



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.5.208-219>

***Corresponding author:**

Email address:

bacnd@huce.edu.vn

Received: 07/07/2026

Received in Revised Form:
03/08/2026

Accepted: 14/09/2026

Energy Efficiency Assessment and Identification of an Optimal Operating Region for a Small-Power Induction Motor under Variable Load Conditions

Nguyen Duc Bac*, Nguyen Van Dat

Hanoi University of Civil Engineering, No.55 Giai Phong Street, Bach Mai Ward, Hanoi, Vietnam

Abstract: Small-power three-phase induction motors are widely used in residential and light industrial drive systems owing to their simple structure, high reliability, and low investment cost. However, the simultaneous assessment of energy performance indicators and the determination of a suitable load range for a specific motor still require quantitative analysis to support operating-condition selection. This paper develops a MATLAB/Simulink-based simulation model of a three-phase induction motor to evaluate the influence of load conditions on key energy performance indicators. The motor is investigated over a load range from 15% to 100% of the rated load using ten operating points, where the evaluated parameters include stator current, input power, output power, efficiency, and power factor. The simulation results show that, as the load increases from 15% to 100% of the rated load, the stator current increases from 4.06 A to 8.10 A, the output power rises from 616 W to 3938 W, and the power factor increases from 0.286 to 0.840. The efficiency increases from 80.78% at 15% load to a maximum value of approximately 89.62% in the 50–65% load range, and then slightly decreases to 87.86% at the rated load. The total losses increase from 146.6 W to 544 W; however, the ratio of total losses to input power decreases from 19.22% at light load to approximately 10.38% in the 50–65% load range, before increasing slightly as the motor approaches the rated load. Considering both efficiency and power factor, the 65–80% rated-load range is identified as a suitable operating region for the investigated motor. Within this range, the efficiency remains between 89.27% and 89.62%, while the power factor increases from 0.738 to 0.792. The findings provide a quantitative basis for selecting an appropriate motor rating and operating condition for the 4 kW induction motor under the investigated simulation conditions.

Keywords: induction motor; energy efficiency; efficiency; load conditions; MATLAB/Simulink



Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo nghiên cứu

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.5.208-219>

*Tác giả liên hệ:
Địa chỉ Email:
bacnd@huce.edu.vn

Ngày nộp bài: 07/07/2026
Ngày nộp bài sửa: 03/08/2026
Ngày chấp nhận: 14/09/2026

Đánh giá hiệu quả sử dụng năng lượng và xác định vùng vận hành tối ưu của động cơ không đồng bộ công suất nhỏ trong điều kiện tải thay đổi

Nguyễn Đức Bắc*, Nguyễn Văn Đạt

Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

Tóm tắt: Động cơ không đồng bộ ba pha công suất nhỏ được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống truyền động dân dụng và công nghiệp nhẹ nhờ kết cấu đơn giản, độ tin cậy cao và chi phí đầu tư thấp. Tuy nhiên, việc đánh giá đồng thời sự biến thiên của các chỉ tiêu năng lượng và xác định vùng tải phù hợp cho một động cơ cụ thể vẫn cần được phân tích định lượng để hỗ trợ lựa chọn chế độ vận hành. Bài báo xây dựng mô hình mô phỏng động cơ không đồng bộ ba pha trên nền tảng MATLAB/Simulink để đánh giá ảnh hưởng của tải đến các chỉ tiêu năng lượng. Động cơ được khảo sát trên dải tải từ 15% đến 100% tải định mức với mười điểm khảo sát, trong đó các chỉ tiêu đánh giá bao gồm dòng điện stato, công suất đầu vào, công suất đầu ra, hiệu suất và hệ số công suất. Kết quả mô phỏng cho thấy khi tải tăng từ 15% lên 100% tải định mức, dòng điện stato tăng từ 4,06 A lên 8,10 A, công suất đầu ra tăng từ 616 W lên 3938 W và hệ số công suất tăng từ 0,286 lên 0,840. Hiệu suất tăng từ 80,78% tại mức tải 15% lên giá trị lớn nhất khoảng 89,62% tại vùng tải 50–65%, sau đó giảm nhẹ xuống 87,86% ở tải định mức. Tổng tổn hao tăng từ 146,6 W lên 544 W, nhưng tỷ lệ tổn hao trên công suất đầu vào giảm từ 19,22% tại tải thấp xuống khoảng 10,38% tại vùng tải 50–65%, sau đó tăng nhẹ khi động cơ tiến gần tải định mức. Xét đồng thời hiệu suất và hệ số công suất, vùng tải 65–80% tải định mức được xác định là vùng vận hành phù hợp đối với động cơ khảo sát; trong vùng này, hiệu suất duy trì ở mức 89,27–89,62% và hệ số công suất tăng từ 0,738 lên 0,792. Kết quả cung cấp cơ sở định lượng cho việc lựa chọn công suất và chế độ vận hành phù hợp đối với động cơ không đồng bộ 4 kW trong các điều kiện mô phỏng đã khảo sát.

Từ khóa: động cơ không đồng bộ; hiệu quả sử dụng năng lượng; hiệu suất; điều kiện tải; MATLAB/Simulink.

