

# NGHIÊN CỨU MÔ HÌNH VÀ MÔ PHỎNG ĐẶC TÍNH ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHỞI ĐỘNG TRỰC TIẾP

## MODELING AND SIMULATING OF LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Lê Anh Tuấn<sup>1,\*</sup>, Phạm Văn Tuấn<sup>2</sup>,  
Nguyễn Thị Minh Hiền<sup>1</sup>

### TÓM TẮT

Ngày nay, động cơ điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp được nghiên cứu và ứng dụng ngày càng phổ biến để thay thế động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc do có hiệu suất cao, vận hành ổn định khi có dao động về điện áp, phụ tải và khối lượng nhỏ hơn động cơ không đồng bộ rôto lồng sóc cùng công suất và tốc độ. Tuy nhiên để ứng dụng vào thực tế còn gặp một số hạn chế như mô men khởi động thấp, chất lượng và giá thành vật liệu nam châm vĩnh cửu biến đổi,... Vì vậy nghiên cứu mô hình toán và mô phỏng đặc tính động cơ sẽ là tiền đề để giải quyết các khó khăn nhằm phổ biến động cơ trong điều kiện hiện nay.

**Từ khóa:** Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp; nam châm vĩnh cửu; động cơ đồng bộ; mô hình toán; mô phỏng.

### ABSTRACT

Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors are now developed and become more and more popular in order to replace Squirrel Cage Induction Motors (SCIM) due to high efficiency, small size, weight and stable operation in conditions of the fluctuation of voltage or load. However, there are still some disadvantages of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors, such as low start moment, permanent magnet materials,... Therefore, study of modeling and simulating of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors plays an important role in enhancing the motors in order to popularize Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors.

**Keywords:** Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors; Permanent Magnet; Synchronous Motors; modeling; simulating.

<sup>1</sup>Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>2</sup>Khoa Điện, Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Vinh

\*Email: leanhtuan0985@gmail.com

Ngày nhận bài: 17/01/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 20/6/2020

Ngày chấp nhận đăng: 23/12/2020

### KÝ HIỆU

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$V_{dsr}, V_{qs}$	V	Điện áp dọc trục, ngang trục stator
$V'_{drr}, V'_{qr}$	V	Điện áp dọc trục, ngang trục rotor quy đổi
$i_{dsr}, i_{qs}$	A	Dòng điện đồng bộ dọc trục, ngang trục stator

$r_s, r_r$	$\Omega$	Điện trở stator và rotor quy đổi
$L_{mdr}, L_{mq}$	H	Điện kháng đồng bộ dọc trục và ngang trục stator
$L_{lsr}, L'_{lr}$	H	Điện kháng tản stator và rotor quy đổi
$\Psi_{dsr}, \Psi_{qs}$	Wb	Từ thông dọc trục và ngang trục stator
$\Psi'_{dsr}, \Psi'_{qs}$	Wb	Từ thông dọc trục và ngang trục rotor quy đổi

### CHỮ VIẾT TẮT

LSPMSM	Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor
	(động cơ điện đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp)
NCVC	Nam châm vĩnh cửu

### 1. GIỚI THIỆU

Trong thập kỷ gần đây, rất nhiều tác giả nghiên cứu ứng dụng của LSPMSM như là sự thay thế cho động cơ không đồng bộ. LSPMSM là sự cải tiến động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, nói cách khác nó là sự lai giữa động cơ không đồng bộ và động cơ đồng bộ bằng cách đặt các thanh nam châm vào rôto lồng sóc của động cơ không đồng bộ. Vào năm 1978, Binns [1] lần đầu đưa ra khái niệm về dòng động cơ mới, động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp. Từ đó đến nay, nhiều hướng nghiên cứu và ứng dụng về động cơ này đã được đưa ra.

