

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG MỘT SỐ CẤU HÌNH NAM CHÂM VĨNH CỬU ĐẾN ĐẶC TÍNH TỐC ĐỘ KHỞI ĐỘNG VÀ DẠNG SÓNG DÒNG ĐIỆN Ở CHẾ ĐỘ XÁC LẬP ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHỞI ĐỘNG TRỰC TIẾP 15KW, 3.000 VÒNG/PHÚT

A STUDY ON EFFECT OF PERMANENT MAGNET CONFIGURATIONS ON STARTING SPEED CURVE AND PHASE CURRENT WAVEFORM IN STEADY STATE OF LINE START MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS 15 KW, 3,000 RPM

Bùi Đức Hùng<sup>1\*</sup>, Lê Anh Tuấn<sup>2</sup>, Đỗ Như Ý<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

<sup>2</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>3</sup>Trường Đại học Mỏ địa chất

\*Tác giả liên hệ: hung.buiduc@hust.edu.vn

(Nhận bài: 27/01/2022; Chấp nhận đăng: 02/6/2022)

**Tóm tắt** - Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp với hiệu suất và hệ số công suất cao là một giải pháp thay thế từng phần cho động cơ không đồng bộ lồng sóc (SCIM). Trong thiết kế cấu hình rôto ảnh hưởng rất nhiều tới thông số động cơ. Đối với đặc tính dòng điện làm việc, việc thiết kế và lựa chọn cấu hình nam châm vĩnh cửu không đảm bảo sinh ra sóng hài dòng điện lớn. Các sóng hài bậc cao của dòng điện ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu suất vận hành của động cơ, sinh ra mômen đập mạch và làm ảnh hưởng đến chất lượng nguồn cấp. Bên cạnh đó, ở một số nơi cần động cơ tốc độ 3.000 vòng/phút, nhưng các nghiên cứu cấu hình này chưa nhiều. Vì vậy, bài báo tập này nghiên cứu một số cấu hình đề xuất cho động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM) 3 pha, 15 kW, tốc độ 3.000 vòng/phút. Từ kết quả, bài báo rút ra một số đánh giá để đề xuất cấu hình phù hợp trong điều kiện hiện nay.

**Từ khóa** - Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp (LSPMSM); nam châm vĩnh cửu; thanh nam châm; cấu hình rôto; đặc tính dòng điện

## 1. Đặt vấn đề

Ngày nay, do sự phát triển của công nghệ khai thác và chế biến nên nam châm vĩnh cửu (NCVC) đắt hiếm với giá trị cảm ứng từ dư lớn, tích số năng lượng lớn, như Neodymium (NdFeB), Samarium cobalt (SmCo) ... ngày trở nên phổ biến. Vì vậy trong hai thập kỷ gần đây đã thúc đẩy việc ứng dụng NCVC đắt hiếm trong sản xuất máy điện để tạo ra sản phẩm là các động cơ có hiệu suất biến đổi năng lượng cao. Trong các loại động cơ trên, LSPMSM nổi lên như là một giải pháp thay thế từng phần cho SCIM hiện đang sử dụng rộng rãi. LSPMSM đã chứng minh được có nhiều ưu điểm vượt trội trong quá trình vận hành như có hiệu suất biến đổi điện cơ lớn, hệ số công suất gần bằng 1, mật độ mômen lớn [1], [2]. Động cơ LSPMSM bản chất là sự cải tiến từ động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) và SCIM. Nói cách khác nó là sự lai tạp giữa PMSM và SCIM bằng cách đặt các thanh nam châm vĩnh cửu vào rôto của SCIM. Do vậy, LSPMSM ngoài sở hữu ưu điểm của PMSM, nó còn có ưu điểm của SCIM là khả năng khởi động trực tiếp

**Abstract** - Line start permanent magnet synchronous motors with high efficiency and power factor in steady state is a partial replacement solution for squirrel cage induction motors (SCIM) which are widely used at the present time. In designing process, the rotor configuration profoundly influenced the engine parameters. For the current curve in steady state, the design and selection of the permanent magnet configuration does not create the large harmonics. These large harmonics directly affect on operating efficiency, produce ripple moment of the motor and affect on the quality of power supply. In addition, it is needed to have the engine with 3,000 rpm, however, there are quite few researches on this configuration. Therefore, this paper focuses on proposing several configurations for line start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM) with 3 phase, 15kW, 3,000 rpm. As a result, author suggests several suitable configurations in present conditions.

