

# TỔNG QUAN VỀ ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ CHUYỂN MẠCH: CƠ HỘI, THÁCH THỨC VÀ XU HƯỚNG ĐIỀU KHIỂN TRONG TƯƠNG LAI

## A REVIEW OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR: OPPORTUNITY, CHALLENGENS AND FUTURE TRENDS OF CONTROL

Phí Hoàng Nhã<sup>1</sup>, Võ Thị Cẩm Thùy<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Mỏ - Địa chất Hà Nội, Việt Nam

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: vothuyhau@gmail.com

(Nhận bài / Received: 06/10/2022; Sửa bài / Revised: 02/02/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 01/3/2023)

**Tóm tắt** - Động cơ từ trở chuyển mạch là động cơ điện mới được ứng dụng rộng rãi trong những năm gần đây. Với nhiều ưu điểm như mô men khởi động lớn, cấu tạo đơn giản, giá thành sản xuất rẻ, tổn hao nhiệt thấp, ..., động cơ từ trở chuyển mạch trở thành đối tượng được quan tâm, nhất là trong lĩnh vực xe điện. Với xu thế phát triển của lĩnh vực xe ô tô điện, hệ truyền động động cơ từ trở chuyển mạch có thể trở thành hệ truyền động phổ biến trong tương lai. Chính vì vậy, bài báo này trình bày tổng quan về động cơ từ trở chuyển mạch, những xu hướng điều khiển hệ truyền động động cơ từ trở chuyển mạch hiện nay. Đồng thời, nhóm tác giả đề xuất một số giải pháp điều khiển nhằm nâng cao chất lượng của hệ truyền động chuyển mạch.

**Từ khóa** - Động cơ từ trở chuyển mạch; SRM; xe điện

### 1. Giới thiệu

Động cơ từ trở chuyển mạch xuất hiện từ khá sớm (1940), nhưng chưa được chú ý. Nguyên nhân là để điều khiển được SRM, cần thực hiện quá trình chuyển mạch giữa các pha nhanh chóng. Khoa học kỹ thuật tại thời điểm đó chưa đủ để thực hiện quá trình điều khiển này [1]. Những năm gần đây, sự phát triển mạnh mẽ và hoàn thiện của kỹ thuật điện tử, van bán dẫn, điện tử công suất,... đã góp phần hoàn thiện quá trình điều khiển cho động cơ từ trở chuyển mạch.

Động cơ từ trở chuyển mạch có nhiều ưu điểm [2], bao gồm: Cấu tạo đơn giản, độ bền cao, động cơ hoạt động ở vùng tốc độ lớn. Rotor không có nam châm vĩnh cửu, không có cuộn dây nên nhiệt độ cho phép của rotor cao hơn các loại động cơ khác. Hướng của mô men không phụ thuộc hướng dòng điện, vì thế có thể đơn giản hoá bộ biến đổi, giảm chi phí của hệ thống. Ở động cơ từ trở chuyển mạch không có hiện tượng quá dòng làm hỏng các van công suất, do đó, bộ biến đổi có độ tin cậy cao. Mô men khởi động lớn, hiệu suất điều khiển tốc độ tốt, không có tác động của dòng điện trong động cơ tại thời điểm khởi động. Mạch từ động cơ làm việc trong cả vùng tuyến tính và bão hoà của đường đặc tính từ B-H, sử dụng tối đa khả năng vật liệu sắt từ, tỉ lệ công suất trên khối lượng lớn. Với những ưu điểm nổi trội trên, động cơ từ trở chuyển mạch được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp và một số lĩnh vực đặc thù như: chế tạo máy phát khởi động cho máy bay, các máy li tâm đòi hỏi tốc độ cao, động cơ tàu ngầm với yêu cầu mô-men khởi động lớn,... Tất cả những điều này đã đưa ra cơ hội cho SRM phát triển trong tương lai.

**Abstract** - Switched reluctance motor is a new electric motor that has been widely applied in recent years. With many advantages such as large starting torque, simple structure, low production cost, low heat loss, ..., the switched reluctance motor has become an object of interest, especially in the electric vehicle. With the development trend of the electric car, the switched reluctance motor drive system can become a popular powertrain in the future. Therefore, this paper presents an overview of the switched reluctance motor, the current control trends of the switched reluctance motor drive system. At the same time, the authors propose the controlling solutions to improve the quality of the switched reluctance motor drive system.

**Key words** - Switched reluctance motor; SRM; electric vehicle

Tuy nhiên, các nhược điểm của SRM đặt ra những thách thức không nhỏ. SRM có cấu trúc rotor cấu tạo cực lõi làm từ thông động cơ có tính phi tuyến mạnh, mô men đập mạch lớn và độ ồn cao. Tất cả những khuyết điểm đó đã giới hạn những ứng dụng của động cơ SRM trong một số trường hợp. Nhằm khắc phục những hạn chế mô men đập mạch, nâng cao chất lượng của động cơ, kết hợp với nghiên cứu các tài liệu liên quan trong và ngoài nước, nhóm tác giả bài báo trình bày tổng quan về động cơ từ trở chuyển mạch, phân tích, tổng hợp các xu hướng điều khiển SRM hiện nay. Đồng thời, nhóm tác giả đề xuất một số giải pháp điều khiển nhằm nâng cao chất lượng của hệ truyền động động cơ từ trở chuyển mạch.

### 2. Những đặc trưng cơ bản của SRM

#### 2.1. Cấu tạo và nguyên lý làm việc

Động cơ từ trở chuyển mạch thuộc nhánh động cơ điện xoay chiều, Hình 1. Động cơ hoạt động dựa trên sự chuyển mạch giữa các pha và sự thay đổi từ trở trong mạch từ nên được gọi là động cơ từ trở chuyển mạch. Bên cạnh đó, một loại động cơ cũng có sự biến thiên từ trở trong mạch từ là động cơ từ trở đồng bộ. Chính vì vậy, để phân biệt cụ thể giữa hai loại động cơ này, động cơ từ trở chuyển mạch cần được gọi đầy đủ.

Động cơ từ trở chuyển mạch được phân làm hai loại chính: Động cơ quay và động cơ tuyến tính. Động cơ quay dùng để truyền động quay, động cơ tuyến tính dùng để truyền động tịnh tiến.

