



PHÂN TÍCH THÔNG SỐ LÀM VIỆC CỦA MÁY PHÁT ĐIỆN KHÔNG ĐỒNG BỘ LỒNG SÓC CỖ NHỎ TRONG HỆ THỐNG TUABIN ĐIỆN GIÓ

Nguyễn Tiến Sỹ*, Nguyễn Trường Giang, Kim Thị Cẩm Ánh,
Hà Thị Chúc, Tống Ngọc Anh

¹Trường Đại học Mỏ - Địa chất, 18 Phố Viên, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 20/5/2026

Ngày nhận bài sửa: 23/6/2026

Ngày chấp nhận đăng: 28/6/2026

*Tác giả liên hệ:

Email: nguyentienys@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Máy phát điện không đồng bộ lồng sóc cỡ nhỏ được dùng phổ biến trong các hệ thống điện gió phân tán nhờ cấu trúc bền vững và chi phí bảo trì thấp. Đánh giá chính xác công suất và ảnh hưởng của thông số động cơ là then chốt để đảm bảo hiệu quả khi nối lưới trực tiếp. Bài báo trình bày đi phân tích thông số làm việc của máy phát điện không đồng bộ ba pha cỡ nhỏ trong hệ thống Tuabin điện gió nối lưới trên môi trường MATLAB/Simulink. Mô hình này cho phép khảo sát toàn diện sự biến thiên của các thông số máy điện đến khả năng phát công suất tác dụng và nhu cầu công suất phản kháng. Kết quả nghiên cứu cung cấp công cụ mô phỏng linh hoạt, độ tin cậy cao, tạo cơ sở nền tảng cho việc thiết kế, lựa chọn thông số và tối ưu hóa vận hành tuabin gió cỡ nhỏ phân tán.

Từ khóa: Máy phát điện không đồng bộ, nối lưới trực tiếp, dòng công suất, điện gió cỡ nhỏ, MATLAB/Simulink.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh hướng tới mục tiêu phát thải ròng bằng không (Net Zero), việc phát triển các hệ thống điện gió phân tán quy mô nhỏ đang trở thành xu hướng tất yếu [1], [2]. Máy phát điện không đồng bộ lồng sóc (SCIG) là lựa chọn tối ưu cho các ứng dụng này nhờ cấu trúc đơn giản, độ bền cơ khí cao và chi phí bảo trì thấp.

Khi nối trực tiếp vào lưới điện hạ áp, SCIG tiêu thụ công suất phản kháng từ lưới để duy trì từ trường và phát công suất tác dụng vào hệ thống [3], [4]. Tuy nhiên, đặc tính vận hành của máy phát chịu ảnh hưởng mạnh bởi sự biến thiên liên tục của tốc độ gió, thông số thiết kế và điều kiện lưới điện. Điều này làm cho sự phân bố dòng công suất (tác dụng và phản kháng) diễn biến rất phức tạp. Nếu không được kiểm soát tốt, sự dao động của dòng công suất sẽ gây mất ổn định điện áp và làm suy giảm chất lượng điện năng của lưới [1].

Từ những rủi ro trên, việc xây dựng một mô hình toán học và mô phỏng chính xác động học của SCIG nối lưới hạ áp là một yêu cầu cấp thiết. Bài báo này trình bày phương pháp mô hình hóa để khảo sát chi tiết đặc tính dòng công suất dưới các kịch bản vận hành khác nhau. Kết quả nghiên cứu cung cấp thông tin giúp các kỹ sư thiết kế, lựa chọn thông số và tối ưu hóa vận hành, góp phần nâng cao tính ổn định cho các hệ thống điện gió dân dụng [2].

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để khảo sát chính xác dòng công suất của máy phát điện không đồng bộ lồng sóc cỡ nhỏ nối lưới, nghiên cứu này sử dụng phương pháp mô hình hóa toán học dựa trên lý thuyết máy điện tổng quát trong hệ tọa độ cố định gắn với stator (hệ tọa độ α - β) [5], [7]. Đây là cách tiếp cận kinh điển nhưng mang lại hiệu quả cao, cho phép biểu diễn toàn bộ các đại lượng điện từ (điện áp, dòng điện, từ thông)



dưới dạng các vector không gian hai pha vuông góc, thay cho hệ ba pha phức tạp, nhờ đó đơn giản hóa đáng kể cấu trúc phương trình vi phân mà vẫn bảo toàn được bản chất động học của máy điện.

2.1. Mô hình toán của máy điện không đồng bộ ba pha

Trong nghiên cứu này, mô hình liên tục của máy điện không đồng bộ ba pha (MĐKĐB) sẽ được xây dựng dựa trên lý thuyết vector không gian phức trong hệ thống đơn vị tương đối (perunit - pu) [1], [6]. Mô hình toán học được mô tả bởi các phương trình (1)-(5) của MĐKĐB trong hệ tọa độ tọa độ cố định α - β .

