e-ISSN: 3039 - 3145
Tạp chí Khoa học và Công nghệ Y khoa, 2026, 06, 085-088

TỐI ƯU HÓA TIÊU THỤ ĐIỆN NĂNG CỦA HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU CHỈNH TẦN SỐ

Nguyễn Tiến Dũng*

Trường Đại học Lương Thế Vinh, Số 9 Đường Cầu Đông, Phường Nam Định, tỉnh Ninh Bình, Việt Nam
**Tác giả liên hệ: nguyentiendung@ltvu.edu.vn*

THÔNG TIN BÀI BÁO
Ngày nhận: 16/08/2026
Ngày hoàn thiện: 26/08/2026
Ngày chấp nhận: 06/09/2026
Ngày đăng: 15/09/2026

TỪ KHÓA
Điều chỉnh tần số;
Điều khiển vô hướng;
Máy bơm ly tâm;
Điều chỉnh tự động với phản hồi.

TÓM TẮT
Các phương pháp tối ưu hóa tiêu thụ điện năng của hệ thống truyền động điện dựa trên điều chỉnh tần số nguồn được xem xét trong bài báo. Các định luật vật lý về tiết kiệm điện năng cho các thiết bị: bơm; quạt gió; máy nén có công suất phụ thuộc bậc hai vào tốc độ, được phân tích. Thực hiện phân tích so sánh phương pháp điều khiển vô hướng với phương pháp điều chỉnh tần số (biến tần) theo các tiêu chí: độ chính xác; tính tác động nhanh và hiệu suất sử dụng điện năng. Việc giảm điện năng tiêu thụ đến khi sử dụng biến tần trong tổ máy bơm được xác nhận bằng thực nghiệm.

OPTIMIZING THE POWER CONSUMPTION OF AN ELECTRIC DRIVE SYSTEM USING THE FREQUENCY ADJUSTMENT METHOD

Tien Dung Nguyen*

Luong The Vinh University, 9 Cau Dong Street, Nam Dinh Ward, Ninh Binh Province, Viet Nam
**Corresponding Author: nguyentiendung@ltvu.edu.vn*

ARTICLE INFO
Received: Aug 16, 2026
Revised: Aug 26, 2026
Accepted: Sep 06, 2026
Published: Sep 15, 2026

KEYWORDS
Frequency adjustment;
Scalar control;
Centrifugal pump;
Automatic control with feedback.

ABSTRACT
This paper examines methods for optimizing the power consumption of electric drive systems through supply frequency regulation. It analyzes the physical principles of energy conservation for equipment—such as pumps, fans, and compressors—where power demand varies with the square of the speed. A comparative analysis is conducted between scalar control and frequency regulation (variable frequency drive) methods based on criteria including accuracy, dynamic response, and energy efficiency. Experimental results confirm the reduction in power consumption achieved by using variable frequency drives in pump units.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các động cơ điện không đồng bộ chiếm gần 80% tổng số các loại động cơ điện công nghiệp và tiêu thụ điện năng đến 60% trong công nghiệp. Trong công nghiệp thì phần lớn điện năng tiêu thụ lại từ máy bơm; quạt gió; máy nén; và các tải có chu kỳ làm việc với tốc độ tối đa không đổi, điều này dẫn đến tổn thất khi tải thay đổi; khi chạy không tải; và khi khởi động. Việc sử dụng bộ nguồn có điều chỉnh tần số (tức biến tần) để nuôi các động cơ không đồng bộ sẽ cho phép thay đổi tốc độ động cơ cho phù hợp với tải, giúp tiết kiệm điện năng tiêu thụ từ 30% đến 50% hoặc hơn nữa trong một số ứng dụng, khiến cho việc phát triển các phương pháp tiết kiệm điện năng dựa trên điều chỉnh tần số đầu ra của bộ nguồn trở thành nhu cầu cần được quan tâm giải quyết.

2. MỤC TIÊU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. MỤC TIÊU NGHIÊN CỨU

* Xem xét cơ sở lý thuyết cho tiết kiệm điện năng tiêu thụ bởi động cơ điện không đồng bộ dẫn động tải là bơm; quạt gió; và máy nén khi sử dụng điều chỉnh tần số trong các bộ nguồn biến tần;

* Xem xét định lượng mức tiết kiệm điện năng tiêu thụ của động cơ điện không đồng bộ.

