

THIẾT KẾ TỐI ƯU ĐA MỤC TIÊU ĐỘNG CƠ SERVO SỬ DỤNG THUẬT TOÁN RÀNG BUỘC- ϵ

MULTI-TARGET OPTIMAL DESIGN OF SERVO MOTORS BY ϵ -CONSTRAINT ALGORITHM

Nguyễn Đức Bắc*,
Trần Tuấn Vũ, Nguyễn Thế Công

TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp thiết kế tối ưu áp dụng cho động cơ servo. Nội dung báo cáo đưa ra phương pháp thiết kế hiện đại sử dụng thuật toán tối ưu hóa ngay từ bước mô hình hóa và tính toán ban đầu, nhằm giảm các vòng lặp chế tạo mẫu thử tốn kém về chi phí và thời gian của phương pháp thiết kế máy điện “truyền thống”. Bài toán thiết kế tối ưu động cơ servo, sử dụng tối ưu hóa đa mục tiêu với các ràng buộc được chọn để tìm ra kết quả thiết kế tối ưu. Kết quả Pareto được đưa ra với hai mục tiêu trái ngược nhau, cực đại mômen và cực tiểu khối lượng điện từ, nhằm giúp người thiết kế lựa chọn động cơ phù hợp nhất về mặt chi phí và thời gian đáp ứng cho ứng dụng yêu cầu.

Từ khóa: Động cơ servo, thiết kế tối ưu, thuật toán tối ưu, tối ưu đa mục tiêu.

ABSTRACT

This article presents the optimal design approach for servo motors. Content of the report proposes a modern design method using optimization algorithms from the initial modeling step and calculation step, to reduce the costly and time-consuming prototype fabrication loops of conventional motor design method. Servo motor optimization design is using multi-target optimization with constraints to find optimum results. Pareto front has two opposing targets, maximizing the torque and minimizing the electromagnetic mass to help designers to choose the most suitable motor in the terms of cost and response time for the required application.

Keywords: Servomotor, optimal design, optimization algorithms, multi-objectives optimization.

Viện Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

*Email: bacnd@nuce.edu.vn

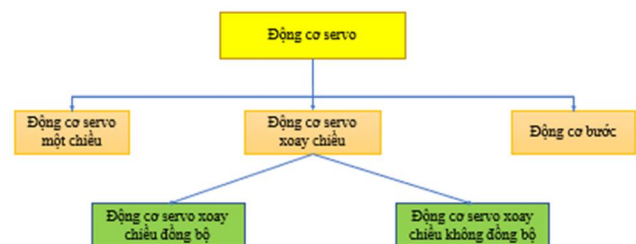
Ngày nhận bài: 01/11/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 18/12/2020

Ngày chấp nhận đăng: 23/12/2020

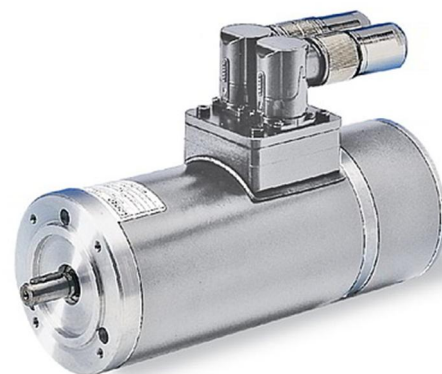
1. GIỚI THIỆU

Động cơ servo hoạt động trong một dải tốc độ rộng - mômen xoắn cao, động lực học nhanh, định vị với độ chính xác cao, thời gian tăng tốc ngắn, trọng lượng thấp, thiết kế nhỏ gọn. Vì vậy, việc giảm thiểu khối lượng ở bước thiết kế không chỉ giúp giảm chi phí sản xuất, mà còn để có mômen quán tính nhỏ, trong khi vấn đề về nhiệt và các đặc tính yêu cầu kỹ thuật của động cơ được đảm bảo. Sơ đồ phân loại động cơ servo được biểu diễn ở hình 1.



