

ĐIỀU KHIỂN TỐI THIỂU TỔN THẤT HỆ TRUYỀN ĐỘNG ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU CHÌM

NGUYỄN AN TOÀN*

Khoa Kỹ thuật & Công nghệ, Trường Đại học Quy Nhơn

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất một thuật toán tối thiểu tổn thất cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu chìm (IPMSM). Dựa vào mô hình tổn thất của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM), thành phần trục d tối ưu của dòng điện stator được đưa ra để giảm thiểu tổn thất công suất. Dòng điện này được xem xét trong hai trường hợp: tối thiểu tổn thất ở trong vùng giới hạn điện áp và dòng điện, và tối thiểu tổn thất trên biên giới hạn điện áp. Bảo hòa từ cũng được xét đến để tăng độ chính xác của thuật toán. Cuối cùng, kết quả mô phỏng khi sử dụng thuật toán đề xuất và một thuật toán đưa ra gần đây được so sánh và đánh giá.

Từ khóa: Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, tổn thất công suất, thuật toán tối thiểu tổn thất.

ABSTRACT

Loss-Minimization Control for Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives

This article proposes a loss-minimization algorithm (LMA) for interior permanent-magnet synchronous motor (IPMSM). Based on the loss model of permanent magnet synchronous motor (PMSM), the optimal d -axis component of the stator current is given to minimize power losses. This current is considered in two cases: loss minimizing in the voltage and current limit interior and loss minimizing on the voltage limit boundary. Magnetic saturation is also considered to improve the accuracy of the algorithm. Finally, the simulation results using the proposed algorithm and an algorithm introduced recently are compared and evaluated.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor (PMSM), power loss, loss-minimization algorithm.

1. Đặt vấn đề

Với hiệu suất cao và tỷ lệ công suất trên khối lượng lớn... PMSM rất phù hợp cho các ứng dụng trong các hệ truyền động có nguồn cung cấp hạn chế như pin, ắc quy. Để tăng tính cạnh tranh của sản phẩm thì một yêu cầu đặt ra cho các ứng dụng này là phải tăng thời gian sử dụng pin (ắc quy), hoặc cũng có thể giảm kích cỡ pin (ắc quy) nếu cần thiết. Khi đó, điều khiển nâng cao hiệu suất PMSM trở thành một yêu cầu quan trọng. Vì vậy, việc điều khiển tối thiểu tổn thất cho động cơ này cần được nghiên cứu chuyên sâu.

Tổn thất động cơ bao gồm tổn thất cơ khí, tổn thất đồng, tổn thất sắt, tổn thất phụ và một số tổn thất khác. Mademlis và các cộng sự [1] đã xây dựng công thức hàm tổn thất trong hệ tọa độ $d-q$, và suy ra cách để giảm thiểu tổn thất theo dòng điện trục d . Nhưng tối thiểu tổn thất trên biên giới hạn điện áp ở tốc độ cao chưa được xét đến. Jeong và các cộng sự [2] đã xét vùng bão hòa và tách kênh trong mô hình tổn thất, và ứng dụng phương pháp Newton online trong tìm kiếm giá trị tối ưu. Nhưng một nghiên cứu tối ưu ở vùng tốc độ cao cũng chưa được xét tới. Lee và các

*Email: nguyenantolan@qnu.edu.vn

Ngày nhận bài: 11/6/2018; Ngày nhận đăng: 30/7/2018

cộng sự [3] đã đưa ra thuật toán giảm thiểu tổn thất bằng phương pháp Lagrange dựa trên mô hình tổn thất của Mademlis [1], và đã dùng phép xấp xỉ để tìm nghiệm trên biên giới hạn điện áp.

Bài báo đề xuất một thuật toán tối thiểu tổn thất dựa trên mô hình tổn thất và được sắp xếp như sau. Mục 2 trình bày mô hình tổn thất công suất của động cơ theo hàm toàn phương của các dòng điện, cấu hình điều khiển mà tác giả sử dụng và một số phương pháp giảm thiểu tổn thất đã biết. Giải bài toán tối thiểu tổn thất với hai trường hợp riêng biệt và thuật toán tối thiểu tổn thất được đưa ra ở mục 3. Mục 4 trình bày kết quả mô phỏng khi sử dụng thuật toán đề xuất, sau đó so sánh với kết quả mô phỏng khi sử dụng một phương pháp được đưa ra gần đây [3], và đánh giá kết quả. Các ưu điểm nổi bật của thuật toán đề xuất được tổng hợp ở mục 5.

2. Mô hình tổn thất và một số phương pháp tối thiểu tổn thất đã biết

2.1. Mô hình của PMSM

Trong hệ tọa độ d - q quay đồng bộ với vận tốc điện ω_e , quan hệ điện áp và dòng điện được biểu diễn như sau [4]:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_s + sL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_m \end{bmatrix}. \quad (1)$$

trong đó u_d, u_q : điện áp đầu cực theo hai trục d, q ;

R_s : điện trở stator;

L_d, L_q : điện cảm dọc trục và ngang trục;

ω_e : tốc độ điện;

i_d, i_q : dòng điện stator theo trục d, q ;

ψ_m : từ thông nam châm vĩnh cửu.

Do đặc điểm cấu tạo của rotor nên điện cảm trục q của IPMSM lớn hơn so với điện cảm trục d ($L_q > L_d$). Đặt ξ là hệ số nhấp nhô:

$$\xi = \frac{L_q}{L_d} > 1. \quad (2)$$

Giới hạn từ thông rotor có thể được phản ánh qua L_d và nguồn dòng ảo i_f [5]. Khi đó, có thể xem:

$$\psi_m = L_d i_f. \quad (3)$$

Mômen điện từ của động cơ được tính theo công thức sau [3]:

$$T_e = \frac{3}{2} P_n L_d [i_f - (\xi - 1)i_d] i_q \quad (4)$$

trong đó P_n là số đôi cực.

