

TÍNH TOÁN ỨNG SUẤT, BIẾN DẠNG CỦA ROTOR ĐỘNG CƠ ĐỒNG BỘ NAM CHÂM VĨNH CỬU KHỞI ĐỘNG TRỰC TIẾP DƯỚI TÁC DỤNG CỦA LỰC ĐIỆN TỪ

Đinh Hải Lĩnh¹, Nguyễn Thị Lục²

^{1,2} Trường Đại học Lâm nghiệp

TÓM TẮT

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp có kết cấu rotor được đục lỗ để có thể lắp được các thanh nam châm vào bên trong rotor, việc này tạo nên các vùng cầu nối giữa các cực rotor sẽ có đặc tính cơ học yếu. Sự biến dạng của rotor cũng có thể làm thay đổi khe hở không khí giữa rotor và stator. Khe hở không khí thay đổi sẽ ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính làm việc cũng như hiệu suất của động cơ. Do vậy trong bài báo tác giả phân tích tính toán cơ học, điện từ một cách đồng thời cho vùng cầu nối của rotor động cơ. Ứng dụng phần mềm Matlab để tính toán chính xác ứng suất và biến dạng của cầu rotor và kết quả tính toán là tham số quan trọng cho việc tính toán thiết kế rotor về mặt điện từ của động cơ để rotor động cơ vừa đảm bảo độ bền cơ học vừa đảm bảo hiệu năng làm việc của động cơ điện.

Từ khóa: Biến dạng rotor, động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu, lực điện từ, ứng suất rotor.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp từ lưới điện (LSPMSM) là động cơ có các rãnh stator tương tự với dây quấn động cơ không đồng bộ, rotor với lồng sóc nhôm và nam châm vĩnh cửu gắn bên trong. Động cơ LSPMSM có thể khởi động trực tiếp khi nối với lưới điện mà không cần đến bộ điều khiển, có mômen cao, làm việc với tốc độ đồng bộ, hiệu suất cao. Do vậy động cơ được ứng dụng nhiều trong các tải như máy bơm, quạt gió, băng truyền.

Với cấu trúc của động cơ LSPMSM thì mọi sự biến dạng của rotor đều có thể làm thay đổi kích thước khe hở không khí giữa rotor và stator, làm ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính làm việc cũng như hiệu suất của động cơ. Với kết cấu rotor cần đục lỗ để đưa các thanh nam châm vào trong thì có xuất hiện vùng cầu nối giữa các cực. Vùng cầu nối có đặc tính cơ học yếu, có ảnh hưởng nhất định tới đặc tính làm việc của động cơ, do vậy cần thiết phải phân tích cơ học, điện từ một cách đồng thời cho vùng này.

Bài báo tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của của lực điện từ tới ứng suất và biến dạng của động cơ. Từ đó tạo cơ sở cho việc tối

ưu hóa động cơ khi tính đến các yếu tố ảnh hưởng từ biến dạng cơ học. Đồng thời đảm bảo động cơ thỏa mãn độ bền cơ khí khi hoạt động dưới các tải trọng khác nhau.

II. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu này được thực hiện theo cách sau:

- *Phương pháp nghiên cứu lý thuyết:* Sử dụng các tài liệu của các nhóm nghiên cứu trong và ngoài nước để tính thiết kế sơ bộ kích thước động cơ. Trên cơ sở các kích thước cơ bản của động cơ tính toán, phân tích ứng suất và biến dạng của lõi thép stato.

- *Phương pháp lập trình:* Viết chương trình tính số trên phần mềm Matlab giải bài toán về ứng suất và biến dạng. Kết quả tính toán sẽ cho biết kết cấu cơ học của động cơ đảm bảo được độ bền cơ học trong quá trình hoạt động hay không.

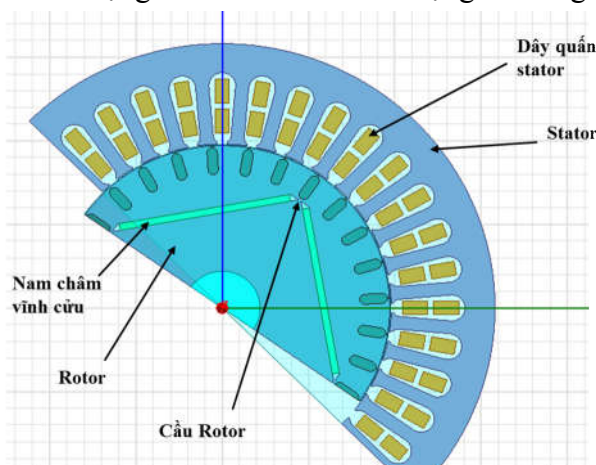
III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Giới thiệu chung về động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (LSPMSM)

Động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu có cấu tạo gồm hai phần chính là stato và rotor: stato được ghép lại từ các lá thép kỹ thuật điện, được chế tạo theo dạng cực từ lõi, trên cực có quấn dây. rotor được làm từ thép kỹ thuật điện

có xẻ rãnh để đặt lồng sóc nhôm và bên trong rotor được xẻ rãnh để đặt nam châm vĩnh cửu. Động cơ có quá trình khởi động hoàn toàn

giống động cơ không đồng bộ với lồng sóc nhôm nhưng lại làm việc với tốc độ đồng bộ như động cơ đồng bộ.



