

Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <https://jmes.humg.edu.vn>

An enhancement of output torque ripple of the switching reluctance motor based on appropriate time switching selection



Thuy Cam Thi Vo^{1,2}, Dung Manh Do^{3,*}, Khoat Duc Nguyen², Xuan Minh Phan⁴

¹ Hanoi University of Industry, Hanoi, Vietnam

² Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

³ Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

⁴ Vietnam National University, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5th Aug. 2024

Revised 4th Dec. 2024

Accepted 24th Dec. 2024

Keywords:

Electric Vehicles,
Switching Reluctance Motor,
Switching time,
Torque Characteristic.

ABSTRACT

The Switching Reluctance Motors (SRM for brief) have attracted a host of interests of scientists in recent years because of their outstanding advantages such as low manufacturing costs, simple configuration, high durability and an ability to operate at high speeds. In addition to their benefits, some disadvantages causing the SRMs' performance can be listed as high torque ripple, excessive acoustic disturbances, and difficulties in controlling. They are serving as our motivation to perform studies aiming to enhance SRM's operational quality. The SRM's performance depends upon torque characteristics and rotational speed features. To better torque characteristics, an appropriate time-switching selection is proposed. Because moment features are always the decisive factor for motors' effectiveness in general and it is more vital for SRM owing to the high torque ripple stemming from the switching process. This is the compelling reason why the selecting appropriate switching time among phases of SRM is particularly important. This paper proposes a method for determining this time based on the numerical simulation. Results are warranted thoughtfully consideration and they are the precise of sythesising a fuzzy logic system being able to automatically choose the switching time.

Copyright © 2025 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: dung.dm232193M@sis.hust.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2025.66(1).09



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <https://tapchi.humg.edu.vn>

Cải thiện đặc tính mô men của động cơ từ trở chuyển mạch dựa trên lựa chọn thời gian chuyển mạch phù hợp

Võ Thị Cẩm Thùy^{1,2}, Đỗ Mạnh Dũng^{3,*}, Nguyễn Đức Khoát², Phan Xuân Minh⁴

¹ Trường đại học Công nghiệp Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam.

² Trường đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

³ Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

⁴ Đại học Quốc gia Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

TÓM TẮT

Quá trình:

Nhận bài 5/8/2024

Sửa xong 4/12/2024

Chấp nhận đăng 24/12/2024

Từ khóa:

Đặc tính mô men,

Động cơ từ trở chuyển mạch,

Thời gian chuyển mạch,

Xe điện.

Động cơ từ trở chuyển mạch (Switching Reductance Motor, viết tắt là SRM) là loại động cơ được quan tâm nhiều trong những năm gần đây bởi những ưu điểm vượt trội như chi phí chế tạo thấp, cấu tạo đơn giản, độ bền cao, động cơ hoạt động ở vùng tốc độ lớn. Tuy nhiên, động cơ này vẫn tồn tại một số nhược điểm trong quá trình vận hành như mô men xoắn lớn, rung ồn và khó điều khiển và đây chính là động lực để các nhà khoa học tập trung nghiên cứu về kiểm soát chất lượng làm việc của SRM. Chất lượng làm việc của động cơ từ trở phụ thuộc vào đặc tính mô men và đặc tính tốc độ. Để cải thiện đặc tính mô men, bài báo này đề xuất một phương pháp lựa chọn thời gian chuyển mạch hợp lý cho SRM bằng mô phỏng. Do đặc tính mô men luôn là yếu tố quyết định đến chất lượng làm việc của động cơ nói chung và đối với động cơ từ trở chuyển mạch lại càng quan trọng hơn vì quá trình chuyển mạch thường làm đặc tính mô men bị dao động rất lớn. Cũng chính vì vậy việc lựa chọn thời gian chuyển mạch hợp lý giữa các pha của động cơ từ trở chuyển mạch là đặc biệt quan trọng. Bài báo đề xuất một phương pháp lựa chọn thời gian chuyển mạch hợp lý cho động cơ từ trở chuyển mạch dựa trên mô phỏng số. Các kết quả nghiên cứu được phân tích đánh giá và là cơ sở ban đầu để tổng hợp một hệ chuyên gia mờ tự động chọn thời gian chuyển mạch cho động cơ từ trở.

