

# Tính toán điện cảm Ld, Lq cho động cơ IPMSM bằng mạch từ trở tương đương xét đến sự ảnh hưởng của từ thông tản và hiện tượng bão hòa vật liệu từ

## Ld, Lq Inductance Computation of IPMSM by Magnetic Equivalent Circuit Taking Leakage Flux and Magnetic Saturation Phenomenon into Account

Phạm Duy Học<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Đức Định<sup>1</sup>, Phạm Tiến Dũng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vietnam – Korea Institute of Science and Technology

\*Corresponding author E-mail: [pduhoc@most.gov.vn](mailto:pduhoc@most.gov.vn)

### Abstract

The paper proposes a new magnetic equivalent circuit. The proposed magnetic circuit is applied to calculate the Ld, Lq inductance for the IPMSM motor using the magnetic equivalent circuit method. Analysis PMSM by magnetic equivalent circuit method greatly reduces computational cost compared to finite element method, but the accuracy also reduced. We proposed the new magnetic equivalent circuit that increasing accuracy by including model of flux leakage phenomenon and magnetic saturation phenomenon. The proposed magnetic equivalent circuit is applied for IPMSM with V-shape magnet type. The results show that the difference between proposed method and finite element method is less than 8%.

**Keywords:** PMSM, V-shape, Magnetic Equivalent Circuit (MEC), Magnetic Saturation, Flux Leakage.

### Các từ viết tắt

MEC	Magnetic Equivalent Circuit
FEM	Finite Element Method
RNA	Reluctance Network Analysis
IPMSM	Interior Permanent Magnet Synchronous Motor
SPMSM	Surface Permanent Magnet Synchronous Motor

### Tóm tắt

Bài báo đề xuất mạch từ tương đương mới cho động cơ. Mạch từ đề xuất được áp dụng để tính toán điện cảm Ld, Lq cho động cơ IPMSM bằng phương pháp mạch từ tương đương. Sử dụng phương pháp mạch từ tương đương để giải tích động cơ PMSM giúp tiết kiệm tài nguyên máy tính và thời gian tính toán hơn nhiều so với phương pháp phần tử hữu hạn, tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là độ chính xác thấp hơn phương pháp phần tử hữu hạn. Mạch từ tương đương được nhóm tác giả đề xuất giúp cải thiện độ chính xác do đã mô hình hóa được hiện tượng tản từ thông và hiện tượng bão hòa vật liệu từ. Mạch từ được xây dựng cho động cơ IPMSM nam châm dạng V. Kết quả tính toán được so sánh với phương pháp phần tử hữu hạn cho thấy sự sai lệch giữa hai phương pháp nhỏ hơn 8%.

### 1. Giới thiệu

Ngày nay, động cơ điện xuất hiện ở hầu hết các lĩnh vực của xã hội. Việc xuất hiện của đa dạng các sản phẩm yêu cầu sự chính xác cao như tay máy robot cộng tác (Collaborative robot), máy bay không người lái (drone), xe điện,... đòi hỏi động cơ cần thiết kế tối ưu để đảm bảo hiệu suất, tốc độ, mô-

men, nhiệt độ. Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) với những lợi thế về khả năng sinh mô-men lớn, dải tốc độ làm việc rộng cũng như thiết kế nhỏ gọn và cho hiệu suất cao, do đó nhận được nhiều sự quan tâm trong việc nghiên cứu phát triển động cơ hiện nay. Với những ứng dụng trong đa dạng các sản phẩm, việc nghiên cứu phát triển động cơ PMSM cần được tối ưu giữa chi phí sản xuất cũng như hiệu năng của động cơ (hiệu suất, mô-men, dải tốc độ,...) với từng dòng sản phẩm. Các phương pháp mô hình hóa, phân tích, đánh giá chi tiết động cơ PMSM đã được đề xuất trong rất nhiều các nghiên cứu như phương pháp mạng từ trở (RNA) [1], phương pháp mạch từ tương đương (MEC) [2], phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Với sự đa dạng các loại động cơ PMSM như: động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu gắn chìm (IPMSM), động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu gắn bề mặt (SPMSM), động cơ PMSM nam châm dạng chữ V, nam châm dạng thanh,... việc phân tích động cơ theo các phương pháp trên đòi hỏi những yêu cầu khác nhau với từng loại động cơ.

Phương pháp phần tử hữu hạn hiện nay được sử dụng chủ yếu trong nghiên cứu thiết kế động cơ [3-5]. Phương pháp phần tử hữu hạn tính toán một cách chính xác các giá trị thành phần trong động cơ PMSM. Tuy nhiên, nó đòi hỏi thời gian tính toán lâu và khó kiểm soát được lỗi khi gặp vấn đề trong tính toán. Do đó, phương pháp phần tử hữu hạn sẽ phù hợp để kiểm chứng thiết kế động cơ sau quá trình phân tích thiết kế ban đầu. Trong hầu hết các động cơ PMSM, việc tính toán các giá trị điện cảm Ld, Lq và từ thông liên kết là yêu cầu bắt buộc để nghiên cứu thiết kế cũng như xây dựng phương pháp điều khiển cho động cơ. Trong các nghiên cứu [6-7], nhóm tác giả đã xây dựng mô hình mạch từ tương đương cho động cơ

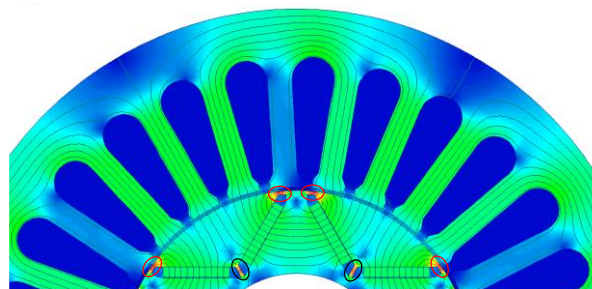
IPMSM với nam châm dạng chữ V và dạng thanh để tính toán các giá trị điện cảm và từ thông trên 2 trục d-q. Bên cạnh đó, các mô hình mạch từ tương đương được kết hợp với các phương pháp tối ưu để tính toán các giá trị không gian kích thước cho động cơ. Các mô hình mạng từ trở [8-9] được phân tích kết hợp phương pháp tối ưu đa mục tiêu (Multiobject) đưa ra không gian kích thước tối ưu cho động cơ IPMSM bao gồm kích thước rotor, stator, kích thước nam châm, kích thước răng rãnh và khe hở không khí. Hiện tượng bão hòa (saturation) của vật liệu dẫn từ ảnh hưởng rất lớn đến phân tích sự phân bố mật độ từ thông trong động cơ PMSM. Trong [10-12], phương pháp mạch từ trở tương đương được đề xuất cho mô hình động cơ PMSM giải quyết vấn đề về bão hòa từ của vật liệu đồng thời đưa ra các phương pháp để tính toán các giá trị mật độ phân bố từ thông trong động cơ. Ngoài những phương pháp xây dựng mạch từ trở tương đương cho động cơ, [13] đề xuất phương pháp mạng từ trở để phân tích động cơ IPMSM, các cụm từ trở được liên kết với nhau tạo thành mạng từ trở từ đó xây dựng các phương trình tính toán chính xác sự phân bố từ thông tại mọi vị trí trong động cơ.