Để đánh giá quá trình khởi động của LSPMSM đòi hỏi cần có một mô hình toán mô tả quá trình của động cơ với các tham số đầu vào phụ thuộc các thông số động cơ (thiết kế lồng sóc rôto, vị trí các thanh nam châm, các tấm cảm từ,...). Năm 1984, T.J.Miler [2] mô tả quá trình khởi động của LSPMSM trong đó nhấn mạnh ảnh hưởng của các thông số chính đến quá trình khởi động. Khi khởi động, động cơ sẽ như một động cơ không đồng bộ, lúc đó mômen khởi động là sự tổ hợp của thành phần mômen không đồng bộ và thành phần mô men do nam châm vĩnh cửu sinh ra. Tuy nhiên, thành phần mô men do NCVC sinh ra làm cho quá trình đồng bộ hóa của động cơ khó khăn

hơn. Năm 1980, Honsinger [3] là người đầu tiên đề xuất mô hình toán động cơ LSPMSM thông qua các hệ phương trình vi phân với các tham số đầu vào: điện áp, điện cảm, điện trở stato và rôto, từ thông do NCVC sinh ra. Tuy nhiên, do công nghệ tính toán thời điểm đó chưa phát triển nên trong nghiên cứu Honsinger không trực tiếp giải gần đúng các bài toán vi phân này. Nhiều nghiên cứu sau này ứng dụng mô hình toán LSPMSM do Honsinger đề xuất có thể thấy trong các tài liệu [4, 5, 6]. Năm 1997, M. A. Rahman, A. M. Osheiba và T. S. Radwan [7] đề xuất phương trình tính toán hai đặc tính trong quá trình khởi động của động cơ là mômen và độ trượt. Bên cạnh đó, các tác giả cũng nghiên cứu tác động của điện áp nguồn cấp, tần số nguồn, tỉ số cực lõi, tỉ số điện áp không tải đến các thông số trên. Với mô hình đề xuất này, việc tính toán và đánh giá quá trình khởi động của LSPMSM đơn giản hơn so với việc giải các hệ phương trình vi phân tại mô hình mà Honsinger đề xuất cho LSPMSM. Năm 2000, Juliette Soulard, Hans-Peter Nee [8] nghiên cứu quá trình đồng bộ hóa của LSPMSM để xuất phương trình tính toán mômen không đồng bộ và mômen cản của NCVC trong quá trình khởi động của động cơ. Qua nghiên cứu này, sơ bộ có thể đánh giá trường hợp xấu nhất của quá trình đồng bộ hóa khi có tải đồng thời xét đến ảnh hưởng của các tham số đến quá trình khởi động. Các nghiên cứu sau này ứng dụng phương trình tính toán của Soulard và Nee có thể thấy trong các tài liệu [9, 10, 11]. Tuy đưa ra mô hình hệ phương trình vi phân mô phỏng quá trình hoạt động ở cả chế độ khởi động và vận hành tĩnh nhưng Honsinger, M. A. Rahman, Juliette Soulard không trực tiếp giải bài toán vi phân mà dựa vào mô hình để đề xuất phương trình tính toán thông số của động cơ. Nguyên nhân chủ yếu là do khó khăn trong việc giải và tìm nghiệm các bài toán vi phân.

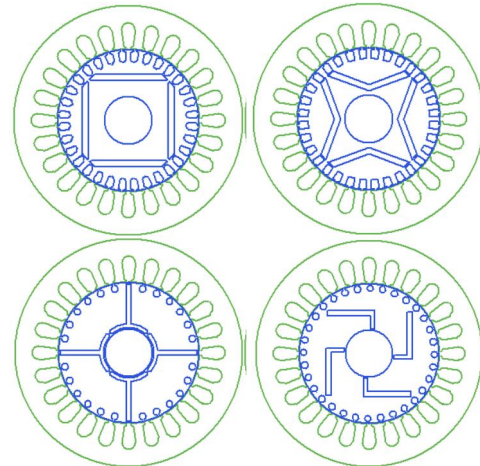
Ngày nay với sự phát triển của công nghệ nhất là công nghệ máy tính việc giải và tìm nghiệm gần đúng của các phương trình vi phân ngày càng đơn giản về dễ dàng. Trong nội dung nghiên cứu này, bài báo nghiên cứu mô hình toán LSPMSM do Honsinger đề xuất đồng thời ứng dụng MATLAB/Simulink để mô phỏng các đặc tính làm việc của LSPMSM. Qua các kết quả mô phỏng, các đặc tính làm việc sẽ được phân tích để đánh giá khả năng hoạt động của LSPMSM. Các đặc tính chính được quan tâm trong nội dung nghiên cứu là: Tốc độ khởi động, mômen khởi động, dòng điện khởi động của động cơ... Việc nghiên cứu mô hình toán và ứng dụng phần mềm MATLAB/Simulink mô phỏng đặc tính làm việc LSPMSM là bước cơ bản và là tiền đề để giải quyết các vấn đề chuyên sâu khác trong quá trình nghiên cứu LSPMSM sau này. Trong nghiên cứu, nhóm tác giả sẽ thực nghiệm mô phỏng đối với một LSPMSM 3 pha, 4 cực, 380V, 2,2kW, tốc độ 1.500 vòng/phút được hiệu chỉnh từ một động cơ không đồng bộ.