1. Giới thiệu

Động cơ không đồng bộ ba pha công suất nhỏ (≤ 5 kW) được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống truyền động dân dụng và công nghiệp nhẹ như quạt điện, bơm nước, băng tải và nhiều thiết bị cơ điện khác. Với ưu điểm kết cấu đơn giản, độ

tin cậy cao, chi phí đầu tư hợp lý và khả năng vận hành ổn định, loại động cơ này chiếm tỷ trọng lớn trong tổng số động cơ điện đang được sử dụng hiện nay [1]. Do đó, việc nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng của động cơ không đồng bộ công suất nhỏ có ý nghĩa quan trọng trong việc giảm tiêu

thụ điện năng, tiết kiệm chi phí vận hành và nâng cao hiệu quả khai thác của các hệ thống truyền động điện.

Trong thực tế, động cơ thường được lựa chọn với công suất định mức lớn hơn nhu cầu phụ tải nhằm bảo đảm khả năng dự phòng và đáp ứng yêu cầu vận hành khi tải tăng đột biến. Tuy nhiên, cách lựa chọn này làm cho nhiều động cơ phải làm việc trong thời gian dài ở chế độ non tải hoặc tải thấp, dẫn đến hiệu suất sử dụng năng lượng suy giảm đáng kể. Nguyên nhân chủ yếu là công suất đầu ra giảm theo tải, trong khi các thành phần tổn hao cố định, đặc biệt là tổn hao sắt và tổn hao cơ, gần như không thay đổi. Vì vậy, tỷ lệ tổn hao trên công suất hữu ích tăng lên khi tải giảm, gây lãng phí điện năng và làm tăng chi phí vận hành của hệ thống [1].

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng của động cơ không đồng bộ thông qua tối ưu hóa thiết kế, sử dụng vật liệu có hiệu suất cao và áp dụng các chiến lược điều khiển hiện đại như điều khiển vector và điều khiển biến tần [2–6]. Bên cạnh đó, các nghiên cứu gần đây tiếp tục phát triển các phương pháp tối ưu hiệu suất trong quá trình vận hành và các giải pháp điều khiển hướng tới mục tiêu tiết kiệm năng lượng [7, 8]. Đồng thời, các phương pháp ước lượng công suất đầu ra và hiệu suất động cơ cũng được nghiên cứu nhằm phục vụ giám sát tình trạng làm việc và quản lý năng lượng trong quá trình vận hành [9]. Các nghiên cứu đã công bố chủ yếu tập trung vào tối ưu thiết kế, phát triển chiến lược điều khiển tiết kiệm năng lượng hoặc ước lượng hiệu suất của động cơ không đồng bộ. Xu hướng hiệu suất và hệ số công suất thay đổi theo tải đã được ghi nhận trong nhiều công trình. Tuy nhiên, đối với động cơ không đồng bộ công suất nhỏ được khảo sát trong nghiên cứu này, việc đánh giá đồng thời dòng điện, công suất đầu vào, công suất đầu ra, tổng tổn hao, hiệu suất và hệ số công suất trên cùng một tập điều kiện tải vẫn cần được làm rõ nhằm cung cấp số liệu định lượng phục vụ lựa chọn chế độ vận hành.

Tại Việt Nam, nhiều hệ thống truyền động

điện trong các lĩnh vực dân dụng và công nghiệp nhẹ thường xuyên làm việc ở chế độ tải thấp do đặc tính phụ tải biến thiên hoặc do lựa chọn động cơ có công suất dự phòng lớn hơn yêu cầu. Điều này đặt ra nhu cầu cần đánh giá định lượng mối quan hệ giữa điều kiện tải và các chỉ tiêu năng lượng của động cơ nhằm xác định vùng vận hành có hiệu quả năng lượng cao, từ đó làm cơ sở cho việc lựa chọn công suất động cơ và chế độ vận hành phù hợp, góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng điện năng.

Xuất phát từ những yêu cầu trên, bài báo xây dựng mô hình mô phỏng động cơ không đồng bộ ba pha công suất nhỏ trên nền tảng MATLAB/Simulink để đánh giá ảnh hưởng của điều kiện tải đến các chỉ tiêu năng lượng của động cơ. Nghiên cứu được thực hiện trên dải tải từ 15% đến 100% tải định mức với mười điểm khảo sát, cho phép phân tích sự biến thiên của dòng điện stato, công suất đầu vào, công suất đầu ra, hiệu suất và hệ số công suất theo điều kiện tải. Trên cơ sở đó, bài báo làm rõ cơ chế suy giảm hiệu suất ở vùng tải thấp, đồng thời xác định vùng vận hành có hiệu quả năng lượng cao nhằm đề xuất cơ sở định lượng cho việc lựa chọn công suất động cơ và chế độ vận hành phù hợp trong các hệ thống truyền động điện.

Các đóng góp chính của bài báo bao gồm:

- Xây dựng và công bố đầy đủ mô hình mô phỏng cùng các tham số điện – cơ của động cơ không đồng bộ 4 kW, bảo đảm khả năng tái lập kết quả;

- Đánh giá định lượng đồng thời các đại lượng vận hành và chỉ tiêu năng lượng của động cơ theo tải, bao gồm dòng điện, công suất đầu vào, công suất đầu ra, tổng tổn hao, hiệu suất và hệ số công suất;

- Xác định vùng tải có sự cân bằng giữa hiệu suất và hệ số công suất đối với động cơ và điều kiện mô phỏng được khảo sát, làm cơ sở cho lựa chọn chế độ vận hành phù hợp.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau. Mục 2 trình bày cơ sở lý thuyết. Mục 3 trình bày mô hình và phương pháp nghiên cứu. Mục 4

trình bày kết quả mô phỏng, phân tích và thảo luận. Cuối cùng, Mục 5 trình bày các kết luận và định hướng nghiên cứu tiếp theo.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1. Hiệu suất và các thành phần tổn hao của động cơ không đồng bộ

Hiệu suất của động cơ không đồng bộ được xác định theo công thức (1):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1)$$

trong đó:

- P_{out} : công suất cơ đầu ra (W)
- P_{in} : công suất điện đầu vào (W)

Hiệu suất của động cơ phụ thuộc vào chế độ tải, điều kiện vận hành và các thành phần tổn hao bên trong. Hiệu suất của động cơ thường tăng từ vùng tải thấp và đạt giá trị cao trong một vùng tải nhất định, phụ thuộc vào thiết kế và điều kiện vận hành của động cơ.