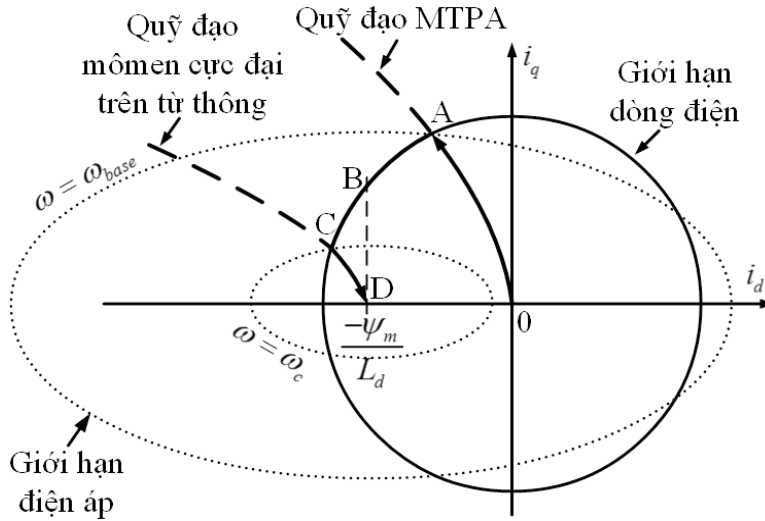
Gọi $I_{s \max}$ là biên độ dòng điện lớn nhất. Lúc đó, giới hạn dòng điện được biểu diễn là một đường tròn (Hình 1) có phương trình như sau:

$$i_d^2 + i_q^2 \leq I_{s \max}^2. \quad (5)$$

Điện áp rơi $R_s i_d$ và $R_s i_q$ trên điện trở cuộn dây stator là nhỏ so với các thành phần khác trong vùng tốc độ cao, chúng thường được bỏ qua khi chọn giới hạn điện áp. Ràng buộc điện áp trong (1) trở thành:

$$\frac{(i_d + i_f)^2}{U_{s\max}^2 / \omega_e^2 L_d^2} + \frac{i_q^2}{U_{s\max}^2 / \omega_e^2 L_q^2} \leq 1 \quad (6)$$

trong đó $U_{s\max} = U_{dc} / \sqrt{3}$ là điện áp đỉnh lớn nhất của bộ nghịch lưu. Giới hạn điện áp (6) là một ellipse (Hình 1) trong mặt phẳng (i_d, i_q) . Ellipse này co lại tại $(-\psi_m / L_d, 0)$ khi tốc độ ω_e tăng [3].



Hình 1. Đường tròn giới hạn dòng điện và ellipse giới hạn điện áp đối với IPMSM

2.2. Mô hình tổn thất của PMSM

Tổn thất của PMSM bao gồm tổn thất đồng, tổn thất sắt, tổn thất phụ, và một số tổn thất khác.

Tổn thất đồng của PMSM phụ thuộc điện trở của cuộn dây stator và được tính theo công thức [3]:

$$P_{cu} = \frac{3}{2} R_s I_s^2 = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2). \quad (7)$$

Tổn thất sắt, ngoài phụ thuộc vào cấu tạo và vật liệu còn phụ thuộc vào tần số làm việc của động cơ, nên tổn thất sắt thường được xác định theo công thức thực nghiệm [1], [3]:

$$\begin{aligned} P_{fe} &= C_{fe} \omega_e^\gamma \left[(\psi_m + L_d i_d)^2 + L_q^2 i_q^2 \right] \\ &= C_{fe} \omega_e^\gamma L_d^2 \left[(i_f + i_d)^2 + \xi^2 i_q^2 \right] \end{aligned} \quad (8)$$

trong đó $\gamma = 1,5 \div 1,6$ và C_{fe} là hệ số tổn thất sắt.

Việc tính toán tổn thất phụ là rất khó khăn và thường không đảm bảo độ chính xác, nên trong thực tế tổn thất này được ước lượng theo công thức [6]:

$$P_{str} = C_{str} \omega_e^2 (i_d^2 + i_q^2) \quad (9)$$

trong đó C_{str} là hệ số tổn thất phụ.

Tổng các tổn thất của PMSM đã đưa ra ở trên mà có thể điều khiển được:

$$\begin{aligned} P_t &= P_{cu} + P_{fe} + P_{str} \\ &= A(i_d^2 + i_q^2) + B[(i_f + i_d)^2 + \xi^2 i_q^2] \end{aligned} \quad (10)$$

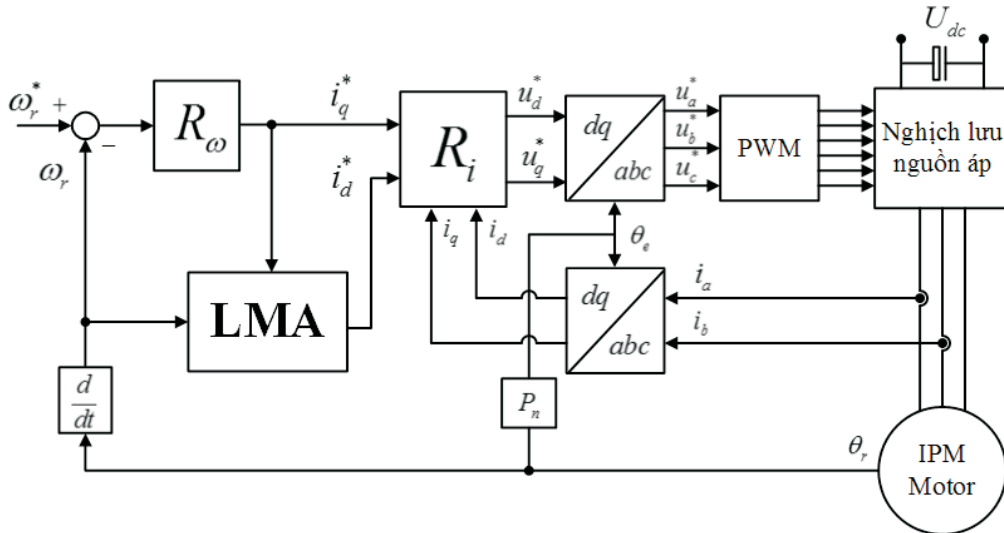
$$\text{trong đó:} \quad A = \frac{3}{2} R_s + C_{str} \omega_e^2 \quad (11)$$

$$\text{và} \quad B = C_{fe} \omega_e^2 L_d^2. \quad (12)$$

2.3. Cấu hình điều khiển

Sơ đồ khối cấu trúc của một hệ truyền động điện điều khiển tựa theo từ thông rotor (FOC) sử dụng PMSM được thể hiện trên **Hình 2**. Sơ đồ gồm hai mạch vòng điều khiển: mạch vòng dòng điện và mạch vòng tốc độ. Động cơ được nuôi bằng biến tần nguồn áp. Khối PWM sử dụng phương pháp điều chế vector không gian. Khối R_i là bộ điều khiển dòng điện tách kênh thông dụng PI. Khối LMA chứa thuật toán điều khiển tối thiểu tổn thất. Giá trị đặt tốc độ trực động cơ ω_r^* (* tượng trưng cho giá trị đặt), qua bộ điều khiển tốc độ R_ω , đưa ra giá trị dòng điện đặt i_q^* . Giá trị đặt i_q^* và tốc độ thực của rotor ω_r được đưa vào khối LMA, đầu ra cho giá trị dòng điện đặt tối ưu i_d^* .