**Key words** - Line start permanent magnet synchronous motors (LSPMSM); permanent magnet; magnet rod; rotor configuration; current curve

Đối với LSPMSM, mặc dù được khẳng định là có hiệu suất và hệ số công suất cao, nhưng nếu thiết kế không tốt thì có thể không khởi động được ở tải định mức. Bên cạnh đó, các thông số vận hành có thể không đảm bảo, thậm chí có thể còn không đạt được các tiêu chuẩn của SCIM [3]. Tại quá trình thiết kế, trong các đặc tính thì đặc tính tốc độ khởi động thường được nghiên cứu đầu tiên, vì nó khẳng định khả năng khởi động trực tiếp của động cơ. Bên cạnh đó, đặc tính dòng điện làm việc ở chế độ xác lập cũng được tính đến tiếp theo. Nguyên nhân là, thông thường đối với LSPMSM bất kỳ trong quá trình làm việc, dạng sóng dòng điện thường không "sin" mà dao động điều hòa với tần số nguồn cấp [4], [5]. Dạng sóng điều hòa này sinh ra các sóng hài bậc cao. Sóng hài bậc cao này nếu không kiểm soát tốt dẫn đến nhiều không mong muốn ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng điện năng của nguồn cấp, ngoài ra nó còn gây ra độ rung khi làm việc cho chính bản thân động cơ này [5]. Vì vậy, việc thiết kế cần đảm bảo sóng hài bậc cao

<sup>1</sup> Hanoi University of Science and Technology (Bui Duc Hung)

<sup>2</sup> Hanoi University of Industry (Le Anh Tuan)

<sup>3</sup> Hanoi University of Mining and Geology (Do Nhu Y)

của dòng điện làm việc sinh ra là thấp nhất.

Bên cạnh đó, với LSPMSM hoạt động ở tần số nguồn cấp 50Hz người ta thường nghiên cứu và chế tạo động cơ hoạt động ở tốc độ 1.500 vòng/phút [1], [2], [3],... còn những tốc độ khác có rất ít nghiên cứu đề cập [6], [7]. Nhưng trên thực tế, có rất nhiều nơi ứng dụng tốc độ 3.000 vòng/phút, như trong ngành công nghiệp khai thác mỏ, dầu khí... [8]. Và như vậy người sử dụng phải điều chỉnh tốc độ bằng các cơ cấu cơ khí như bánh răng, đai truyền hoặc thông qua các bộ biến tần nhưng như vậy giá thành hệ thống tăng lên. Nhằm nghiên cứu LSPMSM tốc độ 3.000 vòng/phút ứng dụng tại các mỏ than công nghiệp tại Việt Nam, bài báo nghiên cứu đề xuất một số cấu hình NCVC gắn chìm trong rôto. Các cấu hình này được mô phỏng thông qua phần mềm Ansys/Maxwell2D ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn. Các kết quả mô phỏng được phân tích và đánh giá để làm rõ ưu, nhược điểm nhằm lựa chọn cấu hình tốt nhất để chế tạo phù hợp với điều kiện sản xuất của Việt Nam ở thời điểm hiện tại.

Trong nội dung nghiên cứu, bài báo khảo sát ba cấu hình đề xuất NCVC khác nhau của LSPMSM thử nghiệm với thông số kỹ thuật cơ bản: 15kW, 660/1140VAC, 50Hz, 3 pha, tốc độ 3.000 vòng/phút. Trong thiết kế, các cấu hình răng, rãnh, mạch từ, dây quấn, lồng sóc stator và rôto giữ nguyên và đều sử dụng NCVC NdFe-45. NCVC được gắn chìm trong rôto.

## 2. Cấu hình rôto đề xuất cho LSPMSM, 15kW, 3.000 vòng/phút

### 2.1. Cấu hình LSPMSMStator

Động cơ LSPMSM điển hình có cấu tạo stator giống SCIM. LSPMSM 15kW thử nghiệm trong bài báo nghiên cứu có thông số như Bảng 1.