© 2025 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: dung.dm232193M@sis.hust.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2025.66(1).09

1. Giới thiệu

Động cơ từ trở chuyển mạch (SRM) là một trong những động cơ phổ biến nhất trong các lĩnh vực công nghiệp. Trong thập kỷ gần đây, giữa sự cạnh tranh về công nghệ động cơ, các nghiên cứu liên quan đến động cơ từ trở chuyển mạch (SRM) đã thu hút rất nhiều sự quan tâm và đầu tư của các nhà khoa học, các nhóm nghiên cứu trên thế giới. SRM có tiềm năng ứng dụng lớn trong nhiều loại lĩnh vực công nghiệp như ứng dụng trong xe điện (EV) (Bilgin và nnk., 2020), ứng dụng trong năng lượng gió hệ thống phát điện (dos Santos Barros và nnk., 2017), lĩnh vực hàng không vũ trụ (Bartolo và nnk., 2016), ứng dụng kinh tế nông nghiệp (Asok Kumar và nnk., 2020),... so sánh với động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu bên trong (IPMSM) (Hammoud và nnk., 2022) hoặc động cơ cảm ứng (Zorig và nnk., 2022), SRM có nhiều ưu điểm hơn như chi phí sản xuất thấp, độ bền cao trong quá trình vận hành và sức chịu đựng với ảnh hưởng lớn của nhiễu. SRM cũng có thể hoạt động ở tốc độ cao. Với nhiều lợi ích kể trên, những nghiên cứu nhằm nâng cao hiệu suất cho động cơ từ trở chuyển mạch SRM cần có những nghiên cứu bổ sung. Đó chính là động lực lớn nhất để chúng tôi nghiên cứu về động cơ này.

Việc cải thiện đặc tính mô men là yếu tố then chốt để đảm bảo tính ổn định và hiệu suất tối ưu của hệ thống cơ điện. Dao động quá mức của mô men xoắn có thể dẫn đến rung động, nhiễu loạn và sự mất ổn định trong quá trình vận hành, gây ra những hậu quả nghiêm trọng như hao mòn cơ khí tại ổ đỡ, trục và bộ truyền động. Điều này đặc biệt nghiêm trọng khi động cơ hoạt động tại vùng tốc độ thấp (Feng và nnk., 2023). Trong các kỹ thuật xử lý gợn sóng mô men phổ biến, các nhà khoa học hướng đến các kỹ thuật xử lý ngay trong sơ đồ điều khiển (Ahmad và nnk., 2023 ; Li và nnk., 2018 ; Chithrabhanu và Vasudevan, 2022 ; Sun và nnk., 2020). Theo Sun và nnk.(2020), các tác giả đã kết hợp kỹ thuật điều khiển trượt với kỹ thuật DTC (Direct Torque Control) để khử sóng hài tại đầu ra của động cơ SRM dựa trên giả thiết bỏ qua ảnh hưởng của mô men cản và mô men tải. Độ gợn sóng mô men đầu ra của SRM trong (Sun và nnk., 2020) phụ thuộc tuyến tính vào gia tốc quay của động cơ. Do đó, điều khiển trượt đã được tích hợp để cực tiểu hoá gia tốc quay. Một hướng can thiệp khác nhằm điều chỉnh độ gợn sóng của mô men

được nghiên cứu bởi Ahmad và nnk. (2024) đó là tạo ra quỹ đạo đặt cho dòng điện tại mỗi pha, sau đó điều khiển để dòng điện bám theo các quỹ đạo này. Phương pháp này mang lại đặc tính giảm gợn sóng mô men tốt nhưng chất lượng lại phụ thuộc rất nhiều vào cách thiết kế quỹ đạo đặt cho dòng điện pha. Điều này vô tình đã làm giảm tính linh hoạt khi ứng dụng và gây ra hiện tượng phát nhiệt cục bộ do sự thay đổi liên tục của dòng điện gây ra. Nhìn chung, các phương pháp giảm gợn sóng mô men dựa trên phần mềm tương đối phức tạp và phụ thuộc rất nhiều vào đặc tính của bộ điều khiển đề ra.