Hình 2 chỉ ra rằng để điều khiển tối thiểu tổn thất động cơ cần phải tìm ra một thuật toán điều khiển đưa ra được dòng điện đặt i_d^* tối ưu để giảm thiểu tổn thất nhưng vẫn tạo ra mômen xác lập tại tốc độ đặt.



Hình 2. Cấu trúc điều khiển tối thiểu tổn thất cho IPMSM

2.4. Một số phương pháp tối thiểu tổn thất đã biết

Các nghiên cứu để giảm thiểu tổn thất nhằm nâng cao hiệu suất của hệ truyền động rất được quan tâm trong nhiều thập kỷ qua, đặc biệt là cho hệ truyền động dùng động cơ không đồng bộ.

Với sự phát triển mạnh mẽ của PMSM, các nghiên cứu về điều khiển tối thiểu tổn thất cho IPMSM cũng được đưa ra.

Mademlis và các cộng sự đã đưa ra bộ điều khiển theo mô hình tổn thất nhằm xác định thành phần trực d tối ưu của dòng điện stator để tổn thất công suất là nhỏ nhất [1]. Để ứng dụng bộ điều khiển này, thì không yêu cầu phải hiểu biết về mô hình tổn thất vì biện pháp thực nghiệm cho phép xác định các tham số bộ điều khiển. Hơn nữa, mô hình tổn thất của IPMSM mà Mademlis xây dựng [1], [7] có thể được sử dụng như một cơ sở để suy ra điều kiện giảm thiểu tổn thất cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu bề mặt (SPMSM). Tuy nhiên, phương pháp cũng có một số nhược điểm: 1) Vì dùng thực nghiệm để tìm các tham số của bộ điều khiển, nên yêu cầu các thiết bị đo phải có độ chính xác cao và người tiến hành thực nghiệm phải có kinh nghiệm; 2) Phương pháp chưa xét đến việc tối thiểu tổn thất trong vùng tốc độ cao.

Gần đây, Lee và các cộng sự đã dùng phương pháp giải tích để tìm nghiệm cho bài toán tối thiểu tổn thất IPMSM [3]. Bài toán được Lee chia làm hai trường hợp: 1) tìm lời giải từ các ràng buộc điện áp và dòng điện, và 2) tìm lời giải trên biên giới hạn điện áp.

Ở trong vùng giới hạn dòng điện (5) và điện áp (6), Lee sử dụng phương pháp Lagrange để tìm giá trị dòng điện đặt i_d^* và i_q^* với giá trị đầu vào là mômen đặt T_0 và tốc độ điện ω_e (có được từ tốc độ thực của rotor ω_r). Việc tìm nghiệm tối ưu dẫn đến bài toán tìm nghiệm của phương trình bậc 4:

$$f_{\omega_e, T_0}(i_d) = A_L i_d^4 + B_L i_d^3 + C_L i_d^2 + D_L i_d + E_L = 0 \quad (13)$$

trong đó A_L, B_L, C_L, D_L, E_L là các hệ số phụ thuộc vào tốc độ và các thông số của động cơ [3].

Đối với các PMSM hoạt động ở tốc độ cao, các hệ số A_L và B_L là rất nhỏ so với các hệ số khác, do vậy Lee xấp xỉ gần đúng (13) thành phương trình bậc hai $C_L i_d^2 + D_L i_d + E_L = 0$ và có nghiệm là:

$$i_{d1} = \frac{-D_L + \sqrt{D_L^2 - 4C_L E_L}}{2C_L} \quad (14)$$

$$i_{q1} = \frac{T_0}{(3P_n / 2)(\psi_m + (L_d - L_q)i_{d1})}. \quad (15)$$

Sau đó, Lee dùng phép khai triển chuỗi Taylor để cải thiện độ chính xác của nghiệm tìm được. Bảo hòa từ trục q được xét đến bằng cách thay L_q bằng $L_{q0}(1 - \alpha_L i_{q1})$ vào các hệ số A_L, B_L, C_L, D_L, E_L của (13). Khi đó, giá trị nghiệm được tính lại lần hai:

$$i_{d2} = i_{d1} - \frac{f_{\omega_e, T_0}(i_{d1})}{f'_{\omega_e, T_0}(i_{d1})} \quad (16)$$

$$i_{q2} = \frac{T_0}{(3P_n / 2)(\psi_m + (L_d - L_{q0}(1 - \alpha_L i_{d1}))i_{d2})}. \quad (17)$$

Khi nghiệm (16) và (17) không còn nằm trong vùng giới hạn điện áp và dòng điện, thì Lee tìm nghiệm xấp xỉ trên biên giới hạn điện áp (6):

$$i_d^\# = \frac{\mu - \sqrt{\mu^2 - (1 - \eta / \mu^4)(\mu^2 - \rho + 2\eta / \mu^2)}}{(1 - \eta / \mu^4)(L_d - L_q)} - \frac{\psi_m}{L_d - L_q} \quad (18)$$

$$i_q^\# = \frac{T_0}{(3P_n / 2)(\psi_m + (L_d - L_q)i_d^\#)} \quad (19)$$

trong đó $\mu = \xi \psi_m$, $\eta = L_q^2 (1 - \xi)^2 \frac{4T_0^2}{9P_n^2}$ và $\rho = (1 - \xi)^2 \frac{U_{s\max}^2}{\omega_e^2}$.

Thuật toán của Lee có thể được tóm tắt như sau. Đầu tiên, Lee tính toán i_{d2} (16) và i_{q2} (17). Sau đó, điều kiện giới hạn điện áp (6) được kiểm tra. Nếu thỏa mãn, thì $i_d^* = i_{d2}$ và $i_q^* = i_{q2}$. Nếu không thỏa mãn, thì $i_d^* = i_d^\#$ (18) và $i_q^* = i_q^\#$ (19).

Ta thấy rằng, đây là một phương pháp không phức tạp, nhưng kết quả giảm thiểu tổn thất là rất khả quan [3] và cả bảo hòa từ cũng được đề cập đến. Tuy nhiên, trong quá trình đưa ra công thức nghiệm thì Lee và các cộng sự đã sử dụng nhiều phép xấp xỉ gần đúng, đặc biệt là đường xấp xỉ giá trị điện cảm trục q , điều này có thể dẫn đến kết quả nghiệm cuối cùng chưa làm cho tổn thất động cơ là thấp nhất có thể.