**Bảng 1.** Các thông số cơ bản của LSPMSM 15kW

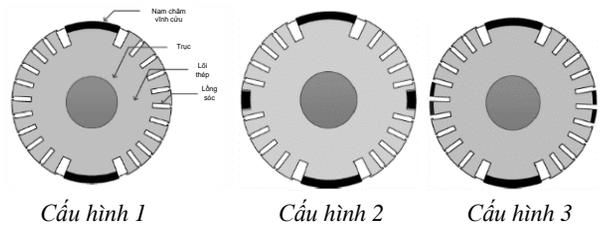
Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Đường kính ngoài stator	$D_n$	245	mm
Đường kính trong stator	$D$	152	mm
Đường kính ngoài rôto	$D'$	151	mm
Đường kính trục rôto	$D_t$	52	mm
Vật liệu thép stator	Steel 1008		
Số rãnh stator	$Z_1$	36	Rãnh
Số rãnh rôto	$Z_2$	28	Rãnh
Chiều dài khe hở không khí	$g$	0,5	mm
Điện áp nguồn cấp	$U_{dm}$	660/1140	V
Tần số nguồn cấp	$f$	50	Hz

#### 2.1.1. Cấu hình rôto

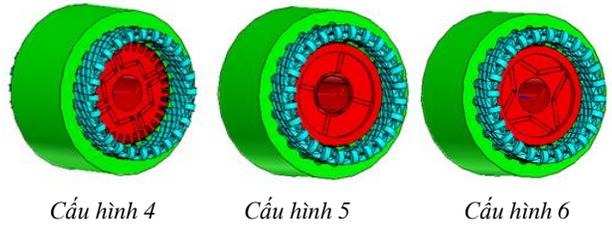
Rôto LSPMSM giống SCIM là nó có lõi thép và lồng sóc. Tuy nhiên LSPMSM khác động cơ SCIM ở chỗ loại này có gắn thêm các thanh NCVC trên bề mặt hoặc gắn chìm trong lõi thép rôto. Một số cấu hình rôto LSPMSM thường dùng như Hình 1, Hình 2.

Ưu điểm của cấu hình NCVC gắn chìm là vững chắc về mặt cơ khí và khó bị khử từ do có lồng sóc. Nhưng nhược điểm là chế tạo rôto khó hơn cấu hình gắn bề mặt do phải tạo khe đặt NCVC. Ưu điểm cấu hình NCVC gắn bề mặt

là dễ chế tạo hơn, nhưng nhược điểm là các thanh NCVC được gắn vào rôto bằng chất kết dính do vậy có khả năng sẽ bị bong tróc trong quá trình hoạt động lâu dài. Bên cạnh đó, LSPMSM cấu hình gắn bề mặt khi vận hành có độ rung và ồn cao hơn, thời gian vào đồng bộ lớn hơn LSPMSM cấu hình gắn chìm [3].



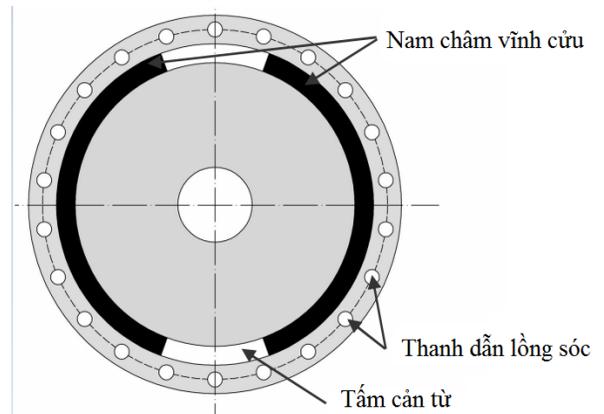
**Hình 1.** Một số cấu tạo rôto LSPMSM với NCVC gắn bề mặt [9]



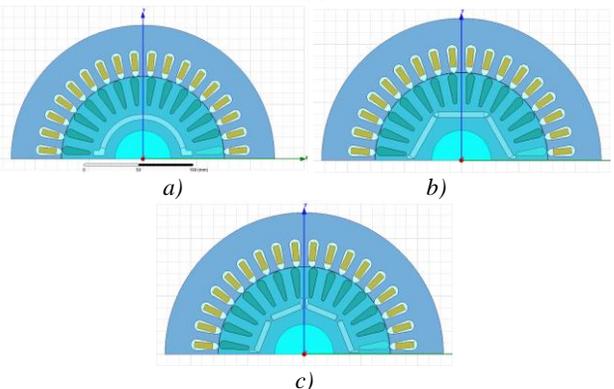
**Hình 2.** Một số cấu tạo rôto LSPMSM với NCVC gắn chìm [10]