Hình 1. Phân loại động cơ servo

Thiết kế động cơ nói chung cũng như động cơ servo nói riêng thường dựa vào mô hình nguyên mẫu ảo để giảm thời gian và chi phí sản xuất mẫu thử và thử nghiệm, ví dụ những nguyên mẫu được tạo ra dựa vào mô hình hóa bằng phương pháp phần tử hữu hạn [1]. Tuy nhiên để đạt được các yêu cầu kỹ thuật mong muốn, bài toán thiết kế tối ưu về hình dáng và kích thước là công việc khó khăn và phức tạp khi lựa chọn thông số tối ưu với các hàm ràng buộc [1-3]. Tối ưu hóa sản phẩm góp phần giảm thiểu chi phí sản xuất cho các doanh nghiệp [4]. Phương pháp thiết kế tối ưu động cơ servo không đồng bộ (hình 2) đề xuất trong [1-8], thông qua phương pháp luận và các công cụ phần mềm, kết hợp các thuật toán tối ưu hóa và các mô hình đa vật lý.



Hình 2. Động cơ servo không đồng bộ

Các nghiên cứu về các thuật toán tối ưu có thể xử lý các biến liên tục và rời rạc được nghiên cứu trong [5-7]. Các bài toán thiết kế đa mục tiêu được tham khảo trong [7-9]. Phương pháp thiết kế tối ưu đa mục tiêu yêu cầu số lần lặp

lại thiết kế ít hơn nhiều so với các phương pháp thiết kế truyền thống. Trong thiết kế tối ưu đa mục tiêu, có thể lựa chọn thuật toán đạo hàm hay thuật toán ngẫu nhiên để giải quyết các bài toán tối ưu tuyến tính hoặc phi tuyến.

Nội dung của bài báo trong phần 2 sẽ trình bày phương pháp thiết kế tối ưu đơn và đa mục tiêu được áp dụng để tối ưu hóa trong thiết kế máy điện. Công thức tối ưu hóa và kết quả thiết kế tối ưu Pareto sẽ được trình bày chi tiết trong phần 3 với thiết kế tối ưu đa mục tiêu áp dụng cho động cơ servo. Các kết luận được đưa ra bàn luận trong phần 4.

2. PHƯƠNG PHÁP TỐI ƯU ĐA MỤC TIÊU

2.1. Lý thuyết tối ưu

Việc tối ưu hóa hay tìm giá trị cực đại (hoặc cực tiểu) của một mục tiêu được thay bằng mô hình toán học của yêu cầu (mục tiêu) đó giúp giải quyết một cách logic hơn. Nó phải xác định chính xác bằng các công thức [10]:

$$F(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X))$$

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in S \in \mathbb{R}^n$$

$$x_i \in D_i = \{d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{iq}\}, \quad i = 1, \dots, n_d \quad (1)$$

Ràng buộc:

$$g_j(X) \leq 0, \quad j = 1, \dots, l$$

$$h_k(X) = 0, \quad k = 1, \dots, m \quad (2)$$

Các hàm mục tiêu ($f_1(X), f_2(X), \dots$) là một hoặc nhiều tiêu chí xác định mục tiêu, có thể là để giảm thiểu chi phí (sản xuất, tiêu hao điện năng,...), giảm thiểu tác động môi trường (cạn kiệt tài nguyên thiên nhiên, khí thải, hiệu ứng nhà kính...) hoặc để tối đa hóa hiệu suất, mômen, công suất...

Các biến hoặc các tham số thiết kế ($X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$) là các đại lượng đầu vào có ảnh hưởng đến hiệu suất, khối lượng, mômen của động cơ. Các thông số này sẽ được thay đổi trong quá trình lặp lại của thiết kế tối ưu. Chẳng hạn như kích thước hình học của stator, rotor, số vòng dây quấn, tính chất vật liệu,... Việc lựa chọn số lượng các biến cũng là vấn đề của tối ưu hóa. Có thể thay đổi một số lượng lớn các biến thiết kế để tăng không gian tìm kiếm nhưng quá trình tối ưu hóa sẽ lâu hơn và khó hội tụ hơn.