Tổng tổn hao của động cơ được xác định theo công thức (2):

$$P_{loss} = P_{cu} + P_{fe} + P_m + P_{stray} \quad (2)$$

trong đó:

- P_{cu} : tổn hao đồng của dây quấn stato và rôto;
- P_{fe} : tổn hao sắt (tổn hao từ trễ và dòng xoáy);
- P_m : tổn hao cơ (ma sát và thông gió);
- P_{stray} : tổn hao phụ.

Trong các thành phần trên, tổn hao đồng phụ thuộc chủ yếu vào bình phương dòng điện nên giảm khi tải giảm. Ngược lại, tổn hao sắt phụ thuộc chủ yếu vào điện áp và tần số nguồn, còn tổn hao cơ gần như không thay đổi trong vùng làm việc bình thường [10]. Vì vậy, ở chế độ tải thấp, các tổn hao cố định chiếm tỷ lệ lớn so với công suất đầu ra, làm cho hiệu suất động cơ giảm đáng kể [11, 12].

2.2. Ảnh hưởng của tải đến đặc tính năng lượng của động cơ

Từ cân bằng công suất, hiệu suất của động cơ được biểu diễn theo công thức (3):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \quad (3)$$

Khi tải giảm, công suất đầu ra P_{out} giảm tỷ lệ với tải, trong khi tổn hao sắt P_{fe} và tổn hao cơ P_m gần như không đổi. Do đó, tổng tổn hao không giảm tương ứng với công suất đầu ra, dẫn đến hiệu suất giảm nhanh trong vùng tải thấp [13].

Ngoài hiệu suất, hệ số công suất cũng chịu ảnh hưởng đáng kể của tải và được xác định theo công thức (4):

$$\cos\varphi = \frac{P_{in}}{\sqrt{3}UI} \quad (4)$$

trong đó:

- U : điện áp dây
- I : dòng điện stato

Ở chế độ tải thấp, thành phần dòng phản kháng chiếm ưu thế nên hệ số công suất có giá trị thấp. Khi tải tăng, thành phần dòng tác dụng tăng lên, làm hệ số công suất được cải thiện. Hệ số công suất thấp không chỉ làm giảm hiệu quả sử dụng điện mà còn làm tăng tổn hao trên hệ thống cung cấp điện [14].

Từ các phân tích lý thuyết trên có thể nhận thấy rằng hiệu suất và hệ số công suất của động cơ phụ thuộc mạnh vào chế độ tải. Trong vùng tải thấp, tổn hao sắt và tổn hao cơ chiếm tỷ trọng lớn trong tổng tổn hao, dẫn đến hiệu suất thấp và sử dụng năng lượng chưa hiệu quả. Khi tải tăng, tỷ lệ công suất hữu ích tăng nhanh hơn các tổn hao cố định, giúp hiệu suất và hệ số công suất được cải thiện đáng kể.

Do đó, việc đánh giá định lượng sự biến thiên của các chỉ tiêu năng lượng theo các mức tải khác nhau là cơ sở để xác định vùng vận hành có hiệu quả năng lượng cao của động cơ. Trên cơ sở đó, nghiên cứu tiến hành xây dựng mô hình mô phỏng và phân tích các chỉ tiêu năng lượng của động cơ trong các điều kiện tải khác nhau, nội dung được trình bày trong mục tiếp theo.

3. Mô hình và phương pháp nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu và mô hình mô phỏng

Đối tượng nghiên cứu của bài báo là động cơ không đồng bộ ba pha rôto lồng sóc công suất nhỏ, loại động cơ được sử dụng phổ biến trong các hệ thống truyền động dân dụng và công nghiệp nhẹ

như bơm nước, quạt công nghiệp, băng tải và các thiết bị cơ điện công suất thấp.

Trong nghiên cứu này, đối tượng khảo sát là động cơ không đồng bộ ba pha rôto lồng sóc có công suất định mức 4 kW, điện áp dây định mức 380 V, tần số định mức 50 Hz và tốc độ định mức khoảng 1450 vòng/phút, được cấp từ nguồn điện áp ba pha cân bằng, hình sin. Mức công suất này

được lựa chọn do đại diện cho nhóm động cơ công suất nhỏ được sử dụng phổ biến trong các hệ thống truyền động công nghiệp nhẹ, đồng thời phù hợp để đánh giá ảnh hưởng của điều kiện tải đến hiệu quả sử dụng năng lượng trong các chế độ vận hành khác nhau. Các thông số định mức và tham số mạch tương đương được tổng hợp trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số điện – cơ động cơ khảo sát

Thông số	Giá trị	Đơn vị tính
Công suất định mức	4	kW
Điện áp dây định mức	380	V
Tần số định mức	50	Hz
Số pha	3	
Loại rôto	Lồng sóc	
Tốc độ định mức	1450	vòng/phút
Điện trở stato	1,405	Ω
Điện cảm tản stato	0,005839	H
Điện trở rôto quy đổi về stato	1,395	Ω
Điện cảm tản rôto quy đổi về stato	0,005839	H
Điện cảm hổ cảm	0,1722	H
Mômen quán tính	0,031	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$
Hệ số ma sát nhớt	0,002985	$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$
Số đôi cực	2	

Các tham số điện và cơ trong Bảng 1 là các giá trị được khai báo cho động cơ khảo sát trong khối Asynchronous Machine SI Units của mô hình MATLAB/Simulink.