Với những nền tảng trong nghiên cứu phát triển động cơ PMSM, nhóm nghiên cứu đề xuất một mạch từ tương đương mới, từ đó tính toán điện cảm  $L_d$ ,  $L_q$  bằng phương pháp MEC cho IPMSM có nam châm dạng V. Mạch từ được đề xuất trong nghiên cứu này có độ chính xác cao do đã mô hình hóa đầy đủ hiện tượng bão hòa từ và hiện tượng tản từ thông trong động cơ. Kết quả tính toán được so sánh với kết quả mô phỏng từ phần mềm sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn.

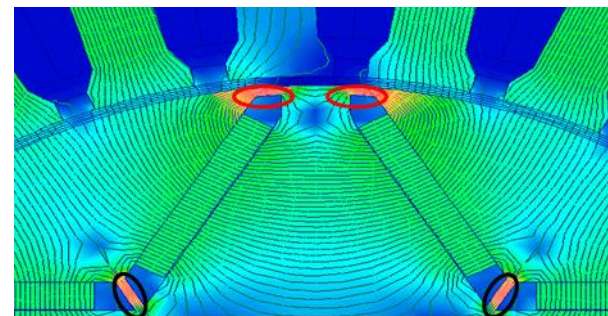
## 2. Từ thông trong động cơ IPMSM

### 2.1. Đường đi của từ thông trong động cơ

Có hai nguồn sinh từ trong động cơ điện nam châm vĩnh cửu nói chung và IPMSM nói riêng, đó là nguồn từ do nam châm sinh ra và nguồn từ do cuộn dây stator sinh ra. Trong động cơ điện, đường từ thông (hay đường sức từ) là đường khép kín và đường đi từ thông sẽ ưu tiên đi qua những vùng có từ trở nhỏ hơn.

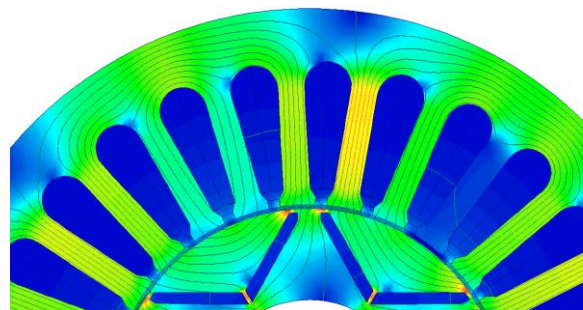


Hình 1-a. Đường sức từ của từ thông nam châm



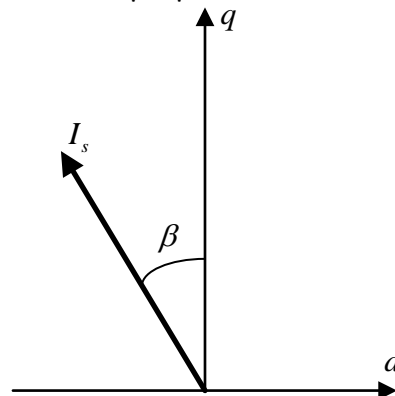
Hình 1-b. Thành phần tản của từ thông nam châm

Các đường sức từ của động cơ có hai thành phần: thành phần chính và thành phần tản. Thành phần chính là những đường sức từ hoàn thiện một vòng qua rotor, stator và khe hở không khí. Thành phần này tạo ra từ thông liên kết và sinh ra năng lượng. Thành phần tản là những đường sức chỉ đi vòng trong rotor, trong stator và không đi qua khe hở không khí. Ví dụ, các đường sức đi qua hai răng liền kề của stator, hay đường sức đi từ cực bắc đến cực nam của nam châm qua các cầu rotor là các thành phần tản. Thành phần tản không có tác dụng sinh ra năng lượng, chúng gây thất thoát năng lượng và sinh ra tổn hao sắt từ. Xét động cơ IPMSM có nam châm dạng V, khi chỉ có nam châm mà không có dòng điện, đường từ thông sẽ đi theo dạng hình 1-a. Thành phần từ thông chính là những đường sức từ hoàn thiện một vòng đi từ cực bắc của nam châm này, qua khe hở không khí, qua stator, vòng lại qua khe hở không khí và đi vào cực nam của nam châm kia. Thành phần từ thông tản (hình 1-b) là những đường sức đi qua phần cầu trên (ô tròn đỏ) và cầu dưới (ô tròn đen). Cũng có các thành phần tản khác ở răng động cơ, tuy nhiên thành phần này khá nhỏ và không được thể hiện trong hình 1.



Hình 2: Đường sức từ của từ thông dòng điện

Khi chỉ có nguồn dòng điện mà không có nguồn nam châm, các đường sức sẽ đi theo dạng hình 2. Thành phần từ thông chính là các đường sức từ hoàn thiện một vòng đi qua stator, rotor và qua khe hở không khí. Thành phần từ thông tản bao gồm thành phần đi qua cầu trên, cầu dưới và thành phần tản ở răng động cơ. Do nguồn từ nằm trên các răng nên từ thông tản trên các răng là đáng kể, chúng ta có thể thấy rõ đường từ thông tản này trong hình 2. Trong tính toán mạch từ với nguồn từ sinh ra từ dòng điện, từ thông tản tại răng của động cơ cần được xem xét để cải thiện độ chính xác.