2.2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

* Sử dụng các định luật vật lý mô tả sự phụ thuộc của điện năng tiêu thụ vào tốc độ quay để phân tích khả năng tổn thất điện năng khi tải thay đổi;

** Thực hiện thử nghiệm chứng minh định lượng về tiết kiệm điện năng khi sử dụng biến tần để điều khiển tốc độ quay phù hợp với tải thay đổi.

3. NỘI DUNG VÀ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. PHÂN TÍCH CÁC ĐỊNH LUẬT VẬT LÝ TIẾT KIỆM ĐIỆN NĂNG

3.1.1. Sự phụ thuộc giữa công suất tiêu thụ điện năng và tốc độ quay

Đối với bơm ly tâm; quạt gió; và máy nén, thì các định luật vật lý đối với chúng có tính tương đồng, trong đó lưu ý: chúng là loại tải có đặc tính cơ bậc 2.

Trong công nghiệp, các loại tải này thường được dẫn động bởi động cơ điện không đồng bộ, công suất tiêu thụ điện năng của động cơ điện không đồng bộ dẫn động bơm; quạt gió; và máy nén sẽ tỷ lệ hàm mũ bậc ba với tốc độ quay của rotor động cơ không đồng bộ:

$$P_{CON} : n^3; \frac{P_{CON_2}}{P_{CON_1}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3; P_{CON_2} = P_{CON_1} \cdot \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3, \quad (1)$$

ở đây P_{CON} — công suất tiêu thụ điện năng, kW; n — tần số quay của rotor, rpm; P_{CON_1} — công suất tiêu thụ ban đầu ứng với tốc độ quay ban đầu n_1, kW; công suất tiêu thụ điện năng sau khi thay đổi tốc độ thành n_2.

Điều này có nghĩa rằng, chỉ cần giảm một lượng nhỏ cho tốc độ quay cũng sẽ giảm đáng kể mức tiêu thụ điện năng. Thí dụ, giảm tốc độ quay ở mức 20% sẽ giảm được mức tiêu thụ điện năng đến xấp xỉ 50%, giảm tốc độ 30% sẽ giảm tiêu thụ điện năng hơn hai lần [2].

3.1.2. So sánh với phương pháp điều chỉnh thay thế cổ điển

Các phương pháp truyền thống để điều chỉnh năng suất của bơm và các tổ hợp quạt gió là điều tiết bằng van; chuyển mạch *ON/OFF*; và sử dụng cánh dẫn hướng, các phương pháp này đều chung một đặc điểm là hiệu suất sử dụng điện năng rất thấp. Khi điều tiết thay đổi tốc độ cánh quạt (của bơm; quạt gió; máy nén) thì động cơ điện không đồng bộ vẫn hoạt động ở tốc độ định mức (ứng với tần số của mạng lưới phân phối điện động lực), và như thế là động cơ dẫn động tiêu thụ điện năng gần như để phát hết công suất định mức của động cơ điện, tức phần công suất không sinh công hữu ích được tiêu tán tại các van điều tiết. Ngược lại, nếu tốc độ quay của động cơ dẫn động được thay đổi (một cách chính xác và ổn định tốt ở mức được thay đổi) tương ứng theo năng suất yêu cầu thì loại bỏ được tổn thất công suất do thực hiện điều tiết.

3.2. PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU CHỈNH TẦN SỐ CỦA TRUYỀN ĐỘNG ĐIỆN

3.2.1. Nguyên lý hoạt động của bộ điều chỉnh tần số

Nguyên lý hoạt động cơ bản của bộ nguồn có điều chỉnh tần số ở điện áp đầu ra:

***** Thực hiện chỉnh lưu điện áp lưới *AC* với tần số không đổi (phổ biến 50Hz hoặc 60Hz) thành điện áp *DC*;

****** Lọc điện áp *DC*;

*** Chuyển đổi điện áp *DC* thành điện áp *AC* với tần số và biên độ thay đổi (điều chỉnh) được, đảm bảo cung cấp điện năng phù hợp với tải thay đổi.