3.2. Mô hình và quy trình khảo sát

Để mô tả đặc tính điện từ và cơ học của động cơ không đồng bộ, nghiên cứu sử dụng mô hình toán học trong hệ tọa độ quay đồng bộ dq . Mô hình toán học của động cơ không đồng bộ trong hệ tọa độ quay đồng bộ dq được thiết lập theo lý thuyết hệ quy chiếu máy điện [1]. Mô hình này cho phép biểu diễn các đại lượng ba pha của stato và rôto dưới dạng các thành phần trên hai trục d và q , qua đó mô tả đồng thời quá trình biến đổi điện từ, quá trình tạo mômen và chuyển động cơ học của động cơ.

Trong hệ tọa độ quay đồng bộ dq , các phương trình điện áp của stato và rôto được biểu

diễn bởi hệ phương trình (5):

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_e \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_e \psi_{ds} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - \omega_{sl} \psi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + \omega_{sl} \psi_{dr} \end{cases} \quad (5)$$

Trong hệ phương trình (5), tốc độ góc trượt được xác định theo công thức (6):

$$\omega_{sl} = \omega_e - p\omega_m \quad (6)$$

Quan hệ giữa từ thông và dòng điện của động cơ được biểu diễn bởi hệ phương trình (7):

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (7)$$

Trong hệ phương trình (7), các điện cảm L_s, L_r được xác định theo công thức (8):

$$L_s = L_{ls} + L_m, \quad L_r = L_{lr} + L_m \quad (8)$$

đảm đủ mật độ điểm khảo sát để đánh giá xu hướng thay đổi của các chỉ tiêu năng lượng theo điều kiện tải. Cách lựa chọn này giúp nâng cao độ tin cậy của quá trình phân tích và xác định chính xác hơn vùng vận hành có hiệu quả năng lượng cao của động cơ.

Các chỉ tiêu năng lượng được xác định từ các đại lượng điện và cơ thu được trong quá trình mô phỏng. Công suất điện đầu vào của động cơ được tính theo công thức (11):

$$P_{in} = \sqrt{3}UI\cos\varphi \quad (11)$$

Công suất cơ đầu ra được xác định theo công thức (12):

$$P_{out} = T_L \omega_m \quad (12)$$

Trong đó:

T_L : mômen tải trên trục động cơ

ω_m : tốc độ góc của rôto

Bên cạnh hiệu suất, nghiên cứu còn theo dõi dòng điện stato và hệ số công suất tại từng chế độ tải nhằm đánh giá toàn diện đặc tính năng lượng của động cơ. Các đại lượng này được tổng hợp và so sánh giữa các mức tải để phân tích ảnh hưởng

của tải đến hiệu quả vận hành.

Quy trình nghiên cứu được thực hiện theo các bước: xây dựng mô hình mô phỏng, thiết lập các mức tải khảo sát, thực hiện mô phỏng đến trạng thái xác lập, thu thập các đại lượng điện và cơ, tính toán các chỉ tiêu năng lượng và phân tích kết quả. Quy trình này bảo đảm tính nhất quán của dữ liệu, đồng thời tạo cơ sở cho việc đánh giá vùng vận hành có hiệu quả năng lượng cao của động cơ.

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Ảnh hưởng của điều kiện tải đến đặc tính năng lượng của động cơ

Để đánh giá ảnh hưởng của điều kiện tải đến hiệu quả sử dụng năng lượng của động cơ không đồng bộ, nghiên cứu tiến hành mô phỏng trên dải tải từ 15% đến 100% tải định mức với mười điểm khảo sát. Các chỉ tiêu được phân tích bao gồm dòng điện stato, công suất đầu vào, công suất đầu ra, hiệu suất và hệ số công suất. Kết quả mô phỏng được tổng hợp trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả các chỉ tiêu năng lượng theo mức tải

Mức tải (%)	Dòng điện I_{RMS} (A)	Công suất vào P_{in} (W)	Công suất ra P_{out} (W)	Hiệu suất η (%)	$\cos\varphi$
15	4,06	762,6	616	80,78	0,286
25	4,28	1185	1023	86,33	0,420
40	4,8	1824	1625	89,09	0,578
50	5,23	2255	2021	89,62	0,655
65	5,99	2910	2608	89,62	0,738
70	6,27	3132	2801	89,43	0,760
75	6,55	3354	2994	89,27	0,778
80	6,85	3567	3185	89,29	0,792
90	7,46	4028	3564	88,48	0,820
100	8,1	4482	3938	87,86	0,840

