

ẢNH HƯỞNG CỦA SÓNG HÀI DÒNG ĐIỆN TRONG ĐỘNG CƠ TỪ TRỞ

INFLUENCE OF HARMONIC CURRENT IN SWITCHED RELUCTANCE MOTORS

Phí Hoàng Nhã^{1,2}, Đào Quang Thủy³, Nguyễn Sơn Tùng^{1,2}, Phạm Hùng Phi¹

¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; phihoangnha@gmail.com

²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội;

³Bộ Khoa học và Công nghệ

Tóm tắt - Động cơ từ trở (SRM) là động cơ có nhiều ưu điểm nhưng nhiều ứng dụng của nó bị hạn chế bởi tiếng ồn. Một trong những nguồn gốc của tiếng ồn là do mô-men đập mạch. Mô-men đập mạch trong SRM không chỉ do cấu trúc của động cơ sinh ra, mà còn tạo ra bởi sóng hài dòng điện. Dòng điện có thành phần sóng hài bậc cao gây ảnh hưởng lớn đến mô-men và tổn hao trong động cơ. Vì vậy, bài báo tiến hành phân tích, đánh giá những ảnh hưởng của sóng hài dòng điện trong động cơ từ trở. Đồng thời, nhóm tác giả đề xuất giải pháp mới là sử dụng vật liệu vô định hình thay thế thép silic chế tạo stator nhằm cải thiện mô-men đập mạch và tổn hao. Kết quả bước đầu cho thấy tổn hao được giảm đáng kể và hạn chế được mô-men đập mạch trong động cơ.

Từ khóa - động cơ từ trở; sóng hài dòng điện; vật liệu vô định hình; SRM, mô-men đập mạch.

1. Giới thiệu

Động cơ từ trở (SRM) có cấu tạo đơn giản, tốc độ hoạt động lớn, độ bền cao trong môi trường làm việc phức tạp và chi phí chế tạo thấp. Mặc dù có những ưu điểm đáng kể trên, nhưng vẫn còn tồn tại một vấn đề làm hạn chế các ứng dụng của SRM, đó chính là tiếng ồn lớn. Có nhiều nguyên nhân gây ra tiếng ồn trong động cơ từ trở, một trong những nguyên nhân đó là do mô-men đập mạch (gọi là sóng hài mô-men). Mô-men đập mạch tồn tại trong động cơ từ trở chủ yếu do cấu tạo của động cơ (cả rotor và stator đều có cấu tạo cực lồi). Tuy nhiên, dòng điện có thành phần sóng hài bậc cao (bậc 3, 5, 7, ...) cũng là nguyên nhân gây ra mô-men đập mạch. Một số công trình nghiên cứu đã chỉ ra ảnh hưởng của sóng hài tới nguồn hay trong các thiết bị điện nói chung [1], [2]. Công trình [3] đưa ra phương pháp điều khiển phản hồi vòng kín sóng hài mô-men để giảm rung/ồn trong động cơ. Hơn nữa, tổn hao sắt do dòng điện xoáy trong lá thép lồi sắt là một vấn đề lớn, ngay cả trong trường hợp lõi có cấu tạo đơn giản [4]. Hiện tượng này thậm chí phức tạp hơn trong trường hợp dòng điện có thành phần sóng hài bậc cao.

Trong SRM, dòng điện và điện áp khi qua bộ chuyển mạch là một chiều, nên dạng sóng điện áp và dòng điện có dạng xung chữ nhật trong điều kiện lý tưởng. Tuy nhiên, trong thực tế, dòng điện qua bộ chuyển mạch luôn chứa thành phần sin và sóng hài bậc cao. Sự ảnh hưởng này là không thể bỏ qua. Vì vậy, bài báo tiến hành phân tích, đánh giá những ảnh hưởng của sóng hài dòng điện trong động cơ từ trở, tổn hao do dòng điện xoáy. Từ đó, tác giả đề xuất phương án nhằm hạn chế ảnh hưởng của sóng hài dòng điện, giảm sóng hài mô-men trong động cơ từ trở.