Hình 1. Hình ảnh mặt cắt 1/2 động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu

3.2. Thông số động cơ LSPMSM

Động cơ LSPMSM được sử dụng để tính

toán và mô phỏng có các thông số như trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số động cơ LSPMSM

Đại lượng	Giá trị	Đơn vị	Đại lượng	Giá trị	Đơn vị
Công suất	2,2	kw	Kích thước Rotor		
Tốc độ	1500	Vòng/phút	Đường kính ngoài rotor	97	mm
Kích thước Stator			Đường kính trục	22	mm
Đường kính ngoài stator	158	mm	Hệ số ép chặt lõi thép	0,95	
Đường kính trong stator	98	mm	Kích thước rãnh (hình ovan)		
Chiều dài tác dụng stator	116	mm	Độ mở miệng rãnh	0,5	mm
Chiều cao gông stator	8,2	mm	Đường kính rãnh	3	mm
Kích thước rãnh (hình quả lê)			Chiều cao miệng rãnh	0,6	mm
Độ mở miệng rãnh	2,8	mm	Chiều cao phần thẳng rãnh	5	mm
Đường kính nhỏ rãnh	5,2	mm	Số rãnh rotor	28	rãnh
Đường kính lớn rãnh	7,8	mm	Nam châm		
Chiều cao miệng rãnh	0,5	mm	Nam châm vĩnh cửu NdFeB 45		
Chiều cao phần thẳng rãnh	14,8	mm	Khoảng cách từ tâm rotor đến nam châm	28	mm
Diện tích nôm	10,6	mm ²	Khoảng cách cầu nối	1	mm
Vật liệu chế tạo lá thép stator, rotor: M270-35A, có ứng suất cho phép [σ]	450	MPa	Bề dày nam châm theo hướng từ hóa (L _m)	2	mm
Số rãnh stator	36		Chiều rộng nam châm (W _m)	50	mm
Hệ số ép chặt lõi thép	0,95	rãnh			

3.3. Xác định phân bố ứng suất và biến dạng

3.3.1. Các giả thiết khi tính toán

Vật liệu làm rotor động cơ là thép M270-35A, việc tính toán ứng suất và biến dạng của rotor động cơ có thể coi cấu trúc của mỗi cực rotor là một kết cấu cong hai đầu ngàm chịu lực hướng kính phân bố đều đối xứng. Như vậy đưa về bài toán tìm ứng suất, biến dạng cho thanh cong phẳng, khi đó trên mặt cắt ngang sẽ xuất hiện nhiều thành phần nội lực. Để giải được bài toán này ta sẽ áp dụng nguyên lý độc lập tác dụng: *Nếu trên một thanh đồng thời chịu tác dụng của nhiều lực thì ứng suất hay biến dạng trong thanh là tổng các ứng suất hay biến dạng do tác dụng riêng của từng lực gây ra trên thanh đó.*

Để áp dụng được nguyên lý độc lập tác dụng thì khi tính toán ta có giả thiết sau:

- Vật liệu làm việc trong giai đoạn đàn hồi (mối quan hệ ứng suất và biến dạng tỷ lệ bậc nhất);
- Biến dạng trong thanh cong được coi là nhỏ.

3.3.2. Xác định lực điện từ tác dụng lên rotor động cơ

Xác định lực điện từ hướng kính tác động lên bề mặt rotor: Áp dụng công thức tính lực hút từ trường tương tác giữa hai tấm phẳng song song ta có (Đặng Văn Đào và Lê Văn Doanh, 2003):

$$F_r = \frac{B_g^2 S_p}{\mu_0} \quad (N) \quad (1)$$

Lực hướng kính phân bố được xác định bởi:

$$q_r = \frac{F_r}{C_p} = \frac{B_g^2}{\mu_0} \quad (N/m^2) \quad (2)$$

Trong đó $B_g; C_p$ là cảm ứng từ tại khe hở không khí và chiều dài cung một cực của động cơ.