Cấu tạo của động cơ từ trở chuyển mạch dạng quay

<sup>1</sup> Ha Noi University of Industry, Vietnam (Phi Hoang Nha, Vo Thi Cam Thuy)

<sup>2</sup> Ha Noi University of Mining and Geology, Vietnam (Vo Thi Cam Thuy)

cũng giống như các loại động cơ quay khác, gồm rotor và stator. Tùy theo số cực của rotor và stator mà người ta có các loại động cơ từ trở chuyển mạch 6/4, 8/6, 10/8,.... Cả stator và rotor của động cơ từ trở chuyển mạch đều là loại cực lồi. Stator của động cơ được gắn cố định với vỏ, trên các cực đối diện của nó được quấn các cuộn dây giống như stator của động cơ 1 chiều hay động cơ xoay chiều 3 pha. Rotor của động cơ là phần di động, có thể quay quanh trục stator. Tuy nhiên, trên rotor không có cuộn dây nào. Cấu tạo của rotor đơn giản chỉ là lõi thép được ghép bởi các lá thép mỏng và chia làm các cực đối diện nhau.

hình (b). Bây giờ ta lại kích thích vào cuộn dây ở pha b, kéo  $r_1, r'_1$  hướng đến b và b' theo chiều kim đồng hồ. Tiếp đến, ta lại cho dòng điện kích thích vào pha c sẽ làm cho  $r_2, r'_2$  thẳng hàng với c và c'. Do đó, nhờ việc cung cấp điện vào các cuộn dây ở 3 pha của stator, ta đã làm dịch chuyển rotor đi góc  $90^\circ$ .

Dòng điện được chuyển mạch đóng điện và cắt điện nhờ các khóa bán dẫn. Muốn làm cho rotor quay theo vòng thì ta chỉ việc thay đổi thứ tự cấp điện sao cho thứ tự được liên tục và hợp lý. Trong trường hợp trên ta cấp điện cho các pha theo thứ tự abc thì rotor quay theo chiều kim đồng hồ. Nếu như ta cấp điện theo thứ tự acb thì rotor sẽ quay theo chiều ngược lại.

## 2.2. Mô hình toán của SRM

Mô hình toán của động cơ từ trở chuyển mạch được sử dụng để thiết lập bộ điều khiển từ phương trình vi phân thu được từ các phương trình máy điện cơ bản. Động lực học của động cơ từ trở chuyển mạch bao gồm các phương trình về điện áp, phương trình mô men và phương trình cơ, được biểu diễn:

Phương trình vi phân mô tả SRM với m pha [4] có dạng sau:

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

Trong đó:  $j = 1, 2, \dots, m$ ;

$u_j$  là điện áp của pha  $j$ ;

$R$  là điện trở pha  $j$ ;

$i_j$  là dòng điện pha  $j$ ;

$\psi_j$  từ thông pha  $j$ , được xác định:

$$\psi_j = \int_0^T (v_j - R.i_j) dt \quad (2)$$

$W'_j$  là đối năng lượng từ trường, được xác định:

$$\partial W'_j(\theta, i_j) = \int_0^{i_j} \psi_j(\theta, i_j) di_j \quad (3)$$

$T_e$  là mô men một pha;

$T_l$  là mô men tải;

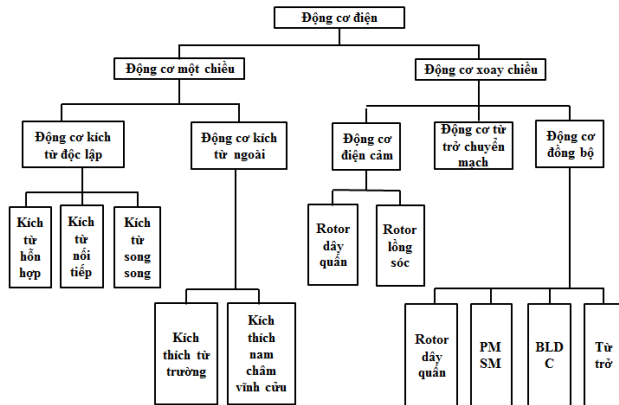
$J$  là mô men quán tính.

Mô men trong SRM là hàm phi tuyến theo dòng điện nếu mạch từ là tuyến tính. Khi đó, mô men tổng sinh ra chính bằng tổng mô men ở các pha:

$$T_e(\theta, i_1, i_2, \dots, i_m) = \sum_{j=1}^m T_j(\theta, i_j) \quad (4)$$

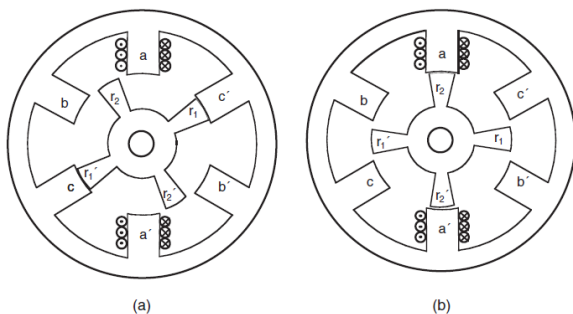
## 2.3. Phân tích nhược điểm của động cơ từ trở chuyển mạch

Những ưu điểm của động cơ từ trở chuyển mạch đã được trình bày chi tiết ở phần giới thiệu trong bài báo.



Hình 1. Phân loại động cơ điện

Nguyên lý làm việc của SRM khá đơn giản, khi có dòng điện kích thích vào cuộn dây trên cực stator thì rotor sẽ chuyển động dịch chuyển sao cho cực rotor tương ứng gần nhất với cực stator bị kích thích sẽ dịch chuyển để trở thành thẳng hàng với cực stator đó, để từ trở giữa hai cực của rotor và stator có giá trị nhỏ nhất. Khi hai cực của stator được kích thích thẳng hàng với hai cực của rotor thì nhờ cấu tạo khác nhau về số cực giữa rotor và stator, cho nên cực khác của rotor lại nằm lệch so với các cực stator. Ta lại cho dòng điện kích thích vào cực stator kế tiếp sẽ kéo cực rotor này thẳng hàng. Bằng việc cấp dòng điện kích thích lần lượt trên các cuộn dây trên cực stator, rotor sẽ quay. Chuyển động của rotor vì thế tạo ra mô men và năng lượng. Cụ thể, ta xét một động cơ từ trở chuyển mạch dạng 6/4 đơn giản như Hình 2.