Hình 3: Góc điều khiển dòng điện -  $\beta$

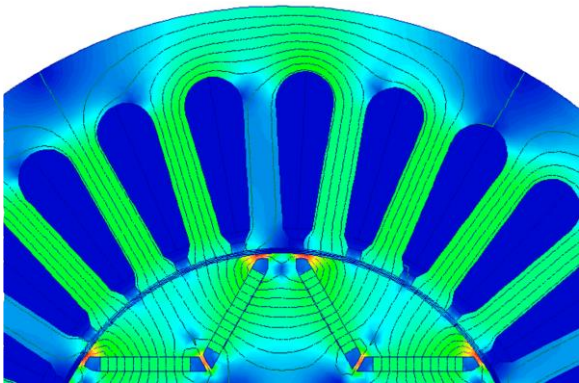
Khác với đường từ thông do nguồn nam châm sinh ra đã có đường đi cố định, đường từ thông do dòng điện sinh ra phụ thuộc vào góc điều khiển dòng điện (hình 3 - góc điều khiển có thể thay đổi từ  $-90^\circ$  đến  $90^\circ$ ). Để phân tích đặc tính từ thông trong động cơ, chúng ta chia đường từ thông bất kỳ thành từ



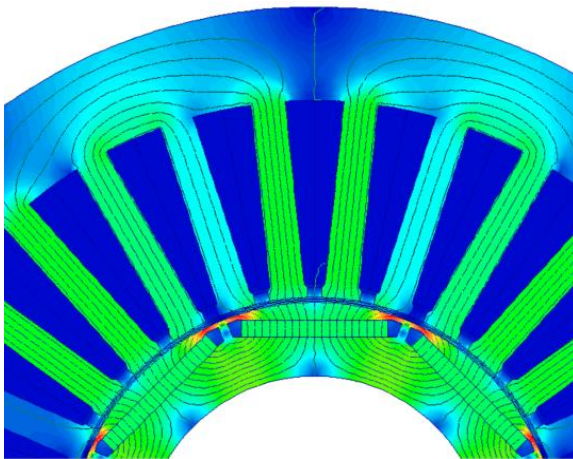
thông trên trục  $d$  và trên trục  $q$ . Đối với động cơ PMSM nói chung, khi ta chuyển hệ trục tọa độ ( $abc$ ) sang ( $dq$ ), trục  $d$  được chọn trùng với chiều từ thông của nam châm sinh ra, trục  $q$  được chọn vuông góc với trục  $d$ . Do đó, từ thông trên trục  $d$  là đường từ thông trùng với đường từ thông do nam châm sinh ra (tương ứng góc điều khiển là  $-90^\circ$  hoặc  $90^\circ$ ), từ thông trên trục  $q$  là đường từ thông vuông góc (điện) với từ thông trục  $d$  (tương ứng góc điều khiển là  $0^\circ$ ). Đường từ thông trên trục  $d$  và trục  $q$  sẽ được trình bày trong mục kế tiếp.

**2.2. Từ thông trục  $d$**

Đường đi từ thông trục  $d$  trùng với đường đi từ thông do nam châm sinh ra. Xét hai loại động cơ IPMSM phổ biến là IPMSM nam châm dạng V và IPMSM dạng thanh, đường từ thông trục  $d$  được thể hiện như hình 4 và hình 5. Ta thấy, đường từ thông trục  $d$  trên động cơ IPMSM dạng V và dạng thanh có gây ra hiện tượng bão hòa từ tại vùng cầu xung quanh nam châm. Những vùng này bị bão hòa từ do tiết diện để từ thông đi qua nhỏ, dẫn đến mật độ từ thông lớn gây bão hòa vật liệu từ. Khi xét giải mạch từ trục  $d$ , chúng ta cần có phương pháp tiếp cận phù hợp để tính toán được các vùng bão hòa này. Nếu không, kết quả sẽ có sự sai lệch rất lớn.



Hình 4: Đường từ thông trục  $d$  của động cơ IPMSM nam châm dạng V

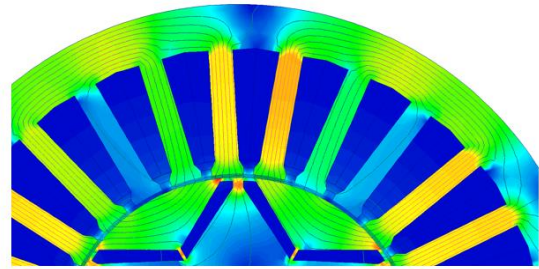


Hình 5: Đường từ thông trục  $d$  của động cơ IPMSM nam châm dạng thanh

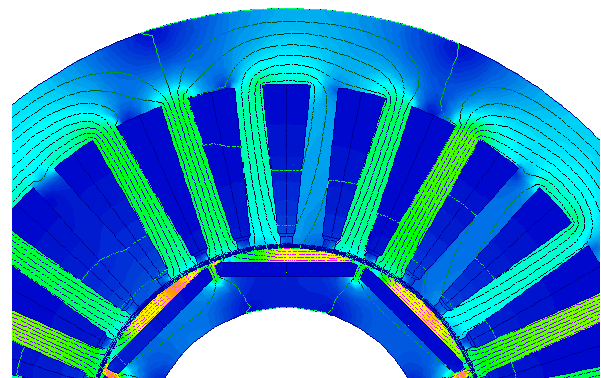
**2.3. Từ thông trục  $q$**

Đường đi từ thông trục  $q$  vuông góc với đường đi từ thông trục  $d$ . Xét hai loại động cơ IPMSM phổ biến là IPMSM nam châm dạng V và IPMSM dạng thanh, đường từ thông trục  $q$  được thể hiện như hình 6 và hình 7. Giống như từ thông trục

$d$ , từ thông trục  $q$  cũng gây ra hiện tượng bão hòa từ tại vùng cầu xung quanh nam châm. Vì vậy, khi tính toán từ thông trục  $d$ , chúng ta cần tính toán đến sự bão hòa từ để thu được kết quả chính xác.



Hình 6: Đường từ thông trục  $q$  của động cơ IPMSM nam châm dạng V



Hình 7: Đường từ thông trục  $q$  của động cơ IPMSM nam châm dạng thanh

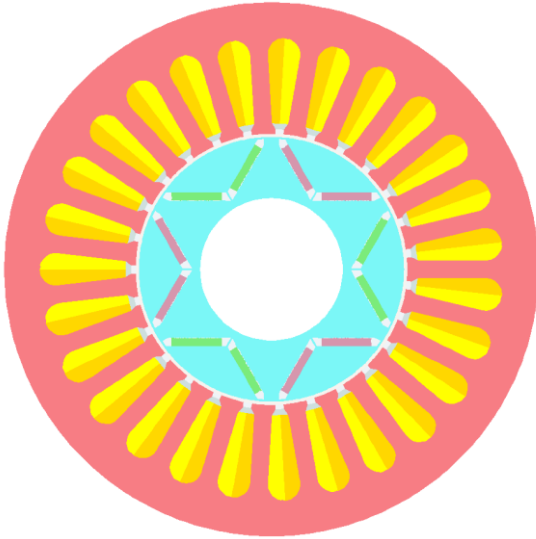
**3. Mạch từ tương đương của động cơ IPMSM**

**3.1. Cấu hình động cơ IPMSM nam châm dạng V**

Động cơ IPMSM dạng V được sử dụng phổ biến do khả năng sinh mô-men lớn và dải làm việc rộng. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng phương pháp mạch từ tương đương để tính toán từ thông sinh ra của động cơ nam châm IPMSM dạng V, sau đó sử dụng kết quả tính toán từ thông để tính điện cảm trên trục  $d$  và trục  $q$ . Động cơ được ứng dụng tính toán là động cơ 27 rãnh, 6 cực, có biên dạng mặt cắt được thể hiện trong hình 8. Thông số kích thước động cơ được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1: Thông số kích thước động cơ IPMSM nam châm dạng V