3.2.2. Điều khiển vô hướng và vector

Các bộ điều chỉnh tần số (biến tần) tiên tiến thực hiện biến tần bằng hai phương pháp:

* Điều khiển vô hướng (*V/f*) — duy trì tỷ lệ điện áp/tần số là không thay đổi. Phương pháp này đơn giản và khá phổ biến, nhưng tính tác động nhanh bị hạn chế và điều khiển mô-men xoắn là không chính xác;

** Điều khiển *vector* — điều khiển từ thông và mô-men, bảo đảm độ chính xác cao và tính tác động nhanh cho các cơ cấu có tải trọng trên nó thay đổi.

3.2.3. Hệ thống điều chỉnh tự động có phản hồi

Để đạt được hiệu suất sử dụng điện năng cao nhất, các bộ điều chỉnh tần số (tức các bộ biến tần) được tích hợp điều chỉnh *PID* và cảm biến áp lực (mức), sự tích hợp này giúp tự động hóa điều chỉnh tần số để duy trì thông số kỹ thuật mong muốn cho trước đã cài đặt, đồng thời bộ biến tần được tích hợp này cũng được kết nối với mạng công nghiệp (*EtherNet/IP; PROFINET; Modbus; TCP*) để chẩn đoán trạng thái theo thời gian thực.

3.3. THỰC HIỆN NGHIÊN CỨU VÀ ỨNG DỤNG THỰC TẾ

Để kiểm chứng tính hiệu quả của biến tần trong tiết kiệm điện năng, một thử nghiệm được tiến hành trên một máy bơm ly tâm với dẫn động là động cơ điện không đồng bộ 22kW trong hệ thống cấp nước. Ba chế độ làm việc của bơm được so sánh với nhau: chế độ không tồn tại điều chỉnh tốc độ của bơm (thay đổi lưu lượng và áp lực nước bằng van điều tiết); chế độ điều chỉnh tần số theo luật *V/f* với *PID* — duy trì áp lực nước trong đường ống; và chế độ làm việc với điều khiển vector cho điều khiển mô-men và từ thông. Công suất tiêu thụ và lưu lượng đo lường trong 30 ngày dưới các điều kiện về nhu cầu sử dụng nước khác nhau.

Kết quả được ghi lại trong **Bảng 1.**

Bảng 1. Các chỉ số để so sánh tiêu thụ điện năng của một máy bơm

Chỉ số so sánh	Không điều chỉnh tần số	Điều chỉnh tần số bằng phương pháp V/f	Điều chỉnh tần số bằng phương pháp vector
Công suất tiêu thụ trung bình, kW	18,5	12,8	11,2
Tiêu thụ trung bình hàng ngày. kWh	444	307	269
Mức tiết kiệm điện năng, %	-	30,9	39,4
Độ chính xác duy trì áp lực nước, bar	±0,8	±0,2	±0,1
Thời gian của quá trình quá độ, s	15÷20	5÷8	2÷3
Dòng điện khởi động (bội số danh nghĩa)	6÷8	1,5÷2,0	1,2÷1,5

Dưới đây trích đoạn thuật toán cài đặt điều chỉnh PID cho bộ biến tần (sử dụng giao thức *Modbus RTU*):

; Part of the PID controller configuration within the variable frequency drive

; Modbus register addresses for PID adjustment (VFD standard)

; Pressure setpoint setting (setpoint)

40001=5.0; Set pressure, bar

; Tuning PID adjustment coefficients

40002=1.5; K_p - proportionality coefficient

40003=0.8; K_i - integral coefficient

40004=0.1; K_d - differential coefficient

; Feedback sensor configuration

40005=1; Sensor type: 0–10 V analog input

; PID adjustment activation

40006=1; Mode: PID control active

; Frequency adjustment range

40007=10.0; Minimum frequency, Hz

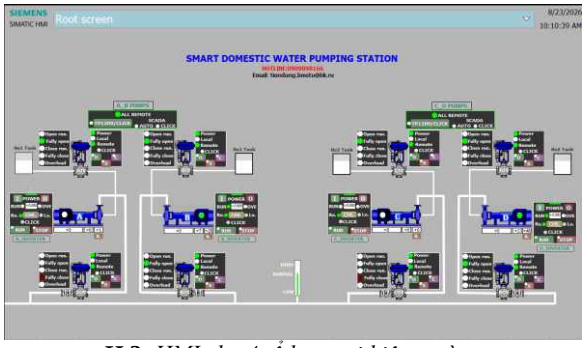
40008=50.0; Maximum frequency, Hz

Kết quả tại Việt Nam là một trạm bơm tăng áp gồm 4 tổ máy 90kW, luân phiên chạy tại khu đô thị MaiLand ở An Khánh-Hoài Đức-Hà Nội đã được tác giả và đội ngũ công nhân VN thực hiện trọn gói.