Phương trình điện áp stato:

$$T_N \frac{d}{dt} \psi_{s\alpha} = u_{s\alpha} - r_s i_{s\alpha}; \quad T_N \frac{d}{dt} \psi_{s\beta} = u_{s\beta} - r_s i_{s\beta}, \quad (1)$$

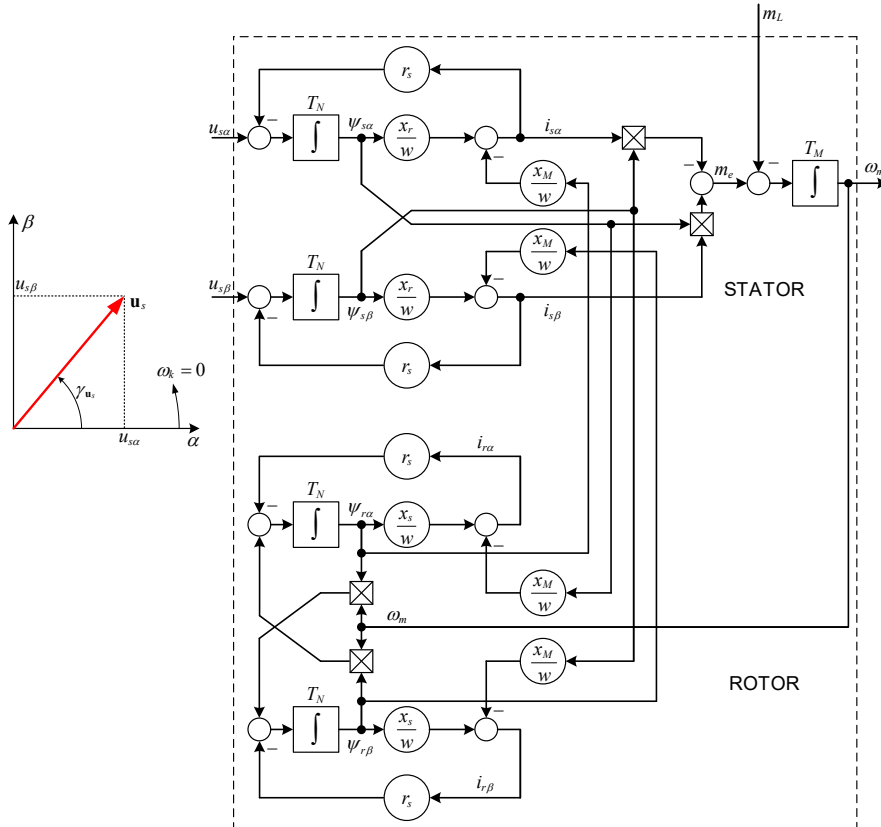
Trong đó: T_N là hằng số thời gian điện từ (s); $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, u_{s\alpha}, u_{s\beta}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ tương ứng là các thành phần từ thông, điện áp và dòng điện stator trong hệ tọa độ α - β ; r_s là điện trở stator.

Phương trình điện áp rôto:

$$T_N \frac{d}{dt} \psi_{r\alpha} = -r_r i_{r\alpha} - \omega_m \psi_{r\beta}; \quad T_N \frac{d}{dt} \psi_{r\beta} = -r_r i_{r\beta} + \omega_m \psi_{r\alpha} \quad (2)$$

a)

b)



Hình 1. (a) Hệ tọa độ cố định stator α - β ; (b) Sơ đồ khối của MĐKĐB trong hệ tọa độ α - β

Trong đó: $\psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}, u_{r\alpha}, u_{r\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ tương ứng là các thành phần từ thông, điện áp và dòng điện rotor trong hệ tọa độ α - β ; r_r là điện trở rotor.

Phương trình dòng từ thông:

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= \psi_{s\alpha} \frac{X_r}{W} - \psi_{r\alpha} \frac{X_M}{W}; & i_{s\beta} &= \psi_{s\beta} \frac{X_r}{W} - \psi_{r\beta} \frac{X_M}{W}, \\ i_{r\alpha} &= \psi_{r\alpha} \frac{X_s}{W} - \psi_{s\alpha} \frac{X_M}{W}; & i_{r\beta} &= \psi_{r\beta} \frac{X_s}{W} - \psi_{s\beta} \frac{X_M}{W} \end{aligned} \quad (3)$$

ở đây $W = x_s x_r - x_M^2$, trong đó x_M, x_s, x_r tương ứng là điện kháng từ hóa, điện kháng tản stator và rotor.