Hình 2. Nguyên lý hoạt động của động cơ từ trở chuyển mạch dạng 6/4. a) Pha c thẳng hàng; b) Pha a thẳng hàng [3]

Giả sử ban đầu các cực  $r_1, r'_1$  của rotor và các cực c, c' của stator nằm thẳng hàng. Đưa một dòng điện kích thích vào pha a. Khi đó thông lượng tạo ra giữa cực a, a' của stator và  $r_2, r'_2$  của rotor sẽ tạo ra lực đẩy làm cho cực  $r_2, r'_2$  hướng đến cực a và a'. Khi chúng đã thẳng hàng, dòng điện ở pha a sẽ bị ngắt, khi đó rotor sẽ có vị trí mới như

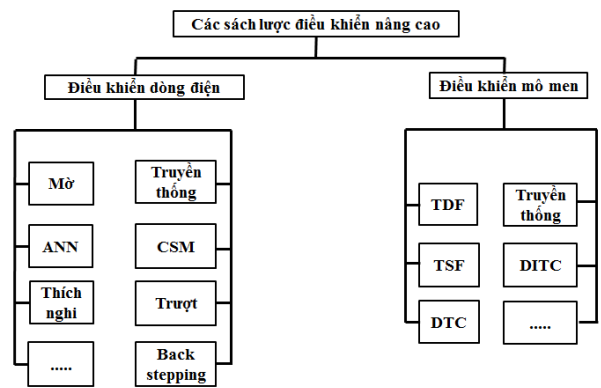
Trong phần này, nhóm tác giả tập trung làm rõ nguồn gốc các nhược điểm của SRM. Những nhược điểm chính của SRM bao gồm mô men đập mạch lớn, rung ồn.

Do đặc điểm cấu trúc vốn có của động cơ từ trở chuyển mạch làm động cơ này có một số nhược điểm lớn [5]. Cấu trúc rotor cấu tạo cực lõi làm từ thông động cơ có tính phi tuyến mạnh, khe hở không khí sinh ra giữa roto và stato lớn làm từ trở lớn, dẫn đến mô men đập mạch lớn. Động cơ có tiếng ồn lớn khi làm việc các ứng dụng đòi hỏi môi trường yên tĩnh như trong bệnh viện, gia đình. Nguồn gốc của tiếng ồn trong động cơ nói chung do nhiều nguyên nhân khác nhau, có thể được phân loại thành bốn nhóm: Từ trường, cơ khí, khí động học, điện từ. Tuy nhiên, ở động cơ từ trở chuyển mạch, nhóm tác giả tập trung phân tích nguồn gốc gây ra tiếng ồn xuất phát từ cấu tạo và nguyên lý làm việc của động cơ. Nguyên nhân đầu tiên gây ra tiếng ồn là do mô men đập mạch, sự chênh lệch quá lớn giữa mô men cực đại và mô men cực tiểu khi động cơ hoạt động gây ra tiếng ồn chính, đồng thời làm giảm mô men trung bình. Nguyên nhân thứ hai gây ra tiếng ồn là do lực xuyên tâm. Lực từ trong động cơ từ trở chuyển mạch gồm lực tiếp tuyến và lực xuyên tâm. Lực tiếp tuyến là lực có tác dụng làm quay roto, lực xuyên tâm là lực hút giữa các cực roto và stato với nhau. Trong động cơ từ trở chuyển mạch, lực xuyên tâm luôn lớn hơn nhiều lần so với lực tiếp tuyến, nhưng lực xuyên tâm là đối xứng và bị triệt tiêu (chỉ đúng với khe khí đồng đều). Lực này tác động đến động cơ vì các lực xuyên tâm triệt tiêu lẫn nhau thông qua thân roto và stato, gây rung động. Hơn nữa, nếu lực hút giữa các cực đối xứng không đều là nguyên nhân làm roto mất cân bằng. Đây là nguồn gốc trội nhất trong tiếng ồn sinh ra ở SRM so với các động cơ khác. Nguyên nhân thứ ba gây ra tiếng ồn là do gông stato bị rung động ở tần số cao, dẫn đến sự méo, lệch gông stato làm khe khí giữa roto và stato trở lên không đồng nhất. Stato của động cơ từ trở chuyển mạch có tần số tự nhiên. Khi mô men trong những tần số của dòng điện kích thích trùng với tần số tự nhiên của stato, cộng hưởng xảy ra dẫn đến tiếng ồn âm thanh (tần số cộng hưởng có thể lên tới hàng nghìn Hz). Một hạn chế nữa trong SRM là ma sát và tổn thất qua khe hở lớn trên roto cực lõi ở tốc độ cao.

Tất cả những khuyết điểm đó đã giới hạn những ứng dụng của động cơ SRM trong một số trường hợp. Nhằm khắc phục những hạn chế mô-men đập mạch, nâng cao chất lượng của động cơ, kết hợp với nghiên cứu các tài liệu liên quan trọng và ngoài nước, nhóm tác giả đã phân tích, so sánh, tổng hợp một số phương pháp điều khiển nhằm cải thiện vấn đề tồn đọng trên.

### 3. Các sách lược điều khiển động cơ từ trở chuyển mạch

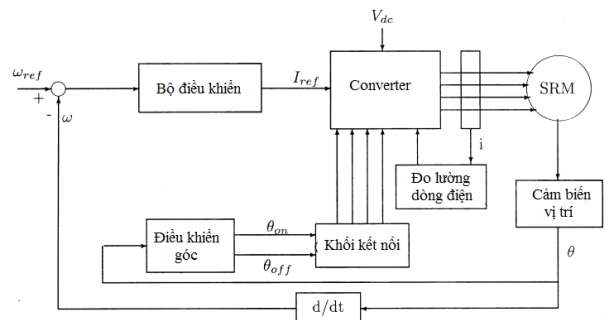
Những nhược điểm của động cơ từ trở chuyển mạch được khắc phục bằng các giải pháp như: Giải pháp thay đổi cấu trúc, giải pháp điều khiển, giải pháp thay đổi vật liệu chế tạo. Trong các giải pháp này, giải pháp mềm hóa và khá hiệu quả là giải pháp điều khiển. Hình 3 trình bày một số các sách lược điều khiển cho động cơ từ trở chuyển mạch. Đồng thời, các thuật toán điều khiển này được nhóm tác giả phân tích, đánh giá chi tiết.