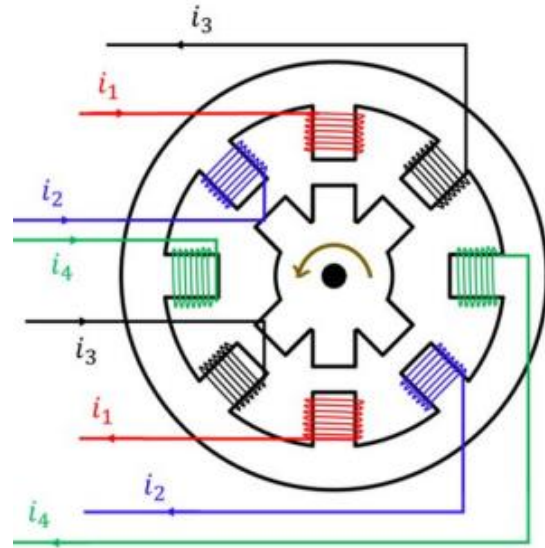
Về khía cạnh phần cứng, việc can thiệp vào thời gian chuyển mạch đồng nghĩa với điều chỉnh việc phát xung để đóng mở các van bán dẫn. Do đó, theo quan điểm của nhóm tác giả, phương pháp đơn giản nhất để cải thiện đặc tính mô men ở đầu ra là điều chỉnh thời gian chuyển mạch giữa các pha. Trong những nghiên cứu bước đầu, việc xác định thời gian chuyển mạch phù hợp cho một dải tốc độ hoặc một giá trị mô men xoắn đầu ra cho trước được tiến hành thông qua phương pháp thống kê. Bên cạnh mục đích làm cho mô men xoắn đầu ra được ổn định, đây còn là cơ sở quan trọng để xây dựng hệ chuyên gia mờ điều chỉnh tự động trong nghiên cứu tương lai. Việc điều chỉnh quá trình đóng mở các van bán dẫn sẽ luôn dễ dàng hơn so với công đoạn thiết kế các bộ điều khiển nhằm đảm bảo nhu cầu đề ra. Với ý nghĩa thực tiễn như vậy, việc kiểm soát và phẳng hóa mô men xoắn trong SRM bằng phương pháp lựa chọn thời gian chuyển mạch thích hợp là một bước đột phá quan trọng, giúp kéo dài tuổi thọ của các thành phần cơ điện và nâng cao hiệu suất tổng thể của hệ thống. Những cải tiến này, bên cạnh nhiệm vụ đảm bảo hiệu suất hoạt động tối ưu, còn mang lại lợi ích về kinh tế và môi trường, từ đó góp phần vào bức tranh sự phát triển chung của công nghệ cơ điện.

Bài báo được cấu trúc như sau: phần 2 trình bày cấu trúc và mô tả toán học của SRM. Phần 3 trình bày phương pháp lựa chọn thời gian chuyển mạch để nâng cao chất lượng đặc tính mô men cho SMR. Đánh giá kết quả đạt được nhờ chọn thời gian chuyển mạch phù hợp được thể hiện trong phần 4. Kết luận và sách lược điều khiển trong tương lai được trình bày trình bày ở phần cuối cùng.