Phương trình chuyển động:

$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{T_M} [(\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) - m_L] \quad (4)$$

Trong đó: T_M là hằng số thời gian cơ học (s); ω_m và m_L là tần số góc và mô men quay của trục. Công suất tác dụng và công suất phản kháng [1]:

$$\begin{aligned} p &= u_{s\alpha} i_{s\alpha} + u_{s\beta} i_{s\beta} \\ q &= u_{s\alpha} i_{s\beta} - u_{s\beta} i_{s\alpha} \end{aligned} \quad (5)$$

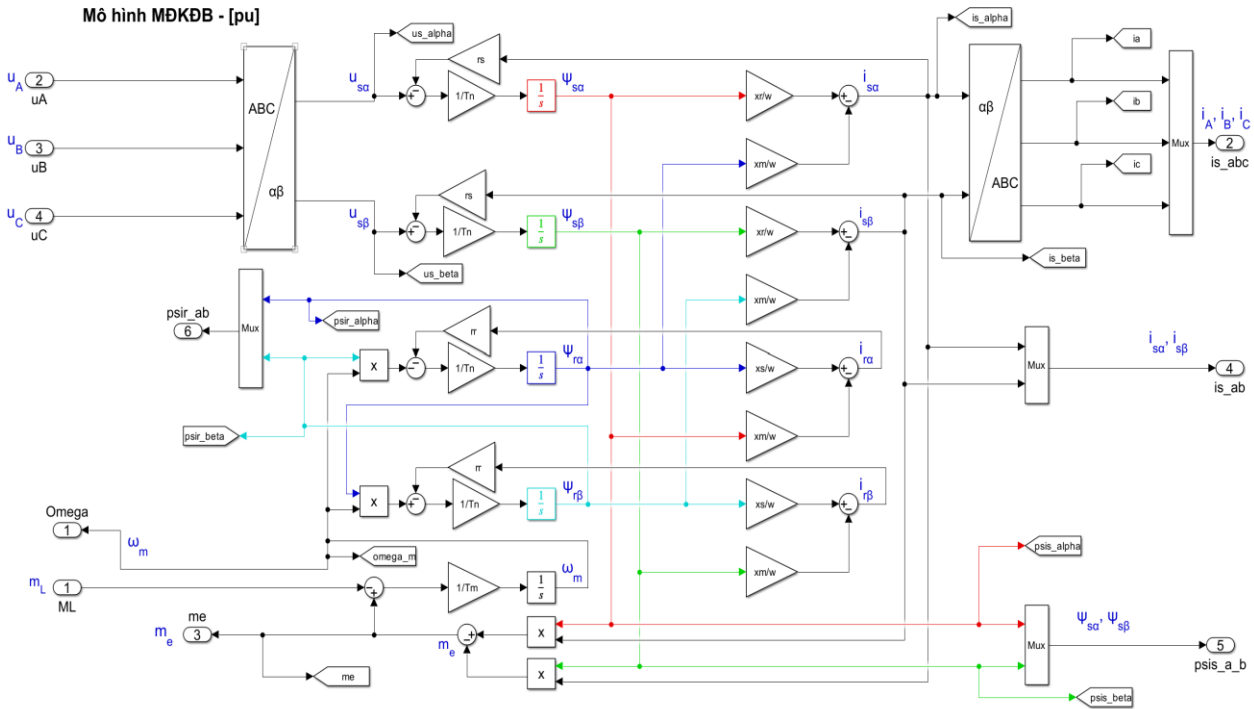
Mối quan hệ được mô tả bởi các biểu thức (1) - (5) có thể được biểu diễn trong sơ đồ khối như thể hiện trong Hình 1.



2.2. Mô hình mô phỏng máy điện không đồng bộ ba pha

Trên cơ sở mô hình toán học đã xây dựng, toàn bộ hệ thống được triển khai trên nền tảng Matlab/Simulink. Mô hình Simulink trong Hình 2 bao gồm khối tính toán các phương trình điện áp, khối tích phân từ thông, khối tính mô men và khối giao diện với lưới điện. Kỹ thuật giải số sử dụng bộ tính toán ode1 [Solve ode1 (Euler)] với bước tính

cố định đảm bảo độ chính xác và ổn định trong toàn bộ dải vận tốc khảo sát [8], [9]. Mô hình này cho phép thay đổi linh hoạt các thông số đầu vào như tốc độ quay rotor, điện áp lưới, tần số và các tham số thiết kế của máy (điện trở, điện cảm stator và rotor), tạo điều kiện thuận lợi cho việc đánh giá ảnh hưởng của từng yếu tố đến đặc tính dòng công suất, từ đó rút ra các kết luận định lượng phục vụ công tác thiết kế và vận hành hệ thống điện gió.