#### 2.1.2. Một số cấu hình NCVC LSPMSM 3000 vòng/phút đề xuất

Đối với LSPMSM có tốc độ 3.000 vòng/phút, tần số nguồn cấp 50Hz, thông thường cấu hình rôto hay gặp gồm hai NCVC hình khuyên, như Hình 3 [6].



**Hình 3.** Cấu hình điển hình LSPMSM gắn NCVC 3.000 vòng/phút [6]

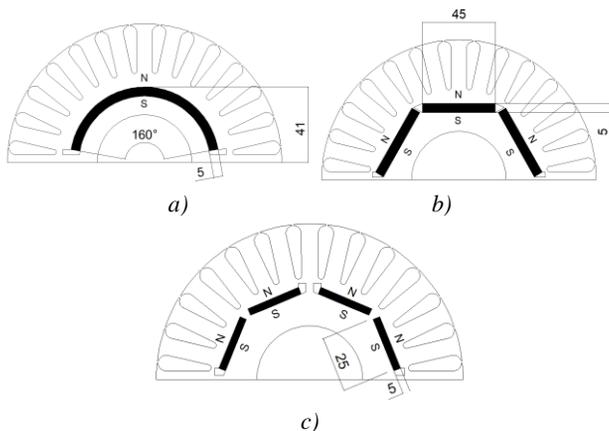


**Hình 4.** Cấu hình NCVC LSPMSM 15kW thử nghiệm a)-dạng khuyên, b)-chia 3 thanh, c)-chia 4 thanh

Tuy nhiên, LSPMSM, 15kW, tốc độ 3000 vòng/phút với hình dạng NCVC hình khuyên như trên có một số nhược điểm trong quá trình chế tạo:

- Miếng NCVC kích thước lớn, khó gia công, vận chuyển và lắp đặt;
- Lực từ lớn, rất dễ va đập mất an toàn khi lắp ghép;
- Miếng NCVC lớn cho nên nạp từ khó khăn hơn.

Kích thước NCVC của từng cấu hình LSPMSM như Hình 5.



**Hình 5.** Kích thước NCVC LSPMSM 15kW thử nghiệm  
a)-dạng khuyên, b)-chia 3 thanh, c)-chia 4 thanh

Chính vì các lý do trên nên trên thực tế ít chế tạo NCVC dạng vành khuyên mà thường chế tạo NCVC dạng cong nhỏ hoặc dạng phẳng sau đó ghép lại. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất nghiên cứu một số cấu hình NCVC dạng thanh phẳng cho LSPMSM thử nghiệm 15kW, 3.000 vòng/phút như ở Hình 4.

Nguyên lý ở đây là chia nhỏ khối NCVC hình khuyên ra thành các NCVC dạng thanh phẳng. Như vậy, đã khắc phục nhược điểm của khối NCVC hình khuyên trong quá trình chế tạo. Ở nội dung bài báo nghiên cứu LSPMSM thử nghiệm 15kW trong trường hợp NCVC hình khuyên và khi được ghép từ 3 hoặc 4 thanh. Lý do chỉ xét NCVC được ghép từ 3 và 4 thanh phẳng mà không chia nhỏ hơn nữa là:

- Nếu chia nhỏ hơn thì số lượng thanh NCVC dùng để ghép nối là rất nhiều, phức tạp hơn trong quá trình lắp đặt.
- Bên cạnh đó nếu chia nhỏ hơn cũng dẫn đến gia công tạo rãnh đặt NCVC trên lõi thép rôto trở nên phức tạp hơn.

Cấu hình NCVC khác nhau tất yếu dẫn đến ảnh hưởng khác nhau lên các đặc tính quá độ cũng như thông số vận hành ở chế độ xác lập của LSPMSM. Vì vậy, trong nội dung nghiên cứu bài báo sẽ phân tích và đánh giá ảnh hưởng của các cấu hình khác nhau đến đặc tính khởi động và đặc tính dòng điện của LSPMSM ở chế độ vận hành xác lập. Từ các kết quả nghiên cứu, bài báo rút ra một số kết luận nhằm hướng đến chế tạo động cơ trong thực tế.