2. Đặc tính cơ bản của động cơ từ trở

2.1. Cấu trúc hệ thống SRM

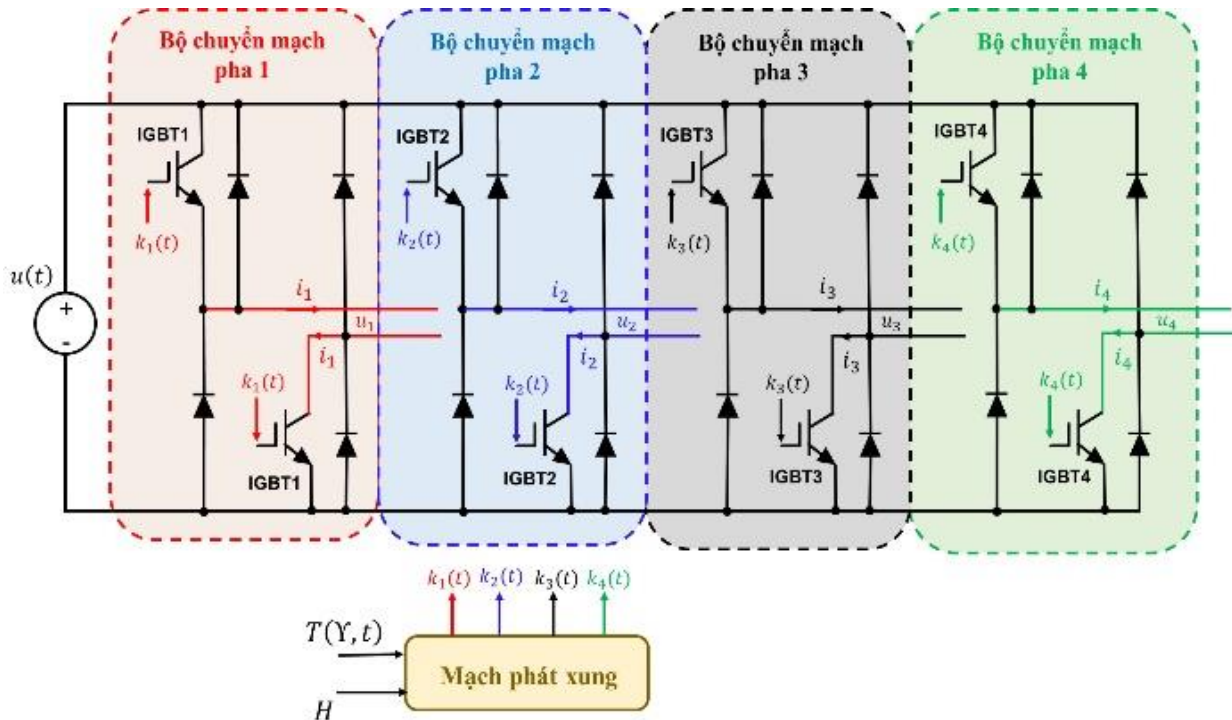
Sơ đồ của hệ thống SRM được thể hiện trên Hình 1 và 2. Hệ thống SRM nghiên cứu trong bài báo này có 8 cực trong stato và 6 cực của rôto. Vì vậy, các SRM được nghiên cứu ở đây còn được gọi là hệ thống SRM 8/6. Ngoài ra, hệ thống SRM có bốn pha độc lập trong đó các điện áp cung cấp cho từng pha được ký hiệu là u_1, u_2, u_3 và u_4 . Điện áp cung cấp cho mỗi pha thông qua quá trình chuyển mạch. Quá trình chuyển mạch đó được tạo ra bởi hoạt động của Điốt và IGBT được điều khiển bởi các xung giữ được tạo ra. Giá trị dòng điện trong mỗi pha được ký hiệu là i_1, i_2, i_3 và i_4 tương ứng. Vị trí của rôto SRM được ký hiệu là $\theta(t)$. Đạo hàm bậc nhất của $\theta(t)$ là $\omega(t)$ là tốc độ quay của hệ thống SRM. Mặc dù có bốn pha trong hệ thống SRM nhưng chỉ có một pha được cấp điện áp tại một thời điểm nhất định. Hơn nữa, do cấu hình cực lồi trong cả rôto và stato của SRM 8/6, vị trí của rôto $\theta(t)$ có độ phi tuyến mạnh. Với $u_i, i = 1, 2, 3, 4$ là các tín hiệu đầu vào của hệ thống SRM được thiết kế để làm cho tốc độ quay $\omega(t)$ ổn định ở giá trị mong muốn.



Hình 1. Sơ đồ chuyển mạch của SRM.

2.2. Mô hình toán của SRM

Phần này trình bày ngắn gọn quá trình xây dựng mô hình toán học của SRM được nghiên cứu bởi Cam và nnk. (2023) từ ba phương trình chính: phương trình điện áp phần ứng, phương trình điện từ và phương trình cơ học:



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc SRM.

$$\begin{cases} u_j = Ri_j + \frac{d\psi_j}{dt} \\ T_j(\theta, i_j) = \frac{\partial \psi_j}{\partial \theta} \\ J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = T_e - T_l \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: $j = 1, 2, \dots, m$. Các ký hiệu u_j, R, i_j, ψ_j - lần lượt là điện áp, điện trở, dòng điện và từ thông của pha thứ j . T_e - mô men xoắn đầu ra, T_l - mô men tải, T_j - mô men pha j , J - mô men quán tính của roto với trục quay quán tính qua tâm. Năng lượng điện từ tính bằng:

$$\partial W_j'(\theta, i_j) = \int_0^{i_j} \psi_j(\theta, i_j) di_j \quad (2)$$

Tổng mô men xoắn đầu ra động cơ T_e được xác định bằng cách lấy tổng mômen trong mỗi pha:

$$T_c(\theta, i_1, i_2, \dots, i_m) = \sum_{j=1}^m T_j(\theta, i_j) \quad (3)$$

Hàm của đặc tính từ thông có thể được xấp xỉ bằng (Cam và nnk., 2023):

$$\psi_j(\theta, i_j) = \psi_s(1 - e^{-i_j f_j(\theta)}) \quad (4)$$

Trong đó ψ_s là từ thông bão hòa và $f_j(\theta)$ được tính bằng chuỗi Fourier với N_r là số cực rôto:

$$f_j(\theta) = a + b \sin \left[N_r \theta - (j-1) \frac{2\pi}{m} \right] \quad (5)$$