Hình 2. Mô hình Matlab Simulink của MĐKĐB trong hệ đơn vị tương đối [pu]

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Từ mô hình mô phỏng trong Hình 2, nhóm tác giả sử dụng máy điện không đồng bộ rotor lồng sóc

thông dụng (mã Sg 100L-4B của hãng Cantoni) để khảo sát công suất máy phát khi thay đổi các thông số của máy điện. Thông số định mức và thông số tương đối của máy điện được cho trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của máy điện không đồng bộ Sg 100L-4B

TT	Thông số định mức	Giá trị	Đơn vị	Giá trị tương đối [pu]
1	Số pha	3		
2	Công suất	3000	W	
3	Điện áp	400	V	
4	Dòng điện	4	A	
5	Tần số	50	Hz	
6	Số đôi cực	2		
7	Tốc độ	1415	v/ph	
8	Mô-men	20,46	Nm	

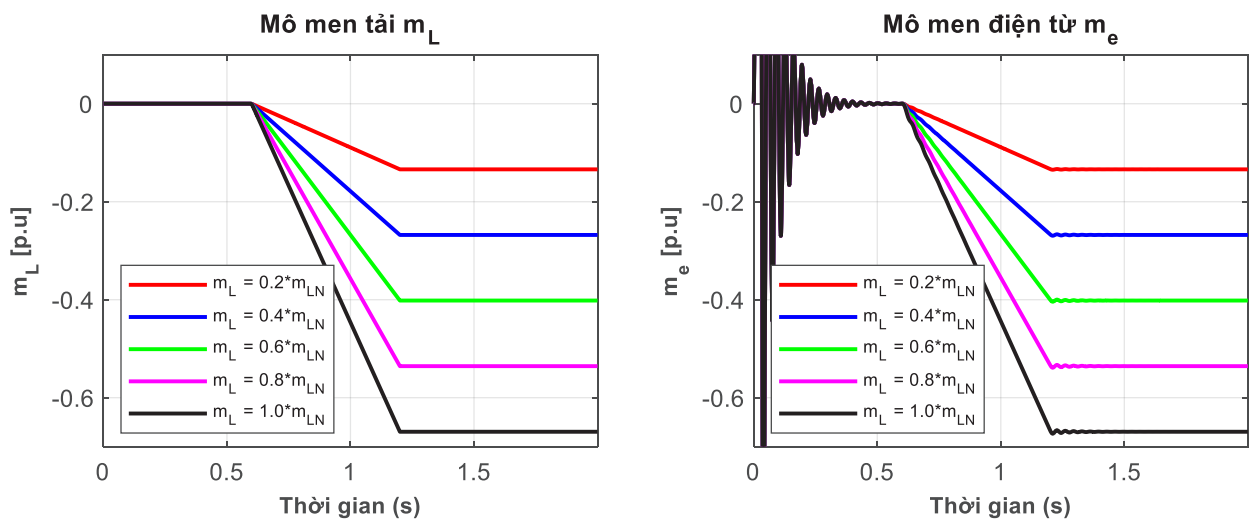


TT	Thông số định mức	Giá trị	Đơn vị	Giá trị tương đối [pu]
9	Điện trở stator (R_s)	7.073	Ω	0.0707
10	Điện kháng tản stator (X_{ss})	9.8018	Ω	0.0980
11	Điện trở rotor (R_r)	6.372	Ω	0.0637
12	Điện kháng tản rotor (X_{rr})	9.8018	Ω	0.0980
13	Điện kháng từ hóa (X_m)	187.8044	Ω	1.8780

3.1. Khảo sát công suất khi thay đổi mô men đặt lên trục máy phát

Ở trạng thái xác lập, mô men điện từ xấp xỉ bằng mô men cơ học (m_L), phản ánh sự cân bằng động lực học của hệ thống. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 3.