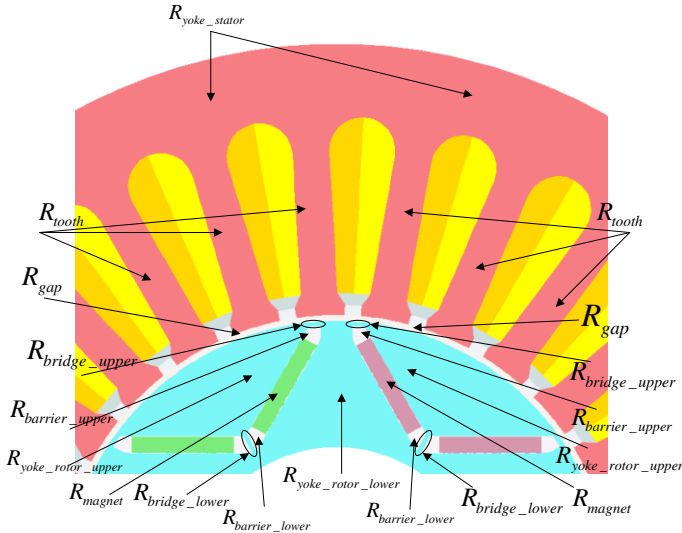
Thông số	Giá trị
Số rãnh	27
Số cực	6
Đường kính ngoài stator	205 mm
Đường kính trong stator	104 mm
Độ rộng răng	7mm
Độ dày nam châm	3 mm
Độ dài nam châm	19 mm
Góc V nam châm	120°
Độ rộng khe hở không khí	1 mm



Hình 8: Biện dạng mặt cắt động cơ IPMSM nam châm dạng V

3.2. Xây dựng mạch từ trực d

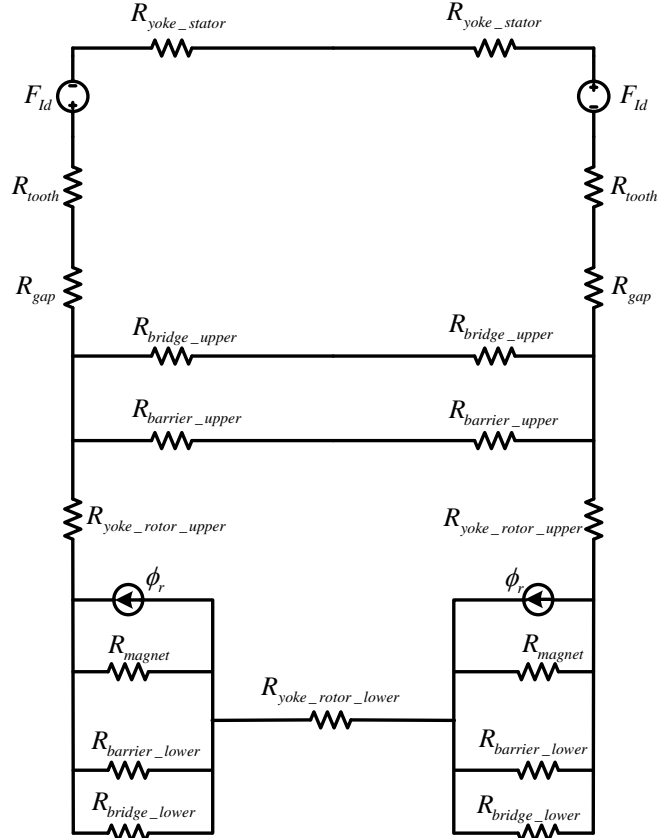
Mỗi khu vực đường từ thông đi qua tương ứng với một từ trở nhất định, các từ trở bao gồm: Từ trở gông stator ( $R_{yoke\_stator}$ ); từ trở răng stator ( $R_{tooth}$ ); từ trở khe hở không khí ( $R_{gap}$ ); từ trở cầu trên ( $R_{bridge\_upper}$ ); từ trở barrier trên ( $R_{barrier\_upper}$ ); từ trở gông rotor trên ( $R_{yoke\_rotor\_upper}$ ); từ trở nam châm ( $R_{magnet}$ ); từ trở gông rotor dưới ( $R_{yoke\_rotor\_lower}$ ); từ trở barrier dưới ( $R_{barrier\_lower}$ ); từ trở cầu dưới ( $R_{bridge\_lower}$ ). Các vùng này được thể hiện trong hình 9.



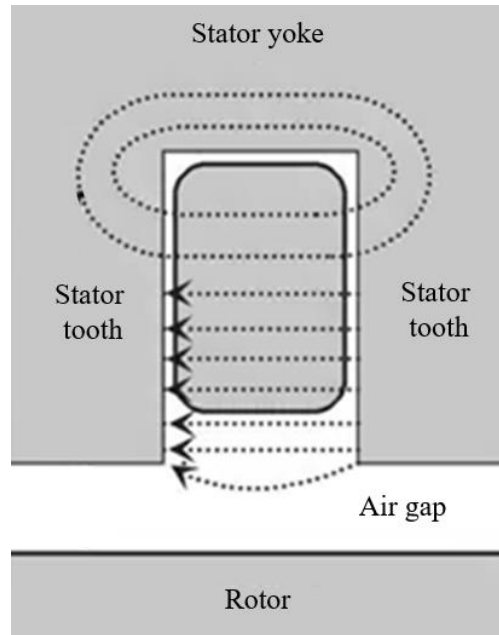
Hình 9: Ký hiệu các từ trở của đường từ thông trực d

Mạch từ trực d được xây dựng dựa vào đường đi từ thông trên trục d, thể hiện trong hình 10. Mạch từ trực d như hình 10 là mạch từ dạng đơn giản do đã lược bỏ thành phần tản trên răng stator. Mạch từ này thể hiện đúng đường đi từ thông chính và từ thông tản qua các vùng cầu trên, cầu dưới của từ thông trực d. Giá trị tính toán phụ thuộc nhiều vào độ chính xác của các từ trở, đặc biệt là từ trở tại các cầu (từ trở vùng xảy ra bão hòa từ). Hiện tượng tản tại răng stator được mô tả như hình 11. Hiện tượng này được mô hình hóa theo hình 12.