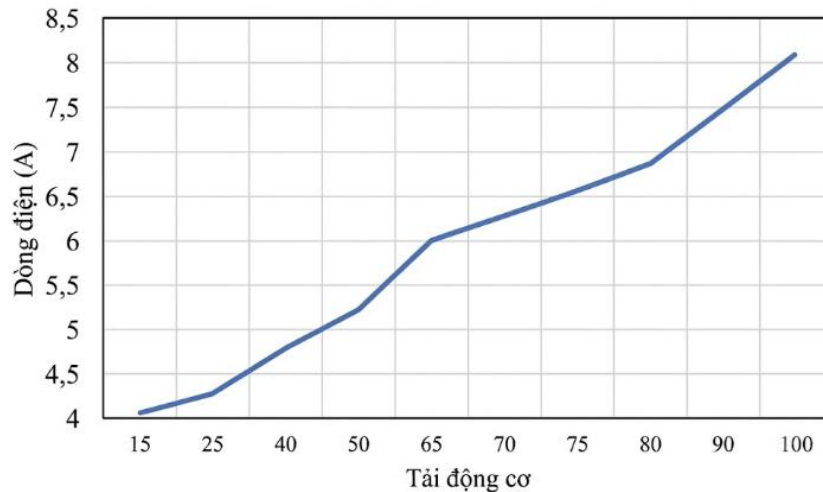
Từ kết quả trong Bảng 2 có thể nhận thấy rằng khi tải tăng, dòng điện stato, công suất đầu vào và công suất đầu ra của động cơ đều tăng. Dòng điện stato tăng từ 4,06 A tại mức tải 15% lên 8,10 A ở tải định mức, phản ánh nhu cầu công suất điện đầu vào tăng theo mômen tải. Trong cùng

khoảng khảo sát, công suất đầu ra tăng từ 616 W lên 3938 W, cho thấy khả năng khai thác công suất của động cơ được cải thiện rõ rệt khi tải tăng.

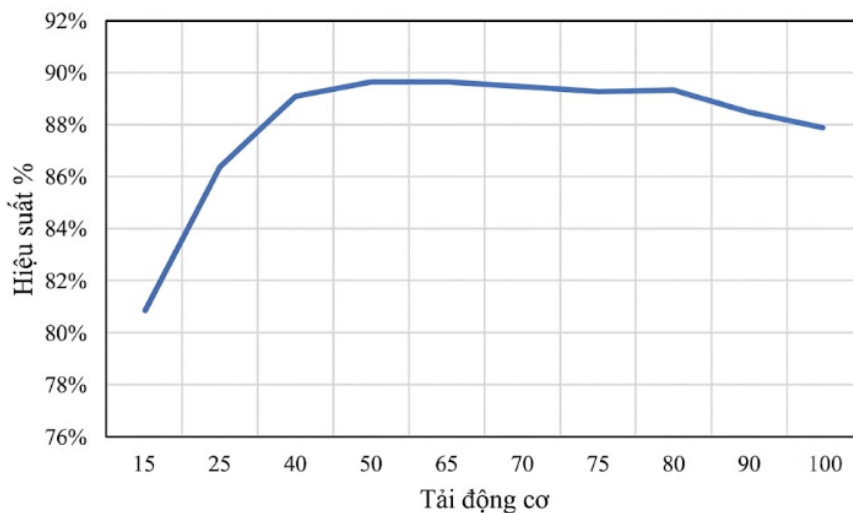
Xu hướng biến thiên của dòng điện stato theo mức tải được thể hiện trong Hình 2. Có thể thấy dòng điện tăng theo tải, phù hợp với đặc tính

làm việc của động cơ không đồng bộ khi mômen tải tăng. Hiệu suất của động cơ thay đổi rõ rệt theo điều kiện tải. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu suất tăng từ 80,78% tại mức tải 15% lên giá trị lớn nhất khoảng 89,62% tại vùng tải 50–65%. Khi tải tiếp tục tăng, hiệu suất giảm nhẹ và đạt 87,86% tại tải định

mức. Sự biến thiên này cho thấy hiệu suất phụ thuộc vào tương quan giữa công suất đầu ra và tổng tổn hao tại từng chế độ tải; ở vùng tải trung bình, tỷ lệ tổn hao trên công suất đầu vào đạt giá trị thấp hơn so với vùng tải thấp và vùng tải gần định mức.



Hình 2. Quan hệ giữa dòng điện và tải của động cơ



Hình 3. Quan hệ giữa hiệu suất và tải của động cơ

Bên cạnh hiệu suất, hệ số công suất cũng được cải thiện khi tải tăng. Giá trị $\cos\varphi$ tăng từ 0,286 tại mức tải 15% lên 0,840 ở tải định mức, phản ánh thành phần công suất tác dụng tăng so với thành phần công suất phản kháng khi động cơ làm việc ở tải cao hơn. Điều này góp phần nâng cao khả năng khai thác nguồn điện và giảm tỷ lệ dòng điện phản kháng trong hệ thống cung cấp điện.

Xu hướng thay đổi của hệ số công suất theo mức tải được thể hiện trong Hình 4. Kết quả cho