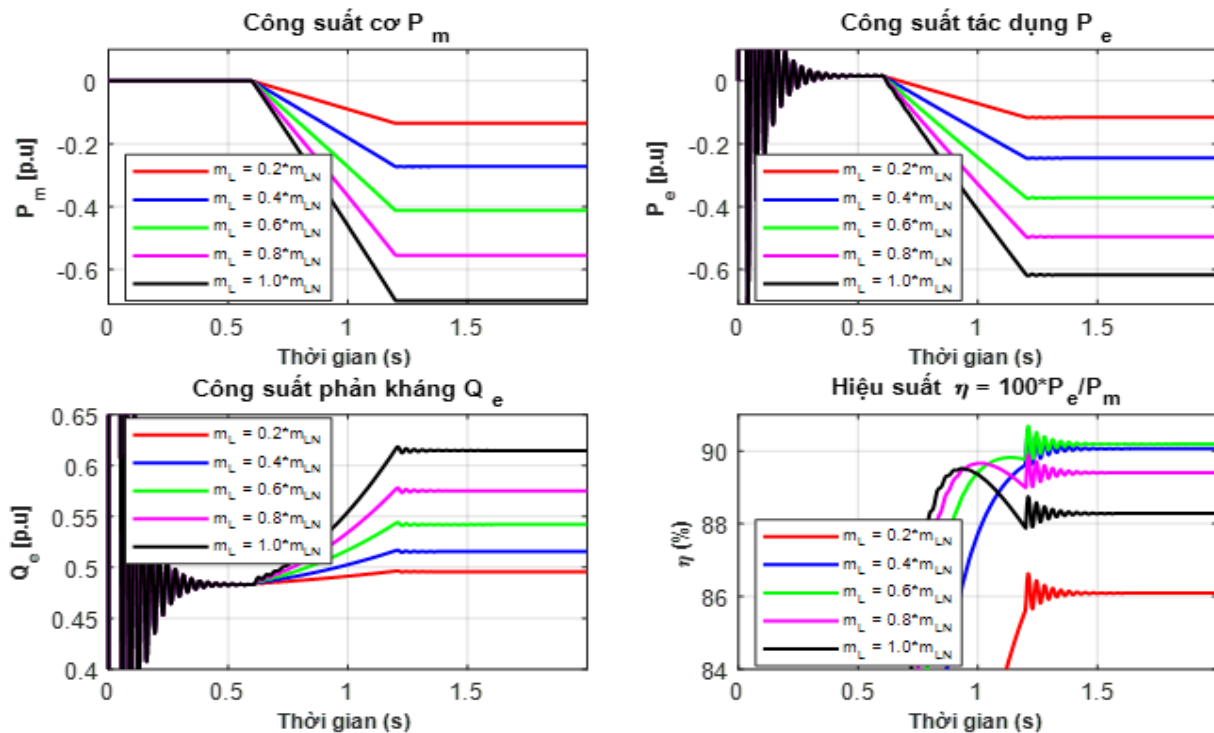
Trên Hình 4 trình bày kết quả mô phỏng về các dạng công suất và hiệu suất phụ thuộc vào mô men trên trục máy phát. Khi mô men m_L tăng, máy phát điều chỉnh hệ số trượt để đáp ứng, dẫn đến dòng điện rotor và stator đều tăng, tạo nên sự gia tăng tuyến tính của công suất cơ P_m , công suất tác dụng P_e và công suất phản kháng Q_e .



Hình 3. Sự tương quan giữa mô men cơ và mô men điện từ

Hiệu suất đạt cực đại (90,2 %) tại $0.6m_{LN}$ là hoàn toàn phù hợp với lý thuyết thiết kế máy điện. Ở tải thấp ($0.2m_{LN}$), tổn hao sắt từ và ma sát chiếm tỷ trọng lớn làm hiệu suất sụt giảm xuống 86

%. Ngược lại, ở vùng đầy tải, tổn hao đồng tăng nhanh theo bình phương dòng điện gây suy giảm hiệu suất, xác nhận quy luật tối ưu hóa điểm làm việc của máy điện.