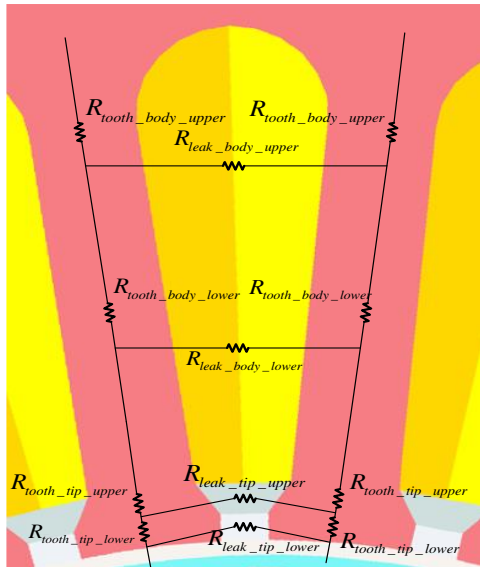
Thay vì mô hình hóa vùng răng của động cơ thành hai từ trở ( $R_{tooth}$ ) như hình 10, chúng ta chia răng thành các phần nhỏ hơn và các thành phần tản như hình 12. Mạch từ đầy đủ khi xét cả thành phần tản trên răng stator được thể hiện như hình 13.



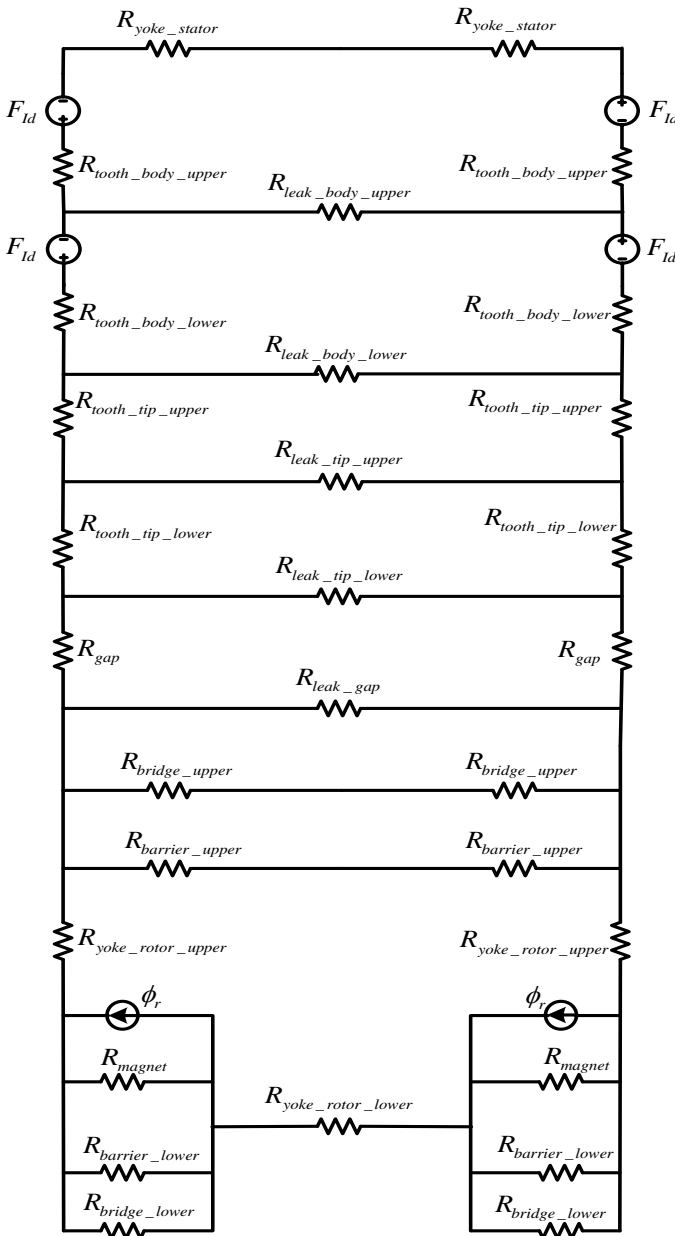
Hình 10: Mạch từ đơn giản trục d



Hình 11: Hiện tượng tản từ thông trên răng stator



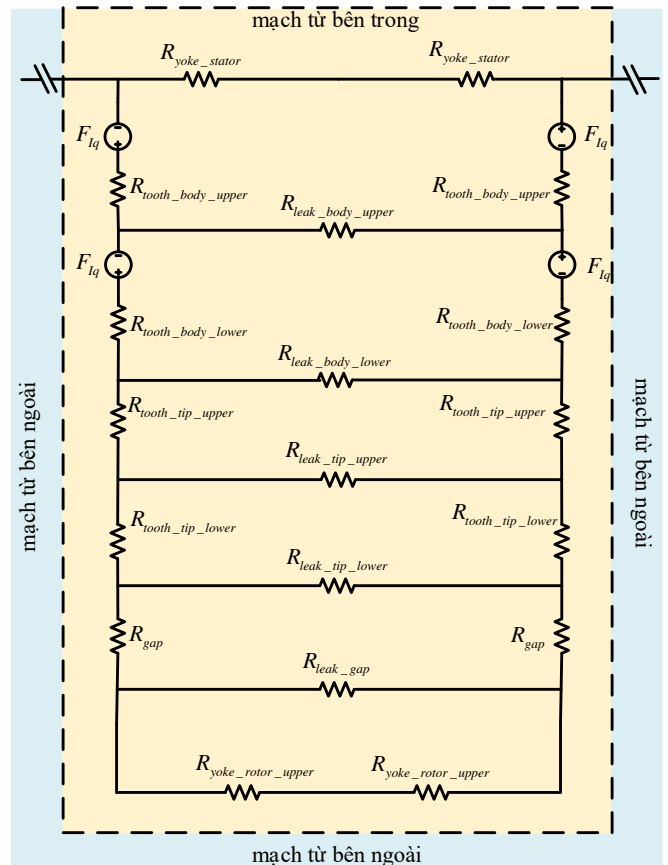
Hình 12: Mô hình hóa hiện tượng từ thông tản trên răng stator