Mômen của pha j được biểu diễn như sau:

$$T_j(\theta, i_j) = \left(\frac{\psi_s}{f_j^2(\theta)} \frac{df_j(\theta)}{d\theta} \right) \left\{ 1 - [1 + i_j f_j(\theta)] e^{-i_j f_j(\theta)} \right\} \quad (6)$$

Trong bài báo này, SRM với 4 pha sẽ được xét sao cho $m = 4$ và vector trạng thái được xác định như sau: $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$, trong đó $x_1 = \theta$, $x_2 = \omega$, $x_3 = i_1$, $x_4 = i_2$, $x_5 = i_3$ và $x_6 = i_4$. Các phương trình không gian trạng thái của động cơ có thể được viết lại thành:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = F(x) - \frac{B}{J} x_2 + \frac{mgl}{J} \sin(x_1) \\ \dot{x}_3 = p_a(x) + q_a(x)u_1 \\ \dot{x}_4 = p_b(x) + q_b(x)u_2 \\ \dot{x}_5 = p_c(x) + q_c(x)u_3 \\ \dot{x}_6 = p_d(x) + q_d(x)u_3 \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó: $F(x) = \sum_{i=a,b,c,d} f_i(x) + g_i(x)x_{i+2}$ và $f_i(x), g_i(x), p_i(x)$ và $q_i(x)$ được tính toán trong (Rigatos và nnk., 2019) với $i = a, b, c, d$.

3. Sách lược lựa chọn thời gian chuyển mạch phù hợp cho SRM

Mục tiêu chính của phần này là xác định thời gian lưu giữ thích hợp τ cho SRM để giảm độ gợn của mô-men xoắn đầu ra. Từ phương trình (1) với sự xuất hiện của giá trị chuyển mạch $k_1(t - (j-1)\tau)$. Do có $x_i = x_i(t, \tau)$ kết hợp với phương trình (7) ta được:

$$T = \sum_{j=1}^4 T_j(\theta, i_j) = \sum_{j=1}^4 \frac{\psi_s}{\eta_j^2(x_1(t, \tau))} f_j(\tau) \quad (8)$$

$$f_j(\tau) = \frac{d\eta_j(x_1(t, \tau))}{dx_1(t, \tau)} m(\tau) \quad (9)$$

$$m_j(\tau) = 1 - [1 + x_j(t, \tau)\eta_j] e^{-x_j(t, \tau)\eta_j} \quad (10)$$

Rõ ràng có thể thấy trong phương trình (8), việc điều chỉnh thời gian chuyển mạch hoàn toàn có thể tác động tới mô men đầu ra. Bằng cách điều chỉnh thời gian chuyển mạch thủ công, nhiệm vụ bài toán là xác định thời gian chuyển mạch τ sao cho giá trị kì vọng của mô men đầu ra là hằng số. Giá trị kì vọng của mô men được tính bởi:

$$E(T, \tau) = \frac{1}{T_a} \int_{t-T_a}^{T_a} T(t, \tau) dt \quad (11)$$

Việc này rất có ý nghĩa trong việc đảm bảo động cơ hoạt động được ổn định và mượt mà, không gây xóc tải. Ngoài ra, có thể tồn tại nhiều giá trị của τ thoả mãn công thức (11). Do đó trong bài báo này, chúng tôi đề xuất hàm hiệu suất thời gian:

$$H\% = \begin{cases} \left(1 - \frac{T}{T_m}\right) \times 100\%, & T < T_m \\ 0, & T \geq T_m \end{cases} \quad (12)$$