3. Phương pháp tối thiểu tổn thất đề xuất

Việc tìm một nghiệm tối ưu để tổn thất của IPMSM (tổn thất đồng, tổn thất sắt và tổn thất phụ) là cực tiểu, tương đương với việc tìm cực tiểu của hàm tổn thất nhận được từ công thức (10).

Dựa trên đặc tính vận hành của động cơ, việc tối thiểu tổn thất được thực hiện trên hai vùng: vùng trong giới hạn điện áp và trên biên giới hạn điện áp.

3.1. Tối thiểu tổn thất ở trong vùng giới hạn điện áp và dòng điện

Trong vùng này, dòng điện i_d, i_q thỏa mãn:

$$(L_d i_d + \psi_m)^2 \omega_e^2 + (L_q i_q)^2 \omega_e^2 \leq U_{s\max}^2 \quad (20)$$

$$\text{và} \quad i_d^2 + i_q^2 \leq I_{s\max}^2. \quad (21)$$

Theo [1] và [8], điều kiện tối thiểu tổn thất ở trạng thái ổn định theo thành phần dòng điện i_d là:

$$\left. \frac{\partial P_t}{\partial i_d} \right|_{T_e, \omega_e} = (A + B)i_d + Bi_f + (A + B\xi^2)i_q \frac{\partial i_q}{\partial i_d} = 0. \quad (22)$$

Ở trạng thái ổn định, mômen điện từ của động cơ được giữ bằng hằng số, nên từ (4) ta suy ra được:

$$\left. \frac{\partial T_e}{\partial i_d} \right|_{\omega_e} = [i_f - (\xi - 1)i_d] \frac{\partial i_q}{\partial i_d} - (\xi - 1)i_q = 0 \quad (23)$$

$$\text{suy ra:} \quad \frac{\partial i_q}{\partial i_d} = \frac{(\xi - 1)i_q}{i_f - (\xi - 1)i_d}. \quad (24)$$

Thay (24) vào (22), ta được:

$$(\xi-1)i_d^2 - \frac{A+2B-B\xi}{A+B} i_f i_d - \frac{Bi_f^2 + (A+B\xi^2)(\xi-1)i_q^2}{A+B} = 0 \quad (25)$$

Để tồn thất của động cơ P_i là nhỏ nhất và có xét đến bão hòa từ thì nghiệm tối ưu được tìm qua hai bước: 1) tìm nghiệm i_d của phương trình bậc hai (25); và 2) xét ảnh hưởng của bão hòa từ trên trục q để đưa ra nghiệm tối ưu $i_{d_{opt}}$.

3.1.1. Bước 1: Giải phương trình bậc hai

Giải phương trình bậc hai (25) theo ẩn i_d , thu được hai nghiệm thực phân biệt. Nhưng khi thay lần lượt hai nghiệm này vào (4) thì chỉ có một nghiệm thỏa mãn tính chất của mômen động cơ đó là:

$$i_d = \frac{A+B(2-\xi)}{2(A+B)(\xi-1)} i_f - \sqrt{\frac{(A+B\xi)^2}{4(A+B)^2(\xi-1)^2} i_f^2 + \frac{A+B\xi^2}{A+B} i_q^2} \quad (26)$$

3.1.2. Bước 2: Xét đến sự thay đổi của điện cảm

Một vấn đề cũng cần được xét là bão hòa từ. Vì khi bão hòa từ thì giá trị điện cảm của động cơ cũng thay đổi. Mà điện cảm lại ảnh hưởng đáng kể đến kết quả nghiệm (26) thông qua ξ . Khảo sát giá trị điện cảm của một IPMSM (**Bảng 1**) khi thay đổi dòng điện được thể hiện trên **Hình 3** [3]. Ta thấy rằng $L_q > L_d$ và các điện cảm tương tác chéo L_{dq} và L_{qd} là đủ nhỏ để được bỏ qua. Cũng thấy rằng, L_d hầu như không thay đổi. Còn L_q lại khác, khi $i_q \leq 180A$ thì L_q ít thay đổi, nhưng khi $i_q > 180A$ thì L_q lại giảm đáng kể khi i_q tăng. Đặt $I_{q_{sat}}$ là mốc giá trị i_q mà L_q bắt đầu giảm mạnh khi i_q tăng (trong **Hình 3** (b) thì $I_{q_{sat}} = 180A$). Sự thay đổi L_q khi $i_q > I_{q_{sat}}$ được xấp xỉ bằng một hàm tuyến tính theo i_q trên **Hình 3** (b):

$$L_q = L_{q0} - \alpha(i_q - I_{q_{sat}}) \quad (27)$$

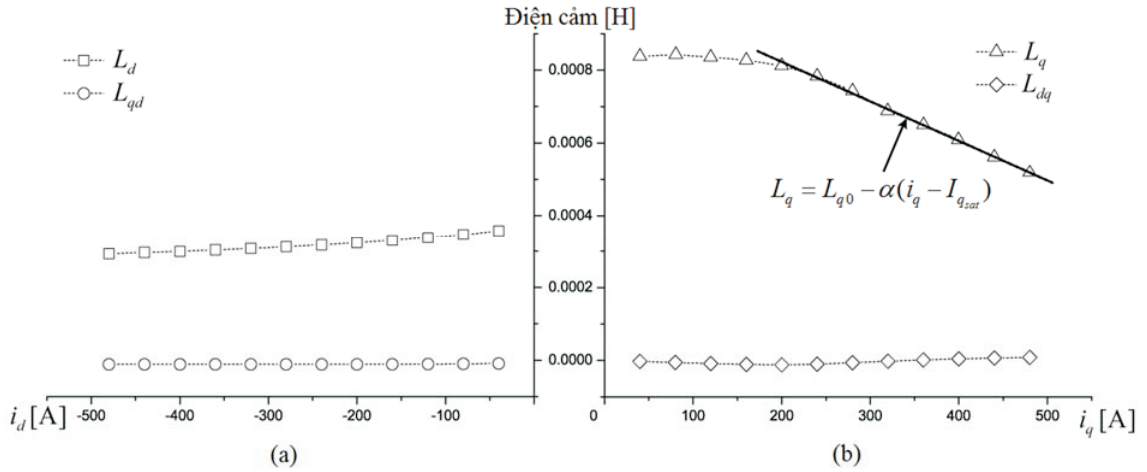
trong đó L_{q0} là giá trị của L_q khi $i_q = 0$ và $\alpha > 0$ là một hằng số tương ứng với độ dốc.