2. Ảnh hưởng của sóng hài dòng điện trong động cơ từ trở

2.1. Dạng sóng dòng điện trong động cơ từ trở

Các phương pháp tính toán, phân tích trình bày trước

Abstract - Switched reluctance motor (SRM) has many advantages but its applications are limited by the noise. One of the causes of this noise is the torque ripple which is caused not only by the structure of the motor but also by the harmonic current. The current has high harmonic component that greatly affects torque and loss in the motor. Therefore, in this article the influence of harmonic current in the switched reluctance motor will be analyzed and evaluated. At the same time, new solution using amorphous materials will be discussed to decrease the torque ripple and reduce the loss. The initial results show that the loss is significantly reduced and the torque ripple is limited.

Key words - switched reluctance motor; harmonic current; amorphous materials; SRM; torque ripple.

đây được giới hạn với dạng sóng dòng điện hình sin lý tưởng. Năm 1984, Venkatraman cho thấy những tổn hao được tính bằng cách sử dụng phân tích chuỗi Fourier. Venkatraman giới hạn những phân tích của mình cho dạng sóng dòng điện hình chữ nhật, nhưng tất nhiên, phương pháp phân tích Fourier có thể được áp dụng cho bất kỳ dạng sóng dòng điện nào. Hình 1 biểu diễn dạng sóng dòng điện không chứa thành phần sóng hài (xung chữ nhật) và dạng sóng dòng điện chứa thành phần sóng hài. Theo chuỗi Fourier, dòng điện $i(t)$ với chu kỳ T_0 và tần số cơ bản

$f_0 = \frac{1}{T_0}$ được biểu diễn như sau:

$$i(t) = I_{DC} + \sum_{k=1}^{\infty} \left[\hat{I}_k' \cos(k\omega t) + \hat{I}_k'' \sin(k\omega t) \right] \quad (1)$$

Trong đó: k là bậc của sóng hài dòng điện.

$$I_{DC} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} i(t) \cos(\omega t) dt$$

$$\hat{I}_k' = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} i(t) \cos(k\omega t) dt \quad k=1, 2, \dots$$

$$\hat{I}_k'' = \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} i(t) \sin(k\omega t) dt \quad k=1, 2, \dots$$

Tín hiệu dòng điện $i(t)$ cũng có thể được biểu diễn dưới dạng các sóng hình sin:

$$i(t) = I_{DC} + \sum_{k=1}^{\infty} \hat{I}_k \sin(k\omega t + \beta_k) \quad (2)$$

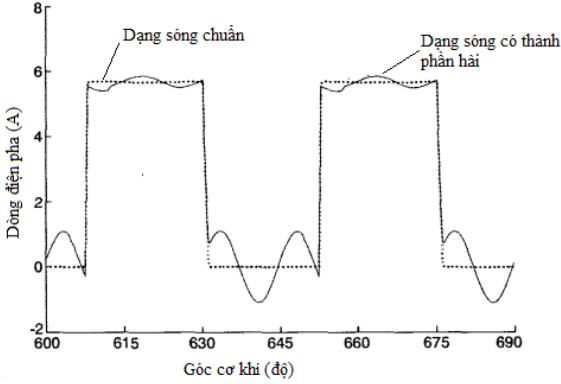
$$\text{với } \hat{I}_k = \sqrt{\hat{I}_k'^2 + \hat{I}_k''^2} \quad \text{và } \beta_k = \arctan \left(\frac{\hat{I}_k'}{\hat{I}_k''} \right)$$

Theo đó, dòng điện định mức:

$$I = I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} i^2(t) dt} \quad (3)$$

Kết hợp (2) và (3), dòng điện được biểu diễn:

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \left[I_{DC} + \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(k\omega t + \beta_k) \right]^2 dt} \\ &= \sqrt{I_{DC}^2 + \frac{I_1^2}{2} + \frac{I_2^2}{2} + \dots} = \sqrt{I_{DC}^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots} \quad (4) \\ &= \sqrt{I_{DC}^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \end{aligned}$$



Hình 1. Dạng sóng dòng điện chuẩn và khi có thành phần sóng hài

2.2. Ảnh hưởng của sóng hài dòng điện trong động cơ từ trở

Điện áp không sin cung cấp cho máy điện nói chung có thể gây ra hiện tượng phát nóng, mô-men đập mạch, hoặc tiếng ồn. Trong điều kiện các ứng dụng là tuyến tính, tốc độ động cơ được điều chỉnh từ biên tần có thể sinh ra các điện áp bị biến dạng lớn.