Trong đó: T_m - khoảng thời gian mà mô men tải chưa thay đổi giá trị, T – khoảng thời gian mô men xoắn đầu ra tiến tới xác lập. Hàm hiệu suất thời gian này có ý nghĩa rằng nếu $H\%$ càng cao thì thời gian mô men đầu ra ổn định càng nhanh. Khi $H\% = 0$ điều này có nghĩa rằng giá trị thời gian chuyển mạch đó không làm cho kỳ vọng của mô men đầu ra ổn định. Như vậy giá trị thời gian chuyển mạch tối ưu τ^* cần đảm bảo:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(T, \tau^*, t) = const \quad (13)$$

$$H^*\% = \left(1 - \frac{\tau^*}{T_m}\right) \times 100\% \rightarrow \max \quad (14)$$

4. Mô phỏng kiểm chứng

Hiệu quả của phương pháp đề xuất trong việc cải thiện đặc tính mô men đầu ra được kiểm chứng trong phần này với các giá trị khác nhau của thời gian chuyển mạch. Giá trị thời gian chuyển mạch

được thử với giải giá trị từ 1 đến 10 ms với một loại mô men tải nhất định. Mô men tải trong bài báo này được giả thiết bằng 50 Nm trong vòng từ 0 đến 200 s, bằng 110 Nm trong vòng từ 200 s đến 400 s và trong vòng 400s đến 600s, giá trị của mô men tải bằng 80 Nm. Các mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm Matlab và Simulink. Tham số mô phỏng đối với động cơ từ trở được liệt kê trong Bảng 1 (Nhã, 2022).

Như quan sát thấy trong Bảng 2, chất lượng đầu ra của mô men động cơ từ trở SRM đủ tốt tại các giá trị 2 ms, 5 ms, 9 ms và 10 ms của thời gian chuyển mạch. “Đủ tốt” ở đây được hiểu là với những giá trị thời gian chuyển mạch như vậy, hiệu suất thời gian lớn hơn 50% và độ lặp bập của mô men đầu ra tương đối nhỏ. Độ lặp bập của mô men đầu ra được lượng hoá bằng tham số \dot{T} , với \dot{T} càng nhỏ, mô men đầu ra sẽ càng phẳng. Điều này có nghĩa rằng những giá trị của τ thoả mãn (13) và (14) sẽ cho mô men đầu ra phẳng trong khoảng thời gian tương đối ngắn. Hình 3 thể hiện đồ thị của mô men đầu ra với những giá trị thời gian chuyển mạch 2 ms, 5 ms, 9 ms và 10 ms để từ đó có cơ sở lựa chọn giá trị nào là tốt nhất trong những giá trị “chấp nhận được” của τ với một loại mô men tải nhất định.

Bảng 1. Tham số của động cơ từ trở chuyển mạch.

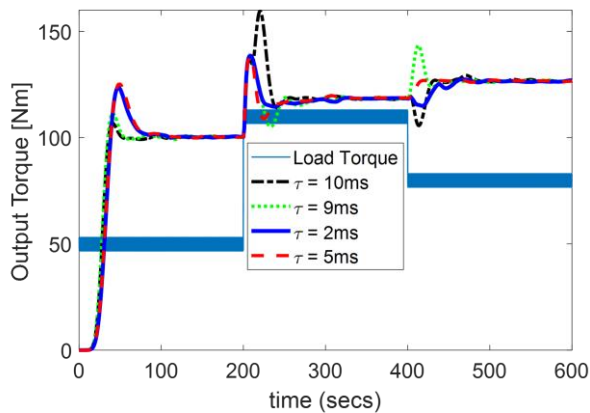
$J = 9,68.10^3 [kg/m^2]$	$m = 150 [kg]$
$a = 1,5.10^{-3} [H]$	$N_r = 6$
$b = 1,364.10^{-3} [H]$	$\psi_s = 0.2886 [Wb]$
$l = 2 [m]$	$g = 9.81 [m/s^2]$
Công suất: 1.2 kW	Số pha: 4
Mô men trung bình: 4.5 Nm	Tốc độ: 3000 rpm

Bảng 2. Thống kê thời gian chuyển mạch và đáp ứng của mô men đầu ra của SRM.