Hình 3. Một số các sách lược điều khiển SRM hiện nay

#### 3.1. Điều khiển dòng điện

Sử dụng bộ điều khiển PI và PID truyền thống trong tài liệu [6]. Bộ điều khiển PI (tỉ lệ - tích phân) và bộ điều khiển PID (tỉ lệ - tích phân - vi phân) là hai bộ điều khiển truyền thống, Hình 4. Điều khiển truyền thống có ba cách tiêu biểu: Điều khiển vị trí rotor (APC), điều khiển dòng điện (CCC) và điều khiển điện áp (CVC).



Hình 4. Cấu trúc hệ thống điều khiển [6]

Điều khiển vị trí rotor có nghĩa là cung cấp điện áp cho cuộn dây bằng cách thay đổi  $\theta_{on}$  và  $\theta_{off}$  của công tắc để bật tắt nguồn cung cấp. Do đó, điều chỉnh được dạng sóng tín hiệu dòng điện để điều khiển tốc độ vòng kín. Góc mở  $\theta_{on}$  và góc tắt  $\theta_{off}$  có thể được điều chỉnh, tuy nhiên trong thực tế, thường phải cố định  $\theta_{off}$ , thay đổi  $\theta_{on}$  theo chế độ điều chỉnh.  $\theta_{on}$  và  $\theta_{off}$  phải được điều chỉnh riêng biệt, khi đó động cơ SRM có thể có được bộ điều khiển vị trí góc tối ưu. Ưu điểm của phương pháp điều khiển này là dải điều chỉnh mô men lớn, nhiều cuộn dây được cấp điện đồng thời, hiệu suất động cơ cao, phù hợp cho tốc lớn, không phù hợp cho tốc độ nhỏ.

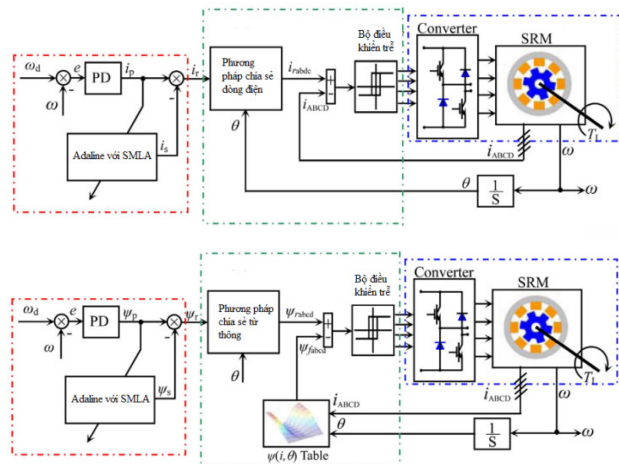
Điều khiển thay đổi dòng điện chủ yếu sử dụng để điều khiển động cơ hoạt động ở tốc độ thấp. Bởi dòng điện được tăng lên nhanh chóng, để tránh thiệt hại do xung dòng điện cần hạn chế dòng điện đỉnh. Phương pháp điều khiển này hiếm khi liên quan tới  $\theta_{on}$  và  $\theta_{off}$ , chọn vị trí của mỗi cuộn dây để điều khiển dòng điện bằng PWM. Ưu điểm chính của bộ điều khiển là đơn giản và chính xác, điều khiển tốt hơn, giảm gợn sóng mô men, thích hợp cho động cơ hoạt động ở tốc độ thấp, có tải cố định.

Điều khiển thay đổi điện áp là giữ  $\theta_{on}$ , thay đổi  $\theta_{off}$ , thiết bị đóng cắt nguồn hoạt động trong chế độ điều chỉnh độ rộng xung. Giữ chu kỳ T cố định, thay đổi chu kỳ sóng PWM, qua đó điều chỉnh biên độ điện áp qua cuộn dây, tạo

ra sự thay đổi dòng điện để đạt tốc độ động cơ. Ưu điểm của phương pháp: Phù hợp cho điều khiển cả ở tốc độ cao và tốc độ thấp, khả năng thích ứng nhanh chóng với sự thay đổi của tải.

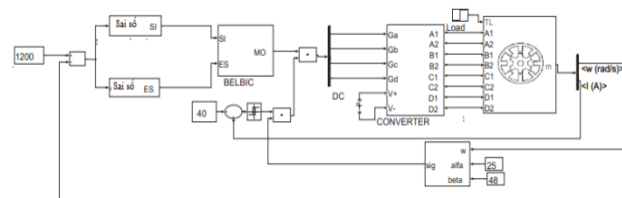
Điều khiển dòng điện và từ thông sử dụng phương pháp hàm chia sẻ, Hình 5. Trong tài liệu [7-8], một phương pháp chia sẻ dòng điện và chia sẻ từ thông được đề xuất để điều khiển nâng cao năng suất của động cơ từ trở chuyen mạch. Phương pháp này không chỉ nhận ra sự chia sẻ liên kết dòng điện và từ thông giữa các pha khác nhau của SRM, mà còn có thể giảm mô men đập mạch xuống mức rất thấp. CSM và FSM được áp dụng để điều khiển tốc độ của SRM bốn pha 8/6 tương ứng. Bộ điều khiển tốc độ bao gồm bộ điều khiển đạo hàm - tỷ lệ (PD) và phần tử tuyến tính thích ứng (Adaline) với thuật toán học chế độ trượt (SMLA). Các so sánh giữa hiệu suất kiểm soát của CSM và FSM được đưa ra. Tuy nhiên, mô hình SRM được đưa ra trong nghiên cứu này vẫn bỏ qua ảnh hưởng của bão hòa mạch từ và coi dòng điện không thay đổi khi tính giá trị điện cảm.