Vì vậy, khi tính toán giá trị hệ số nhấp nhô (2) trước khi thay vào công thức nghiệm (26) cần kiểm tra giá trị dòng điện i_q . Nếu $i_q \leq I_{q_{sat}}$ thì:

$$\xi' = \frac{L_{q0}}{L_d} \quad (28)$$

Còn nếu $i_q > I_{q_{sat}}$ thì:

$$\xi' = \frac{L_{q0} - \alpha(i_q - I_{q_{sat}})}{L_d} \quad (29)$$



Hình 3. Giá trị đo điện cảm: (a) L_d và L_{qd} theo i_d khi $i_q = 160$ A và (b) L_q và

L_{dq} theo i_q khi $i_d = -160$ A

Thay hệ số nhập nhô ξ' và $i_f = \psi_m / L_d$ vào (26), ta có nghiệm tối ưu để tối thiểu tổn thất IPMSM là:

$$i_{d_{opt}} = \frac{A+B(2-\xi')}{2L_d(A+B)(\xi'-1)}\psi_m - \sqrt{\frac{\psi_m^2(A+B\xi')^2}{4L_d^2(A+B)^2(\xi'-1)^2} + \frac{A+B\xi'^2}{A+B}}i_q^2 \quad (30)$$

Bảng 1. Các thông số và hệ số của một PMSM.

Tên thông số (hệ số)	Giá trị
Công suất đầu ra định mức [kW]	40
Mômen định mức [Nm]	133
Tốc độ định mức [r/min]	2600
Dòng điện pha định mức [A]	216
Số đôi cực (P_n)	3
Từ thông rotor (ψ_m) [Wb]	0,07
Mômen quán tính (J) [kgm ²]	0,02
Điện cảm trục d (L_d) [μ H]	375
Điện cảm trục q (L_q) [μ H]	835
Điện trở stator (R_s) [m Ω]	29.5
Hệ số tổn thất sắt (C_{fe})	$2,1 \times 10^{-2}$
Hệ số tổn thất phụ (C_{str})	$6,5 \times 10^{-9}$

3.2. Tối thiểu tổn thất trên biên giới hạn điện áp

Khi tốc độ tăng, giới hạn điện áp co lại. Với quá trình công suất cực đại, nếu nghiệm tối

thiếu tổn thất không còn nằm bên trong giới hạn (20), thì nghiệm được tìm trên đường cong giới hạn điện áp [3], [4].

Phương trình điện áp stator:

$$U_s = R_s I_s + E_s \quad (31)$$

với E_s là sức điện động tự cảm được tính bằng công thức:

$$E_s = \frac{d\lambda_s}{dt} + j\omega_e \lambda_s \quad (32)$$

Từ (31), suy ra:

$$E_s \leq U_{dm} - R_s I_{dm}. \quad (33)$$

Từ thông stator λ_s trên hai trục d, q :

$$\begin{cases} \lambda_d = L_d i_d + \psi_m \\ \lambda_q = L_q i_q \end{cases}. \quad (34)$$

Do đó:

$$\begin{cases} E_{sd} = L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ E_{sq} = L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_m \end{cases} \quad (35)$$

Xét ở trạng thái ổn định:

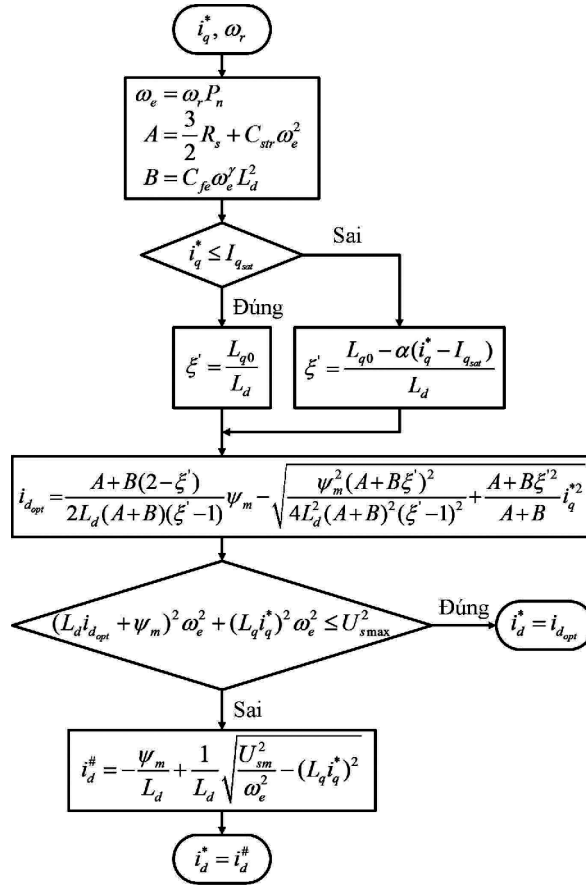
$$\begin{cases} E_{sd} = -\omega_e L_q i_q \\ E_{sq} = \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_m \end{cases} \quad (36)$$

Từ (33) và (36), ta có:

$$\begin{aligned} E_s = \sqrt{E_{sd}^2 + E_{sq}^2} &\leq U_{dm} - R_s I_{dm} \\ \Leftrightarrow (L_q i_q)^2 + (L_d i_d + \psi_m)^2 &\leq \left(\frac{U_{dm} - R_s I_{dm}}{\omega_e} \right)^2. \end{aligned} \quad (37)$$

Đặt $U_{sm} = U_{dm} - R_s I_{dm}$, và từ (37) rút ra được công thức tính $i_d^\#$ như sau:

$$i_d^\# = -\frac{\psi_m}{L_d} + \frac{1}{L_d} \sqrt{\frac{U_{sm}^2}{\omega_e^2} - (L_q i_q)^2}. \quad (38)$$



Hình 4. Thuật toán tối thiểu tổn thất (LMA) đề xuất

Các kết quả trình bày ở trên được tổng hợp và xây dựng thành lưu đồ thuật toán tối thiểu tổn thất (LMA đề xuất) như **Hình 4**. Như đã phân tích ở mục 2.3, đầu vào LMA là dòng điện đặt i_q^* và tốc độ thực của rotor ω_r , đầu ra là dòng điện đặt tối ưu i_d^* . Ngoài ra, đầu ra của LMA còn cần một khâu giới hạn theo điều kiện giới hạn dòng điện (21).