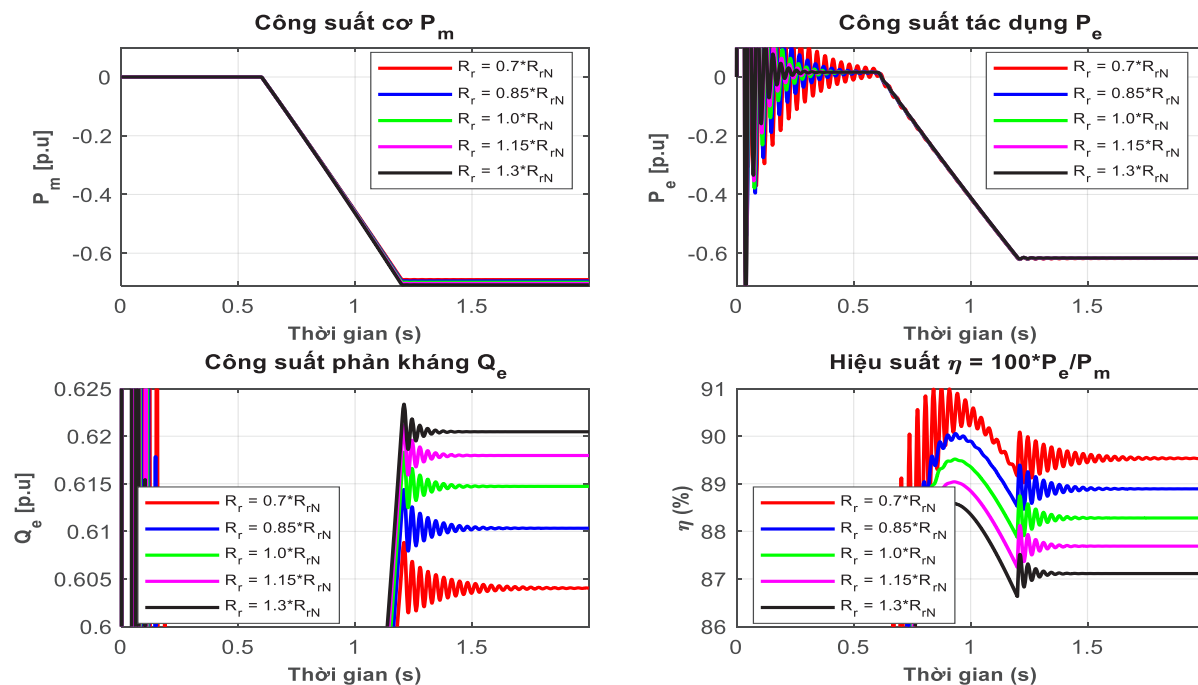


Hình 4. Sự phụ thuộc của công suất và hiệu suất vào mô men quay trên trục

3.2. Khảo sát sự thay đổi điện trở rotor

Kết quả khảo sát trong Hình 5 cho thấy sự thay đổi $\pm 30\%$ điện trở rotor xung quanh giá trị định mức R_{rN} chỉ gây dao động nhỏ (dưới $\pm 1\%$) trong

đặc tính dòng công suất, vì R_r chủ yếu ảnh hưởng đến độ dốc đặc tính cơ và tổn hao nhiệt trên rotor. Khi giảm R_r ở chế độ tải định mức, độ trượt giảm, kéo theo tổn hao nhiệt trên mạch rotor giảm, qua đó nâng cao hiệu suất tổng thể.