Xác định lực tiếp tuyến tác động lên rotor: Trong trường hợp lực tiếp tuyến tác động lên rotor chính là thành phần làm phát sinh mô men chính của động cơ. Coi lực tiếp tuyến phân bố đều trên toàn bộ bề mặt rotor khi đó lực tiếp tuyến được xác định bởi công thức (Đặng Văn Đào và Lê Văn Doanh, 2003):

$$F_t = \frac{T}{r_{out_ro}} \quad (N) \quad (3)$$

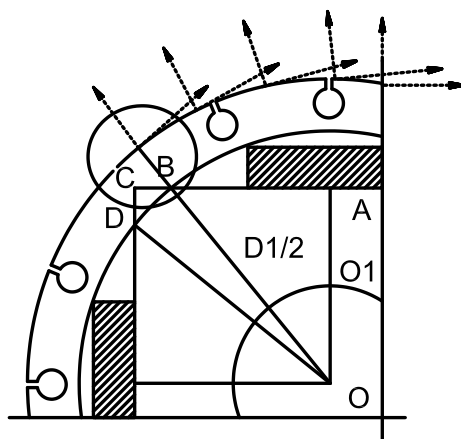
Lực tiếp tuyến phân bố được xác định bởi công thức (Đặng Văn Đào và Lê Văn Doanh, 2003):

$$q_t = \frac{F_t}{C_p} \quad (N/m^2) \quad (4)$$

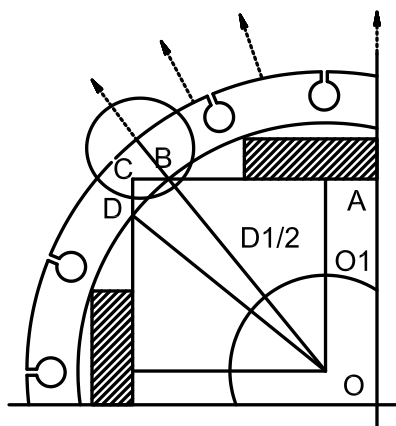
Trong đó T, r_{out_ro}, C_p lần lượt là mômen động cơ, bán kính và diện tích mặt ngoài rotor.

3.3.3. Xây dựng mô hình giải tích

Để đảm bảo động cơ thỏa mãn điều kiện bền cơ học, ứng xử cơ học của rotor phải nằm trong vùng có ứng xử tuyến tính của vật liệu. Ứng suất do tổng các ngoại lực gây ra trên rotor bằng tổng các ứng suất do từng thành phần gây ra trên rotor. Để đơn giản hóa mô hình tính toán, ta tiến hành tính ứng suất riêng rẽ cho từng thành phần lực. Mô hình tính toán và phân tích được miêu tả như trong hình 2:



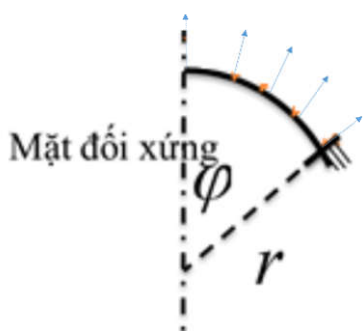
Hình 2. Mô hình cấu trúc rotor và phân bố ngoại lực tác động lên rotor



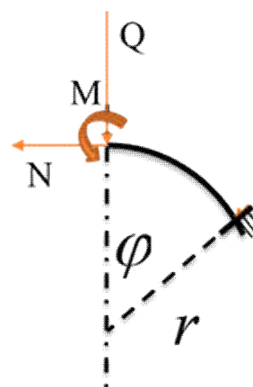
Hình 3. Thành phần lực hướng kính

Với mô hình này, ta nhận thấy tại vị trí mặt cắt đi qua điểm BO là vị trí có thiết diện chịu lực rotor là bé nhất, thiết diện mặt cắt nửa trước theo chiều kim đồng hồ lớn hơn nhiều thiết diện mặt cắt nửa sau kim đồng hồ. Do vậy có thể coi mặt cắt OB chính là một ngàm cứng

đối với phần kết cấu mặt cực AB. Coi cấu trúc của mỗi cực rotor là một kết cấu cong hai đầu ngàm chịu lực hướng kính phân bố đều đối xứng. Mô hình có thể được biểu diễn đơn giản hơn như hình 4.



Hình 4. Mô hình thay thế



Hình 5. Mô hình tương đương của mô hình thay thế

Mô hình tính toán là mô hình hai đầu ngàm đối xứng do vậy để đơn giản hóa bài toán trong quá trình tính toán ta mô hình hóa bài toán dưới dạng đối xứng 1/2. Trong mô hình này để đảm bảo tính tương đương của mô hình tại mặt cắt đối xứng ta đặt thêm 3 thành phần ngoại lực thay thế là N, Q, M như hình 5. Trong đó N là lực kéo (nén) có phương luôn tiếp tuyến với khung dây, Q là lực cắt có phương luôn hướng qua tâm, M là mô men uốn.