Sử dụng bộ điều khiển thông minh BELBIC trong tài liệu [10], Hình 7. Bộ điều khiển thông minh dựa trên trí tuệ nhân tạo được phát triển để điều khiển tốc độ SRM. Giống như các bộ điều khiển thông minh khác, BELBIC là mô hình tự do và là thích hợp để điều khiển các hệ thống phi tuyến. Thông số động cơ thay đổi, điểm làm việc thay đổi, đo lường tiếng ồn, lỗi mạch hở trong một pha và các pha bất đối xứng trong SRM cũng được mô phỏng để hiển thị hiệu quả mạnh mẽ và vượt trội của BELBIC. Để so sánh hiệu suất BELBIC với các bộ điều khiển thông minh khác, bộ điều khiển Logic mờ (FLC) được phát triển. Đáp ứng của hệ thống với BELBIC và FLC được so sánh với nhau. Hơn nữa, bằng cách loại bỏ cảm biến vị trí, một phương pháp được giới thiệu để ước lượng vị trí rotor. Phương pháp này dựa trên hệ thống mạng nơ ron thích nghi mờ (ANFIS). Đầu vào ước tính là từ thông của bốn pha. Bộ ước lượng vị trí rotor được đề xuất được mô phỏng trong các điều kiện khác nhau. Kết quả mô phỏng xác định ước tính vị trí rotor chính xác trong các tải và tốc độ khác nhau.



Hình 5. Hệ thống điều khiển theo phương pháp chia sẻ dòng điện và từ thông [7]

Bộ điều khiển Fuzzy logic điều khiển mô men cho động cơ từ trở chuyen mạch được đưa ra trong tài liệu [9]. Hình 6 cho thấy hệ thống điều khiển SRM theo phương pháp mờ coi đầu vào là tốc độ, đầu ra là dòng điện. Sự thay đổi các hàm chức năng làm thay đổi dòng điện các pha trong các vùng thích hợp. Giá trị ban đầu của tham số mờ là ngẫu nhiên. Trong quá trình hoạt động, tham số được điều chỉnh bởi bộ điều khiển thời gian thực, thích ứng với những thay đổi của đặc tính động cơ. Điều khiển mờ cho phép điều khiển động cơ từ trở chuyen mạch linh hoạt hơn so với bộ điều khiển truyền thống. Tuy nhiên, với động cơ ít có sự thay đổi đặc tính, bộ điều khiển mờ chưa phát huy được nhiều ưu điểm.



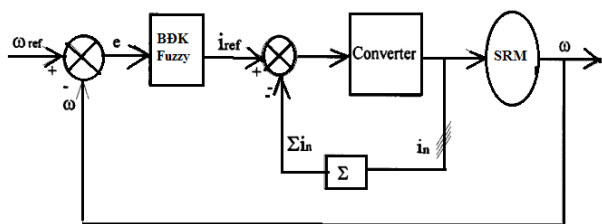
Hình 7. Cấu trúc hệ thống điều khiển sử dụng bộ BELBIC [10]

Kỹ thuật điều khiển trượt (Sliding) được các công trình [11] và [12] đưa ra với cả mô hình SRM tuyến tính và phi tuyến. Một vài nghiên cứu [13-15] kết hợp giữa bộ điều khiển Sliding và các bộ quan sát. Tuy nhiên, do tính chất của điều khiển trượt là đảo chiều liên tục trong bề mặt trượt nên gây ra tín hiệu đập mạch dường như kém hiệu quả bởi bản chất của SRM được điều khiển đóng/ngắt logic giữa các pha. Sự cộng hưởng này có thể làm mô men đập mạch tăng lên.

Kỹ thuật Backstepping lần đầu được đưa ra bởi James J. Carroll [16] năm 1995 để điều khiển tốc độ với mô hình toán của SRM chưa đầy đủ. Các kết quả trong các nghiên cứu [17-18] cho chất lượng điều khiển mô men hoặc tốc độ tốt. Tuy nhiên, hàm từ thông phi tuyến đưa ra chưa đầy đủ, các tham số trong hàm không được công bố, trong khi việc xác định các tham số đó là rất quan trọng và khó khăn.

3.2. Điều khiển mô men

Nghiên cứu [19] trình bày các kết quả mô phỏng thời gian thực của truyền động động cơ từ trở chuyen mạch với hàm phân bố mô men (TDF) cho các ứng dụng tốc độ cao, nhằm giảm mô men đập mạch. SRM được cấp nguồn bởi bộ chuyen đổi điện một chiều ba pha, mỗi pha bao gồm hai IGBT và hai diốt tự do. Mô hình SRM kết hợp tất cả các điểm phi tuyến giữa dòng kích từ, vị trí rotor và các liên kết từ thông. Với mục đích điều khiển hệ SRM, một cải tiến của phương pháp TDF được đề xuất cho các ứng dụng tốc độ cao, nhằm giảm mô men đập mạch. Mô phỏng thời gian thực của hệ thống được tiến hành trên nền tảng mô phỏng thời gian thực RT-LAB, dựa trên FPGA để kiểm tra



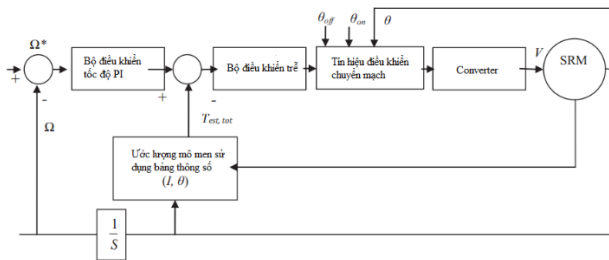
Hình 6. Cấu trúc bộ điều khiển mờ cho SRM [9]



các thuật toán nâng cao của TDF. Mô hình SRM trong nghiên cứu dừng lại ở mô hình tuyến tính.

Phương pháp tiếp cận mờ để xác định dạng sóng dòng điện sử dụng hàm chia sẻ mô men (TSF) trong tài liệu [20]. Công trình với ý tưởng điều khiển SRM, cụ thể là mô men đập mạch. Thông thường, mô men đập mạch nhỏ nhất đạt được bằng cách sử dụng bảng tra, bảng tra được sử dụng có đặc tính từ thông cung cấp dạng dòng điện cho mô men riêng. Do tính phi tuyến cao của SRM, một ý tưởng với thuật toán được đưa ra cho dạng sóng dòng điện được điều chế kết hợp với hàm chia sẻ mô men, tại cả vùng sinh mô men âm và dương. Sự kết hợp tính toán với logic mờ sẽ bù lại tính phi tuyến của hệ thống. Mặc dù đưa ra hàm mô men ở cả mô hình tuyến tính và phi tuyến, nhưng khi tổng hợp bộ điều khiển, tác giả của nghiên cứu này lại chỉ sử dụng mô hình tuyến tính của SRM.