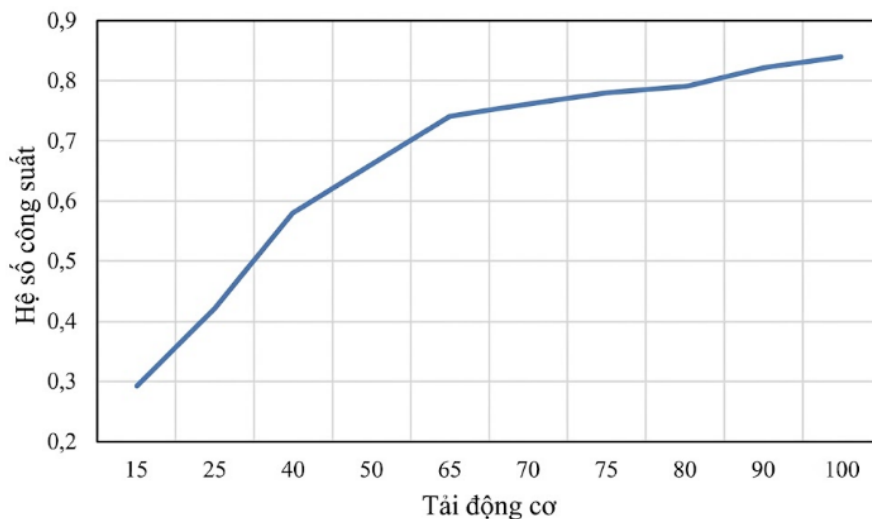
thấy hệ số công suất tăng liên tục theo tải và đạt giá trị cao nhất tại tải định mức.

Nhìn chung, khi tải tăng từ 15% đến 100% tải định mức, dòng điện, công suất đầu vào, công suất đầu ra và hệ số công suất đều tăng. Hiệu suất tăng nhanh ở vùng tải thấp, đạt giá trị lớn nhất khoảng 89,62% tại vùng tải 50–65%, sau đó giảm nhẹ khi động cơ tiến gần tải định mức. Kết quả này tạo cơ sở cho việc phân tích tổng tổn hao và xác định vùng vận hành có hiệu quả năng lượng phù hợp trong mục tiếp theo.

4.2. Phân tích đặc tính năng lượng theo điều kiện tải

Kết quả trong Bảng 2 cho thấy khi mức tải tăng, công suất đầu vào và công suất đầu ra của động cơ đều tăng. Tổng tổn hao tăng từ 146,6 W tại mức tải 15% lên 234 W tại 50% tải, 302 W tại 65% tải và 544 W tại tải định mức. Tuy nhiên, tỷ lệ tổn hao trên công suất đầu vào giảm từ 19,22% tại

mức tải 15% xuống khoảng 10,38% tại vùng tải 50–65%, sau đó tăng nhẹ lên 12,14% tại tải định mức. Kết quả này cho thấy hiệu suất của động cơ phụ thuộc không chỉ vào giá trị tuyệt đối của tổn hao mà còn vào tỷ lệ giữa tổng tổn hao và công suất đầu vào tại từng chế độ tải. Trong phạm vi dữ liệu thu thập, nghiên cứu tập trung phân tích định lượng tổng tổn hao của động cơ theo tải.



Hình 4. Quan hệ giữa hệ số công suất và tải của động cơ

Tương ứng với sự thay đổi trên, hiệu suất của động cơ tăng từ 80,78% tại mức tải 15% lên giá trị lớn nhất khoảng 89,62% tại vùng tải 50–65%. Khi tải tiếp tục tăng, hiệu suất giảm nhẹ, đạt 89,43% tại 70% tải, 89,27% tại 75% tải, 89,29% tại 80% tải, 88,48% tại 90% tải và 87,86% tại tải định mức. Như vậy, hiệu suất không tăng liên tục đến tải định mức mà đạt giá trị cao nhất tại vùng tải trung bình, sau đó giảm nhẹ khi động cơ làm việc ở vùng tải cao do tỷ lệ tổn hao trên công suất đầu vào tăng trở lại.

Bên cạnh hiệu suất, hệ số công suất của động cơ được cải thiện rõ rệt khi tải tăng. Giá trị $\cos\varphi$ tăng từ 0,286 tại mức tải 15% lên 0,655 tại 50% tải, 0,738 tại 65% tải và đạt 0,840 ở tải định mức. Sự gia tăng này phản ánh thành phần công suất tác dụng tăng nhanh hơn so với thành phần công suất phản kháng khi động cơ làm việc ở tải cao hơn, qua đó nâng cao khả năng khai thác nguồn điện và giảm tỷ lệ dòng điện phản kháng trong hệ thống cung cấp điện.

Xét đồng thời hiệu suất và hệ số công suất,

vùng tải từ 65% đến 80% được xác định là vùng vận hành có hiệu quả năng lượng cao đối với động cơ khảo sát. Trong vùng này, hiệu suất được duy trì trong khoảng 89,27–89,62%, đồng thời hệ số công suất tăng từ 0,738 lên 0,792. Mặc dù hiệu suất đạt giá trị lớn nhất tại vùng tải 50–65%, hệ số công suất ở tải 50% mới đạt 0,655. Khi tải tăng lên 90–100%, hệ số công suất tiếp tục được cải thiện nhưng hiệu suất giảm nhẹ do tổng tổn hao tăng và tỷ lệ tổn hao trên công suất đầu vào có xu hướng tăng trở lại.

Xu hướng hiệu suất suy giảm ở vùng tải thấp và đạt giá trị cao hơn khi tải tăng phù hợp với kết quả mô phỏng và thực nghiệm đã được công bố trong [10–13]. Xu hướng hệ số công suất được cải thiện khi tải tăng cũng phù hợp với phân tích trong [14]. Do có sự khác biệt về công suất định mức, bộ tham số động cơ và điều kiện khảo sát, nghiên cứu này tập trung đối chiếu xu hướng biến thiên thay vì so sánh trực tiếp các giá trị tuyệt đối. Kết quả bổ sung của nghiên cứu là lượng hóa đồng thời các chỉ tiêu năng lượng, tổng tổn hao và xác định vùng

tải 65–80% theo tiêu chí kết hợp giữa hiệu suất và hệ số công suất đối với động cơ 4 kW được khảo sát.