Gọi \bar{N}, \bar{M} là các lực suy rộng có độ lớn bằng 1 tại mặt cắt đối xứng.

Các thành phần lực tại mặt cắt bất kỳ hợp mặt phẳng đối xứng một góc phi do lực suy rộng \bar{N} là (Vũ Đình Lai, Nguyễn Xuân Lựu, Bùi Đình Nghi, 2002).

$$\begin{cases} \bar{N}_1 = \cos(\varphi) \\ \bar{Q}_1 = \sin(\varphi) \\ \bar{M}_1 = r(1 - \cos(\varphi)) \end{cases} \quad (5)$$

Do tải là lực phân bố hướng tâm có tính chất đối xứng nên lực thay thế Q tại mặt cắt đối xứng bằng 0.

Các thành phần lực tại mặt cắt bất kỳ hợp mặt phẳng đối xứng một góc phi do lực suy rộng \bar{M} là:

$$\begin{cases} \overline{N}_2 = 0 \\ \overline{Q}_2 = 0 \\ \overline{M}_2 = 1 \end{cases} \quad (6)$$

Các thành phần lực tại mặt cắt bất kỳ hợp mặt phẳng đối xứng một góc φ do lực phân bố q là:

$$\begin{cases} N_p = -2qr \left(\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right)^2 \\ Q_p = qr \sin(\varphi) \\ M_p = 2qr^2 \left(\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right)^2 \end{cases} \quad (7)$$

Hệ phương trình chính tắc:

$$\begin{cases} \delta_{11}N + \delta_{12}M + \Delta_{1p} = 0 \\ \delta_{21}N + \delta_{22}M + \Delta_{2p} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó các thành phần $\delta_{i,j}, \Delta_{i,p}$ được tính qua các công thức của Morh.

$$\delta_{11} = \int_0^\Phi \frac{\overline{N}_1 * \overline{N}_1}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q}_1 * \overline{Q}_1}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M}_1 * \overline{M}_1}{EJ} d\varphi \quad (9)$$

Tính tích phân ta thu được:

Tương tự ta có:

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \int_0^\Phi \frac{\overline{N}_1 * \overline{N}_2}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q}_1 * \overline{Q}_2}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M}_1 * \overline{M}_2}{EJ} d\varphi \quad (14)$$

$$\rightarrow \delta_{12} = \delta_{21} = -\frac{r(-\Phi + \sin(\Phi))}{EJ} \quad (15)$$

$$\delta_{22} = \int_0^\Phi \frac{\overline{N}_2 * \overline{N}_2}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q}_2 * \overline{Q}_2}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M}_2 * \overline{M}_2}{EJ} d\varphi \quad (16)$$

$$\rightarrow \delta_{22} = \frac{\Phi}{EJ} \quad (17)$$

$$\Delta_{1p} = \int_0^\Phi \frac{\overline{N}_1 * N_p}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q}_1 * Q_p}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M}_1 * M_p}{EJ} d\varphi \quad (18)$$

$$\rightarrow \Delta_{1p} = -\frac{1}{4} \frac{qr(4\sin(\Phi) - \sin(2\Phi) - 2\Phi)}{EA} - \frac{1}{2} \frac{\eta qr(\cos(\Phi) - \Phi)}{GA} - \frac{1}{4} \frac{qr^3(8\sin(\Phi) - \sin(2\Phi) - 6\Phi)}{EJ}$$

$$\Delta_{2p} = \int_0^\Phi \frac{\overline{N}_2 * N_p}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q}_2 * Q_p}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M}_2 * M_p}{EJ} d\varphi \quad (19)$$

$$\rightarrow \delta_{2p} = -\frac{qr^2 \left(2 \cos\left(\frac{1}{2}\Phi\right) \sin\left(\frac{1}{2}\Phi\right) - \Phi \right)}{EJ} \quad (20)$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{2} \frac{\cos(\Phi) \sin(\Phi) + \Phi}{EA} - \frac{1}{2} \frac{\eta(\cos(\Phi) \sin(\Phi) - \Phi)}{GA} + \frac{1}{2} \frac{r^2(3\Phi - 4\sin(\Phi) + \cos(\Phi) \sin(\Phi))}{EJ} \quad (10)$$

Trong đó:

- E mô đun đàn hồi ứng với vật liệu:

$$E = 207 \cdot 10^9$$

- η hệ số poisson ứng với vật liệu:

$$\eta = 0,34$$

- G mô đun đàn hồi trượt ứng với vật liệu:

$$G = \frac{E}{2(1+\eta)} = 77,24 \cdot 10^9 \quad (11)$$

- F diện tích mặt cắt tại ngàm (ứng với vị trí có tiết diện nhỏ nhất):

$$A = \frac{D_{out_ro} - D_1}{2} l_{ro} \quad (12)$$

- J momen quán tính mặt cắt ứng với trục trung hòa:

$$J = \frac{bh^3}{12} = \frac{l_{ro} \left(\frac{D_{out_ro} - D_1}{2} \right)^3}{12} \quad (13)$$

Từ hệ phương trình chính tắc ta có:

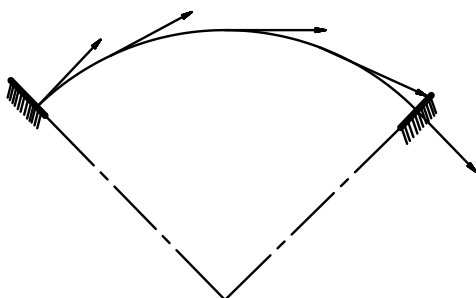
$$\begin{cases} M = \frac{(\Delta_{2p}\delta_{11} - \Delta_{1p}\delta_{21})}{\delta_{21}\delta_{12} - \delta_{11}\delta_{22}} \\ N = -\frac{(M\delta_{21} + \Delta_{1p})}{\delta_{11}} \end{cases} \quad (21)$$

Ta có được các thành phần lực tại các mặt cắt bất kỳ:

$$\begin{cases} N_\varphi = \bar{N}_1 * N + \bar{N}_2 * M + N_p \\ Q_\varphi = \bar{Q}_1 * N + \bar{Q}_2 * M + Q_p \\ M_\varphi = \bar{M}_1 * N + \bar{M}_2 * M + M_p \end{cases} \quad (22)$$

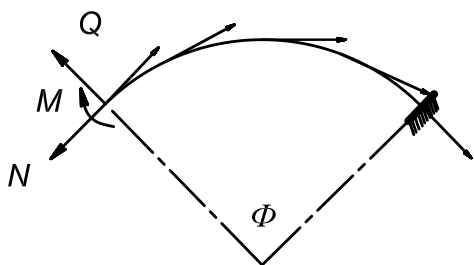
3.3.3.2. Tác động của lực theo phương tiếp tuyến

Kết cấu cong hai đầu ngàm chịu lực tiếp tuyến phân bố đều đối xứng. Mô hình có thể được biểu diễn lại như hình 6.



Hình 6. Mô hình lực tiếp tuyến

Trong mô hình này để đảm bảo tính tương đương của mô hình tại mặt cắt đối xứng ta đặt thêm 3 thành phần ngoại lực thay thế là N, Q, M. Trong đó N là lực kéo (nén) có phương luôn tiếp tuyến với khung dây, Q là lực cắt có phương luôn hướng qua tâm, M là mô men uốn.



Hình 7. Mô hình thay thế tương đương

Gọi $\bar{N}, \bar{Q}, \bar{M}$ là các lực suy rộng có độ lớn

bằng 1 tại mặt cắt đối xứng.

Các thành phần lực tại mặt cắt bất kỳ hợp mặt phẳng ngàm một góc φ do lực suy rộng \bar{N} là:

$$\begin{cases} \bar{N}_1 = \cos(\varphi) \\ \bar{Q}_1 = \sin(\varphi) \\ \bar{M}_1 = r(1 - \cos(\varphi)) \end{cases} \quad (23)$$

Các thành phần lực tại mặt cắt bất kỳ hợp mặt phẳng ngàm một góc φ do lực suy rộng \bar{Q} là:

$$\begin{cases} \bar{N}_2 = \sin(\varphi) \\ \bar{Q}_2 = \cos(\varphi) \\ \bar{M}_2 = r \sin(\varphi) \end{cases} \quad (24)$$

Các thành phần lực tại mặt cắt bất kỳ hợp mặt phẳng ngàm một góc φ do lực suy rộng \bar{M} là:

$$\begin{cases} \bar{N}_3 = 0 \\ \bar{Q}_3 = 0 \\ \bar{M}_3 = 1 \end{cases} \quad (25)$$

Các thành phần lực tại mặt cắt bất kỳ hợp mặt phẳng đối xứng một góc φ do lực phân bố q là:

$$\begin{cases} N_p = qr \sin(\varphi) \\ Q_p = -2qr \left(\sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right)^2 \\ M_p = qr^2 (\varphi - \sin(\varphi)) \end{cases} \quad (26)$$

Từ hệ phương trình chính tắc:

$$\begin{cases} \delta_{11}N + \delta_{12}Q + \delta_{13}M + \Delta_{1p} = 0 \\ \delta_{21}N + \delta_{22}Q + \delta_{23}M + \Delta_{2p} = 0 \\ \delta_{31}N + \delta_{32}Q + \delta_{33}M + \Delta_{3p} = 0 \end{cases} \quad (27)$$