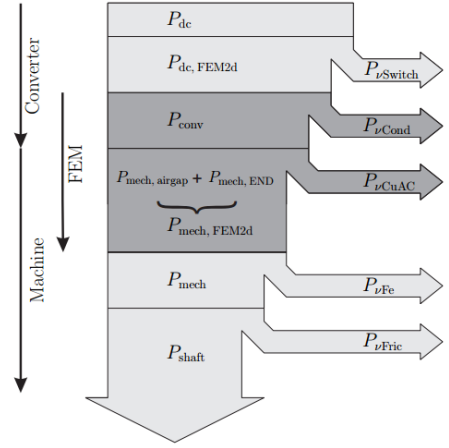
Sự quá nhiệt trong rotor trở nên nghiêm trọng hơn khi điện áp bị biến dạng lớn. Tổn hao lõi và tổn hao phụ trong máy điện phụ thuộc vào phổ tần số của điện áp cung cấp. Tổn hao này tăng lên khi động cơ được cung cấp từ biên tần có tần số sóng hài bậc cao. Nhiệt độ làm việc của động cơ tăng sẽ làm giảm tuổi thọ động cơ. Động cơ làm việc từng pha một như SRM là những động cơ bị ảnh hưởng nhiều nhất. Nhiệt độ tăng không đồng đều trong động cơ, các điểm phát nóng xuất hiện gần dây dẫn trong phần lõi sắt. Nếu sóng hài thay đổi theo thời gian, động cơ có thể chịu mức độ biến dạng đỉnh cao hơn mà không làm tăng nhiệt độ tại chỗ. Điều này có thể được giải thích là bởi vì nhiệt độ động cơ có thời gian tăng chậm hơn nhiều so với chu kỳ của sự thay đổi sóng hài. Connors [5] nhấn mạnh rằng tổn thất sóng hài cũng phụ thuộc vào đặc tính của động cơ. Các trở kháng tần của động cơ sẽ tăng tuyến tính với tần số sóng hài.

Mô-men đập mạch được tạo ra bởi sự tương tác giữa từ thông khe khí và từ thông sinh ra do sóng hài dòng điện trong rotor. Đối với động cơ có điều chỉnh tốc độ, phân tích sự cộng hưởng cơ học là cần thiết để tránh thiệt hại do mô-men đập mạch. Tài liệu tham khảo [6-8] kết luận rằng tiếng ồn âm thanh được tạo ra bởi sự khác biệt tần số sóng hài theo thời gian. Do đó, tần số sóng hài cao không thể nghe được cũng có thể gây ra tiếng ồn âm thanh.

3. Tổn hao dòng điện xoáy trong động cơ từ trở

Hình 2 minh họa dòng công suất trong hệ thống động cơ từ trở và danh sách các nguồn tổn hao. Mô phỏng phần tử hữu hạn bao gồm cả tổn hao của bộ biến đổi P_{vCond} và tổn hao đồng của cuộn dây P_{vCuAC} . Trong đó, P_{dc} là công suất đầu vào; P_{conv} là công suất qua bộ biến đổi; P_{mech} là công suất cơ đầu ra; P_{shaft} là công suất ra trên trục. $P_{vSwitch}$ là tổn hao bộ chuyển mạch; P_{vCond} là tổn hao dẫn; P_{vCuAC} là tổn hao đồng trên dây quấn; P_{vFe} là tổn hao sắt; P_{vFric} là tổn hao phụ.

Trong các loại tổn hao trên, dòng điện hài bậc cao đều có ảnh hưởng gián tiếp. Sóng hài dòng điện trong các bộ chuyển mạch gây ra các sai lệch điện áp, làm méo điện áp. Sự ảnh hưởng này gây ra tổn hao trong các bộ chuyển mạch, $P_{vSwitch}$. Tuy nhiên, tổn hao do dòng điện hài gây ra, mặc dù làm ảnh hưởng đến chất lượng của bộ chuyển đổi, nhưng khá nhỏ so với tổng hao trong động cơ từ trở.