Điều khiển mô men tức thời dựa trên điều khiển đối năng lượng từ trường trong tài liệu [21]. Nghiên cứu đã trình bày kỹ thuật điều khiển mô men tức thời trực tuyến cho động cơ từ trở chuyển mạch hoạt động trong vùng bão hòa. Phương pháp luận đề xuất được thực hiện thông qua việc điều khiển mô men tức thời của mỗi pha được kích thích bằng cách điều chỉnh đối năng lượng từ trường. Vì các thông số của bộ điều khiển phản hồi độc lập với các thông số động cơ trong phân tích hệ thống điều khiển đối năng lượng với phương pháp luận được đề xuất, thiết kế của bộ điều khiển được đề xuất là đơn giản khi so sánh với các bộ điều khiển dòng điện truyền thống. Mô men xoắn thu được bằng cách chia sẻ mô men giữa các pha hoạt động trong quá trình làm việc. Các kết quả mô phỏng và thực nghiệm xác nhận rằng mô men đập mạch ở tần số hoạt động cao được giảm xuống khi sử dụng thuật toán được đề xuất.

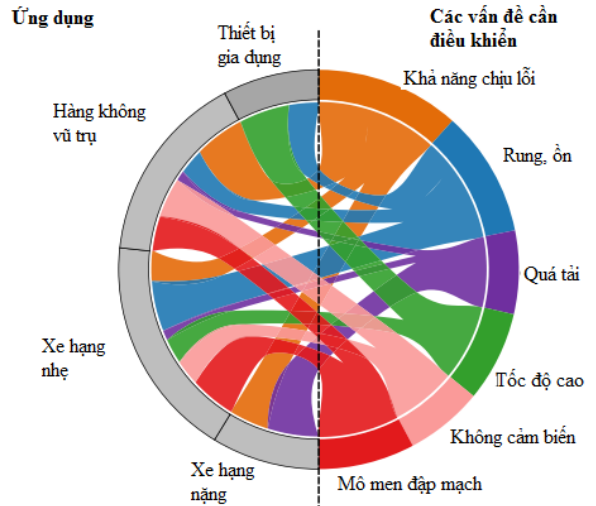


Hình 8. Điều khiển tốc độ SRM kết hợp ước lượng mô men [22]

Điều khiển tốc độ SRM sử dụng bộ điều khiển mô men tức thời trực tiếp trong tài liệu [22]. Công trình này trình bày điều khiển tốc độ của động cơ từ trở chuyển mạch nhằm giảm mô men đập mạch bằng bộ điều khiển mô men tức thời trực tiếp (DITC), Hình 8. Các giá trị tham chiếu của mô men tức thời được tạo ra từ việc điều khiển tốc độ bằng bộ điều khiển PI, từ việc so sánh giữa mô men mẫu và mô men ước lượng sử dụng bộ điều khiển độ trễ ngoài ra để chọn các góc đóng/mở khác nhau sao cho cải thiện hiệu suất của mô men. SRM có tính phi tuyến cao, đặc tính tĩnh được xác định bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) theo đặc tính từ phi tuyến tính khiến chúng khó điều khiển nhưng cho kết quả gần với sự thật hơn. Kết quả thu được từ máy tính được so sánh cho các góc đóng/mở khác nhau giúp cải thiện hiệu suất về mô men của SRM.

4. Tầm nhìn và tiềm năng ứng dụng SRM trong tương lai

Ngoài điều khiển dòng điện và mô men, vốn phổ biến đối với tất cả các ứng dụng, Hình 9 minh họa tác động của các vấn đề cần điều khiển trong một số ứng dụng có tính khả thi cao đối với SRM. Điều đầu tiên và quan trọng nhất cần lưu ý là: thực tế điều khiển hệ thống là điều khiển đa mục tiêu nhằm đảm bảo hiệu suất cao nhất của hệ thống truyền động điện. Hơn nữa, mỗi một ứng dụng có những mục tiêu điều khiển ưu tiên khác nhau. Điều này cho phép đề xuất hướng phát triển trong các ứng dụng của SRM.



Hình 9. Khả năng ứng dụng thực tế của các vấn đề cần điều khiển trong SRM [23]

Ngoài các thiết bị gia dụng, nơi công suất thấp, tốc độ cao và mức độ rung ồn giảm là bắt buộc [24-25], các ứng dụng ô tô yêu cầu đa dạng hơn về mục tiêu điều khiển. Tuy nhiên, các ứng dụng này cũng có thể được chia nhỏ. Trong trường hợp xe tải nhẹ, mặc dù hệ truyền động SRM có thể tạo ra tốc độ và mô men cao [26-27], kỹ thuật điều khiển vẫn có thể giúp cải thiện để nâng cao hiệu suất. Các xu hướng quan trọng trong các ứng dụng truyền động đặt ra những thách thức mới như tích hợp trong các hệ thống phương tiện, nhiều động cơ kéo hơn trên mỗi hệ thống truyền động, công suất cao hơn và điện áp lớn hơn [28-29] cũng như tích hợp bộ sạc pin [30].

Ngoài ra, xe hybrid, xe hạng nặng đã sử dụng SRM vì tiếng ồn, mô men đập mạch không ảnh hưởng nhiều đến quá trình hoạt động của các phương tiện này. Bởi, mô men lớn, khả năng khởi động mạnh mẽ và khả năng chịu quá tải quyết định hiệu suất rất tốt cho các ứng dụng này, như phương tiện di chuyển trên mặt đất [31]. Những chiếc xe này sử dụng một động cơ điện làm máy phát để tạo ra điện cho động cơ xăng, bộ điều khiển cũng có thể tăng tính mạnh mẽ của bộ truyền động SRM động cơ máy phát nói chung, do đó cải thiện hiệu suất và giảm nhiên liệu tiêu thụ.