Trong đó các thành phần $\delta_{i,j}, \Delta_{i,p}$ được tính qua các công thức của Morh:

$$\delta_{11} = \int_0^\varphi \frac{\bar{N}_1 * \bar{N}_1}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\varphi \frac{\bar{Q}_1 * \bar{Q}_1}{GA} d\varphi + \int_0^\varphi \frac{\bar{M}_1 * \bar{M}_1}{EJ} d\varphi$$

$$\begin{aligned} \delta_{12} = \delta_{21} &= \int_0^\Phi \frac{\overline{N_1} * \overline{N_2}}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q_1} * \overline{Q_2}}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M_1} * \overline{M_2}}{EJ} d\varphi \\ \delta_{13} = \delta_{31} &= \int_0^\Phi \frac{\overline{N_1} * \overline{N_3}}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q_1} * \overline{Q_3}}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M_1} * \overline{M_3}}{EJ} d\varphi \\ \delta_{23} = \delta_{32} &= \int_0^\Phi \frac{\overline{N_2} * \overline{N_3}}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q_2} * \overline{Q_3}}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M_2} * \overline{M_3}}{EJ} d\varphi \\ \delta_{22} &= \int_0^\Phi \frac{\overline{N_2} * \overline{N_2}}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q_2} * \overline{Q_2}}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M_2} * \overline{M_2}}{EJ} d\varphi \\ \delta_{33} &= \int_0^\Phi \frac{\overline{N_3} * \overline{N_3}}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q_3} * \overline{Q_3}}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M_3} * \overline{M_3}}{EJ} d\varphi \\ \Delta_{1p} &= \int_0^\Phi \frac{\overline{N_1} * N_p}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q_1} * Q_p}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M_1} * M_p}{EJ} d\varphi \\ \Delta_{2p} &= \int_0^\Phi \frac{\overline{N_2} * N_p}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q_2} * Q_p}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M_2} * M_p}{EJ} d\varphi \\ \Delta_{3p} &= \int_0^\Phi \frac{\overline{N_3} * N_p}{EA} d\varphi + \eta \int_0^\Phi \frac{\overline{Q_3} * Q_p}{GA} d\varphi + \int_0^\Phi \frac{\overline{M_3} * M_p}{EJ} d\varphi \end{aligned}$$

Ta có được các thành phần lực tại các mặt cắt bất kỳ:

$$\begin{cases} N_\varphi = \overline{N_1} * N + \overline{N_2} * M + N_p \\ Q_\varphi = \overline{Q_1} * N + \overline{Q_2} * M + Q_p \\ M_\varphi = \overline{M_1} * N + \overline{M_2} * M + M_p \end{cases} \quad (28)$$

3.3.4. Ứng suất được xác định theo công thức (Thái Thế Hùng, 2009)

$$\begin{cases} \sigma_{keo} = \frac{N_{keo}}{A} \\ \sigma_{uon} = \frac{M}{Aa} \cdot \left(1 - \frac{r_{th}}{y_2}\right) \\ \tau_{cat} = \frac{6Q}{bh^3} \cdot \left(\frac{h^2}{4} - y_1^2\right) \end{cases} \quad (29)$$

Trong đó:

$$r_{th} = \frac{h}{\ln\left(\frac{r_0 + \frac{h}{2}}{r_0 - \frac{h}{2}}\right)}$$

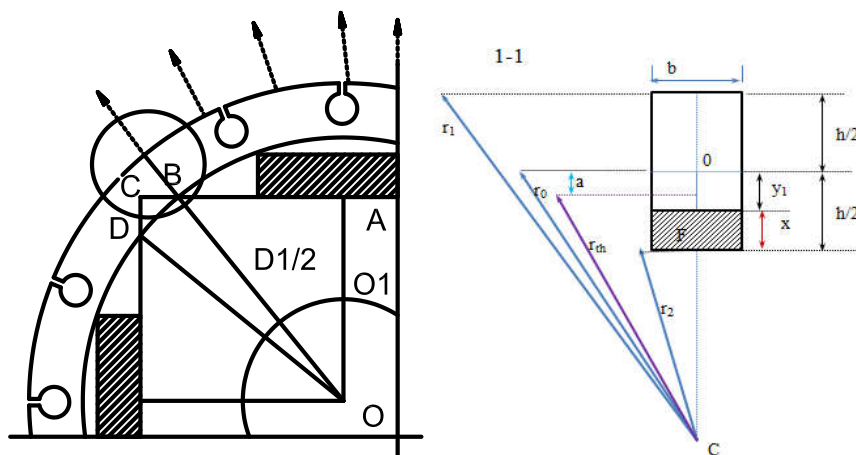
$$y_1 = \frac{h}{2} - x; y_2 = r_2 + x;$$

$$a = r_0 - r_{th};$$

$$h = \frac{D_{out_ro} - D_1}{2};$$

$$A = \frac{D_{out_ro} - D_1}{2} l_{ro}$$

Mặt cắt của tiết diện cần tính ứng suất được biểu diễn như trong hình 8:



Hình 8. Mặt cắt xác định các kích thước để tính ứng suất

Ứng suất tương đương (tính theo thuyết bền thế năng biến đổi hình dáng cực đại) được xác định bởi (Đặng Việt Cường, 2006):

$$\sigma_{td} = \sqrt{(\sigma_{keo} + \sigma_{uon})^2 + 3\tau_{cat}^2} \leq [\sigma] \quad (30)$$

3.3.5. Biến dạng tại vị trí bất kỳ được xác định bởi biểu thức

$$\begin{cases} \delta_N = \delta_{11}^* N + \delta_{12}^* Q + \delta_{13}^* M + \Delta_{1p}^* \\ \delta_Q = \delta_{21}^* N + \delta_{22}^* Q + \delta_{23}^* M + \Delta_{2p}^* \\ \delta_\varphi = \delta_{31}^* N + \delta_{32}^* Q + \delta_{33}^* M + \Delta_{3p}^* \end{cases} \quad (31)$$

3.4. Kết quả tính toán ứng suất và chuyển vị sử dụng Matlab

Với các thông số động cơ như trong bảng 1, lập trình matlab giải các hệ phương trình (30), (31) xác định các thành phần nội lực ta có kết quả như trong bảng 2.

Bảng 2. Kết quả tính toán ứng suất và chuyển vị lá thép rotor động cơ 2,2 kW

Công suất động cơ (W)	Thông số đầu vào							Thông số đầu ra			
	Số cực	Đường kính ngoài rotor D _{out_ro} (mm)	Đường kính ngoài tiếp nam châm D ₁ (mm)	Chiều dài rotor l _{ro} (mm)	Chiều dài nam châm W _m (mm)	Góc cực φ (rad)	Mật độ từ cảm khe hở không khí B _g (T)	Lực hướng tâm F _n (N/m)	Lực tiếp tuyến F _t (N/m)	Ứng suất lớn nhất (Mpa)	Biến dạng lớn nhất (mm)
2200	2	87	72	130	33	0,476	0,481	23964,236	1943,206	0,687	1,46E-4
	4	97	78,5	116	50	0,691	0,481	21383,552	1077,828	1,128	2,76E-4
	6	108	84	116	39	0,483	0,563	29259,366	1243,463	0,580	1,59E-4
	8	118	92	130	23	0,253	0,343	12170,873	1990,387	0,060	1,64E-5

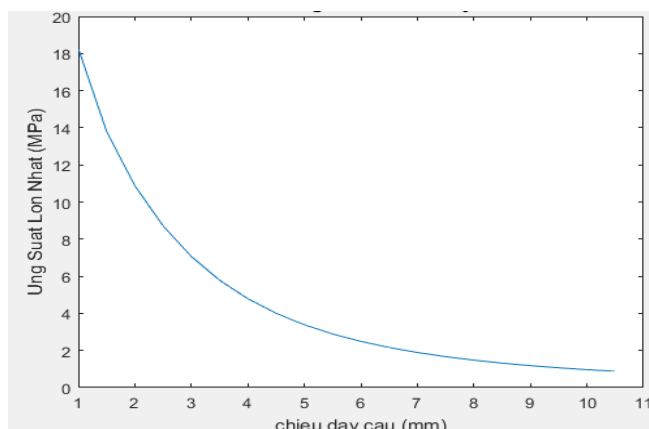
Kết quả tính toán cho thấy giá trị ứng suất lớn nhất đạt được tại mặt dưới của ngàm (hay phần cầu nổi) các kết quả phân tích chỉ ra rotor động cơ hoàn toàn thỏa mãn các điều kiện bền $[\sigma] = 450 \text{ MPa}$ (theo bảng 1) trong quá trình vận hành. Giá trị biến dạng lớn nhất tại mặt

phẳng đối xứng, các giá trị ứng suất là nhỏ và không làm ảnh hưởng đáng kể đến khe hở không khí cũng như cấu trúc rotor.