4. Mô phỏng và đánh giá kết quả

Xây dựng mô hình có cấu trúc như **Hình 2** trong MATLAB/SIMULINK với động cơ có các thông số và hệ số như trong **Bảng 1**. Động cơ này có $I_{qsat} = 180\text{A}$ và $\alpha = 1,07 \times 10^{-6}$. Dựa vào [4], tính được mômen cực đại của động cơ $T_{max} = 101\text{Nm}$ và tốc độ $n_{base} = 3342\text{r/min}$ tại điểm A($i_{dA} = -119\text{A}$; $i_{qA} = 180\text{A}$) trên Hình 1. Ta cũng tính được mômen của động cơ $T_B = 76,1\text{Nm}$ và tốc độ $n_B = 5405\text{r/min}$ tại điểm B($i_d = -\psi_m / L_d = -186,7\text{A}$; $i_q = 108,6\text{A}$) trên Hình 1. Thực hiện mô phỏng với các giá trị đặt như trong **Bảng 2**. Trong đó, ở dải tốc độ $n \leq n_{base}$, thì LMA đưa ra nghiệm trong vùng giới hạn điện áp $i_{d_{opt}}$ (30). Còn ở dải tốc độ $n > n_{base}$, thì LMA đưa ra nghiệm trên biên điện áp $i_d^{\#}$ (38).

Để đánh giá hiệu quả của LMA đề xuất, tác giả tiến hành mô phỏng LMA đề xuất và phương pháp điều khiển tối thiểu tổn thất cho PMSM sử dụng phép xấp xỉ đa thức (mục 2.4) của Lee và các cộng sự (phương pháp của Lee) [3] trên cùng một mô hình xây dựng trong

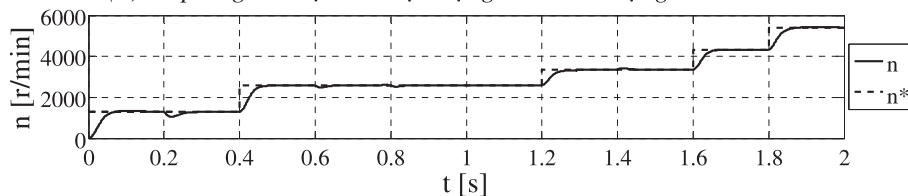
MATLAB/SIMULINK. Các kết quả mô phỏng được thể hiện trên các đồ thị dưới đây. Dựa vào đó, có một số nhận xét sau:

- Tốc độ và mômen của động cơ ở cả hai phương pháp đều đạt giá trị đặt và ổn định trong thời gian ngắn (**Hình 5** và **Hình 6**). Tuy nhiên, độ quá điều chỉnh mômen khi sử dụng LMA đề xuất trên **Hình 6** (a) là nhỏ hơn so với khi sử dụng phương pháp của Lee trên **Hình 6** (b).

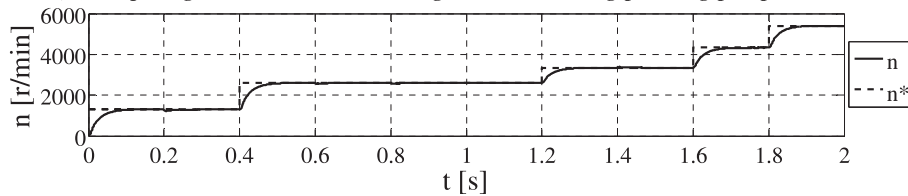
Bảng 2. Giá trị đặt tốc độ và mômen cần trên trục động cơ theo thời gian

$t[s]$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$n^*[r/min]$	1300			2600				3342		4326	5405
$T_c[Nm]$	0	50		80	101			76,1			

(a) Đáp ứng tốc độ trên trục động cơ khi sử dụng LMA đề xuất



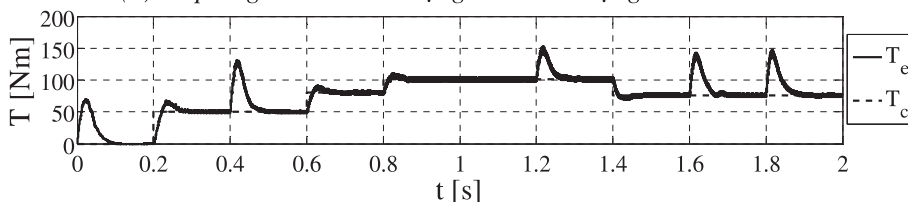
(b) Đáp ứng tốc độ trên trục động cơ khi sử dụng phương pháp của Lee



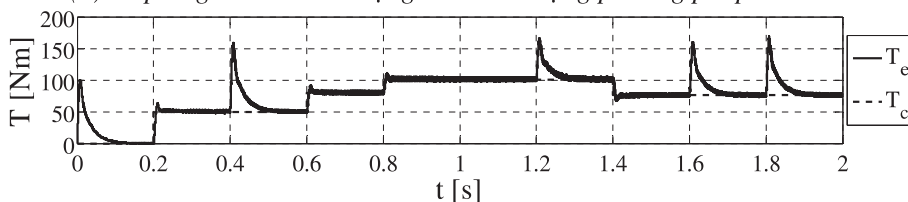
Hình 5. Đồ thị đáp ứng tốc độ trên trục động cơ

- Đáp ứng dòng điện i_q khi sử dụng LMA đề xuất (nét liền) trên **Hình 7** thì nhỏ hơn so với khi sử dụng phương pháp của Lee (nét đứt). Còn dòng điện i_q khi sử dụng LMA đề xuất (nét liền) trên **Hình 8** thì lại lớn hơn so với khi sử dụng phương pháp của Lee (nét đứt).

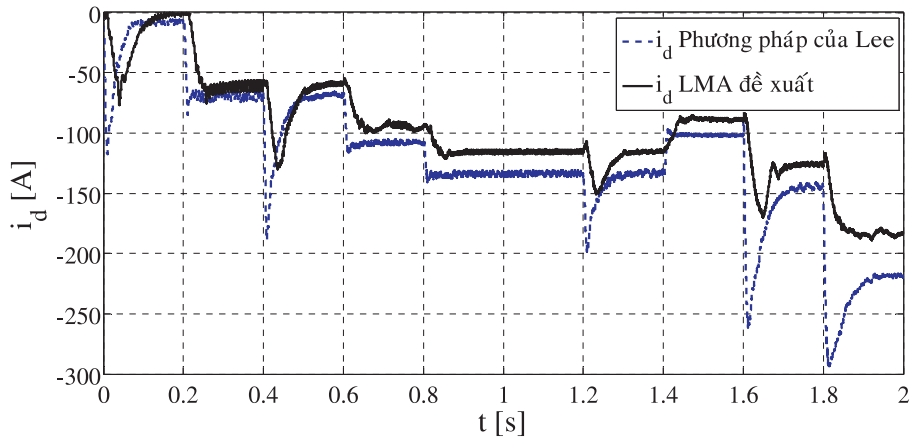
(a) Đáp ứng mômen của động cơ khi sử dụng LMA đề xuất