Hình 2. Giảm đồ năng lượng và tổn hao trong động cơ

Tổn hao đồng P_{vCuAC} bao gồm tổn hao P_{vCuDC} và tổn hao do dòng điện xoáy $P_{vCuEddy}$. Loại thứ hai bao gồm tất cả tổn hao do dòng điện xoáy trong cuộn dây. Giá trị trung bình của tổng tổn hao đồng P_{vCuAC} chuyển đổi trong một chu kỳ điện là sự chênh lệch của công suất đầu ra P_{conv} và công suất cơ $P_{mech, FEM2d}$:

$$P_{vCuAC} = P_{conv} - P_{mech, FEM2d} \quad (5)$$

Tổng tổn hao một chiều được tính bằng cách nhân bình phương giá trị dòng điện hiệu dụng với điện trở của pha R_{ph} :

$$P_{vCuDC} = \sum_{j=1}^{N_{ph}} [I_{phj}^2 \cdot R_{ph}] \quad (6)$$

Mặt khác,

$$R_{ph} = R_{FEM2d} + R_{CoilEnd} + R_{wiring} = R_{FEM2d} + R_{END} \quad (7)$$

Tổn hao một chiều được chia thành các tổn hao trong miền mô phỏng 2d:

$$P_{vCuDC, FEM2d} = \sum_{j=1}^{N_{ph}} [I_{phj}^2 \cdot R_{FEM2d}] \quad (8)$$

Và tổn hao một chiều trong vòng dây cuối:

$$P_{vCuDC, END} = \sum_{j=1}^{N_{ph}} [I_{phj}^2 \cdot R_{END}] \quad (9)$$

Tổn hao dòng điện xoáy có thể được tách ra bằng cách trừ các tổn hao một chiều từ tổng tổn hao:

$$P_{vCuEddy} = P_{vCuAC} - P_{vCuDC} \quad (10)$$

Tổn hao đồng do dòng điện xoáy trở nên phức tạp khi dòng điện chạy trong dây quấn tồn tại thành phần sóng hài bậc cao. Sự gia nhiệt trong dây quấn ở các cực tăng lên, tổn hao do dòng điện xoáy khi đó cũng tăng lên.

Dòng điện xoáy và sóng hài dòng điện thể hiện sự ảnh hưởng rõ rệt nhất trong tổn hao lõi sắt. Có thể thấy rằng, đây là vấn đề tồn tại của máy điện nói chung, không chỉ trong động cơ từ trở. Việc tính toán tổn hao sắt trong các lá thép của động cơ từ trở dựa trên công thức thực nghiệm có nguồn gốc trong các phương trình được Steinmetz đề xuất vào năm 1890. Sau đó, một số phương trình mở rộng của Steinmetz được đề xuất. Phương trình chính được tóm tắt ngắn gọn như sau:

$$P_{Fe} = k \cdot f^{\alpha} \cdot B^{\beta} \quad (11)$$

Phương trình (11) thường được trích dẫn như phương trình của Steinmetz. Nó được định nghĩa khi tần số f là hình sin lý tưởng và tính toán tổn thất điện năng trung bình theo thời gian. Bộ ba tham số k , α , β được gọi là các tham số Steinmetz và có thể tìm thấy trong bảng dữ liệu của nhà sản xuất vật liệu.

Như vậy, tổn hao sắt trong động cơ từ trở phụ thuộc lớn vào vật liệu chế tạo và các thông số được nhà sản xuất công bố. Hơn nữa, tổn hao sắt vật liệu nói chung có một phần nguồn gốc không nhỏ do dòng điện xoáy (dòng Foucault) chạy trong các lá thép tạo ra. Lõi thép trong trường xoay chiều sẽ sinh ra các dòng điện xoáy gây tổn thất năng lượng và tỏa nhiệt.

Trong động cơ từ trở, nếu dòng điện và điện áp có dạng hình sin chuẩn thì khi qua bộ chuyển đổi, trong SRM không có sự tồn tại của từ trường xoay chiều. Khi đó tổn hao dòng Foucault bằng 0. Tuy nhiên, dòng điện luôn tồn tại thành phần sóng hài (chứa thành phần xoay chiều hình sin) như phương trình (1), nên trong lõi thép sinh ra tổn hao dòng điện xoáy. Mặc dù sự ảnh hưởng này chưa lớn, nhưng là vấn đề không thể bỏ qua [9].

Trong công trình nghiên cứu mới [10], Vasyl Tkachuk và cộng sự đã chỉ ra tổn thất trong thép là tổn thất từ trễ và tổn hao dòng điện xoáy. Trong SRM, từ thông rotor cơ bản có biên độ xung trong các mạch từ riêng biệt, thay đổi từ giá trị cực đại tới cực tiểu mà không có sự thay đổi cực tính. Bởi vì tính đơn cực này làm vòng từ trễ rất hẹp và tổn hao từ trễ thực tế được bỏ qua. Điều đó có nghĩa là tổn thất nói chung trong lõi thép là kết quả của dòng điện xoáy. Sự thay đổi của từ thông tạo ra sức điện động là nguyên nhân xuất hiện dòng điện xoáy và tổn hao. Sự giao cắt của từ trường phản ứng được xét bao gồm vòng lặp cơ bản. Chúng được xuyên qua bởi từ thông thay đổi và tạo thành điều kiện ngắn mạch cho dòng điện xoáy.