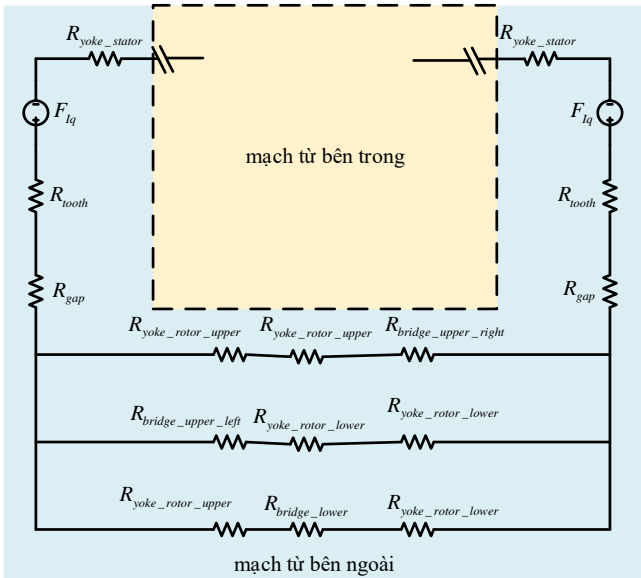
Hình 13: Mạch từ đầy đủ trục d

### 3.3. Xây dựng mạch từ trục q

Tương tự như mạch từ trục d, mạch từ trục q cũng được xây dựng dựa trên đường từ thông trên trục q. Có thể mô hình hóa từ thông trên trục q của động cơ IPMSM dạng nam châm dạng V thành mạch từ tương đương như hình 14 và 15. Mạch từ trục q được chia làm hai vùng: vùng mạch từ bên trong (hình 14) và vùng mạch từ bên ngoài (hình 15). Tương ứng với 2 vùng là hai nguồn sinh từ riêng biệt. Khác với mạch từ trên trục d (do tính chất đường đi trên trục d mà chúng ta có thể gộp các đường từ thông thành một đường chính như trong mạch từ tương đương hình 13), mạch từ trên trục q phải chia thành 2 vùng với 2 nguồn từ được tính riêng và đường đi của từ thông trên mỗi vùng cũng khác nhau. Nếu gộp đường từ thông trên trục q thành một như trên trục d thì kết quả sẽ sai khác đáng kể do vùng mạch từ bên trong có từ trở nhỏ hơn nhiều so với vùng mạch từ bên ngoài nên từ thông có xu hướng đi qua vùng mạch từ bên trong nhiều hơn. Trong mạch từ tương đương trên trục d, do gộp các đường từ thông thành một đường nên  $R_{tooth}$  ở đây là sự tổng hợp của các răng mỗi bên: cụ thể trong động cơ 27 rãnh – 6 cực thì số răng trên mỗi cực là 4.5, do đó trên mạch từ trục d, mỗi  $R_{tooth}$  tương ứng với 2.75 răng. Trong mạch từ trục q, vùng màu vàng có  $R_{tooth}$  ứng với 1.5 răng, vùng màu xanh có  $R_{tooth}$  ứng với 0.75 răng. Sự phân chia này giúp chúng ta xác định được độ lớn của sức từ động trên mỗi nhánh.



Hình 14: Mạch từ trục q - vùng trong



Hình 15: Mạch từ trục q – vùng ngoài

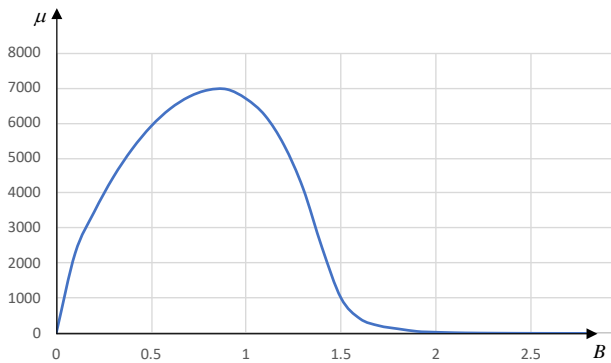
### 4. Giải mạch từ, tính toán điện cảm

#### 4.1. Giải mạch từ với hiện tượng bão hòa vật liệu từ

Từ trở của vật liệu dẫn từ được tính toán theo công thức:

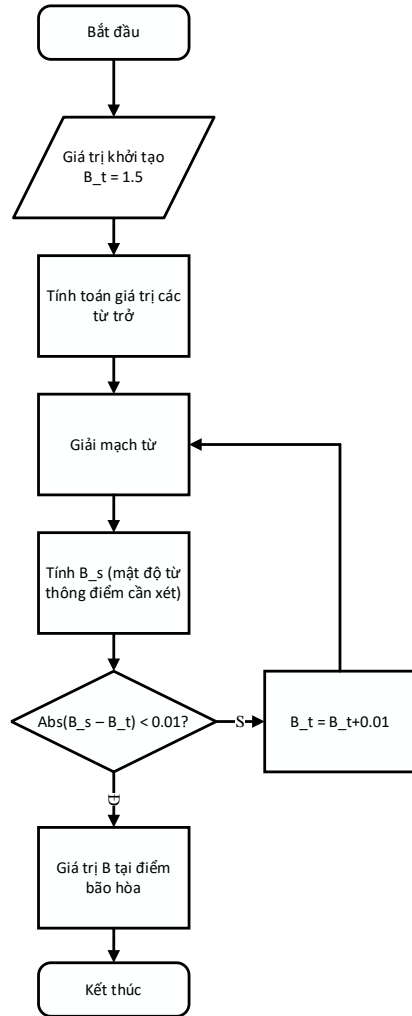
$$R = \frac{l}{\mu \cdot \mu_0 \cdot S} \tag{1}$$

Trong đó:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  là hằng số từ;  $\mu$  là độ từ thẩm của vật liệu;  $S$  là diện tích bề mặt vuông góc với đường sức từ;  $l$  là chiều dài của vật liệu dọc theo đường đi của đường sức từ.



Hình 16: Đường đặc tính độ từ thẩm tương đối của vật liệu lá thép kỹ thuật điện

Từ công thức (1), ta thấy giá trị từ trở phụ thuộc vào hệ số từ thẩm của vật liệu, độ dài đường đi của đường sức từ và diện tích bề mặt mà đường sức đi qua. Đối với vật liệu sắt từ, độ từ thẩm là giá trị thay đổi tùy thuộc vào lượng từ thông đi qua vùng vật liệu đó (hình 16). Khi vật liệu bị bão hòa từ, sự dẫn từ trong vật liệu đó bị giảm đi, thể hiện ở vùng có độ từ thẩm nhỏ và độ từ thẩm sẽ tiếp tục giảm nếu mật độ từ thông tăng. Trong tính toán mạch từ, chúng ta cần xác định chính xác mật độ từ thông ở những vùng bị bão hòa từ. Trong công bố này, nhóm nghiên cứu đề xuất thuật toán tính chính xác mật độ từ thông tại điểm có bão hòa, được diễn giải theo lưu đồ thuật toán trong hình 17.