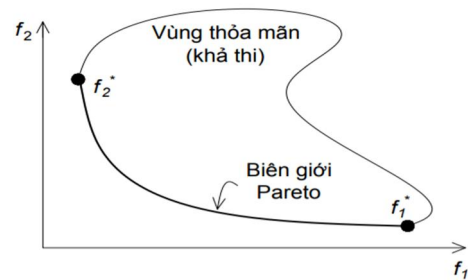
Các ràng buộc ($g_j(X), h_k(X)$) liên quan đến đa lĩnh vực như cơ, nhiệt, điện từ, điều khiển, được thể hiện trong các thông số kỹ thuật của máy. Ví dụ, hiệu suất của động cơ phải cao để nâng cao hiệu quả về mặt năng lượng, nhiệt độ cuộn dây phải thấp hơn giới hạn tăng nhiệt của lớp cách điện, dòng điện cần thiết để thực hiện mômen xoắn cực đại không vượt quá dòng điện tối đa cho phép bởi bộ điều khiển và công suất lớn nhất ở tốc độ cao phải lớn hơn hoặc bằng với yêu cầu kỹ thuật cho động cơ servo... Tương tự, trong quá trình tối ưu hóa, người thiết kế có thể thêm nhiều ràng buộc không được thể hiện trong các thông số kỹ thuật nhưng ngầm hiểu cho các chuyên gia để đảm bảo thiết kế tối ưu tính toán khả thi trong sản xuất. Ví dụ, một ràng buộc như là hệ số lấp đầy phải được thêm vào để đảm

bảo rằng dây quấn không được vượt quá rãnh stator, mật độ dòng điện lớn nhất để đảm bảo về nhiệt cho động cơ. Những ràng buộc được thêm vào đảm bảo tính phù hợp của mô hình đã chọn.

2.2. Tối ưu đa mục tiêu Pareto

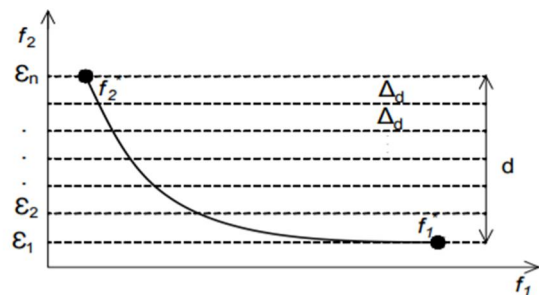
Thông thường, các kỹ sư phải đối mặt với nhiệm vụ thiết kế các ứng dụng công nghiệp để đáp ứng một tập hợp các yêu cầu, đa mục tiêu. Tối ưu hóa hai mục tiêu là một trường hợp cụ thể trong tối ưu hóa đa mục tiêu, trong đó có thể lựa chọn tối ưu kích thước vật lý giúp chi phí của hệ thống ở mức tối thiểu đồng thời tối ưu mômen cực đại hay hiệu suất với tập hợp các ràng buộc đồng thời [9].

Hình 3 thể hiện tối ưu đa hai mục tiêu được định nghĩa bởi biểu đồ phân bố Pareto. Điểm $x^* \in X$ là tối ưu Pareto khi và chỉ khi không tồn tại điểm khác $x \in X$, sao cho $f(x^*) \geq f(x)$ và $f_i(x) < f_i(x^*)$ cho ít nhất một hàm mục tiêu.



Hình 3. Biểu đồ phân bố tương trưng tối ưu đa mục tiêu Pareto

Có hai họ phương pháp tối ưu hóa chính: phương pháp đạo hàm và phương pháp ngẫu nhiên. Các phương pháp đạo hàm: thuật toán Simplex Nelder-Mead, SQP-Lập trình bậc hai tuần tự,... [11]. Để tìm giá trị tối ưu, chúng dựa trên hướng tìm kiếm được cung cấp bởi các đạo hàm của hàm mục tiêu. Phương pháp cho hội tụ nhanh chóng nhưng có thể là hội tụ cục bộ. Các phương pháp ngẫu nhiên: thuật toán di truyền (GA), tối ưu hóa dòng hạt (PSO),... dựa trên cơ chế chuyển đổi ngẫu nhiên và xác suất giúp khám phá không gian tìm kiếm một cách thông minh và có thể hội tụ đến tối ưu toàn cục. Chúng yêu cầu một số lượng lớn các đánh giá của hàm mục tiêu, do đó, thời gian tính toán rất lớn so với các phương pháp đạo hàm.



Hình 4. Đồ thị tương trưng sử dụng thuật toán ϵ -constraint [9]

Một trong các phương pháp giải bài toán tối ưu đa mục tiêu hiệu quả là thuật toán ϵ -constraint [9]. Trong phương pháp này, một trong các hàm mục tiêu được chọn để tối ưu hóa $f_1(x)$ trong khi các hàm khác $f_2(x), f_3(x)$ được chuyển

thành các ràng buộc bổ sung biến bài toán đa mục tiêu thành đơn mục tiêu, dẫn đến một giải pháp có thể được chứng minh là luôn tối ưu Pareto. Thay đổi có hệ thống các giá trị của hàm mục tiêu thành các ràng buộc bổ sung $f_2(x) \leq \{\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n\}$ dẫn đến việc tạo ra một biên giới Pareto phân bố đều. Đồ thị tương trưng sử dụng thuật toán ϵ -constraint được thể hiện trong hình 4.