Công suất tổn hao dòng điện xoáy (Foucault) được biểu diễn:

$$P_{Foucault} = \frac{4B_s^2 d^2 k_f^2 f^2}{3\gamma\rho} \quad (12)$$

Trong đó: B_s là cảm ứng từ bão hòa của lõi thép;

d là độ dày của lõi thép;

k_f là hệ số đặc trưng;

γ là khối lượng riêng của vật liệu;

f là tần số từ trường xoay chiều;

ρ là điện trở suất của vật liệu.

4. Thảo luận

Sóng hài dòng điện trong động cơ từ trở làm tăng tổn hao đồng trong dây quấn, tổn hao sắt trong lõi thép và gây ra mô-men sóng hài là không thể phủ nhận. Các nghiên cứu gần đây tập trung phần lớn vào chất lượng dòng điện đầu vào và điện áp đầu ra của bộ chuyển mạch bằng các bộ lọc sóng hài hay các bộ chỉnh lưu mới [11]. Mặc dù đạt được một số kết quả có lợi, nhưng các bộ biến đổi và chuyển mạch trở nên phức tạp, đồng thời loại bỏ được hoàn toàn sóng hài dòng điện là không thể. Vì vậy, nhóm tác giả tiến hành phân tích, đánh giá và thấy rằng giảm ảnh hưởng của sóng hài dòng điện trong động cơ là giải pháp khả quan hơn. Đó là giảm tổn hao trong động cơ từ trở và giảm sóng hài mô-men.

Theo công thức (12), để giảm tổn hao dòng điện xoáy cần chế tạo lõi thép có đặc tính giảm cảm ứng bão hòa, giảm độ dày và khối lượng lõi. Đồng thời lõi thép silic chỉ có thể sử dụng cho tần số thấp, vì ở tần số cao tổn hao sẽ lớn do điện trở suất của thép silic thấp. Trong những nghiên cứu gần đây đã chỉ ra những ưu điểm của một loại vật liệu mới - hợp kim vô định hình, có thể cải thiện được các đặc tính trên. Sắt vô định hình là loại vật liệu từ mềm, còn được gọi là thủy tinh kim loại. Nguyên liệu chính bao gồm: niken, coban, silic,.... Ở trạng thái vô định hình, nó có điện trở suất cao hơn nhiều so với các hợp kim tinh thể. Đồng thời, vật liệu này có khả năng chống ăn mòn, độ bền cơ học cao, có thể sử dụng ở tần số làm việc cao hơn với các vật liệu tinh thể nên nên triệt tiêu dị hướng từ tinh thể, vì thế nó có tính từ mềm rất tốt. Vật liệu vô định hình nên Co còn có từ giảo bằng 0 nên có lực kháng từ rất nhỏ. Đường cong từ trễ của vật liệu rất hẹp, hẹp hơn so với thép silic - vật liệu từ mềm. Độ dày tự nhiên của lá thép vô định hình rất nhỏ, điện trở suất lớn và mật độ khối lượng vật liệu lớn. Một số tính chất lý hóa cơ bản của vật liệu vô định hình (Metglas 2605SA1) được cho trong Bảng 1, so sánh với vật liệu silic (M600 – 50A).

Theo Bảng 1, điện trở suất của vật liệu vô định hình lớn hơn 3 lần so với điện trở suất của thép silic. Khi đó, theo (12) công suất tổn hao do dòng Foucault cũng được giảm đi khoảng 3 lần. Hơn nữa, tổn hao lõi sắt của vật liệu vô định hình (0,22 W/kg) là thấp hơn nhiều lần so với vật liệu thép silic thông thường (2,8 W/kg). Khi đó, tổn hao lõi sắt được giảm, tổng tổn hao trong động cơ từ trở sử dụng vật liệu vô định hình giảm đáng kể so với động cơ chế tạo bằng thép silic thông thường.