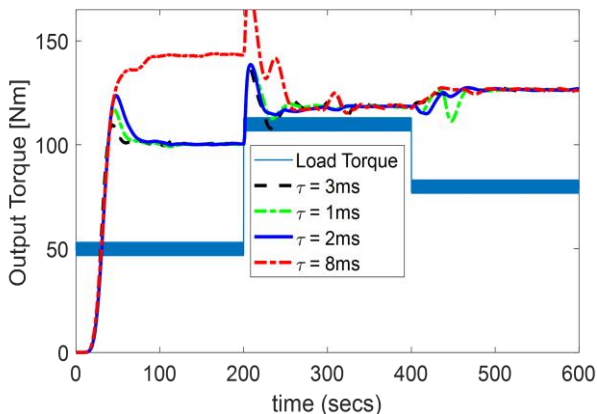
Thời gian chuyển mạch [ms]	0÷200 s		200÷400 s		400÷600 s	
	$H\%$	$\dot{T} [N/m]$	$H\%$	$\dot{T} [N/m]$	$H\%$	$\dot{T} [N/m]$
$\tau = 1$	49.63	0.012	65.47	0.0197	33.95	0.0934
$\tau = 2$	61.51	0.0146	78.88	0.0932	65.76	0.04
$\tau = 3$	35.12	0.0215	0	0.121	51.43	0.0506
$\tau = 4$	34.87	0.0079	24.86	0.0941	46.29	0.0396
$\tau = 5$	66.43	0.0011	60.12	0.0912	62.67	0.0505
$\tau = 6$	36.76	0.0142	75.03	0.0966	50.45	0.0965
$\tau = 7$	22.97	0.0482	63.42	0.0863	32.38	0.0448
$\tau = 8$	50.12	0.0453	0	0.1277	48.11	0.0424
$\tau = 9$	62.77	0.0075	63.26	0.0915	68.51	0.0416
$\tau = 10$	70.34	0.0063	73.44	0.0941	59.53	0.0393

Có thể thấy trong Hình 3 và 4, mô men đầu ra đều ổn định trong vòng 200 s đầu tiên, trong đó giá trị $\tau = 9\text{ ms}$ và $\tau = 10\text{ ms}$ có độ quá điều chỉnh nhỏ hơn hẳn 2 giá trị còn lại. Tuy nhiên, từ 200 s đến 400 s, đáp ứng của mô men đầu ra có sự khác nhau rõ rệt khi mô men tải thay đổi. Theo đó, mô men đầu ra ứng với $\tau = 5\text{ ms}$ và $\tau = 9\text{ ms}$ có những thời điểm nhỏ hơn mô men tải. Điều này vô hình chung sẽ có hại cho động cơ và dẫn đến phát nóng cục bộ. Vì vậy, giá trị $\tau = 5\text{ ms}$ và $\tau = 9\text{ ms}$ chưa phải là giá trị tối ưu nhất đối với mô men tải đang xét trong bài. Ngược lại, $\tau = 2\text{ ms}$ và $\tau = 10\text{ ms}$ cho đáp ứng mô men không nhỏ hơn mô men tải, vì vậy đây là 2 giá trị khả dĩ nhất. Mặc dù vậy, độ quá điều chỉnh của mô men ứng với $\tau = 10\text{ ms}$ là tương đối lớn.

Do đó giá trị $\tau = 2\text{ ms}$ được chọn là giá trị phù hợp nhất đối với trường hợp này. Cũng cần



Hình 3. Đáp ứng đầu ra của Mô men với các giá trị 2 ms, 5 ms, 9 ms và 10 ms.



Hình 4. Đáp ứng đầu ra của Mô men với các giá trị 2 ms, 1 ms, 3 ms và 8 ms.

nói thêm rằng, giá trị $\tau = 2\text{ ms}$ cũng đồng thời là giá trị hợp lý nhất đối với phần lớn các loại tải có mô men nhỏ hơn giá trị mô men tải được xét trong bài báo này. Điều này giúp cho kỹ sư không phải xác định thời gian chuyển mạch khi làm việc với động cơ SRM có tải thay đổi nhỏ. Đó chính là ý nghĩa thực tiễn của bài báo này.