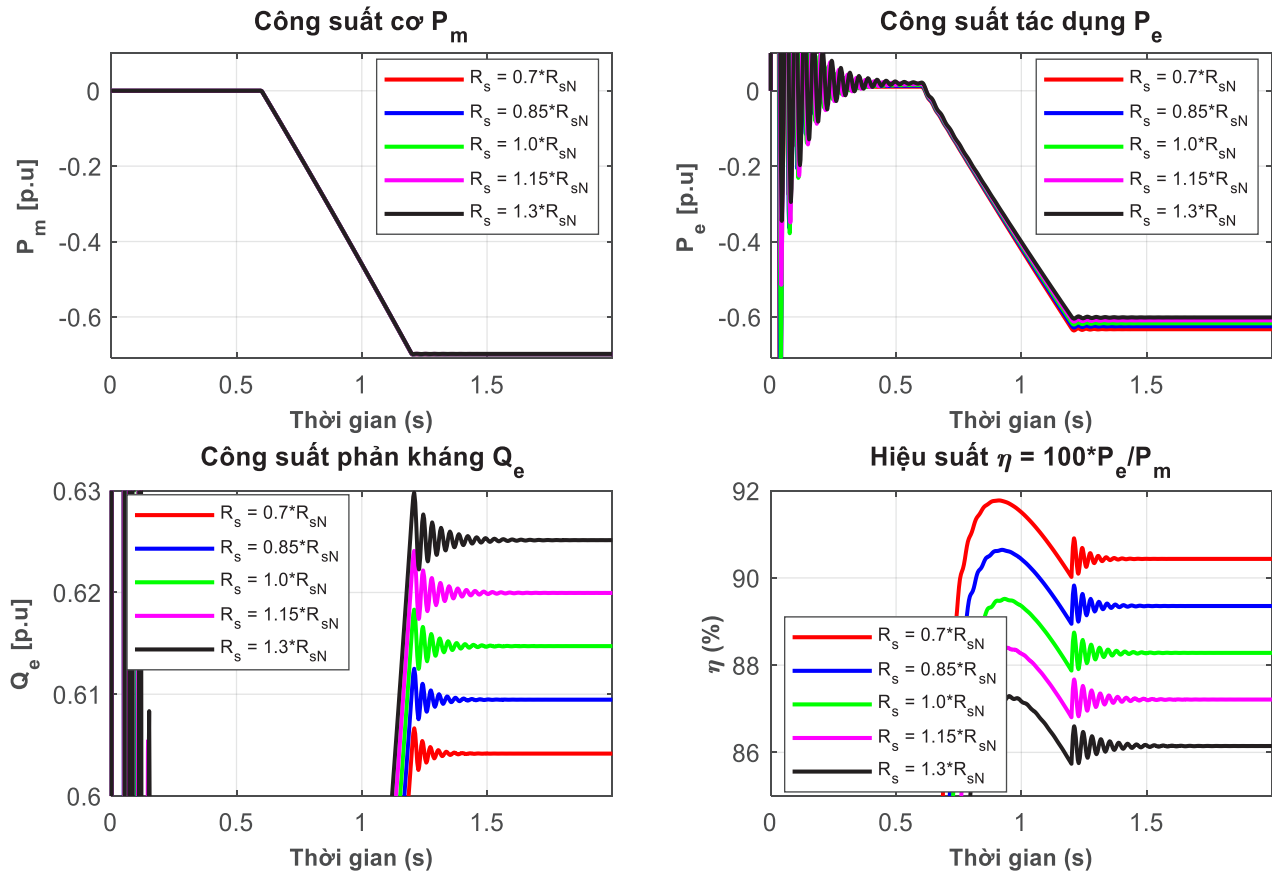


Hình 5. Sự phụ thuộc của công suất và hiệu suất vào điện trở rotor



3.3. Khảo sát sự thay đổi điện trở stator

Kết quả mô phỏng trong Hình 6 cho thấy, việc thay đổi điện trở stator ($\pm 30\% R_{sN}$) tác động trực tiếp đến tổn hao đồng phía stator.



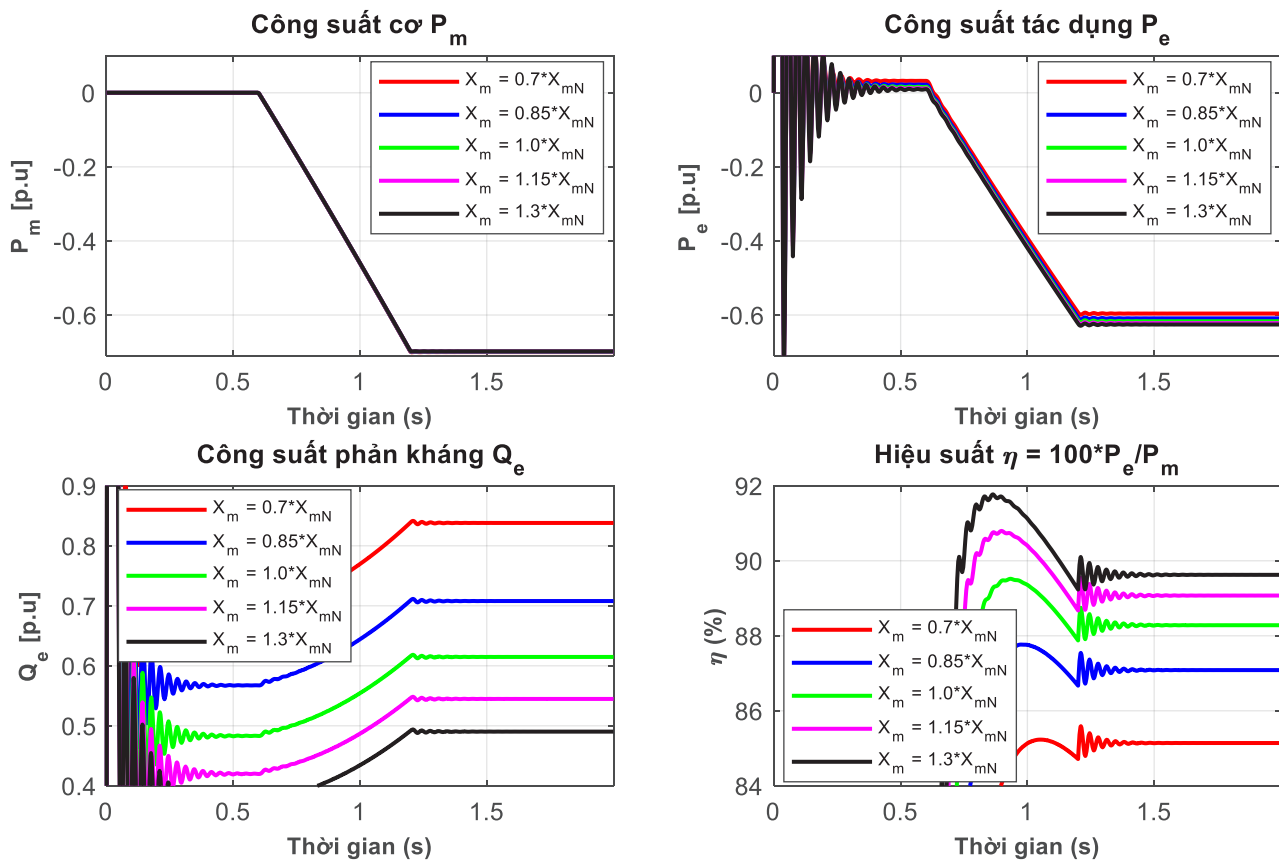
Hình 6. Sự phụ thuộc của công suất và hiệu suất vào điện trở stator

Biên độ dao động của các đại lượng công suất trong khoảng $\pm 1,5\%$ cho thấy thông số mạch stator có độ nhạy cao hơn so với mạch rotor trong quá trình trao đổi năng lượng với lưới. Hiệu suất tỷ lệ nghịch với R_s là hệ quả tất yếu, vì điện trở stator giảm giúp giảm thiểu công suất tiêu hao nhiệt năng.