2.3. Thuật toán tối ưu đơn mục tiêu SQP

Thuật toán lập trình bậc hai tuần tự (Sequential Quadratic Programming-SQP) [12] là một trong những phương pháp tốt nhất để giải quyết các bài toán tối ưu hóa đơn mục tiêu với ràng buộc phi tuyến.

Vấn đề lập trình phi tuyến:

$$\min_x f(x) \tag{3}$$

$$g_j(x) = 0 \quad j = 1, \dots, m \tag{4}$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = m + 1, \dots, n \tag{5}$$

Trong đó, x là vector của tham số thiết kế, $f(x)$ là hàm mục tiêu, m, n là số lượng các ràng buộc, là ưu điểm lớn của lập trình bậc hai tuần tự là khả năng giải quyết các vấn đề với các ràng buộc phi tuyến. Hàm ràng buộc phi tuyến Lagrangian cho bài toán lập trình phi tuyến được biểu diễn như sau:

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^n \lambda_i * g_i(x) \tag{6}$$

Ý tưởng của phương pháp lập trình bậc hai tuần tự là mô hình hóa bài toán lập trình phi tuyến (3)-(5) ở một giải pháp gần đúng nhất định, giả sử x^k bằng một bài toán lập trình bậc hai. Sau đó sử dụng giải pháp cho bài toán con này để xây dựng một xấp xỉ tốt hơn x^{k+1} . Quá trình này được lặp lại để tạo ra một chuỗi các xấp xỉ sẽ hội tụ đến giải pháp tối ưu x^* .

Ý tưởng chính của lập trình bậc hai tuần tự là xây dựng bài toán con lập trình bậc hai dựa trên một xấp xỉ bậc hai của hàm Lagrangian $L(x, \lambda)$ của (6) và bằng cách tuyến tính hóa các ràng buộc phi tuyến của (3) và (5).

$$\frac{\min}{s} f(s) = \frac{\min}{s} [\frac{1}{2} s^T * H_k + \Delta f(x^k)^T * s] \tag{7}$$

Ràng buộc:

$$\Delta g_j(x^k)^T * s + g_j * (x^k) = 0 \quad \text{với } j = 1, \dots, m \tag{8}$$

$$\Delta g_j(x^k)^T * s + g_j * (x^k) \leq 0 \quad \text{với } j = m+1, \dots, n \tag{9}$$

Bài toán con lập trình bậc hai (7)-(9) được giải bằng cách sử dụng phương thức thiết lập hoạt động Quadratic Programming. Các giải pháp của chương trình con lập trình bậc hai từ (7)-(9) sau đó được sử dụng để tạo thành một xấp xỉ mới x^{k+1} như sau:

$$x^{k+1} = x^k + \lambda^k * s \tag{10}$$

Ví dụ 1: áp dụng thuật toán SQP cho bài toán đơn mục tiêu.

