thu được thể hiện trên Hình 8. Có thể thấy điện trở có giá trị càng lớn thì biên độ của dòng điện khi đóng CB2 vào càng được hạn chế nhưng thời gian quá độ để tiến tới giá trị xác lập dài hơn. Thống kê so sánh ba trường hợp mô phỏng về giá trị đỉnh của dòng điện quá độ và thời gian quá độ được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. So sánh giá trị đỉnh và thời gian quá độ của dòng điện quá độ

Giá trị điện trở ảo	Giá trị đỉnh của dòng điện quá độ (A)	Thời gian quá độ (s)
R/2	12,51	0,11
R	8,77	0,13
2R	6,18	0,15

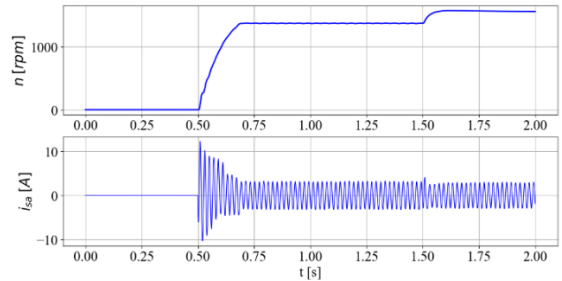
Từ kết quả của Bảng 1 có thể thấy giá trị điện trở ảo bằng R có thể dung hòa được hai yếu tố trên nên được khuyến nghị lựa chọn là thông số cho nhánh điều khiển dòng điện trở ảo để hòa đồng bộ.

### 3.2. Chế độ động cơ điện

Trình tự vận hành của hệ thống như sau, Hình 2:

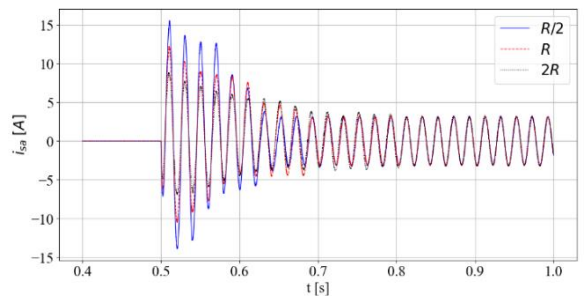
- Đóng CB1;
- Kích hoạt bộ điều khiển GSC; Điện áp của dc-link được điều khiển tới giá trị định mức;
- Kích hoạt RSC, sơ đồ điều khiển Hình 3 làm việc ở chế độ hòa đồng bộ. Đóng CB2 để nối DFIG với lưới điện. Khi đó  $v_{dq}^*$  đang được nối tới vị trí 1 trong Hình 3, ở mạch điều khiển đồng bộ.
- DFIG chuyển sang làm việc ở chế độ điều khiển tốc độ ( $v_{dq}^*$  đang được nối tới vị trí 2).

Khác với chế độ máy phát điện, DFIG được kích thích theo mạch rô to và máy vẫn ở trạng thái đứng yên. Khi đóng CB2 tại thời điểm  $t = 0,5$  s thì tốc độ bắt đầu tăng lên giống như quá trình khởi động động cơ không đồng bộ rô to dây quấn với điện trở phụ mắc ở mạch rô to. Quá trình ổn định được thiết lập trong khoảng 1 s, sau đó hệ thống chuyển sang chế độ chiều chỉnh tốc độ. Sự biến thiên của tốc độ rô to và dòng điện stato ứng với giá trị điện trở ảo R được thể hiện trên Hình 9.



Hình 9. Tín hiệu tốc độ rô to và dòng điện stato pha A trong quá trình khởi động

Tiến hành mô phỏng cho 3 trường hợp với các giá trị tương ứng là R/2, R và 2R, giống như ở chế độ máy phát điện. Nhận xét tương tự thu được ứng với kết quả dòng điện stato, pha A như trên Hình 10.