3.4. Khảo sát sự thay đổi điện kháng từ hóa

Điện kháng từ hóa (X_m) đặc trưng cho khả năng tạo từ thông của mạch từ. Kết quả mô phỏng

trong Hình 7 cho thấy, khi thay đổi điện kháng từ hóa ($\pm 30\% X_{mN}$), công suất tác dụng (P_e) biến động khoảng $\pm 2\%$ xung quanh giá trị định mức tương tự khi thay đổi điện trở stator. Tuy nhiên, X_m có vai trò quyết định đối với nhu cầu bù công suất phản kháng: khi X_m giảm, từ trở mạch từ tăng, dòng từ hóa tăng, làm Q_e tăng cao và ngược lại. Sự tăng X_m giúp giảm đáng kể dòng từ hóa và tổn hao đồng liên quan, tối ưu hệ số công suất và cải thiện hiệu suất vận hành.



Hình 7. Sự phụ thuộc của công suất và hiệu suất vào điện kháng từ hóa

4. KẾT LUẬN

➤ Khi giảm điện trở rotor và stator có thể tăng hiệu suất khoảng $\pm 1\%$ đến $\pm 1,5\%$, tuy nhiên công suất phản kháng tiêu thụ gần như không đổi so với giá trị định mức;

➤ Khi tăng hồ cảm (điện kháng từ hóa) có ảnh hưởng tích cực, đó là tăng công suất tác dụng (khoảng 1%) nhưng giảm đáng kể công suất phản kháng (khoảng 20%) so với giá trị định mức;

➤ Với máy điện có sẵn, khi vận hành cần chú ý làm mát để tránh tăng nhiệt dẫn đến tăng điện trở và giảm hiệu suất;

➤ Khi thiết kế máy phát, để đạt hiệu suất cao cần lựa chọn kết cấu, kích thước và vật liệu để đồng thời có được điện trở là nhỏ nhất và điện kháng lớn nhất có thể □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning: *Wiley*, 2017.
- [2] M. G. Simões and F. A. Farret, Renewable Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators: *Taylor & Francis*, 2004.
- [3] F. A. Farret and M. G. Simoes, Integration of Alternative Sources of Energy: *Wiley*, 2006.
- [4] A. Fitzgerald, A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. Umans, *Electric Machinery*: McGraw-Hill Companies, Incorporated, 2003.
- [5] M. G. Simões and F. A. Farret, *Modeling and Analysis with Induction Generators*, Third Edition: Taylor & Francis, 2014.
- [6] M. P. Kazmierkowski and H. Tunia, Automatic control of converter-fed drives: *Elsevier/PWN*, Warsaw, 1994.



- [7] N. P. Quang and J. A. Dittrich, Vector control of three-phase AC machines: system development in the practice: *Springer*, 2008.
- [8] H. Klee and R. Allen, Simulation of Dynamic Systems with MATLAB® and Simulink®: *CRC Press*, 2018.
- [9] C. M. Ong, Dynamic simulation of electric machinery: using MATLAB/SIMULINK: *Prentice Hall PTR*, 1998.

LỜI CẢM ƠN

Nội dung bài báo được hỗ trợ từ đề tài nghiên cứu cấp Cơ sở của Trường Đại học Mỏ - Địa chất, mã số T25-05.

PERFORMANCE ANALYSIS OF A SMALL-SCALE SQUIRREL-CAGE INDUCTION GENERATOR IN WIND TURBINE SYSTEMS

Tien Sy Nguyen*, Truong Giang Nguyen, Cam Anh Kim Thi,
Chuc Ha Thi, Ngoc Anh Tong

¹Hanoi University of Mining and Geology, 18 Vien Str., Ha Noi, Vietnam

ARTICLE INFOR

TYPE: Research Article

Received: 20/5/2026

Revised: 25/6/2026

Accepted: 28/6/2026

* Corresponding author:

Email: nguyentiensy@humg.edu.vn

ABSTRACT

Small-scale squirrel-cage induction generators are widely used in distributed wind power systems due to their robust structure and low maintenance costs. Accurately evaluating power flow and the impact of machine parameters is crucial for ensuring efficiency during direct grid connection. This paper presents a simulation model of a small-scale grid-tied three-phase induction generator developed in MATLAB/Simulink. The model enables a comprehensive investigation into how variations in machine parameters affect active power generation and reactive power demand. The outcomes provide a flexible and highly reliable simulation tool, establishing a critical foundation for the design, parameter selection, and operational optimization of small-scale distributed wind turbines.

Keywords: Induction generator, Direct grid connection, Power flow, Small-scale wind power, MATLAB/Simulink.

@ Vietnam Mining Science and Technology Association