**2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU**

**2.1. Một số cấu hình rôto LSMPSM**

Đến thời điểm hiện tại, về cơ bản rôto LSPMSM có cấu tạo giống động cơ không đồng bộ, tuy nhiên trong lõi thép

rôto có đặt các thanh NCVC. Một số cấu hình rôto điển hình của LSPMSM phổ biến hiện nay như hình 1.



Hình 1. Một số cấu tạo rôto LSPMSM

**2.2. Mô hình toán LSPMSM**

Trong khi nghiên cứu LSPMSM, các tác giả Takahashi, Aliabad, Kwang Hee Kim... [12, 13, 14] ứng dụng mô hình toán LSPMSM do Honsinger đã đề xuất để nghiên cứu đặc tính làm việc của động cơ. Ứng dụng định luật Kirchoff 2, mô hình toán của LSPMSM bao gồm các hệ phương trình vi phân điện áp stato, rôto; từ trường stato, rôto được biểu diễn dưới dạng biến đổi theo trục tọa độ dq. Tổng hợp lại, mô hình toán của LSPMSM được thể hiện dưới dạng các hệ phương trình vi phân như sau:

**Phương trình điện áp:**

**Điện áp stato**

$$\begin{cases} v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_m \cdot \psi_{qs} \\ v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_m \cdot \psi_{ds} \end{cases} \quad (1)$$

**Điện áp rôto**

$$\begin{cases} v'_{dr} = r'_{dr} \cdot i'_{dr} + \frac{d\psi'_{dr}}{dt} = 0 \\ v'_{qr} = r'_{qr} \cdot i'_{qr} + \frac{d\psi'_{qr}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

**Phương trình từ thông:**

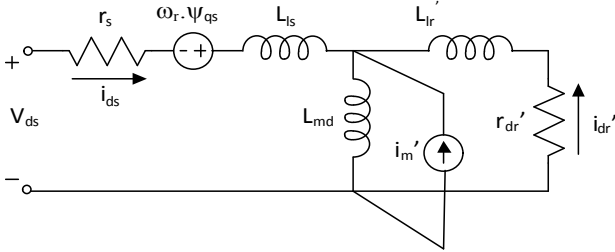
**Từ thông stato**

$$\begin{cases} \psi_{ds} = (L_{ls} + L_{md}) \cdot i_{ds} + L_{md} \cdot i'_{dr} + \psi'_m \\ \psi_{qs} = (L_{ls} + L_{mq}) \cdot i_{qs} + L_{mq} \cdot i'_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

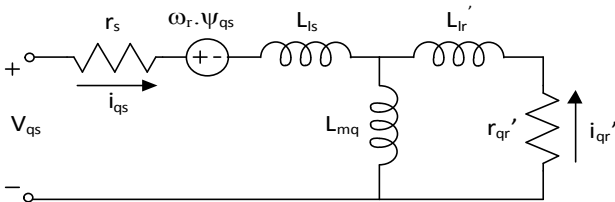
**Từ thông rôto**

$$\begin{cases} \psi'_{dr} = L'_{lr} \cdot i'_{dr} + L_{md} \cdot (i_{ds} + i'_{dr}) + \psi'_m \\ \psi'_{qr} = L'_{lr} \cdot i'_{qr} + L_{mq} \cdot (i_{qs} + i'_{qr}) \end{cases} \quad (4)$$

Từ mô hình, mạch điện thay thế của LSPMSM được thể hiện như hình 2, 3.