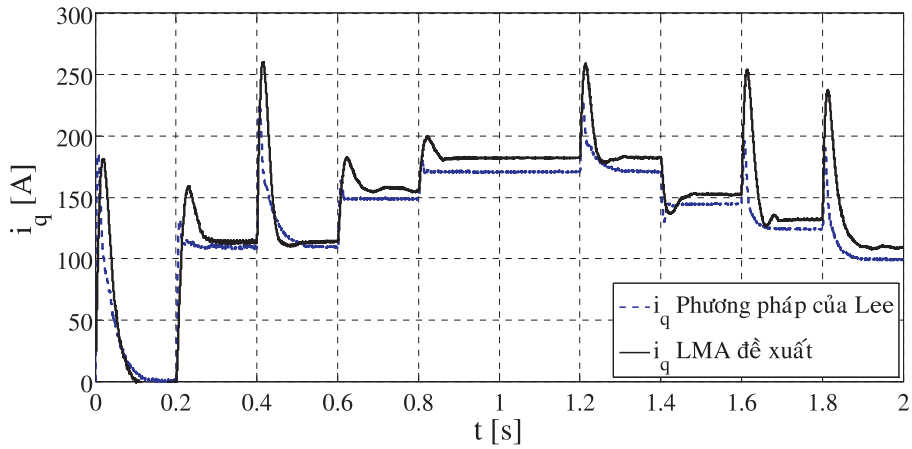
(b) Đáp ứng mômen của động cơ khi sử dụng phương pháp của Lee



Hình 6. Đồ thị đáp ứng mômen của động cơ

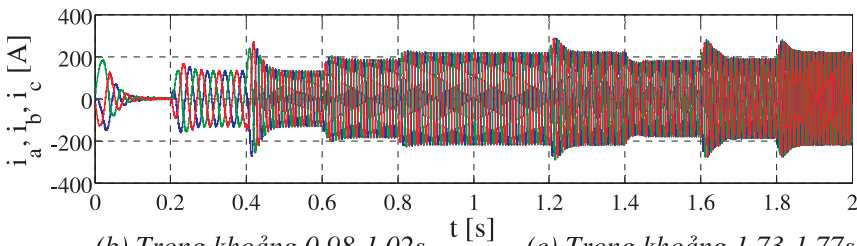


Hình 7. Đồ thị đáp ứng dòng điện i_d của động cơ ở các tốc độ và mômen khác nhau

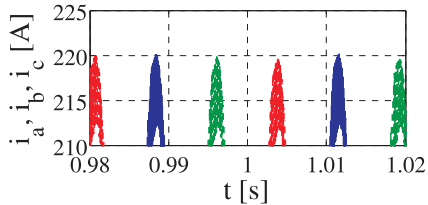


Hình 8. Đồ thị đáp ứng dòng điện i_q của động cơ ở các tốc độ và mômen khác nhau

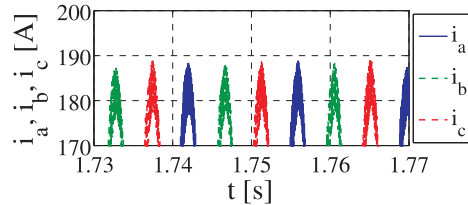
(a) Đáp ứng dòng điện ba pha khi sử dụng LMA đề xuất



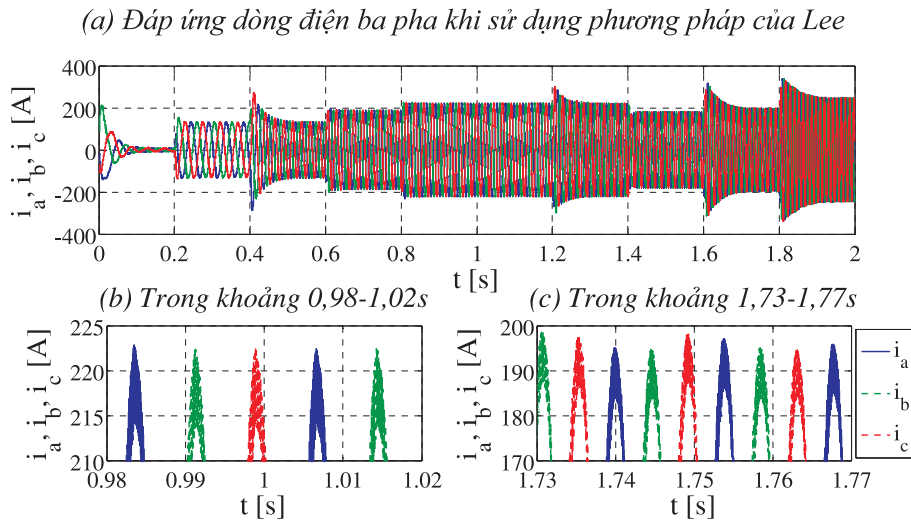
(b) Trong khoảng 0,98-1,02s



(c) Trong khoảng 1,73-1,77s



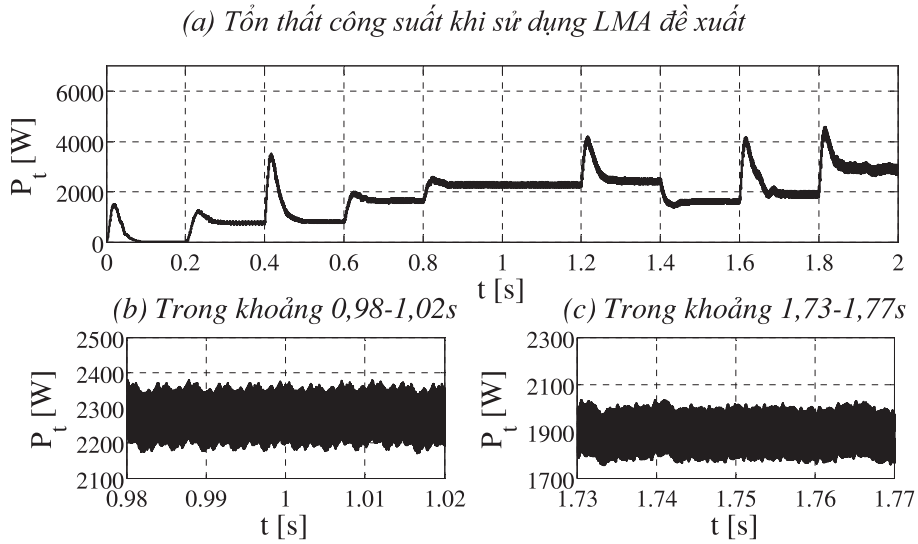
Hình 9. Đáp ứng dòng điện ba pha ở các tốc độ và mômen khác nhau khi sử dụng LMA đề xuất.