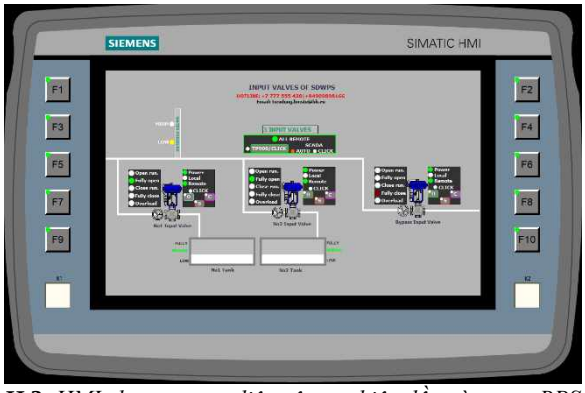
Một số hình ảnh thực về trạm bơm tăng áp này và màn hình *SCADA* của nó, **H. 1**; **H. 2**; **H.3**; **và H.4.**



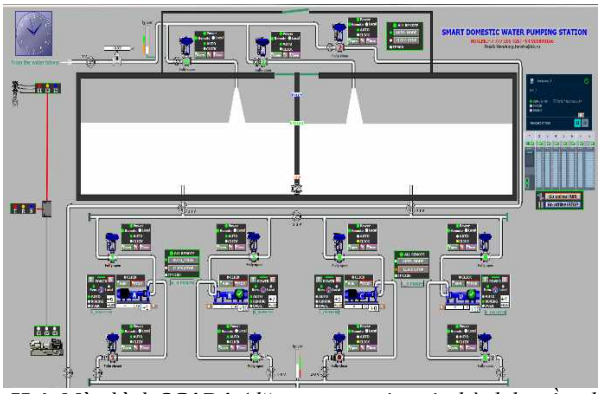
H.1. *Trạm bơm tăng áp BPS gồm 4 tổ máy bơm 90kW*



H.2. *HMI cho 4 tổ bơm tại hiện trường*



H.3. *HMI cho cụm van điện công nghiệp đầu vào trạm BPS*



H.4. *Màn hình SCADA (đặt tại trung tâm vận hành hạ tầng kỹ thuật và kết nối với 4 biến tần+ PLC S7 1500 tại hiện trường thống qua Internet) trạm bơm tăng áp BPS*

Trạm *BPS* này có các đặc điểm chính:

* Sử dụng 4 biến tần *ABB* công suất 90kW với điều chỉnh tần số bằng phương pháp vector;

** Tự động ổn định áp lực đầu ra bằng tín hiệu phản hồi áp lực qua cảm biến áp lực và điều chỉnh tần số;

*** Tự động "*pypass*" dòng chảy khi áp lực nước từ nhà máy nước Sông Đà đủ lớn;

******** Luân phiên chạy các tổ bơm theo nguyên tắc bảo đảm tính liên tục và áp lực đủ của dòng nước đầu ra trong đường ống cấp nước;

***** Tự động dự đoán tình trạng tổ máy bơm đang chạy để gọi tổ máy bơm khác làm việc và dừng tổ máy bơm có trạng thái không tốt;

***** Có các chế độ làm việc: trên màn hình *SCADA* (tự động hoàn toàn; hoặc điều khiển *BPS* bằng rê chuột, được gọi là chế độ *CLICK*); chế độ vận hành tại chỗ bằng *HMI*. Có thể giành quyền vận hành tại hiện trường và tại trung tâm từ xa và hiển thị thông báo *BPS* đang được vận hành ở chế độ nào; chế độ vận hành tại hiện trường thông qua *HMI*;

Lưu ý thêm rằng, hệ truyền động điện máy bơm này không còn các công tắc; nút ấn; đèn hiển thị trên các tủ điện động lực; tủ điện điều khiển với công xoay và các loại đèn hiển thị cùng nút ấn là không tồn tại.