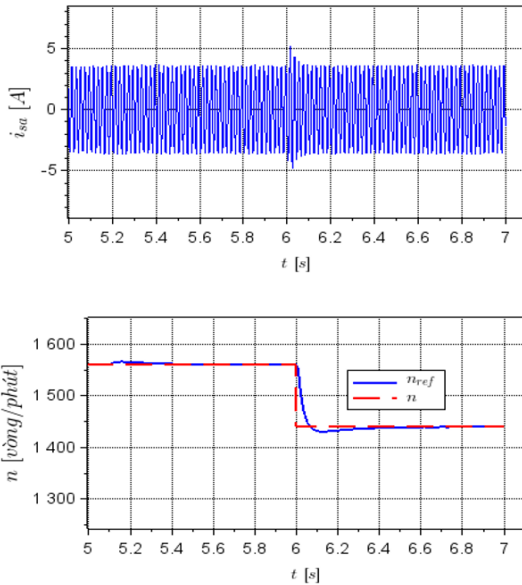


Hình 10. So sánh dòng điện stato pha A khi hòa đồng bộ với các giá trị điện trở ảo khác nhau: R/2; R và 2R (chế độ động cơ điện)

Sau khi máy phát điện đã được nối lưới, tốc độ của máy có thể được điều khiển theo giá trị đặt lớn hơn hoặc nhỏ hơn tốc độ đồng bộ. Kết quả mô phỏng minh họa đáp ứng của dòng điện và tốc độ ứng với giá trị đặt của tốc độ bằng 1560 (vòng/phút) trong khoảng (5-6) s và 1440 (vòng/phút) trong khoảng (6-7) s được thể hiện trên Hình 11.

Tóm lại, phương pháp hòa đồng bộ máy phát điện gió nguồn kép sử dụng điện trở ảo đã được phân tích chi tiết ở hai chế độ máy phát điện và động cơ điện. Thực chất, máy

phát điện được kích thích ban đầu theo mạch rô to để điện áp cảm ứng phía stato phù hợp trước khi đóng mạch nối lưới. Điện áp rô to được tạo ra tỷ lệ với dòng điện cùng phía tương đương với trường hợp sử dụng điện trở phụ để mở máy động cơ điện không đồng bộ rô to dây quấn.



Hình 11. Đáp ứng dòng điện stato và tốc độ quay ứng với hai chế độ trên đồng bộ và dưới đồng bộ

#### 4. Kết luận

Sơ đồ điều khiển hệ thống điện gió sử dụng máy phát điện nguồn kép đã được mô tả chi tiết trong bài. Ở chế độ xác lập, máy phát điện có thể làm việc ở chế độ điều chỉnh tốc độ quay với các giá trị đặt khác nhau: Trên đồng bộ hoặc dưới đồng bộ. Hơn nữa phân tích, tính toán ứng với bốn góc phân tử của mặt phẳng công suất tác dụng và công suất phản kháng ở hai phía stato và rô to có thể thực hiện được trên hệ thống đã xây dựng.

Kết quả mô phỏng và phân tích cho thấy, phương pháp hòa đồng bộ bằng điện trở ảo đơn giản và có thể áp dụng hiệu quả với máy phát điện gió, đặc biệt là trong các hệ thống có công suất thấp. Biên độ của dòng điện quá độ trong stato của máy có thể hạn chế theo giá trị điện trở ảo tương ứng.

Trên cơ sở hệ thống này, các hướng nghiên cứu triển vọng là tính toán phân tích các chế độ làm việc của hệ thống tua bin gió và đề xuất các phương pháp điều khiển nâng cao, xây dựng các hệ thống giám sát tình trạng của các phần tử trong hệ thống điện gió.