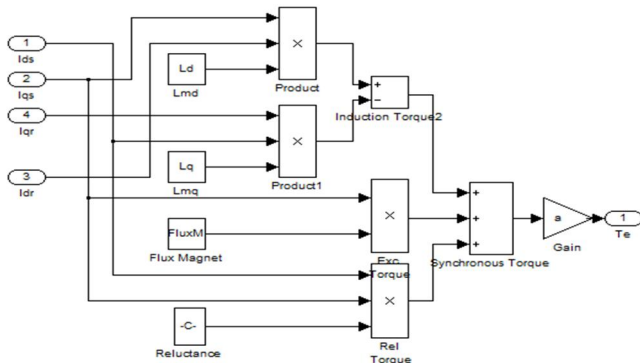


Hình 2. Sơ đồ mạch điện thay thế dọc trục

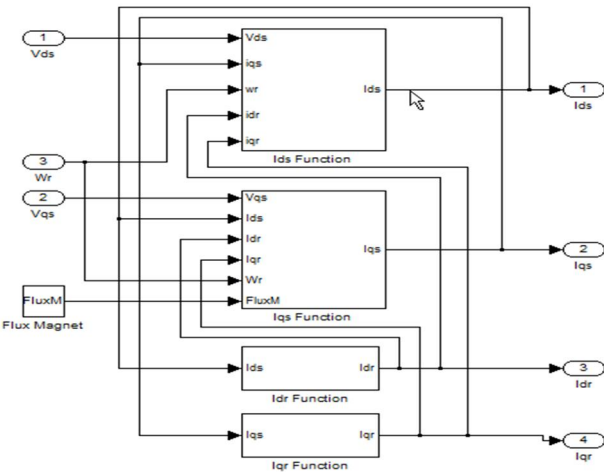


Hình 3. Sơ đồ mạch điện thay thế ngang trục

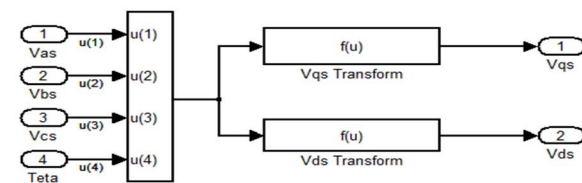
**2.3. Mô phỏng LSPMSM sử dụng MATLAB/Simulink**



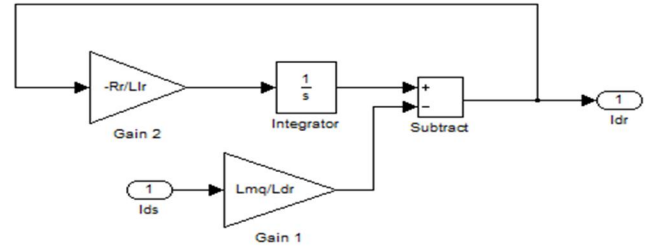
Hình 4. Khối tính toán mômen



Hình 5. Khối tính toán dòng điện trục d-q



Hình 6. Khối biến đổi \$V\_{abc}\$ sang \$V\_{dq}\$



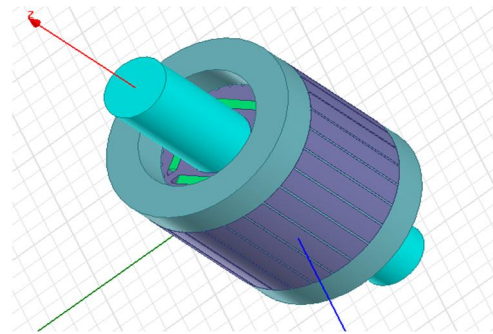
Hình 7. Khối tính toán dòng điện \$I\_{dr}\$

Ứng dụng Matlab/Simulink để mô phỏng các đặc tính làm việc của LSPMSM từ mô hình toán của động cơ tại mục 2.1 trên. Tổng hợp một số module được sử dụng trong quá trình mô phỏng như hình 4 ÷ 7.