$$\text{Hàm mục tiêu: } \min. f_1(x) = 3.x_1^4 - 4.x_1^2.x_2 + 30 \tag{11}$$

$$0 \leq x_1 \leq 7$$

$$0 \leq x_2 \leq 4$$

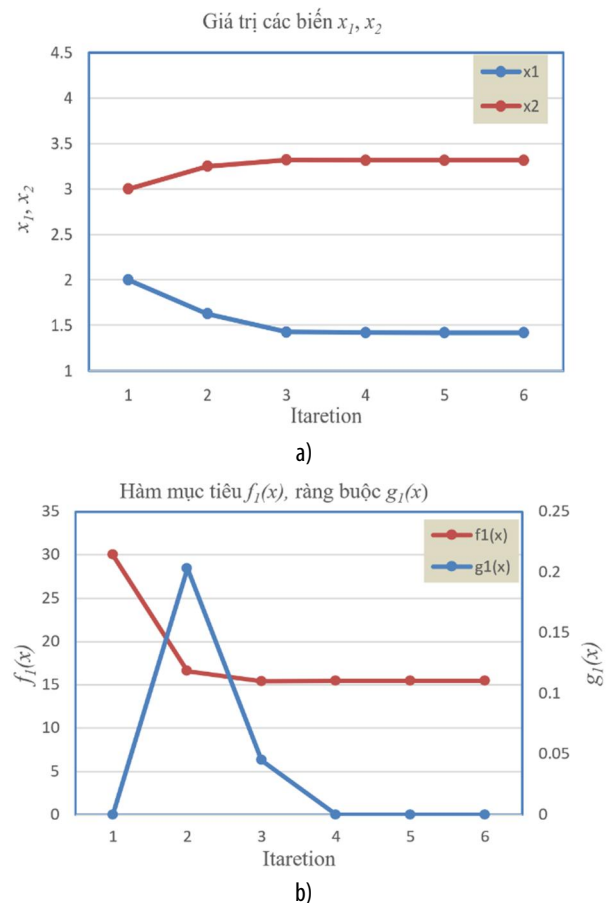
Các ràng buộc:

$$g_1(x) = x_1^2 + x_2^2 - 13 = 0 \tag{12}$$

$$g_2(x) = 2.x_1^2 + x_1.x_2^2 - 80 \leq 0 \tag{13}$$

Sử dụng thuật toán bậc hai tuần tự SQP với điểm ban đầu: $x_0 = [2 \quad 3]^T$.

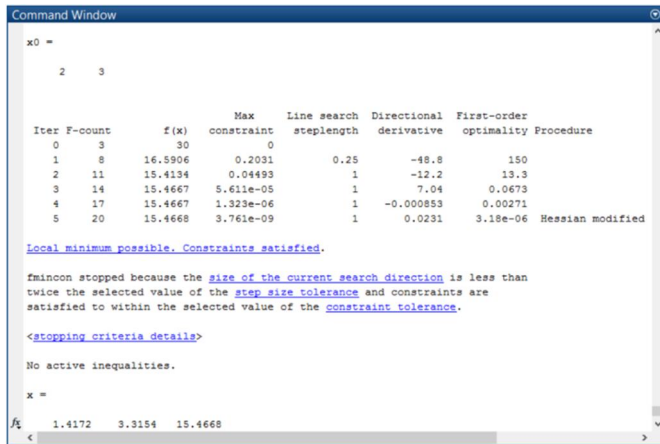
Kết quả thu được sau 6 vòng lặp, được trình bày trong hình 5. Đặc tính hội tụ của các biến x_1, x_2 được thể hiện trong hình 5(a), 5(b) thể hiện đặc tính hội tụ của hàm mục tiêu $f_1(x)$ và ràng buộc $g_1(x)$.



Hình 5. Kết quả hội tụ sử dụng thuật toán SQP: các biến x_1, x_2 (hình a); của hàm $f_1(x)$ và ràng buộc $g_1(x)$ (hình b)

Điểm ban đầu $x_0 = [2 \quad 3]^T$ thỏa mãn ràng buộc $g_1(x)$ và $g_2(x)$, với giá trị hàm mục tiêu $f_1(x) = 30$. Sau vòng lặp thứ nhất, giá trị hàm mục tiêu $f_1(x)$ đã giảm 44,69% còn 16,59, tuy ràng buộc $g_1(x)$ lại tăng nhảy vọt (từ 0 tăng lên 0,2031), $g_2(x) = -57,5547 < 0$, trong khi đó các biến x_1, x_2 có xu hướng hội tụ dần. Tương tự sau 6 vòng lặp hàm mục tiêu $f_1(x)$ đã giảm dần và hội tụ về giá trị $f_1(x)^* = 15,4668$, với ràng buộc $g_1(x)$ hội tụ về giá trị 0 là $g_1(x)^* = 3,76e^{-9}$, $g_2(x) = -60,4054 < 0$ tương ứng với giá trị biến x_1, x_2 là $x^* = [1,4172 \quad 3,3154]^T$.

Sử dụng fmincon là một hàm tích hợp của thuật toán SQP trong công cụ Matlab. Hình 6 là kết quả chạy hàm fmincon cho ví dụ ở phương trình (11)-(13) trong Matlab. Kết quả tính toán hội tụ tối ưu thu được ở hình 5 hoàn toàn trùng khớp với kết quả mô phỏng Matlab.