#### CÁC KÝ HIỆU

$v_{ds}, v_{qs}, v_{dr}, v_{qr}$ : Các thành phần điện áp trong hệ tọa độ đồng bộ dq;

$i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ : Các thành phần dòng điện trong hệ tọa độ đồng bộ dq;

$\Psi_{ds}, \Psi_{qs}, \Psi_{dr}, \Psi_{qr}$ : Các thành phần từ thông rô to trong hệ tọa độ đồng bộ dq;

$L_s, L_r, L_m$ : Điện cảm stato, rô to và từ hóa;

$R_s, R_r$ : Điện trở stato và rô to;

p: Số đôi cực của máy;

$\omega_e, \omega_r, \omega_{rm}$ : Tần số góc của lưới điện, tần số góc điện rô to và tần số góc cơ rô to;

$T_e$ : Mô men điện từ;

$T_m$ : Mô men cơ;

J: Hằng số quán tính;

$F_v$ : Hệ số ma sát.

Chỉ số dưới:

d, q: Đại lượng ứng với trục d, q của hệ tọa độ đồng bộ;

s, r: Đại lượng phía stato, rô to.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] GWEC, Global Wind Report, Global Wind Energy Council, 2021.
- [2] A. Abo-Khalil, A. Alghamdi, A. Eltamaly, M. Al-Saud, P. R. P., K. Sayed, G. Bindu and I. Tlili, "Design of State Feedback Current Controller for Fast Synchronization of DFIG in Wind Power Generation Systems", *Energies*, 12(12), 2019, 2427.
- [3] S. Muller, M. Deicke and R. W. D. Doncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines", *IEEE Industrial applications magazines*, 8(3), 2002, 26-33.
- [4] H.-G. Vu, "DC-link voltage control of voltage source converter by using PI controller with anti-windup", *Journal of Science and Technology, the University of Da Nang*, 11(1), 2018, 18-21.
- [5] A. V. Timbus, M. Liserre, R. Teodorescu and F. Blaabjerg, "Synchronization Methods for Three Phase Distributed Power Generation Systems. An Overview and Evaluation", in *IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, Dresden, Germany, 2005, 109-116.
- [6] G. Tapia, G. Santamaria, M. Telleria and A. Susperregui, "Methodology for Smooth Connection of Doubly Fed Induction Generators to the Grid", *IEEE transactions on energy conversion*, 24(4), 2009, 959-971.
- [7] A. G. Abo-Khalil, "Synchronization of DFIG output voltage to utility grid in wind power system", *Renewable Energy*, 44, 2012, 193-198.
- [8] R. Pena, J. Clare and G. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation", *IEE Proceedings-Electric power applications*, 143(3), 1996, 231-241.
- [9] Y.-M. Saint-Drenan, R. Besseau, M. Jansen, I. Staffell, A. Troccoli, L. Dubus, J. Schmidt, K. Gruber, S. G. Simoes and S. Heier, "A parametric model for wind turbine power curves incorporating environmental conditions", *Renewable Energy*, 157, 2020, 754-768.
- [10] J. L. Da Silva, R. G. De Oliveira, S. R. Silva, B. Rabelo and W. Hofmann, "A discussion about a start-up procedure of a doubly-fed induction generator system", in *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE/2008)*, Espoo, Finland. Helsinki University of Technology, 2008, 1-6.
- [11] V. G. Hanh, T. K. Hà, P. T. Thụ and N. V. Sáu, *Máy điện, tập 1*, Hà Nội: Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2005.

#### PHỤ LỤC

##### Thông số định mức của DFIG:

Công suất định mức	1500 W
Điện áp định mức stato (Y/ $\Delta$ )	400 V / 230 V
Dòng điện định mức stato (Y/ $\Delta$ )	4,4 A / 7,5 A
Điện áp định mức rô to (Y)	140 V
Dòng điện định mức rô to (Y)	6,5 A
Số đôi cực	p = 2
Hệ số công suất	0,75

##### Thông số mô hình:

Điện trở stato	4,7 $\Omega$
Điện trở rô to	5,1 $\Omega$
Điện cảm rô stato	0,023 H
Điện cảm rô rô to	0,023 H
Điện cảm từ hóa	0,329 H
Hằng số quán tính	0,0111 N.m/rad/s <sup>2</sup>