**2.4. Ứng dụng mô hình toán với LSPMSM thử nghiệm**

Trong bài báo này, sẽ không làm giảm đi tính tổng quát khi lựa chọn mô phỏng một động cơ thử nghiệm 2,2kW, 3 pha, 4 cực. Trong đó, phần rôto sẽ được cải tạo từ động cơ không đồng bộ 2,2kW-3K112S4 của Công ty Cổ phần chế tạo điện cơ Hà Nội (hình 8).

Các thông số của LSPMSM 2,2kW thử nghiệm (điện cảm tản stato, điện cảm tản rôto quy đổi, điện cảm đồng bộ từ hóa ngang trục, dọc trục,...) được tính toán dựa trên các cấu hình stato, rôto, kích thước và vị trí đặt các thanh NCVC. Tổng kết lại, các thông số LSPMSM 2,2kW thử nghiệm được xác định tại bảng 1.

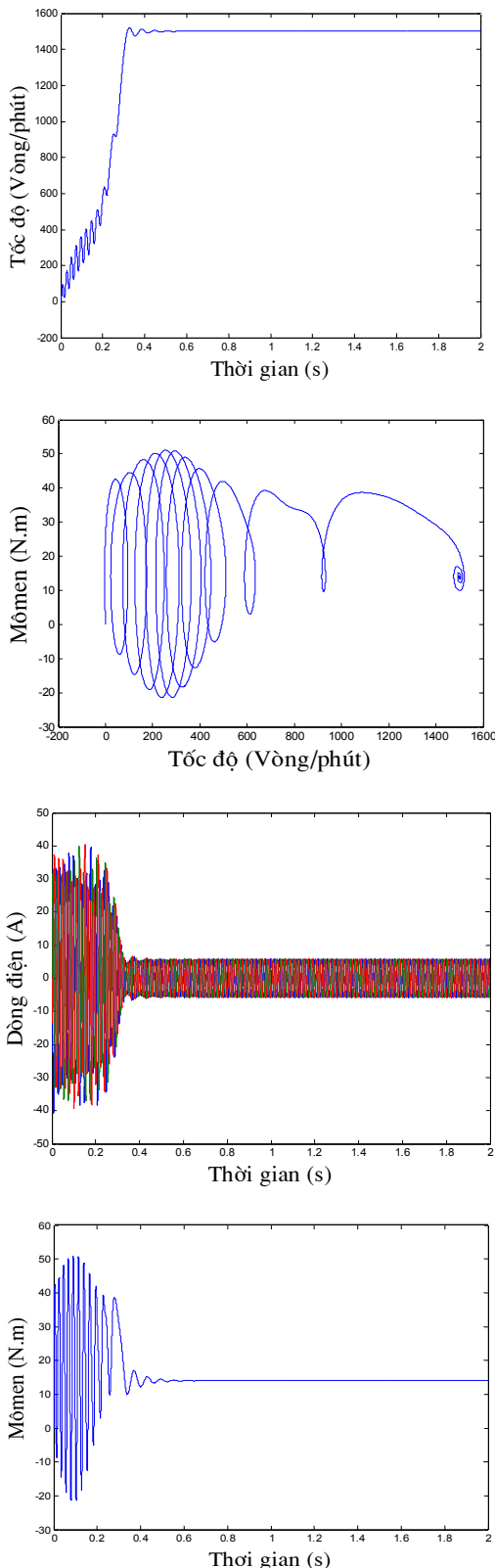


Hình 8. Cấu tạo rôto LSPMSM thử nghiệm

Bảng 1. Các thông số của LSPMSM thử nghiệm

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Đường kính trong stato	$D_{in}$	104	mm
Số rãnh stato		36	
Số rãnh rôto		28	
Chiều dài khe hở không khí	$\delta$	0,5	Mm
Tần số nguồn	F	50	Hz
Điện trở stato	$R_s$	3,6	$\Omega$
Điện trở rôto	$R_r$	3	$\Omega$
Điện cảm tản stato	$L_{ls}$	13	mH
Điện cảm tản lồng sóc rôto quy đổi	$L_{lr}'$	13,2	mH