## 2.2. Phân bố từ trường và đặc tính dòng điện ở chế độ vận hành xác lập của LSPMSM

Phương pháp phần tử hữu hạn đã được chứng minh về hiệu quả và độ chính xác khi giải quyết các bài toán vi tích phân liên quan đến trường điện từ. Vì thế, phần mềm này được sử dụng phổ biến trong nghiên cứu mô phỏng máy

điện và đã được chứng minh có độ chính xác cao, tin cậy [11], [12], [13], [14]. Do đó, phương pháp này cũng được sử dụng rất nhiều trong các bài toán mô phỏng LSPMSM [1], [3], [13], [14]. Nhằm nghiên cứu các đặc tính của LSPMSM, bài báo sử dụng phần mềm Ansys/Maxwell2D (Version16) ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn (Finite Element Method-FEM) để mô phỏng LPMSM. Các kết quả mô phỏng nhằm mục đích nghiên cứu và đánh giá thiết kế của động cơ.

Trong mô phỏng, khả năng khởi động của động cơ với tải định mức được đánh giá thông qua đặc tính tốc độ khởi động. Bên cạnh đó, bài báo tập trung đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng cấu hình rôto đến đặc tính của dòng điện làm việc ở chế độ vận hành xác lập. Từ kết quả mô phỏng, bài báo đánh giá và rút ra một số kết luận để lựa chọn cấu hình rôto phù hợp nhất trong chế tạo thực tế. Để đánh giá khách quan, các cấu hình động cơ mô phỏng phải đảm bảo một số điều kiện sau:

- Kích thước răng, rãnh, kích cỡ dây quấn, kiểu dây quấn và vật liệu chế tạo stato giữ nguyên;
- Cấu hình răng, rãnh và vật liệu chế tạo rôto giữ nguyên;
- Chủng loại NCVC giữ nguyên.

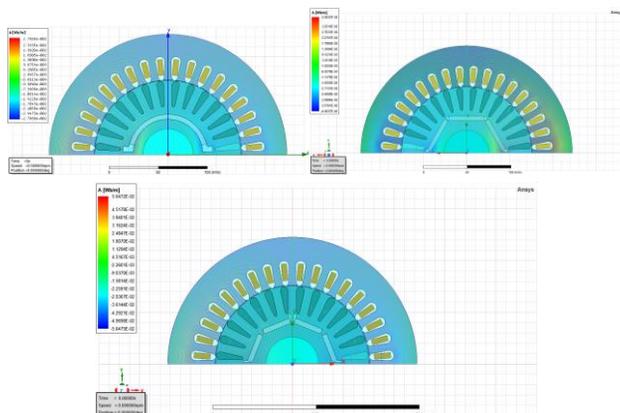
NCVC được sử dụng trong mô phỏng thử nghiệm là NCVC đất hiếm NdFeB-N45. NCVC này có giá trị cảm ứng từ dư lớn, lực kháng từ lớn thích hợp trong chế tạo máy điện NCVC [3].

**Bảng 2.** Thông số NCVC NdFeB-N45

Chủng loại	Giá trị cảm ứng từ dư (mT)	Lực kháng từ (kA/m)	Tích số năng lượng (kJ/m <sup>3</sup> )
NdFeB-N45	1370	930	358

### 2.2.1. Phân bố từ trường do NCVC sinh ra

Bài báo sử dụng phần mềm Ansys/Maxwell2D để mô phỏng LSPMSM với các cấu hình NCVC khác nhau. Phân bố từ trường, mật độ từ trường tại khe hở không khí và dạng sóng sức điện động không tải khi mô phỏng LSPMSM 15kW thử nghiệm các cấu hình NCVC khác nhau như Hình 6.