Hình 17: Lưu đồ thuật toán tính mật độ từ thông tại điểm bão hòa từ

#### 4.2. Giải mạch từ trên trục d

Nhằm đánh giá độ chính xác của mạch từ được đề xuất, nhóm nghiên cứu tiến hành giải mạch từ trục d theo nhiều kịch bản khác nhau, các kịch bản được thể hiện trong bảng 2, được chia làm 3 nhóm:

- Các kịch bản từ 1 đến 5: Từ dư nam châm  $B_r$  thay đổi, giá trị dòng điện và giá trị góc điều khiển bằng 0. Các kịch bản này để đánh giá sự chính xác của mạch từ đề xuất khi chỉ có nguồn sinh từ là nam châm.
- Các kịch bản từ 6 đến 8: Giá trị góc điều khiển thay đổi, giá trị từ dư của nam châm bằng 0 và giá trị dòng điện bằng 58A (giá trị dòng điện định mức). Các kịch bản này để đánh giá sự chính xác của mạch từ đề xuất khi chỉ có nguồn sinh từ là dòng điện.
- Các kịch bản từ 9 đến 11: Giá trị góc điều khiển thay đổi, giá trị từ dư của nam châm bằng 1.21 (T) và giá trị dòng điện bằng 58A. Các kịch bản này để đánh giá sự chính xác của mạch từ đề xuất khi có cả hai nguồn sinh từ.



**Bảng 2:** Các kịch bản tính toán cho mạch từ trực d

Kịch bản	Giá trị từ dư $B_r(T)$	Giá trị dòng điện $I_s(A)$	Giá trị góc điều khiển $\beta$ (độ)
KB 1	1.125	0	0
KB 2	1.21	0	0
KB 3	1.26	0	0
KB 4	1.31	0	0
KB 5	1.39	0	0
KB 6	0	58	90
KB 7	0	58	60
KB 8	0	58	30
KB 9	1.21	58	90
KB 10	1.21	58	60
KB 11	1.21	58	30

Điện cảm trực d được tính bằng công thức (tham chiếu trên hệ trục tọa độ d-q):

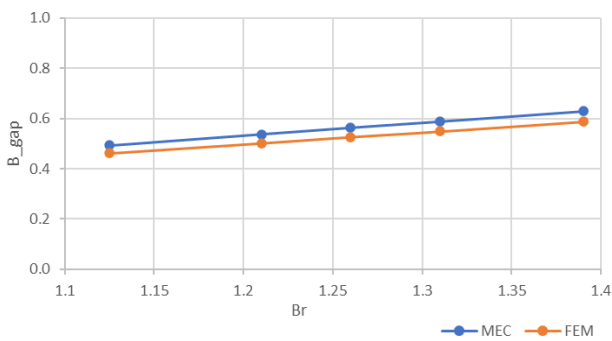
$$L_d = \frac{\phi_d - \phi_f}{I_d} = \frac{\phi_d - \phi_f}{I_s \cos \beta} \quad (2)$$

Với  $\phi_d$  là tổng từ thông liên kết trên trục d;  $\phi_f$  là từ thông liên kết trên trục d do nam châm sinh ra.  $I_s$  là giá trị dòng điện;  $\beta$  là góc điều khiển dòng điện.

Trong các kịch bản 1 – 5, với mục tiêu đánh giá độ chính xác của phương pháp MEC khi chỉ có nguồn sinh từ là nam châm, vì vậy dòng điện và góc điều khiển đều bằng 0. Kết quả điện cảm sẽ không được tính toán trong các kịch bản này. Thay vào đó, nhóm tác giả so sánh kết quả mật độ từ thông tại khe hở không khí ( $B_{gap}$ ) khi tính toán bằng phương pháp MEC và khi mô phỏng bằng phần mềm sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn. Kết quả được thể hiện trong bảng 3 và hình 18.

**Bảng 3:** So sánh kết quả tính toán mật độ từ thông khe hở không khí giữa hai phương pháp MEC và FEM

Kịch bản	Mật độ từ thông khe hở không khí $B_{gap}$		
	MEC (T)	FEM (T)	Sai số (%)
KB 1	0.493	0.461	6.491
KB 2	0.538	0.502	6.691
KB 3	0.564	0.526	6.738
KB 4	0.589	0.549	6.791
KB 5	0.629	0.588	6.518



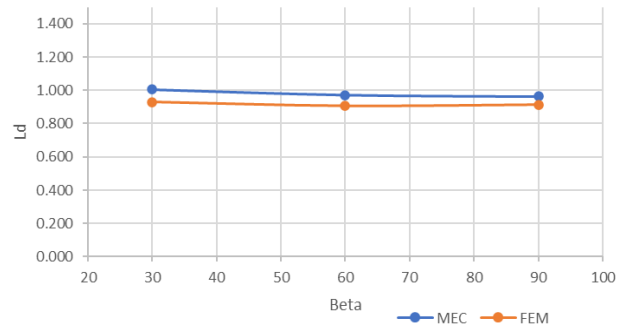
**Hình 18:** Sự thay đổi mật độ từ thông khe hở không khí theo từ dư của nam châm

Trong các kịch bản còn lại, nhóm tác giả so sánh từ thông liên kết trục d và điện cảm trên trục d giữa hai phương pháp MEC

và FEM. Kết quả được thể hiện trong bảng 4. Hình 19 thể hiện giá trị điện cảm trục d thay đổi theo góc điều khiển dòng điện trong điều kiện làm việc định mức của động cơ ( $I_s = 58A; B_r = 1.21T$ ).

**Bảng 4:** So sánh kết quả tính toán từ thông liên kết trục d và điện cảm trục d giữa hai phương pháp MEC và FEM

Kịch bản	Từ thông liên kết trục d $\phi_d$			Điện cảm trục d $L_d$		
	MEC (mWb)	FEM (mWb)	Sai số (%)	MEC (mWb)	FEM (mWb)	Sai số (%)
KB 6	88.093	92.105	4.356	1.074	1.123	4.363
KB 7	78.776	81.449	3.282	1.109	1.147	3.313
KB 8	53.162	49.953	6.036	1.296	1.218	6.019
KB 9	78.929	74.920	5.079	0.962	0.913	5.094
KB 10	69.020	64.400	6.694	0.972	0.907	6.687
KB 11	41.205	38.080	7.584	1.005	0.929	7.562



**Hình 19:** Giá trị điện cảm  $L_d$  tại các góc điều khiển khác nhau trong điều kiện làm việc định mức

Ta thấy, kết quả điện cảm trục d không có sự khác biệt quá lớn (nhỏ hơn 8%). Kết quả từ thông liên kết và mật độ từ thông trong các kịch bản khác nhau cũng tương đối giống nhau (chênh lệch không quá 8%).

### 4.3. Giải mạch từ trên trục q

Tương tự như trục d, nhằm đánh giá độ chính xác của mạch từ được đề xuất cho trục q, nhóm nghiên cứu tiến hành giải mạch từ trục q theo nhiều kịch bản khác nhau, các kịch bản được thể hiện trong bảng 5. Các kịch bản này có sự thay đổi khác nhau ở giá trị dòng điện và góc điều khiển dòng điện.