Điện cảm từ hóa đồng bộ dọc trục	$L_{md}$	28,4	mH
Điện cảm từ hóa đồng bộ ngang trục	$L_{mq}$	131	mH
Mật độ từ thông dư NCVC	Br	1,1	T
Mômen quán tính rôto động cơ	J	0,03	$Kg.m^2$
Mômen tải định mức	$M_{dm}$	14	N.m

2.5. Mô phỏng LSPMSM với MATLAB/Simulink

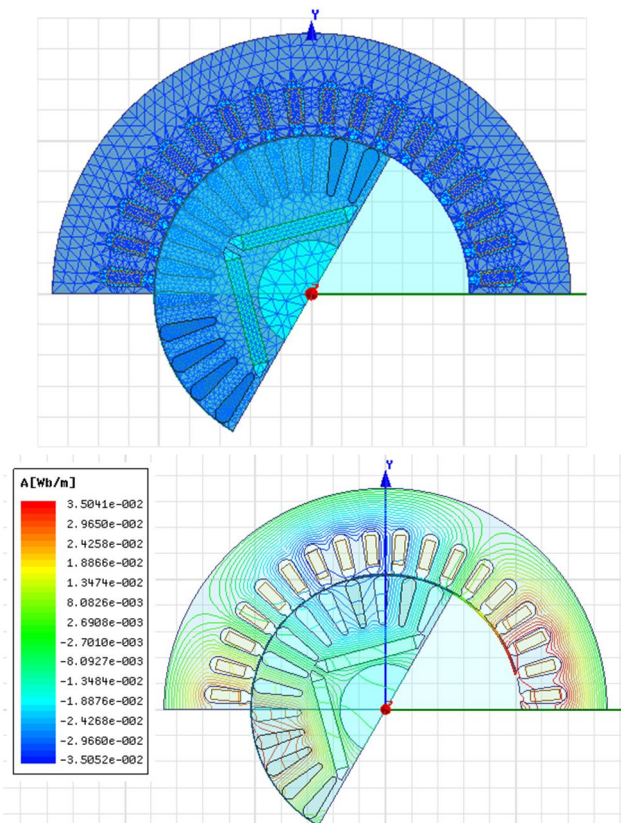


Hình 9. Các đặc tính mô phỏng LSPMSM thử nghiệm

Nhóm tác giả ứng dụng MATLAB/Simulink với các sơ đồ khối được lập trình từ mục 2.2 để mô phỏng LSPMSM 2,2kW thử nghiệm. Các thông số của LSPMSM thử nghiệm

được xác định ở bảng 1. Thông qua kết quả là các đặc tính làm việc, quá trình mô phỏng sẽ cho phép đánh giá khả năng làm việc của động cơ. Cụ thể là người sử dụng có thể nghiên cứu và đánh giá các quá trình biến đổi năng lượng, các đặc tính làm việc (tốc độ, dòng điện, mômen,...). Đối với LSPMSM đã xác định là khó khăn trong việc khởi động. Như vậy, từ đặc tính tốc độ mô phỏng thu được có thể đánh giá được quá trình khởi động động cơ: khả năng, chất lượng khởi động, thời gian để động cơ đi vào vận hành ổn định. Sau khi mô phỏng LSPMSM thử nghiệm, các đặc tính làm việc kết quả được thể hiện ở hình 9.