Hình 6. Kết quả tính toán tối ưu mô phỏng Matlab

Ví dụ 2: áp dụng thuật toán ϵ -constraint cho bài toán đa mục tiêu (hai mục tiêu).

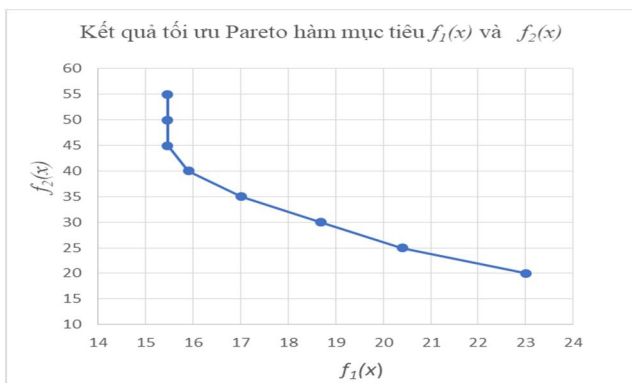
Hàm mục tiêu:

$$\begin{aligned} \min. f_1(x) &= 3.x_1^4 - 4.x_1^2.x_2 + 30 \\ \min. f_2(x) &= 2.x_1^2.x_2 + x_1.x_2^2 + 10 \end{aligned} \quad (14)$$

Các ràng buộc được giữ nguyên như ví dụ 1. Áp dụng thuật toán ϵ -constraint, hàm mục tiêu $f_2(x)$ sẽ được chuyển thành thêm 1 ràng buộc phi tuyến $g_3(x)$, thuật toán SQP trong môi trường Matlab được sử dụng để giải bài toán này.

$$\begin{aligned} g_1(x) &= x_1^2 + x_2^2 - 13 = 0 \\ g_2(x) &= 2.x_1^2 + x_1.x_2^2 - 80 \leq 0 \\ g_3(x) &= 2.x_1^2.x_2 + x_1.x_2^2 + 10 \leq \epsilon \end{aligned} \quad (15)$$

Hình 7 là kết quả tối ưu Pareto của hàm mục tiêu $f_1(x)$ và $f_2(x)$ trong ví dụ 2. Hàm mục tiêu $f_2(x)$ được chuyển thành ràng buộc $g_3(x)$ với các bước nhảy ràng buộc ϵ thuộc [20 : 5 : 55]. Với mỗi bước nhảy ϵ_i của hàm mục tiêu $f_2(x)$ (hay ràng buộc $g_3(x)$), sẽ cho ra kết quả tối ưu tương ứng của hàm mục tiêu $f_1(x)$. Tập hợp các kết quả trên sẽ tạo ra đồ thị tối ưu Pareto. Dựa vào đặc tính Pareto, có thể chọn điểm thỏa mãn các ràng buộc và tối thiểu hóa các hàm mục tiêu.



Hình 7. Kết quả Pareto hai hàm mục tiêu $f_1(x)$ và $f_2(x)$

3. ỨNG DỤNG TỐI ƯU ĐA MỤC TIÊU ĐỘNG CƠ SERVO

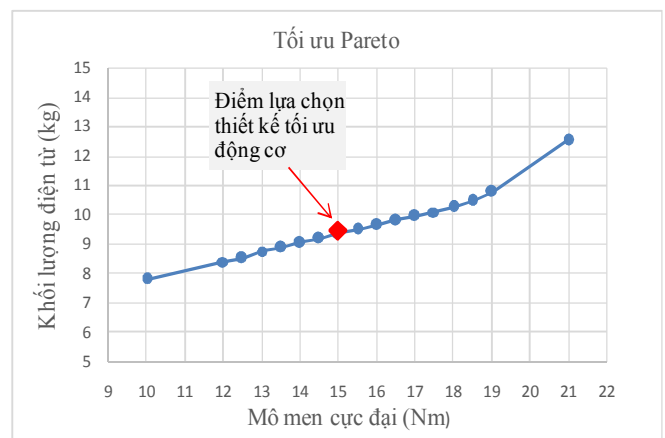
Bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu của động cơ ba pha servo không đồng bộ rotor lồng sóc nhôm, tốc độ tối đa 4000rpm, được xây dựng như sau:

- 02 hàm mục tiêu:
- + Tối thiểu hóa khối lượng điện từ động cơ servo
- + Tối đa hóa mômen cực đại của động cơ @500rpm
- Các biến thiết kế và ràng buộc:
- + Đường kính ngoài/trong của stator
- + Chiều dài lõi sắt stator/rotor
- + Số vòng dây quấn
- + Hệ số trượt của động cơ
- + Điện áp dây
- + Dòng điện cấp cho động cơ $\leq 3A$.
- + Mật độ dòng điện $\leq 9A/mm^2$
- + Hệ số lấp đầy rãnh $\leq 75\%$
- + Điện áp dây $\leq 380V$

Hai mục tiêu mâu thuẫn nhau được chọn: tối đa hóa mômen cực đại và giảm thiểu khối lượng điện từ của động cơ (mạch từ stator/rotor, dây quấn stator bằng đồng và lồng rotor bằng nhôm). Các biến thiết kế thay đổi sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến khối lượng và mômen cực đại của động cơ. Việc thiết kế tối ưu hóa hai mục tiêu nhằm lựa chọn động cơ servo phù hợp nhất với ứng dụng yêu cầu.

Áp dụng thuật toán ϵ -constraint với hàm mục tiêu cực đại hóa mômen động cơ servo được đưa thành ràng buộc {10,... 21} N.m kết hợp thuật toán tối ưu SQP và mô hình giải tích động cơ trong môi trường Matlab. Kết quả phân bố tối ưu Pareto theo hai hàm mục tiêu khối lượng và mômen cực đại được biểu diễn ở hình 8.

Trên đồ thị đặc tính phân bố tối ưu Pareto, điểm (♦) là điểm lựa chọn thiết kế tối ưu động cơ servo không đồng bộ. Vật liệu sử dụng thép M800-50A, dây dẫn bằng đồng và lồng sóc nhôm, lựa chọn tốt nhất Pareto giữa hai hàm mục tiêu: mômen cực đại biến thiên từ 10 ÷ 21N.m với khối lượng điện từ động cơ thay đổi từ 7,81 ÷ 12,53kg.



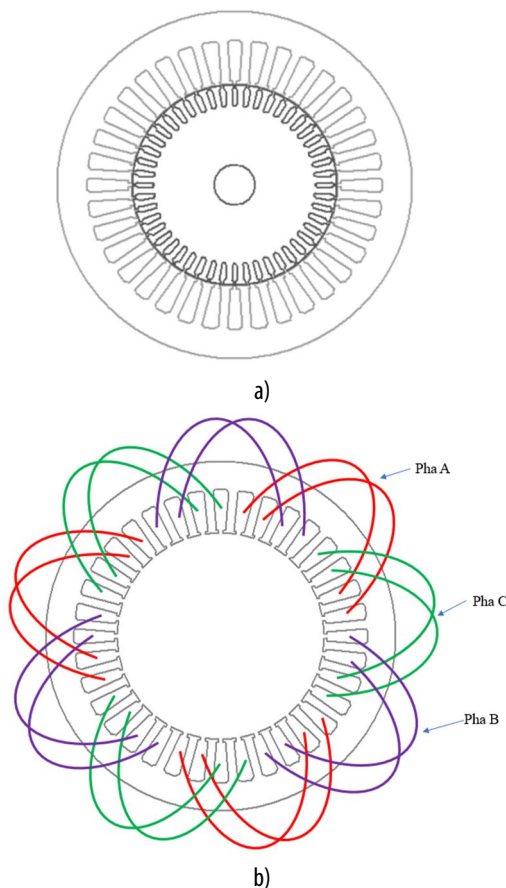
Hình 8. Đặc tính phân bố tối ưu Pareto theo hai hàm mục tiêu

Hình 9 thể hiện thiết kế của động cơ tối ưu (♦) được chọn ở đặc tính tối ưu Pareto trong hình 8. Hình 9(a) thể hiện kích thước stator và rotor của động cơ, hình 9(b) biểu diễn sơ đồ dây quấn điển hình. Các giá trị hàm mục tiêu và các thông số thiết kế chính của động cơ này được trình bày

chi tiết trong bảng 1. Động cơ được chọn có mômen cực đại là 15,0Nm với khối lượng điện từ tối thiểu hợp lý là 9,52kg.