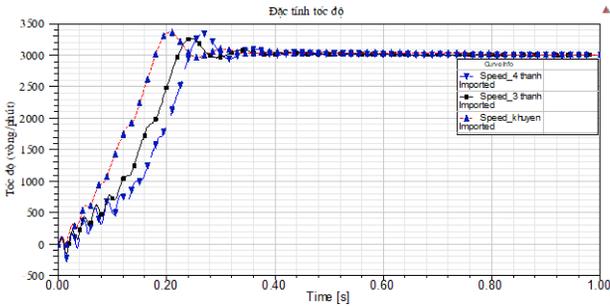


**Hình 6.** Đường từ trường mô phỏng do NCVC sinh ra với ba cấu hình khác nhau

Từ Hình 6 có thể thấy, đường từ trường mô phỏng ở cả ba cấu hình NCVC khác nhau tạo thành hai phân vùng từ trường riêng biệt và đối xứng nhau. Hai phân vùng này thể hiện 2 cực từ (tương ứng tốc độ 3.000 vòng/phút).

2.2.2. Đường đặc tính tốc độ khởi động

Khi mô phỏng với các cấu hình NCVC khác nhau, đường đặc tính tốc độ khởi động ứng với tải định mức như ở Hình 7.

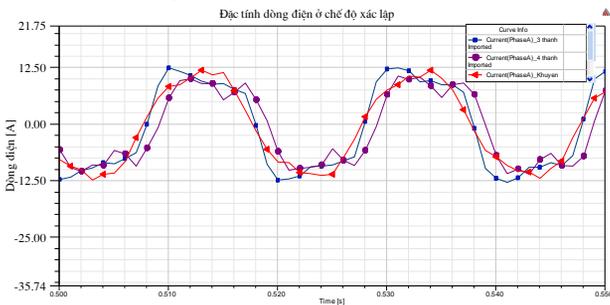


Hình 7. Đặc tính tốc độ khởi động LSPMSM với các cấu hình NCVC khác nhau

Từ Hình 7, có thể nhận thấy, tất cả các cấu hình trên LSPMSM đều có khả năng khởi động với tải định mức (LSPMSM thử nghiệm đều đạt được tốc độ định mức sau một thời gian xác định). Tuy nhiên, đặc tính tốc độ khởi động của các cấu hình là khác nhau. Trong đó, cấu hình rôto hình khuyên có đặc tính khởi động tốt nhất. Với cấu hình này, động cơ đạt tốc độ lớn nhất sau 0,2 s, bên cạnh đó để đạt được tốc độ lớn nhất này đặc tính có 5 đoạn “gấp khúc”. Mặt khác, cấu hình LSPMSM 4 thanh cho đặc tính khởi động xấu nhất. Lúc này, động cơ đạt tốc độ lớn nhất sau 0,27s, để đạt được tốc độ lớn nhất, đặc tính trải qua 8 đoạn “gấp khúc”. Tuy nhiên, với các đường đặc tính tốc độ khởi động như vậy thì nhìn chung các cấu hình đều chấp nhận được về mặt khởi động với tải định mức.

2.2.3. Đặc tính dòng điện làm việc

Đặc tính dòng điện ở chế độ vận hành xác lập với các cấu hình khi mô phỏng với Ansys/Maxwell2D như Hình 8.



Hình 8. Đường đặc tính dòng điện ở chế độ xác lập

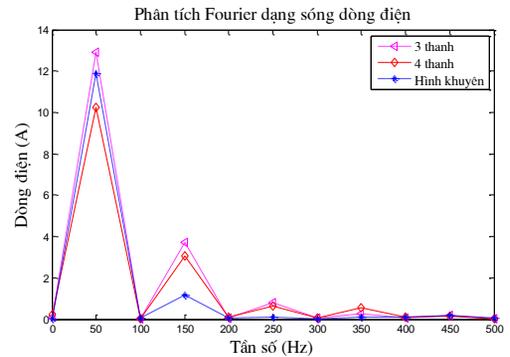
Từ Hình 8 nhận thấy, dạng sóng dòng điện của LSPMSM với các cấu hình khác nhau ở chế độ vận hành xác lập đều không sin. Dạng sóng dòng điện các cấu hình lúc này dao động điều hòa với tần số 50Hz. Sơ bộ, có thể đánh giá dạng sóng dòng điện của cấu hình NCVC hình khuyên gần sin nhất. Để nghiên cứu chi tiết hơn, ở mục sau bài báo phân tích sóng hài dòng điện ứng với từng cấu hình khác nhau để đánh giá cụ thể.