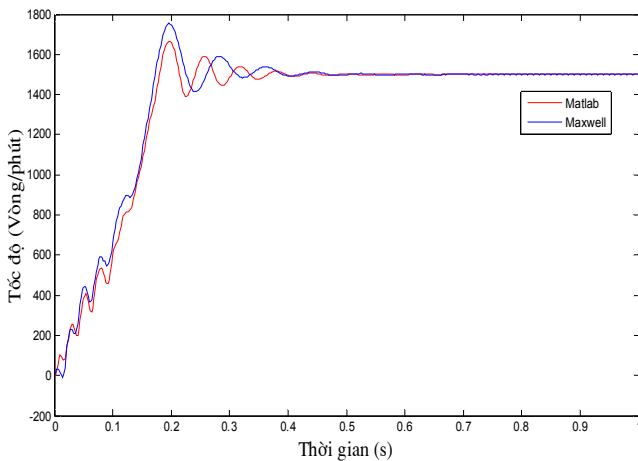
Từ kết quả mô phỏng, có thể nhận thấy rằng LSPMSM 2,2kW thử nghiệm có khả năng khởi động với mômen tải đặt bằng giá trị định mức. Thời gian khởi động của động cơ mất 0,6s sau đó đi vào ổn định. Dòng điện cực đại  $i_{max}$  khoảng 40A, bội số dòng điện khởi động gấp 10 lần dòng điện định mức. Từ đường đặc tính tốc độ mô phỏng cũng cho thấy LSPMSM khởi động khó khăn, trong quá trình khởi động xuất hiện nhiều đoạn giảm tốc (10 đoạn).



Hình 10. Chia lưới và mô phỏng đường đi của từ thông LSPMSM với ANSYS/Maxwell 2D

Bên cạnh mô phỏng LSPMSM thực nghiệm với MATLAB/Simulink, nhóm tác giả cũng tiến hành mô phỏng LSPMSM thực nghiệm với phần mềm sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn ANSYS/Maxwell 2D. Một số hình ảnh khi mô phỏng LSPMSM 2,2kW thực nghiệm như hình 10.

Đặc tính tốc độ khởi động thu được từ hai phương pháp mô phỏng sẽ so sánh với nhau tại hình 11.



Hình 11. Đặc tính tốc độ LSPMSM được mô phỏng với ANSYS/Maxwell 2D và MATLAB/Simulink

Kết quả từ hình 11 cho thấy đường đặc tính tốc độ LSPMSM 2,2kW thu được từ hai phương pháp: mô phỏng từ mô hình toán với MATLAB/Simulink và mô phỏng bằng phần mềm ANSYS/Maxwell 2D là tương đồng. Cả hai phương pháp đều có đường đặc tính tốc độ với tải định mức  $M_{\text{tải}} = 14N.m$  sau 0,5s sẽ vào đồng bộ, bên cạnh đó để đạt đến tốc độ đồng bộ (1.500 vg/ph) lần đầu LSPMSM trải qua 5 lần giảm tốc. Tuy nhiên, mô phỏng với MATLAB/Simulink có ưu điểm là thời gian mô phỏng nhanh hơn so với phương pháp mô phỏng với ANSYS/Maxwell 2D. Theo thống kê, MATLAB/Simulink mô phỏng đặc tính tốc độ trong khoảng thời gian 1s sẽ mất 30s để tính toán, trong khi đó với ANSYS/Maxwell 2D sẽ mất khoảng 45 phút. Như vậy, thời gian mô phỏng với MATLAB/Simulink trong trường hợp này nhanh hơn rất nhiều so với phương pháp mô phỏng với ANSYS/Maxwell 2D.

### 3. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đưa ra mô hình toán và mô phỏng LSPMSM với MATLAB/Simulink. Các kết quả mô phỏng thu được là các đặc tính của LSPMSM trong quá trình làm việc như: tốc độ, dòng điện, mômen, độ trượt,... Bên cạnh đó, bài báo cũng trình bày so sánh kết quả thu được với phần mềm ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn để mô phỏng động cơ. Kết quả cho thấy sự tương đồng. Tuy nhiên mô phỏng LSPMSM với MATLAB/Simulink sẽ cho tốc độ tính toán nhanh hơn.