Bảng 1. Kết quả một số thông số chính của thiết kế tối ưu động cơ servo không đồng bộ

TT	Thông số	Đơn vị	Giá trị
Hàm mục tiêu	Mômen cực đại	N.m	15,0
	Khối lượng phần điện từ	kg	9,52
	Mạch từ stator/rotor	kg	4,5/2,8
	Dây quấn đồng/lồng sóc nhôm	kg	1,9/0,3
Thông số thiết kế tối ưu	Đường kính ngoài/trong stator	mm	140,4/83,2
	Số rãnh của stator/rotor	-	36/48
	Số cực	-	6
	Chiều dài mạch từ	mm	90,1
	Số vòng dây quấn	-	105
	Điện áp dây đặt vào động cơ servo	V	350,7
	Dòng điện pha stator	A	2,99



Hình 9. Thiết kế tối ưu kích thước mạch từ stator/rotor (a); Sơ đồ dây quấn của thiết kế tối ưu (b)

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một phương pháp mới thiết kế động cơ sử dụng các thuật toán tối ưu trên cơ sở tối ưu các thông số kiểm soát năng lượng, ứng dụng cho động cơ servo. Đặc tính Pareto đưa ra phương án lựa chọn tốt nhất

giữa khối lượng điện từ và mômen cực đại sau khi đánh giá mô hình bằng thuật toán ϵ -constraint kết hợp thuật toán lập trình bậc hai tuần tự (SQP) trong Matlab. Một thiết kế tối ưu được lựa chọn trên đặc tính phân bố tối ưu Pareto với khối lượng điện từ là 9,52kg, mômen cực đại đạt được là 15,0Nm. Một thiết kế khác có thể làm tăng mômen cực đại nhưng với khối lượng lớn hơn. Kết quả thiết kế tối ưu Pareto có thể giúp lựa chọn thiết kế tốt nhất phù hợp với chi phí và mômen cực đại cũng như thời gian đáp ứng cho các yêu cầu ứng dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. H. Mikami, K. Ide, Y. Shimizu, M. Senoo, H. Seki, 2011. *Historical Evolution of Motor Technology*. Hitachi Review Vol. 60, No. 1, 38-45.

[2]. M. Centner, 2014. *Basics and application of motor design optimization in an industrial environment*. 21th International Conference on, Electrical Machines (ICEM), in Berlin, Germany, 1008-1012.

[3]. S. Stipetic, W. Miebach, D. Zarko, 2015. *Optimization in design of electric machines: Methodology and workflow*. Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Advanced Electromechanical Motion Systems (ACEMP-OPTIMELECTROMOTION), Side, Turkey, 441-448.

[4]. Damir Zarko, Drago Ban, Davor Gooricki, 2006. *Improvement of a ServoMotor Design Including Optimization and Cost Analysis*. 12th International conference on Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC), in Portoroz, Slovenia, 302-307.

[5]. T. V. Tran, S. Brisset, P. Brochet, 2007. *Combinatorial and Multi-level Optimizations of a Safety Isolating Transformer*. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 26, No. 3-4, 201-208.

[6]. S. Sivaraju, F. Ferreira, N. Devarajan 2012. *Genetic algorithm based design optimization of a three-phase multiflux Induction Motor*. XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM), 288-294.

[7]. Y. Duan, R. G. Harley, 2011. *A Novel Method for Multiobjective Design and Optimization of Three Phase Induction Machines*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, Issue 4, 1707-1715.

[8]. J. Buschbeck, M. Vogelsberger, A. Orellano, Erich Schmidt, 2016. *Pareto Optimization in Terms of Electromagnetic and Thermal Characteristics of AirCooled Asynchronous Induction Machines Applied in Railway Traction Drives*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 52, Issue 3, 1-4.

[9]. Kenneth Chircop, David Zammit, 2013. *On ϵ -constraint based methods for the generation of Pareto frontiers*. Journal of Mechanics Engineering and Automation 3, 279-289.

[10]. T.V. Tran, 2016, *Optimal Design Approach applied for Servo Motors*. The 2016 Regional Conference on Electrical and Electronics Engineering, Hanoi, Vietnam.

[11]. P. Venkataraman, 2002, *Applied Optimization with Matlab Programming*. A Wiley – Interscience publication, John Wiley & Sons, New York.

[12]. Pavlos S. Georgilakis, 2009. *Spotlight on modern transformer design*. Springer Dordrecht Heidelberg London, 231-239.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Duc Bac, Tran Tuan Vu, Nguyen The Cong

School of Electrical Engineering, Hanoi University of Science and Technology