Từ các kết quả phân tích có thể thấy việc vận hành động cơ thường xuyên ở vùng tải thấp làm giảm đồng thời hiệu suất và hệ số công suất, trong khi vận hành gần tải định mức giúp cải thiện hệ số công suất nhưng không bảo đảm hiệu suất cao nhất. Vì vậy, đối với động cơ 4 kW và điều kiện mô phỏng được khảo sát, duy trì mức tải trong khoảng 65–80% tải định mức giúp đạt được sự cân bằng hợp lý giữa hiệu suất và hệ số công suất. Kết quả này cung cấp cơ sở định lượng cho việc lựa chọn công suất động cơ và chế độ vận hành phù hợp trong các hệ thống truyền động công suất nhỏ.

4.3. Xác định vùng vận hành tối ưu của động cơ

Trên cơ sở các kết quả mô phỏng và phân tích, có thể nhận thấy hiệu suất và hệ số công suất của động cơ biến đổi theo các xu hướng khác nhau khi tải tăng. Hiệu suất tăng từ 80,78% tại mức tải 15% lên giá trị lớn nhất khoảng 89,62% tại vùng tải 50–65%, sau đó giảm nhẹ xuống 87,86% ở tải định mức. Trong khi đó, hệ số công suất tăng liên tục từ 0,286 tại mức tải 15% lên 0,840 tại tải định mức. Do đó, không có một mức tải duy nhất đồng thời cho giá trị lớn nhất của cả hiệu suất và hệ số công suất.

Xét đồng thời hai chỉ tiêu hiệu suất và hệ số công suất, vùng tải từ khoảng 65% đến 80% tải định mức được xác định là vùng vận hành có hiệu quả năng lượng phù hợp đối với động cơ khảo sát. Trong khoảng tải này, hiệu suất được duy trì ở mức cao, từ 89,27% đến 89,62%, đồng thời hệ số công suất tăng từ 0,738 lên 0,792. Đây là vùng tải bảo đảm sự cân bằng giữa khả năng chuyển đổi năng lượng và mức độ khai thác nguồn điện của động cơ.

Ở mức tải 50%, hiệu suất đã đạt 89,62%, nhưng hệ số công suất mới đạt 0,655. Khi tải tăng lên vùng 90–100%, hệ số công suất tiếp tục được cải thiện, đạt 0,820–0,840, nhưng hiệu suất giảm xuống còn 88,48–87,86% và tỷ lệ tổn hao trên công suất đầu vào có xu hướng tăng trở lại. Vì vậy, việc vận hành động cơ gần tải định mức không đồng

nghĩa với việc luôn đạt hiệu suất cao nhất.

Ngược lại, tại vùng tải thấp 15–25%, hiệu suất chỉ đạt 80,78–86,33% và hệ số công suất nằm trong khoảng 0,286–0,420. Việc động cơ thường xuyên làm việc trong vùng tải này không thuận lợi về hiệu quả sử dụng năng lượng, do công suất hữu ích còn nhỏ trong khi tỷ lệ tổn hao trên công suất đầu vào tương đối lớn.

Từ các kết quả trên, vùng tải 65–80% tải định mức được lựa chọn là vùng vận hành tối ưu theo tiêu chí kết hợp giữa hiệu suất và hệ số công suất đối với động cơ 4 kW và điều kiện mô phỏng được khảo sát. Kết quả này cung cấp cơ sở định lượng cho việc lựa chọn công suất động cơ phù hợp với đặc tính phụ tải và tổ chức chế độ vận hành các hệ truyền động điện công suất nhỏ theo hướng sử dụng năng lượng hiệu quả.

4.4. Khuyến nghị ứng dụng trong thực tế

Kết quả nghiên cứu cho thấy điều kiện tải có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả sử dụng năng lượng của động cơ không đồng bộ công suất nhỏ. Đối với động cơ khảo sát, vùng tải từ 65% đến 80% tải định mức bảo đảm sự cân bằng phù hợp giữa hiệu suất và hệ số công suất; trong khi hiệu quả sử dụng năng lượng suy giảm rõ rệt khi động cơ thường xuyên làm việc ở vùng tải thấp. Do đó, việc lựa chọn công suất động cơ phù hợp với đặc tính phụ tải có ý nghĩa quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả khai thác và giảm chi phí vận hành của hệ thống.

Đối với các hệ thống truyền động như bơm nước, quạt công nghiệp, băng tải và các thiết bị cơ điện trong công nghiệp nhẹ, cần hạn chế lựa chọn động cơ có công suất dự phòng quá lớn nếu không thực sự cần thiết, vì điều này có thể làm động cơ thường xuyên làm việc trong vùng tải thấp và gây lãng phí điện năng. Trong trường hợp phụ tải biến thiên theo thời gian, việc sử dụng bộ biến tần để điều chỉnh tốc độ động cơ theo nhu cầu thực tế có thể góp phần đưa điểm làm việc của hệ thống về vùng tải phù hợp, đồng thời giảm tiêu thụ điện năng và nâng cao hiệu quả vận hành thiết bị.