Từ kết quả có thể nhận thấy mô hình toán và mô phỏng LSPMSM bằng Matlab/Simulink là một trong những công cụ hữu hiệu khi nghiên cứu và ứng dụng động cơ trong thực tế. Với mô hình này, các nhà thiết kế có thể đánh giá sơ bộ khả năng làm việc của máy điện từ đó có những điều chỉnh cần thiết cho phù hợp. Đối với các nhà nghiên cứu, công cụ này sẽ là tiền đề để đi sâu phân tích các đặc tính, thông số của LSPMSM cần quan tâm. Ngoài ra, mô hình toán này sẽ là một nền tảng để tích hợp trong các sơ đồ điều khiển quá trình khi động cơ ứng dụng trong các khối điều khiển.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Binns K.J, Barnard W. R., Jabbar M. A., 1978. *Hybrid Permanent-magnet Synchronous Motors*. Proc. Inst. Elect., England, March.
- [2]. T. J. E. Miller, 1984. *Synchronous of Line-Start Permanent-Magnet AC Motors*. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, vol. PAS-103, no. 7.
- [3]. V. B. Honsinger, 1980. *Permanent Magnet Machines: Asynchronous Operation*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 4.
- [4]. Arash Hassanpour Isfahani, Sadegh Vaez-Zadeh, 2011. *Effects of Magnetizing Inductance on Start-Up and Synchronization of Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motors*. IEEE Transactions on magnetics, vol. 47, no. 4.
- [5]. A. Hasanpour Isfahani, S. Vaez-Zadeh, M. A Rahman, 2011. *Evaluation of Synchronization Capability in Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*. IEEE International Electric Machines & Drives Conference.
- [6]. S. F. Rabbi, M. A. Rahman, 2012. *Analysis of Starting and Synchronization Process for Line Start IPM Motors*. International Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 311-314.
- [7]. M. A. Rahman, A. M. Osheiba, T. S. Radwan, 1997. *Synchronization process of line-start permanent magnet synchronous motors*. Electric machines and power systems, vol. 25, pp. 577-592.
- [8]. Juliette Soulard, Hans-Peter Nee, 2000. *Study of the Synchronization of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors*. IEEE Industry Applications Conference, vol. 1, pp. 424-431, Rome.
- [9]. Kazumi Kurihara, M. Azirur Rahman, 2004. *High-Efficiency Line-Start Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors*. IEEE Transactions on industry applications, vol. 40, no. 3.
- [10]. Dan Stoia, Mihai Cernat, Kay Hameyer, Drago Ban, 2009. *Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors, Analysis and Design*, EDPE.
- [11]. Akeshi Takahashi, Satoshi Kikuchi, Kenji Miyata, Shin'ichi Wakui, Hiroyuki Mikami, Kazumasa Ide, Andreas Binder, 2008. *Transient-Torque Analysis for Line-Starting Permanent-Magnet Synchronous Motors*. Proceedings of the 2008 ICE on Electrical Machines.
- [12]. Akeshi Takahashi, Satoshi Kikuchi, Hiroyuki Mikami, Kazumasa Ide, Andreas Binder, 2012. *D-q Space Vector Analysis for Line-Starting Permanent Magnet Synchronous Motors*. International Conference on Electrical Machines, pp. 136-142.
- [13]. A. D. Aliabad, M. Mirsalim, 2012. *Analytic modelling and dynamic analysis of pole-changing line-start permanent-magnet motors*. IET Electr. Power Applications, vol. 6, Iss. 3, pp. 149-155.
- [14]. Kwang Hee Kim, Jian Li, Jin Hak Jang, Yun Hyun Cho, 2012. *A Study on Line-Start Permanent Magnet Machine with Improved Saliency Ratio*. International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications, pp. 1-4, Dalian, Liaoning.

### AUTHORS INFORMATION

Le Anh Tuan<sup>1</sup>, Pham Van Tuan<sup>2</sup>, Nguyen Thi Minh Hien<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry

<sup>2</sup>Faculty of Electrical Engineering, Vinh University of Technology Education