**Bảng 5:** Các kịch bản tính toán cho mạch từ trục q

Kịch bản	Giá trị dòng điện $I_s(A)$	Giá trị góc điều khiển $\beta$ (độ)
KB 1	58	0
KB 2	58	30
KB 3	58	60
KB 4	29	0
KB 5	29	30
KB 6	29	60

Điện cảm trực  $q$  được tính bằng công thức (tham chiếu trên hệ trục tọa độ  $d-q$ ):

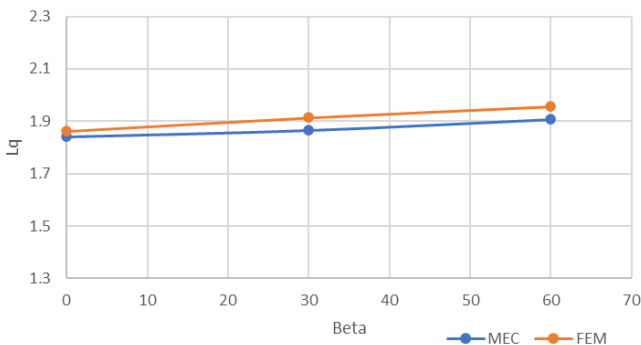
$$L_q = \frac{\phi_q}{I_q} = \frac{\phi_q}{I_s \sin \beta} \quad (3)$$

Với  $\phi_q$  là từ thông từ thông liên kết trên trục  $q$ .

Kết quả từ thông liên kết trục  $q$  và điện cảm trục  $q$  tính toán theo phương pháp MEC và được so sánh với phương pháp FEM trong bảng 6. Hình 20 thể hiện giá trị điện cảm trục  $q$  thay đổi theo góc điều khiển dòng điện trong điều kiện làm việc định mức của động cơ.

**Bảng 6:** So sánh kết quả tính toán từ thông liên kết trục  $q$  và điện cảm trục  $q$  giữa hai phương pháp MEC và FEM

Kích bản	Từ thông liên kết trục $q$			Điện cảm trục $q$ $L_q$		
	MEC (mWb)	FEM (mWb)	Sai số (%)	MEC (mWb)	FEM (mWb)	Sai số (%)
KB 1	151.005	152.717	1.121	1.841	1.862	1.128
KB 2	132.551	135.917	2.477	1.866	1.913	2.457
KB 3	78.247	80.214	2.452	1.908	1.956	2.454
KB 4	78.248	83.712	6.527	1.908	2.041	6.516
KB 5	67.830	71.802	5.532	1.910	2.022	5.539
KB 6	39.425	40.874	3.545	1.923	1.993	3.512



**Hình 20:** Giá trị điện cảm  $L_q$  tại các góc điều khiển khác nhau trong điều kiện làm việc định mức

Trên trục  $q$ , kết quả điện cảm và từ thông liên kết trong các kích bản khác nhau không khác biệt nhau quá 7%.

## 5. Kết luận

Trong công bố này, nhóm tác giả đã tính toán điện cảm  $L_d$ ,  $L_q$  của động cơ IPMSM bằng phương pháp mạch từ tương đương. Nhóm tác giả đã đề xuất một mạch từ tương đương mới, có khả năng mô hình hóa hiện tượng tản từ thông và hiện tượng bão hòa vật liệu từ. Mạch từ được đề xuất mang lại kết quả đáng tin cậy khi sự khác biệt với phương pháp phần tử hữu hạn là không nhiều. Bằng việc sử dụng mạch từ được đề xuất, chúng ta có thể tính toán điện cảm, từ thông nhanh hơn, tiết kiệm chi phí tính toán. Điều này mang lại lợi ích lớn khi muốn thiết kế nhanh một cấu hình động cơ sơ bộ hay khi thực hiện thiết kế tối ưu động cơ.

## References

- [1] Y. Hane, Y. Uchiyama, K. Nakamura. *Reluctance Network Model of Interior Permanent Magnet Motor with Polar Anisotropic Magnet*. Journal of the Magnetics Society of Japan 45(5):125-130, August 2021.
- [2] Attila Nyitrai, Miklós Kuczmann. *Magnetic equivalent circuit and finite element modelling of anisotropic rotor axial flux permanent magnet synchronous motors with fractional slot distributed winding*. IET Electric Power Applications, February 2023.
- [3] G. Y. Sizov, D. M. Ionel and N. A. O. Demerdash *Modeling and Parametric Design of Permanent-Magnet AC Machines Using Computationally Efficient Finite-Element Analysis*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 6, pp. 2403-2413, June 2012
- [4] F. Parasiliti, M. Villani, S. Lucidi and F. Rinaldi *Finite-Element-Based Multiobjective Design Optimization Procedure of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for Wide Constant-Power Region Operation*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 6, pp. 2503-2514, June 2012
- [5] V. Ruuskanen, J. Nerg, J. Pyrhönen, S. Ruotsalainen and R. Kennel, *Drive Cycle Analysis of a Permanent-Magnet Traction Motor Based on Magnetostatic Finite-Element Analysis*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 3, pp. 1249-1254, March 2015
- [6] H. Goto, H. -J. Guo and O. Ichinokura *A new magnetic matrix model of IPMSM*. IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, AZ, USA, 2010, pp. 2207-2211
- [7] K. -D. Lee, J. Lee and H. -W. Lee *Inductance Calculation of Flux Concentrating Permanent Magnet Motor through Nonlinear Magnetic Equivalent Circuit*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015
- [8] Gerbaud, Laurent & Garbuio, Lauric & Emmanuel, Vinot & Reinbold, Vincent. (2015) *Optimal sizing of an electrical machine using a magnetic circuit model: Application to a hybrid electrical vehicle*. IET Electrical Systems in Transportation.
- [9] K. -C. Kim, J. Lee, H. J. Kim and D. -H. Koo *Multiobjective Optimal Design for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 3, pp. 1780-1783, March 2009
- [10] S. Küttler, K. E. -K. Benkara, G. Friedrich, F. Vangraefschèpe and A. Abdelli *Analytical model taking into account the cross saturation for the optimal sizing of IPMSM*. 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, 2012, pp. 2779-2785
- [11] W. -H. Kim et al. *Inductance Calculation in IPMSM Considering Magnetic Saturation*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 1, pp. 1-4, Jan. 2014
- [12] K. J. Meessen, P. Thelin, J. Soulard and E. A. Lomonova *Inductance Calculations of Permanent-Magnet Synchronous Machines Including Flux Change and Self- and Cross-Saturations*. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 10, pp. 2324-2331, Oct. 2008
- [13] Caballero D, Prieto B, Artetxe G, Elosegui I, Martinez-Iturralde M. *Node Mapping Criterion for Highly Saturated Interior PMSMs Using Magnetic Reluctance Network*. Energies. 2018