4. THẢO LUẬN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Điều chỉnh *vector* đã:

* Giảm được 39,4% so với dùng van để điều tiết. Mức tiết kiệm này tương tự với kết quả của các nghiên cứu khác (khoảng 30% đến 60%);

** Bảo đảm duy trì áp lực nước với độ chính xác (sai số) $\pm 0,1$, bar (chính xác hơn so với $\pm 0,8$, *bar*, khi dùng van tiết lưu);

*** Thời gian diễn ra quá trình quá độ được rút ngắn xuống còn $2 \div 3$,s;

**** Giảm dòng điện khởi động từ 1,5 lần đến 2 lần so với giá trị dòng điện khởi động trực tiếp, điều này giúp giảm hao mòn cơ khí; bảo vệ cuộn dây *stator*; giảm sụt áp lưới điện rất đáng kể (tức bảo vệ dây truyền tải điện năng khỏi nóng quá mức và tổn thất điện năng trên đường dây);

***** Giảm sốc thủy lực; giảm hao mòn van và đường ống; kéo dài tuổi thọ ổ trục quay của bơm và động cơ điện dẫn động.

Việc sử dụng điều chỉnh vô hướng *V/f* đã giảm tiêu thụ điện năng được 30,9%.

Hoạt động của trạm *BPS* tại khu đô thị MaiLand đã chứng minh tính ưu việt của phương pháp sử dụng biến tần:

* Giảm nhân lực vận hành, từ 6 người xuống còn 2 người;

** Tiết kiệm điện năng so với dùng khởi động mềm đạt đến 48%;

*** Giải phóng toàn bộ các trạm bơm khu vực biệt thự đơn lập và liền kề do cấp nước đủ áp lực với tính bền vững cấp nước rất cao;

**** Dải tần số điều chỉnh là từ 35Hz đến 48Hz, bảo đảm kéo dài tuổi thọ của *BPS*;

***** Mỗi tổ máy bơm chỉ chạy với thời gian theo nguyên tắc nhiệt độ ổ trục quay và cuộn dây *stator* không vượt quá 75 độ C hoặc thời gian được cài đặt là 4 tiếng.

5. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu trình bày trong bài báo đã khẳng định rằng, việc sử dụng các bộ nguồn biến tần công suất trong cấp nguồn điện có điều chỉnh tần số bằng phương pháp *V/f* hoặc *Vector* cho động cơ điện không đồng bộ với tải bậc hai (bơm; quạt; máy nén) là tiết kiệm điện năng rất thuyết phục, mức tiết kiệm lên đến 50%.

Điều chỉnh tần số bằng phương pháp vector mang lại thêm 8% tiết kiệm điện năng so với điều chỉnh tần số bằng phương pháp *V/f* và bảo đảm: độ chính xác duy trì áp lực là $\pm 0,1$ *bar*; thời gian đáp ứng tức thời là từ 2 đến 3 giây; dòng điện khởi động không lớn hơn 1,5 lần so với dòng điện định mức.

Việc tích hợp biến tần với bộ điều chỉnh *PID* và cảm biến phản hồi, cũng như các ưu điểm khác (khởi động trơn tru - mượt mà; giảm sốc thủy lực và hao mòn cơ khí; loại bỏ hoàn toàn hiện tượng "Búa nước") đã làm giảm đáng kể các loại chi phí vận hành.

Khuyến nghị: sử dụng biến tần trong các cơ sở công nghiệp và trong các hệ thống cấp nước, bơm nước thải; bơm chống ngập; thông gió; điều hòa không khí, đặc biệt với tải luôn thay đổi.

6. TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] ГОСТ Р МЭК 61800–2-2012. Системы силовых электроприводов с регулируемой скоростью. Часть 2. Общие требования и номинальные характеристики для низковольтных систем силовых электроприводов с регулируемой частотой. — Введ. 2013–06–01. — М.: Стандартинформ, 2013. — 78 с.

[2] **Патраков А. И., Келушев А. И., Хамидуллин Р. Р**. Энергосбережение в системах электропривода на промышленных предприятиях // Журнал «Вестник науки» от 1 июня 2025 г. № 6 (87) том 1. С. 2161–2173. 2025 г. ISSN 2712–8849 // Электронный ресурс: https://www.вестник-науки.рф/article/23841 (дата обращения: 28.07.2026 г.).