Kết quả nghiên cứu được xác lập đối với động cơ không đồng bộ ba pha rôto lồng sóc công

suất 4 kW, sử dụng bộ tham số và điều kiện mô phỏng được trình bày trong bài, với nguồn điện ba pha cân bằng, điện áp dây 380 V và tần số 50 Hz. Nghiên cứu chưa xem xét ảnh hưởng của các yếu tố như dao động điện áp, mất cân bằng điện áp nguồn, biến thiên tần số và nhiệt độ làm việc. Vì vậy, việc mở rộng kết quả cho các dải công suất, cấu hình động cơ hoặc điều kiện nguồn khác cần được kiểm chứng bằng các nghiên cứu bổ sung.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, mô hình có thể được mở rộng để khảo sát nhiều dải công suất động cơ khác nhau và kết hợp với dữ liệu thực nghiệm nhằm kiểm chứng kết quả mô phỏng. Đồng thời, việc ứng dụng các phương pháp phân tích dữ liệu và trí tuệ nhân tạo để dự báo hiệu suất, xác định vùng vận hành tối ưu và hỗ trợ lựa chọn công suất động cơ cũng là hướng nghiên cứu có tiềm năng, góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng của các hệ thống truyền động điện trong thực tế.

5. Kết luận

Bài báo đã xây dựng mô hình mô phỏng động cơ không đồng bộ ba pha công suất 4 kW trong MATLAB/Simulink và đánh giá các đại lượng vận hành, chỉ tiêu năng lượng trên dải tải từ 15% đến 100%. Kết quả cho thấy hiệu suất tăng từ 80,78% tại 15% tải lên giá trị lớn nhất khoảng 89,62% ở vùng tải 50–65%, sau đó giảm nhẹ xuống 87,86% tại tải định mức; hệ số công suất tăng liên tục từ 0,286 lên 0,840. Xét đồng thời hiệu suất và hệ số công suất, vùng tải 65–80% được xác định là vùng vận hành có hiệu quả năng lượng cao đối với động cơ và điều kiện mô phỏng được khảo sát. Kết quả cung cấp cơ sở định lượng cho việc lựa chọn công suất và chế độ vận hành động cơ trong các hệ thống truyền động công suất nhỏ.

Tuyên bố về việc sử dụng AI tạo sinh

Trong quá trình chuẩn bị bài báo này, các tác giả đã sử dụng ChatGPT (OpenAI) nhằm cải thiện khả năng đọc hiểu và diễn đạt ngôn ngữ của bản thảo. Sau khi sử dụng công cụ này, các tác giả đã rà soát và chỉnh sửa nội dung khi cần thiết, đồng thời chịu hoàn toàn trách nhiệm về nội dung của bài báo được công bố.

Tài liệu tham khảo

- [1] P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff, S.D. Pekarek. (2013). Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. 3rd ed. *Wiley-IEEE Press*, Hoboken, NJ, USA. <https://doi.org/10.1002/9781118524336>
- [2] A.T. de Almeida, F.J.T.E. Ferreira, J.A.C. Fong. (2011). Standards for efficiency of electric motors. *IEEE Industry Applications Magazine*, 17(1), 12–19. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2010.939427>
- [3] R. Saidur. (2010). A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 877–898. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.018>.
- [4] S. Vaez-Zadeh, F. Hendi. (2005). A continuous efficiency optimization controller for induction motor drives. *Energy Conversion and Management*, 46(5), 701–713. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.05.006>
- [5] B. Lu, T.G. Habetler, R.G. Harley. (2006). A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(4), 924–933. <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.876065>
- [6] International Electrotechnical Commission. (2014). IEC 60034-30-1:2014 — Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). <https://webstore.iec.ch/en/publication/136> (truy cập ngày 02/08/2026)
- [7] A. El-Shahat (Ed.). (2023). Induction Motors – Recent Advances, New Perspectives and Applications. *IntechOpen*. <https://www.intechopen.com/books/1002054> (truy cập ngày 02/08/2026)
- [8] A. Balogun, A. Olajube, A. Awelewa, F. Okafor, T. Sanni, I. Samuel. (2024). A sensorless efficiency-optimizing vector control scheme for an induction motor drive. *Frontiers in Energy Research*, 12, 1406565. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1406565>
- [9] P. Paramo-Balsa, J.M. Roldan-Fernandez, J.

- Semião, M. Burgos-Payan. (2025). Estimation of Power Output and Efficiency of Induction Motors: A New Non-Intrusive Approach. *Sensors*, 25(3), 754. <https://doi.org/10.3390/s25030754>
- [10] M. Nour, P. Thirugnanam. (2017). Investigation of Voltage and Frequency Variation on Induction Motor Core and Copper Losses. In *2017 7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO)*, Sharjah, United Arab Emirates, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2017.7934894>
- [11] Y. Li, M. Liu, J. Lau, B. Zhang. (2015). A novel method to determine the motor efficiency under variable speed operations and partial load conditions. *Applied Energy*, 144, 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.064>
- [12] V.S. Santos, J.J.C. Eras, A.S. Gutiérrez, M.J.C. Ulloa. (2019). Assessment of the Energy Efficiency Estimation Methods on Induction Motors Considering Real-Time Monitoring. *Measurement*, 136, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.080>
- [13] H. Zhang, P. Zanchetta, C. Gerada, K. Bradley, J. Liu. (2011). Performance evaluation of induction motor efficiency and in-service losses measurement using standard test methods. In *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*. Niagara Falls, ON, Canada, pp. 913-917. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2011.5994937>
- [14] F.J.T.E. Ferreira, A.T. de Almeida. (2008). Novel multflux level, three-phase, squirrel-cage induction motor for efficiency and power factor maximization. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(1), 101–109. <https://doi.org/10.1109/TEC.2007.914355>