Các xu hướng nghiên cứu và trong công nghiệp cũng đang thúc đẩy công nghệ trong lĩnh vực hàng không vũ trụ hướng tới kỹ nguyên điện nhiều hơn. Chuyến bay thương mại có xu hướng sử dụng công nghệ máy bay điện (MEA) nhiều hơn, cố gắng thay thế công nghệ cơ khí, thủy lực và khí nén càng nhiều càng tốt [32]. Việc thay thế chỉ khả thi nếu các hệ thống điện mới không chỉ mang

lại lợi ích về hiệu quả và khả năng điều khiển mà còn về trọng lượng và độ bền. Do đó, SRM có được coi là một giải pháp tiềm năng bởi khả năng cho phép làm việc trong các điều kiện khắc nghiệt như nhiệt độ và áp suất cao của các chuyến bay thương mại và các chuyến bay quân sự [33], do đó mang lại độ tin cậy cao. Ngoài ra, SRM đã được coi là một phần của thiết bị truyền động cơ điện thay thế hệ thống thủy lực như bơm nhiên liệu, thiết bị truyền động bề mặt cho điều khiển bay, thiết bị truyền động cánh và bánh lái [34], và gần đây hơn, để thúc đẩy hàng không vũ trụ, các ứng dụng mới như cất cánh và hạ cánh nhanh bằng điện cực (e-ESTOL).

Trước xu hướng phát triển của SRM trong tương lai gần, nhóm tác giả nhận thấy có thể cải tiến hệ thống truyền động động cơ từ trở chuyển mạch theo hướng giảm bớt các thiết bị đo lường [35-37]. Cụ thể, các thiết bị đo dòng điện, tốc độ có thể thay thế bởi các bộ quan sát trạng thái phi tuyến. Hơn nữa, giá trị từ thông được xác định bằng việc huấn luyện mạng nơ ron nhân tạo nhằm nâng cao độ chính xác, từ đó nâng cao chất lượng điều khiển. Những đề xuất này sẽ trở nên hấp dẫn khi chúng được xây dựng dựa trên mô hình toán SRM chính xác và đầy đủ hơn. Chính vì vậy, trong những nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả tập trung cải tiến mô hình toán học phi tuyến của động cơ từ trở chuyển mạch và áp dụng các kỹ thuật điều khiển phi tuyến, cũng như các bộ quan sát, ước lượng nhằm nâng cao chất lượng của hệ SRM. Cụ thể, với mô hình toán SRM [4] như sau:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \omega \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} \left\{ \sum_{j=1}^m T_j(\theta, i_j) - T_l(\theta, \omega) \right\} \\ \frac{di_j}{dt} &= - \left( \frac{\partial \psi_j}{\partial i_j} \right)^{-1} \left( Ri_j + \frac{\partial \psi_j}{\partial \theta} \omega \right) + \left( \frac{\partial \psi_j}{\partial i_j} \right)^{-1} u_j \end{aligned} \quad (5)$$

Phương trình từ thông sử dụng trong mô hình (5) là phương trình từ thông kinh điển được biểu diễn:

$$\psi_j(\theta, i_j) = \psi_s (1 - e^{-i_j f_j(\theta)}) \quad (6)$$

Nhóm tác giả nhận thấy phương trình từ thông (6) là chưa đầy đủ, vì vậy, một phương trình từ thông cải tiến [38] có xét đến ảnh hưởng của hồ cảm giữa các pha và bão hòa mạch từ:

$$\psi_j(\theta, i_j) = \psi_s (1 - e^{-[i_j f_j(\theta) + a_j(\theta)]}) \quad (7)$$

Tính chính xác của phương trình từ thông (7) so với phương trình (6) đã được chứng minh trong công trình nghiên cứu [38]. Kế thừa những kết quả này, nhóm tác giả sử dụng (7) vào mô hình (5) để đưa ra mô hình toán cải tiến của hệ truyền động động cơ từ trở chuyển mạch, từ đó, áp dụng các thuật toán điều khiển phi tuyến như backstepping, trượt,... nhằm nâng cao chất lượng điều khiển của hệ thống.

## 5. Kết luận

Động cơ từ trở chuyển mạch hứa hẹn trở thành động cơ được ứng dụng mạnh mẽ trong tương lai. Những xu hướng

điều khiển hiện nay đã dần hoàn thiện chất lượng của hệ truyền động động cơ từ trở chuyển mạch. Một số giải pháp đề xuất trong bài báo sẽ góp phần nâng cao chất lượng điều khiển và cải tiến hệ thống truyền động SRM trong thời gian tới. Các kết quả này sẽ được nhóm tác giả công bố trong những nghiên cứu tiếp theo.

**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 40-2022-RD/HĐ-ĐHCN.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] X. Gao, X. Wang, Z. Li, and Y. Zhou, "A review of torque ripple control strategies of switched reluctance motor", *International Journal of Control and Automation*, Vol. 8, No. 4, pp.103-116, 2015.
- [2] P. H. Nha and D. Q. Thuy, "Improving the characteristics of switched reluctance motor", *Automatic Control and System Engineering Journal*, Vol. 16, no. 2, pp. 59-66, 2016.
- [3] R. Krishnan, "Switched Reluctance Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications", Industrial electronics series, CRS Press LLC, 2001.
- [4] P. H. Nha, P. H. Phi, D. Q. Thuy, P. X. Dat, and L. X. Hai, "Backstepping Control for Combination Model of Switched Reluctance Motor". *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 19, no. 11, pp. 18-23, 2021.
- [5] P. H. Nha, P. H. Phi, D. Q. Thuy, "Using Amorphous Steel to Improve Radial Force in Switched Reluctance Motors". *The University of Danang - Journal of Science and Technology*, vol. 3, no. 124, pp. 43-48, 2018.
- [6] W. K. Ho, S. K. Panda, K. W. Lim, and F. S. Huang, "Gain-scheduling control of the Switched Reluctance Motor", *Control Eng. Pract.*, vol. 6, no. 2, pp. 181-189, 1998.
- [7] J. J. Wang, "A common sharing method for current and flux-linkage control of switched reluctance motor", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 131, pp. 19-30, 2016.
- [8] A. Chithrabhanu and K. Vasudevan, "Current Sharing Function Based Torque Ripple Reduction Strategy For Switched Reluctance Motor Drives", *2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Expostive Asia*, 2021.
- [9] A. Derdi and V. O. Zbulur, "Improving Performance of Switched Reluctance Motor", *IEEE*, vol. 317, pp. 307-317, 1998.
- [10] B. M. Dehkordi, A. Parsapoor, M. Moallem, and C. Lucas, "Sensorless speed control of switched reluctance motor using brain emotional learning based intelligent controller", *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 1, pp. 85-96, 2011.
- [11] A. Tahour, A. Meroufel, H. Abid, and A. G. Aissaoui, "Sliding controller of switched reluctance motor", *Leonardo Electron. J. Pract. Technol.*, vol. 7, no. 12, pp. 151-162, 2008.
- [12] M. Rafiq, S. U. Rehman, F. U. Rehman, Q. R. Butt, and I. Awan, "A second order sliding mode control design of a switched reluctance motor using super twisting algorithm", *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 25, pp. 106-117, 2012.
- [13] M. S. Islam, I. Husain, R. J. Veillette, and C. Batur, "Design and performance analysis of sliding-mode observers for sensorless operation of switched reluctance motors", *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 11, no. 3, pp. 383-389, 2003.
- [14] J. Sun, G. Z. Cao, S. D. Huang, Y. Peng, J. He, and Q. Q. Qian, "Sliding-Mode-Observer-Based Position Estimation for Sensorless Control of the Planar Switched Reluctance Motor", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 61034-61045, 2019.
- [15] R. A. McCann and M. S. Islam, "Application of a sliding-mode observer for position and speed estimation in switched reluctance motor drives", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 1, pp. 51-58, 2001.
- [16] J. J. Carroll, A. J. Geoghan, D. M. Dawson, and P. Vedagarbha, "A backstepping based computed torque controller for switched reluctance motors driving inertial loads", *IEEE Conf. Control Appl.*