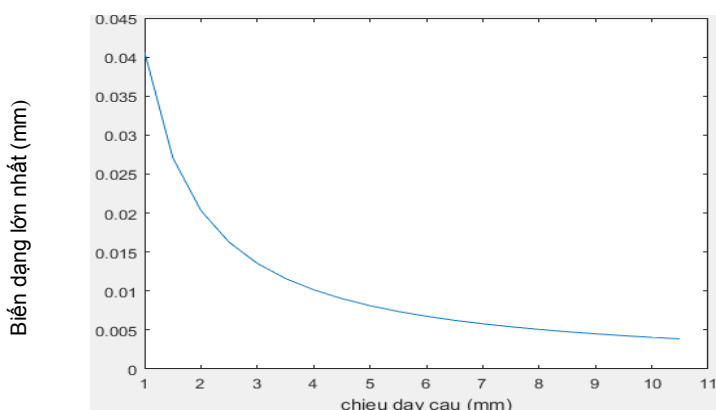
Dựa vào cơ sở tính toán ở trên, sử dụng Matlab xác định được mối quan hệ giữa chiều dày của phần cầu nổi lá thép rotor với ứng suất

và biến dạng như hình 9, 10. Với giá trị cầu biến thiên từ 1 mm đến 10 mm ứng suất phân

cầu nối của lá thép cũng luôn thỏa mãn điều kiện bền $[\sigma] = 450 \text{ MPa}$.



Hình 9. Đặc tính mối quan hệ giữa ứng suất phân cầu nối với chiều dày cầu



Hình 10. Đặc tính mối quan hệ biến dạng với chiều dày cầu

Để biến dạng nhỏ hơn 0,03 mm thì chiều dày tối thiểu của cầu phải lớn hơn 2 mm. Nếu chiều dày cầu 1 mm thì có biến dạng lớn nhất là 0,04 mm. Nếu biến dạng quá lớn sẽ ảnh hưởng đến đặc tính làm việc của động cơ. Như vậy với kích thước cầu 1mm thì phần cầu nối của rotor động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp hoàn toàn đảm bảo độ bền cơ học.

IV. KẾT LUẬN

Kết quả tính toán cho thấy với các thông số đầu vào như tính toán sơ bộ ban đầu của động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu khởi động trực tiếp từ lưới hoàn toàn đảm bảo độ bền cơ học trong quá trình vận hành.

Việc tối ưu về mặt cơ học là cơ sở để tính toán các kích thước lá thép rotor động cơ. Khi kích thước phần cầu nối là 1mm thì có thể tăng được kích thước nam châm vĩnh cửu và cải

thiện được đặc tính làm việc của động cơ. Kết quả tính toán có thể coi là kích thước sơ bộ ban đầu của động cơ và khi thiết kế chế tạo động cơ chỉ cần tính toán về mặt điện từ để nhằm cải thiện đặc tính làm việc, nâng cao hiệu suất động cơ.

Cơ sở dữ liệu tính toán trong bài báo còn có thể dùng để tính toán ứng suất và biến dạng cho các động cơ cùng loại có công suất cao hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Đặng Văn Đào, Lê Văn Doanh (2003). *Khi cụ điện*. NXB. Giáo dục.
2. Vũ Đình Lai, Nguyễn Xuân Lựu, Bùi Đình Nghi (2002). *Sức bền vật liệu*. NXB. Giao thông vận tải.
3. Thái Thế Hùng (2009). *Sách Sức bền vật liệu*. NXB. Khoa học - Kỹ thuật.
4. Đặng Việt Cường (2006). *Sách tuyển tập các bài tập giải môn sức bền vật liệu*, tập 1. NXB. Khoa học - Kỹ thuật.
5. Nguyễn Phùng Quang (2005). *Matlab & simulink*. NXB. Khoa học - Kỹ thuật.

CALCULATION STRESS AND DEFORMATION OF DIRECT START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR BY THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC FORCE

Dinh Hai Linh¹, Nguyen Thi Luc²

^{1,2}*Vietnam National University of Forestry*

SUMMARY

The line start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM) is a hybrid motor with aluminum squirrel cage rotor and permanent magnet in rotor slots. Deformation of the rotor surface can change the air gap between the rotor and the stator. It has a significant effect on the torque and efficiency performance. Particularly with LSPMSM rotor structure, there are additional grooves that can be fitted with magnetic bars, which form bridges between poles with weak mechanical properties. The region has a big influence on the performance characteristics of the motor, so in this paper the author simultaneously analyzes the electromagnetic and electromagnetic fields for the bridge. A Matlab program is used to calculate the tensile strength, yield strength of bridge rotor and the result is an important parameter for calculating the mechanical structure rotor design with limited deformation and vibration.

Keywords: Direct start permanent magnet synchronous motor, tensile strength of core rotor, yield strength of core rotor.

Ngày nhận bài : 28/4/2017

Ngày phản biện : 26/5/2017

Ngày quyết định đăng : 15/7/2017