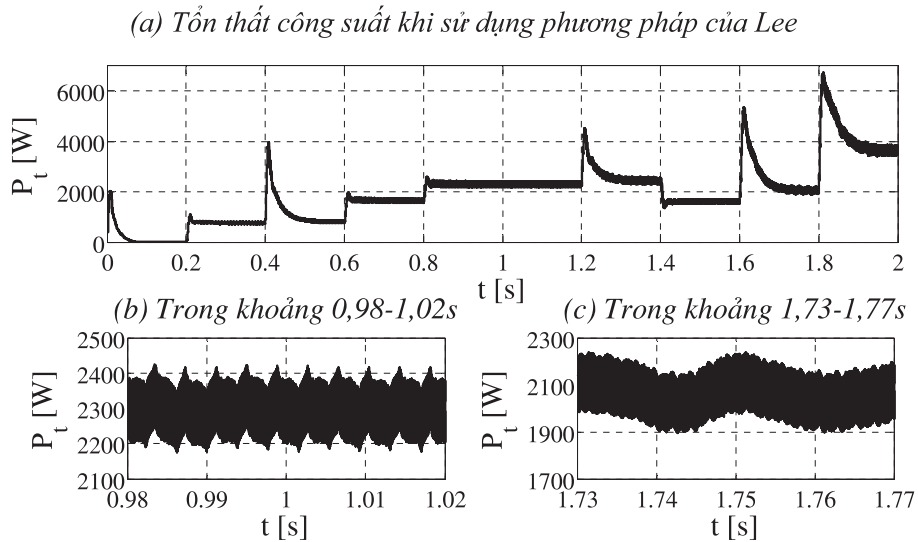
Hình 10. Đáp ứng dòng điện ba pha ở các tốc độ và mômen khác nhau khi sử dụng phương pháp của Lee

- Biên độ dòng điện ba pha khi sử dụng LMA đề xuất trên **Hình 9** nhỏ hơn so với khi sử dụng phương pháp của Lee trên **Hình 10**. Ở tốc độ định mức $n_{dm} = 2600 \text{ r/min}$ và mômen $T_{\max} = 101 \text{ Nm}$ (tối thiểu tổn thất trong vùng giới hạn điện áp), biên độ dòng điện ba pha khi sử dụng LMA đề xuất trên **Hình 9** (b) nhỏ hơn $2 \div 3 \text{ A}$ so với khi sử dụng phương pháp của Lee trên **Hình 10** (b). Ở vùng tốc độ cao $n = 4326 \text{ r/min}$ và $T_c = 76,1 \text{ Nm}$ (tối thiểu tổn thất trên biên giới hạn điện áp), biên độ dòng điện ba pha khi sử dụng LMA đề xuất trên **Hình 9** (c) nhỏ hơn tới $8 \div 10 \text{ A}$ so với phương pháp của Lee trên **Hình 10** (c). Điều này chứng tỏ rằng, LMA mà bài báo đưa ra sẽ cho tổn thất đồng thấp hơn phương pháp của Lee.

- Tổn thất công suất khi sử dụng LMA đề xuất trên **Hình 11** là nhỏ hơn so với khi sử dụng phương pháp của Lee trên **Hình 12**. Ở tốc độ định mức $n_{dm} = 2600 \text{ r/min}$ và mômen $T_{\max} = 101 \text{ Nm}$ (tối thiểu tổn thất trong vùng giới hạn điện áp), tổn thất công suất khi sử dụng LMA đề xuất trên **Hình 11** (b) nhỏ hơn $20 \div 30 \text{ W}$ so với phương pháp của Lee trên **Hình 12** (b). Ở vùng tốc độ cao $n = 4326 \text{ r/min}$ và $T_c = 76,1 \text{ Nm}$ (tối thiểu tổn thất trên biên giới hạn điện áp), tổn thất công suất khi sử dụng LMA đề xuất trên **Hình 11** (c) nhỏ hơn tới $80 \div 100 \text{ W}$ so với phương pháp của Lee trên **Hình 12** (c).



Hình 11. Tổn thất công suất của động cơ ở các tốc độ và mômen khác nhau khi sử dụng LMA đề xuất



Hình 12. Tổn thất công suất của động cơ ở các tốc độ và mômen khác nhau khi sử dụng phương pháp của Lee

5. Kết luận

Bài báo đã đề xuất một thuật toán tối thiểu tổn thất (LMA) cho IPMSM. Thuật toán này có một số ưu điểm nổi bật. Thứ nhất, dòng điện đặt trực d tối ưu của LMA đưa ra được xét trên một dải tốc độ rộng và không phức tạp hơn so với phương pháp của Lee, đồng thời hiệu quả giảm thiểu tổn thất lại tốt hơn. Thứ hai, bài báo đã xét đến hiện tượng bão hòa từ của động cơ và đưa ra một luật xấp xỉ gần đúng cho điện cảm trực q . Cuối cùng, thuật toán mà tác giả đưa ra không đòi hỏi khối lượng tính toán lớn, và hoàn toàn có thể triển khai trên vi điều khiển hoặc DSP thông dụng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. C. Mademlis, I. Kioskeridis, and N. Margaris, *Optimal Efficiency Control Strategy for Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives*, IEEE Trans, Energy Convers., 19(4), 715–723, (2004).
2. Y. S. Jeong, S. K. Sul, S. Hiti, and K. M. Rahman, *Online minimum-copper-loss control of an interior permanent-magnet synchronous machine for automotive applications*, IEEE Trans, Ind, Appl., 42(5), 1222–1229, (2006).
3. J. Lee, K. Nam, S. Choi, and S. Kwon, *Loss-minimizing control of PMSM with the use of polynomial approximations*, IEEE Trans, Power Electron., 24(4), 1071–1082, (2009).
4. S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, *Wide-speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high-performance current regulator*, IEEE Trans, Ind, Appl., 30(4), 920–926, (1994).
5. K. H. Nam, *AC motor control and electric vehicle applications*, 1st ed. CRC Press, (2010).
6. J. F. Gieras, *Permanent Magnet Motor Technology*, 3rd ed. CRC Press, (2010).
7. C. Mademlis, J. Xypteras, and N. Margaris, *Loss minimization in surface permanent-magnet synchronous motor drives*, IEEE Trans, Ind, Electron., 47(1), 115–122, (2000).
8. S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda, and T. Hirasaka, *Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives*, IEEE Trans, Ind, Electron., 41(5), 511–517, (1994).