2.3. Phân tích Fourier dạng sóng hài dòng điện với các cấu hình nghiên cứu

Để đánh giá ảnh hưởng của từng cấu hình NCVC khác nhau đến dạng sóng dòng điện ở chế độ xác lập, bài báo phân tích phổ sóng hài dạng sóng dòng điện của từng cấu hình.

Từ kết quả giá trị chuỗi của dạng sóng dòng điện thu được từ mô phỏng với Ansys/Maxwell2D (Hình 8), bài báo ứng dụng phần mềm Matlab để phân tích FFT dạng sóng dòng điện ở chế độ vận hành xác lập. Kết quả thu được là các biên độ sóng cơ bản và biên độ các thành phần sóng điều hòa đi kèm như Hình 9.

Về cơ bản ở tất cả các cấu hình, dạng sóng dòng điện đều tồn tại sóng hài bậc cao, điều này không thể tránh khỏi đối với LSPMSM. Nguyên nhân chủ yếu do cấu hình NCVC khác nhau dẫn đến đường đi từ trường trong mạch từ, khe hở không khí, ... khác nhau. Khi phân tích sóng hài đối với từng cấu hình, có thể nhận thấy sóng hài dòng điện bậc cao ở các LSPMSM thử nghiệm có sự sai khác giữa từng cấu hình. Từ Hình 9 cho thấy, cấu hình NCVC hình khuyên có thành phần sóng hài bậc cao thấp nhất, đặc biệt thành phần sóng hài bậc 3 (150Hz) và bậc 5 (250Hz) nhỏ hơn đáng kể so với 2 cấu hình còn lại. Như vậy có thể kết luận, cấu hình NCVC hình khuyên cho dạng sóng dòng điện tốt nhất, lúc đó dạng sóng dòng điện gần “sin”. Tuy nhiên, để khắc phục việc chế tạo NCVC hình khuyên gặp khó khăn thì lựa chọn cấu hình NCVC 4 thanh là phù hợp nhất. Lúc đó thành phần sóng hài bậc 3, bậc 5 nhỏ hơn so với cấu Hình 3 thanh.



Hình 9. Phân tích FFT dạng sóng dòng điện với các cấu hình NCVC khác nhau

Bên cạnh đó, khi nối vào lưới điện phân phối, dạng sóng dòng điện LSPMSM sinh ra cần phải đảm bảo yêu cầu về tiêu chuẩn sóng hài dòng điện [15]. Ta tính toán tổng độ biến dạng sóng hài dòng điện phụ tải (THD<sub>i</sub>) sinh ra của từng cấu hình. Giá trị THD<sub>i</sub> được xác định thông qua công thức [15]:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N I_i^2}}{I_1} \quad (1)$$

Trong đó,

+ I<sub>1</sub> là giá trị hiệu dụng của dòng điện tại bậc cơ bản (tần số 50Hz);

+ I<sub>i</sub> là giá trị hiệu dụng của sóng hài dòng điện bậc i và N là sóng hài bậc cao nhất cần đánh giá.

Kết quả tính toán như Bảng 3.

Bảng 3. Tổng độ biến dạng sóng hài dòng điện của từng cấu hình NCVC

Thông số	Tiêu chuẩn [15]	Hình khuyên	3 thanh	4 thanh
THD <sub>i</sub>	≤20%	9,97%	29,6%	20%

Kết quả ở Bảng 3 cho thấy, cấu hình hình khuyên cho giá trị  $THD_i$  thấp nhất, cấu trúc 3 thanh có  $THD_i$  cao nhất. Đối chiếu với tiêu chuẩn yêu cầu về sóng hài dòng điện [15], trong trường hợp này là đấu nối vào lưới điện hạ áp có công suất nhỏ hơn 50kW. Như vậy chỉ có cấu hình hình khuyên hoặc cấu hình 4 thanh là thoả mãn tiêu chuẩn trên ( $THD_i \leq 20\%$ ).