- Proc., 1995, pp. 779–786.
- [17] C. H. Lin, “Adaptive nonlinear backstepping control using mended recurrent Romanovski polynomials neural network and mended particle swarm optimization for switched reluctance motor drive system”, *Trans. Inst. Meas. Control*, vol. 41, no. 14, pp. 4114–4128, 2019.
- [18] M. T. Alrifai, J. H. Chow, and D. A. Torrey, “Practical application of backstepping nonlinear current control to a switched-reluctance motor”, *Proc. Am. Control Conf.*, vol. 1, no. 6, pp. 594–599, 2000.
- [19] K. Asghar, “Analysis of Switched Reluctance Motor Drives for Reduced Torque Ripple using FPGA based Simulation Technique”, *Am. J. Inf. Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 1–11, 2013.
- [20] R. Gobbi and N. C. Sahoo, “A Fuzzy Iterative for Determination of Current Waveform for Switched Reluctance Motors using a Torque Sharing Function at Positive and Negative Torque Production Regions”, *The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2004, pp. 3172–3177.
- [21] K. F. Wong, K. W. E. Cheng, and S. L. Ho, “On-line instantaneous torque control of a switched reluctance motor based on co-energy control”, *IET Electr. Power Appl.*, vol. 3, no. 4, pp. 257–264, 2009.
- [22] C. Mademlis and I. Kioskeridis, “Performance optimization in switched reluctance motor drives with online commutation angle control”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 3, pp. 448–457, 2003.
- [23] D. F. Valencia, R. Tarvirdilu-Asl, C. Garcia, J. Rodriguez, and A. Emadi, “Vision, Challenges, and Future trends of model predictive control in switched reluctance motor drives”, *IEEE*, vol. 9, pp. 69926–69937, 2021.
- [24] J.-W. Ahn and G. F. Lukman, “Switched reluctance motor: Research trends and overview”, *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 2, no. 4, pp. 339–347, 2018.
- [25] S. M. Castano, B. Bilgin, E. Fairall, and A. Emadi, “Acoustic noise analysis of a high-speed high-power switched reluctance machine: Frame effects”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no. 1, pp. 69–77, 2016.
- [26] B. Bilgin, B. Howey, A. D. Callegaro, J. Liang, M. Kordic, J. Taylor, and A. Emadi, “Making the case for switched reluctance motors for propulsion applications”, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 7, pp. 7172–7186, 2020.
- [27] J. W. Jiang, B. Bilgin, and A. Emadi, “Three-phase 24/16 switched reluctance machine for a hybrid electric powertrain”, *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, vol. 3, no. 1, pp. 76–85, 2017.
- [28] U.S., “DRIVE Electrical and Electronics Technical Team Roadmap”, *U.S. Dept. Energy*, Washington, DC, USA, Oct. 2017.
- [29] P. Harrop and K. Ghaffarzadeh, “Electric Motors for Electric Vehicles: Land, Water, Air 2020–2030”, *IDTechEx*, 2021. [Online]. Available: <https://www.idtechex.com/en/research-report/electric-motors-for-electric-vehicles-land-water-air-2020-2030/686>. [Accessed: July 15, 2023].
- [30] M. Yilmaz and P. T. Krein, “Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 5, pp. 2151–2169, 2013.
- [31] B. Singh, “Novel and ruggedized power electronics for off-highway vehicles”, *IEEE Electrific. Mag.*, vol. 2, no. 2, pp. 31–41, 2014.
- [32] V. Madonna, P. Giangrande, and M. Galea, “Electrical power generation in aircraft: Review, challenges, and opportunities”, *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, vol. 4, no. 3, pp. 646–659, 2018.
- [33] S. Li, S. Zhang, T. G. Habetler, and R. G. Harley, “Modeling, design optimization, and applications of switched reluctance machines-A review”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 3, pp. 2660–2681, 2019.
- [34] B. Burkhart, “Technology, research and applications of switched reluctance drives”, *CPSS Trans. Power Electron. Appl.*, vol. 2, no. 1, pp. 12–27, 2017.
- [35] M. Polat, E. Oksuztepe, and H. Kurum, “Switched reluctance motor control without position sensor by using data obtained from finite element method in artificial neural network”, Springer, 2015.
- [36] J. Sun *et al.*, “Sliding mode observer based position estimation for sensorless control of the planar switched reluctance motor”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 610349–61045, 2019.
- [37] P. N. Rao, G. V. S. K. Rao, and G. V. N. Kumar, “A novel technique for controlling speed and position of bearingless switched reluctance motor employing sensorless sliding mode observer”, Springer, 2017.
- [38] P. H. Nha, L. X. Hai, N. T. Ha, and D. D. Chung, “Identification of flux characteristic of switched reluctance motor with the influence of mutual inductance and magnetic saturation”, *Hanoi University of Industry Journal of Science and Technology*, vol. 57, no. 3, pp. 9–15, 2021.