5. Kết luận

Kết quả nghiên cứu về cải thiện đặc tính mô men SRM loại 8/6 được xem xét cẩn thận và được phân tích toán học cả về mặt định lý và mô phỏng. Về phương pháp này chúng tôi đã khảo sát và thống kê hơn 10 trường hợp với nhiều giá trị thời gian lưu giữ khác nhau để tìm ra giá trị tối ưu với một mômen tải nhất định. Thời gian giữ tối ưu là 2 (ms) và nó giúp đặc tính mô men được cải thiện với hiệu suất thời gian cao. Bằng phương pháp điều chỉnh thời gian chuyển mạch, nghiên cứu đã chứng minh được khả năng giảm thiểu dao động của mô men đầu ra giúp giảm hao mòn và tăng tuổi thọ Các kết quả từ nghiên cứu này cung cấp một cơ sở lý thuyết giúp cho các nhà khoa học, các kỹ sư mở ra thêm những hướng nghiên cứu mới về phương pháp điều khiển SRM và các ứng dụng trong thực tế. Ngoài ra, trong tương lai, phương pháp lựa chọn thời gian chuyển mạch thích hợp cho SMR sẽ được tự động hóa thông qua một hệ chuyên gia dựa trên những kết quả đạt được từ bài báo này.

Lời cảm ơn

Công trình nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, theo hợp đồng nghiên cứu khoa học và phát triển công nghệ số 08-2024-RD/HĐ-ĐHCN.

Đóng góp của tác giả

Võ Thị Cẩm Thùy - nghiên cứu tài liệu và viết bản thảo bài báo; Đỗ Mạnh Dũng - thực hiện mô phỏng kết quả và viết phần 3; Nguyễn Đức Khoát - tiến hành lên ý tưởng, kiểm tra bản thảo và giám sát quá trình nghiên cứu; Phan Xuân Minh - lên ý tưởng khoa học và đánh giá kết quả.

Tài liệu tham khảo

Ahmad, S. S., Thirumalasetty, M., & Narayanan, G. (2023). Predictive current control of switched reluctance machine for accurate current

- tracking to enhance torque performance. *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- Asok Kumar, A., Bindu, G. R., Cherian, E., & Parvathy, M. L. (2020). Energy saving and economic analysis of switched reluctance motor in agricultural applications. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 5, 1-13.
- Bartolo, J. B., Degano, M., Espina, J., & Gerada, C. (2016). Design and initial testing of a high-speed 45-kW switched reluctance drive for aerospace application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(2), 988-997.
- Bilgin, B., Howey, B., Callegaro, A. D., Liang, J., Kordic, M., Taylor, J., & Emadi, A. (2020). Making the case for switched reluctance motors for propulsion applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(7), 7172-7186.
- Cam, T. V. T., Manh, D. D., Xuan, H. L., Duc, K. N., & Xuan, M. P. (2023, July). Dynamic surface control for the switched reluctance motor. 2023 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE).
- Chithrabhanu, A., & Vasudevan, K. (2022). Quantification of noise benefits in torque control strategies of SRM drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 38(1), 585-598.
- dos Santos Barros, T. A., dos Santos Neto, P. J., Nascimento Filho, P. S., Moreira, A. B., & Ruppert Filho, E. (2017). An approach for switched reluctance generator in a wind generation system with a wide range of operation speed. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(11), 8277-8292.
- Feng, L., Sun, X., Yang, Z., & Diao, K. (2023). Optimal torque sharing function control for switched reluctance motors based on active disturbance rejection controller. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 28(5), 2600-2608.
- Hammoud, I., Hentzelt, S., Xu, K., Oehlschlägel, T., Abdelrahem, M., Hackl, C., & Kennel, R. (2022). On continuous-set model predictive control of permanent magnet synchronous machines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(9), 10360-10371.
- Li, H., Bilgin, B., & Emadi, A. (2018). An improved torque sharing function for torque ripple reduction in switched reluctance machines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(2), 1635-1644.
- Nhã, P. H. (2022). *Nghiên cứu giải pháp cải thiện đặc tính làm việc của động cơ từ trở*. Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Đại học Bách Khoa Hà Nội.
- Rigatos, G., Siano, P., & Ademi, S. (2019). Nonlinear H-infinity control for switched reluctance machines. *Nonlinear Engineering*, 9(1), 14-27.
- Sun, X., Wu, J., Lei, G., Guo, Y., & Zhu, J. (2020). Torque ripple reduction of SRM drive using improved direct torque control with sliding mode controller and observer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(10), 9334-9345.
- Zorig, A., Kia, S. H., Chouder, A., & Rabhi, A. (2022). A comparative study for stator winding interturn short-circuit fault detection based on harmonic analysis of induction machine signatures. *Mathematics and Computers in Simulation*, 196, 273-288.