### 3. Kết luận

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của một số đặc tính NCVC đến khả năng khởi động và đặc tính dòng điện làm việc của động cơ ở chế độ vận hành xác lập. Bên cạnh đó, bài báo cũng nghiên cứu đặc tính tốc độ khởi động của các cấu hình NCVC khác nhau của LSPMSM 3.000 vòng/phút. Kết quả cho thấy, tất cả các cấu hình đều có khả năng khởi động với tải định mức. Cấu hình NCVC hình khuyên có đường đặc tính tốc độ khởi động là tốt nhất. Cấu hình này có đặc tính dòng điện làm việc ở chế độ xác lập gần hình “sin”, giá trị  $THD_i$  thấp nhất trong các cấu hình. Vì vậy có thể thấy, cấu hình này là thích hợp nhất trong chế tạo LSPMSM tốc độ 3.000 vòng/phút. Tuy nhiên, trong điều kiện hiện tại, do nhược điểm trong quá trình chế tạo nên cấu hình 4 thanh có thể được lựa chọn thay thế. Nguyên nhân là, cấu hình 4 thanh vẫn đảm bảo khả năng khởi động, bên cạnh đó dạng sóng dòng điện thành phần sóng hài dòng điện bậc cao thấp hơn so với cấu hình 3 thanh và tổng độ biến dạng sóng hài  $THD_i$  thoả mãn tiêu chuẩn về sóng hài dòng điện.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] W. Zhao, M. Tian, X. Wang, Y. Sun, “Analysis of the Synchronization Process and the Synchronization Capability for a Novel 6/8-Pole Changing LSPMSM”, *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 56, NO. 2, 2020, 1-6.
- [2] L. S. Maraaba, Z. M. Al-Hamouz, “Mathematical modeling, simulation and experimental testing of interior-mount LSPMSM under stator inter-turn fault”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 34, Issue: 3, 2019, 1213 - 1222.
- [3] V. Elistratova, *Optimal Design of Line-Start Internal Permanent Magnet Synchronous Motor of High Efficiency*, HAL, 2016.
- [4] L.S. Maraaba, Z.M. Al-Hamouz, A.S. Milhem, S. Twaha, “Comprehensive Parameters Identification and Dynamic Model Validation of Interior-Mount Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors”, *MDPI Machines*, 2019, 1-22.
- [5] G. S. Chingale, R. T. Ugale, “Harmonic filter design for line start permanent magnet synchronous motor”, *International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, 2014, 1-4.
- [6] D. D. STOIA, O. CHIRILĂ1, M. CERNAT, K. HAMEYER, D. BAN, “The Behaviour of the LSPMSM in Asynchronous Operation”, *14th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2010, 45- 50.
- [7] A. Takahashi, S. Kikuchi, H. Mikami, K. Ide, A. Binder “d-q Space Vector Analysis for Line-Starting Permanent Magnet Synchronous Motors”, *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, 2012, 136-142.
- [8] I. Z. Boguslawsky, N. Korovkin, M. Hayakawa, *Large A.C. Machines: Theory and Investigation Methods of Currents and Losses in Stator and Rotor Meshes Including Operation with Nonlinear Loads*, Springer, 2017.
- [9] H. Saikura, S. Arikawa, T. Huguchi, Y. Yokoi, T. Abe, “Efficiency Improvement of a Self-Start Type Permanent Magnet Synchronous Motor”, *IEEE 2014 International Power Electronics Conference*, 2014, 3007-3011.
- [10] A. Nekoubin, “Design a Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor and Analysis Effect of the Rotor Structure on the Efficiency”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol:5, No:9, 2011, 1179-1183.
- [11] S. K. Chawrasia, C. K. Chanda, S. Banerjee, “Design and Analysis of In-Wheel Motor for an Electric Vehicle”, *2020 EEE Calcutta Conference (CALCON)*, 2020, 351-355.
- [12] R. Kryshchuk, O. Karlov, A. Bereziuk, “Determination of Conditions for Adequate Analytical Simulation of the Electromagnetic Field of Disk Induction Motors”, *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2020, 331-334.
- [13] M. F. Palangar, A. Mahmoudi, W. L. Soong and S. Kahourzade, “Design Optimisation of an 8-pole Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor”, *2020 2nd International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE)*, 2020, 1-6.
- [14] Lê Anh Tuấn, Bùi Minh Định, Phạm Văn Tuấn, “Nghiên cứu ảnh hưởng của số răng rãnh rôto đến hiệu suất và hệ số công suất ở chế độ xác lập động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, Vol. 18, No. 11.1, 2020, 11-15.
- [15] Thông tư số 39/2015/TT-BCT ngày 18/11/2015 của Bộ Công Thương về quy định hệ thống điện phân phối.