Bảng 1. Đặc tính của sắt vô định hình và thép silic

Vật liệu	Sắt vô định hình	Thép silic
Mật độ từ thông (T)	1,56	1,8 - 2
Điện trở suất ($\mu\Omega cm$)	130 - 170	50 - 60
Độ dày lá thép (mm)	0,03	0,3 - 0,5
Sức căng (kg/mm ²)	150	50
Độ cứng Vickers	900	200 - 300
Mật độ khối lượng (g/cm ³)	7,18	7,65
Độ từ thẩm vật liệu (H/m)	10.000 - 1.500.000	3.000 - 8.000
Tổn hao lõi sắt tại 1,45T và 50Hz (W/kg)	0,22	2,8

Mô-men đập mạch trong động cơ từ trở sinh ra do

cấu tạo cực lõi của rotor và stator. Chính cấu tạo này làm cho từ trở động cơ biến thiên theo góc rotor θ . Công thức thực nghiệm cho mô-men đập mạch được biểu diễn như sau:

$$T_{ripple} = \frac{dR_m}{d\theta} \quad (13)$$

Mặt khác, phương trình chung của mạch từ trong động cơ:

$$F = \Phi \cdot R_m = \Phi \cdot (R_{mAir} + R_{mFe}) \quad (14)$$

Trong đó: F là sức từ động;

R_{mAir} là từ trở khe hở không khí;

R_{mFe} là từ trở lõi thép.

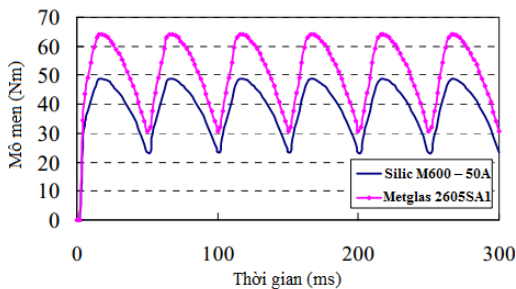
Với từ trở

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} \quad (15)$$

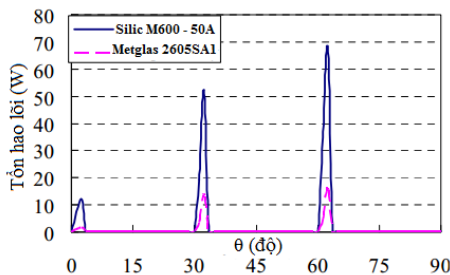
Nếu tỷ số l và S là hằng số thì độ từ thẩm μ_r tỉ lệ nghịch với từ trở R_{mFe} .

$$\mu_r \sim \frac{1}{R_{mFe}} \quad (16)$$

Từ công thức tính mô-men đập mạch (13), với góc quay của rotor θ là không thay đổi (θ phụ thuộc vào số cặp cực rotor/stator), từ trở của động cơ càng nhỏ thì mô-men đập mạch tạo ra do sự thay đổi liên tục của R_m theo θ càng nhỏ. Từ trở R_m (14) phụ thuộc vào độ từ thẩm của vật liệu, tỷ lệ nghịch theo công thức (15). Theo Bảng 1, so sánh độ từ thẩm giữa hai loại vật liệu vô định hình và thép silic, độ từ thẩm của sắt vô định hình lớn hơn khoảng từ 3 – 180 lần so với silic. Đây là thông số hữu ích trong giải quyết vấn đề mô-men đập mạch của động cơ từ trở.



Hình 3. Đặc tính mô-men của động cơ với hai loại vật liệu



Hình 4. Đặc tính tổn hao sắt của động cơ với hai loại vật liệu

Kết quả cho thấy, động cơ từ trở sử dụng vật liệu vô định hình có mô-men đập mạch giảm (mặc dù mô-men xoắn cũng giảm) so với động cơ chế tạo bằng thép silic, Hình 3. Chênh lệch giữa đỉnh thấp nhất và cao nhất của mô-men trong SRM làm bằng vô định hình là 24 Nm, với động cơ sử dụng vật liệu silic truyền thống thì lên tới 34 Nm. Đồng thời, tổn hao lõi sắt trong SRM dùng vật liệu mới giảm mạnh, được thể hiện trên Hình 4. Kết quả của nhóm tác giả công bố là kết quả phân tích, đánh giá bước đầu, để có kết quả đánh giá chuẩn mực thông qua việc mô phỏng quá trình chuyển hóa vật lý của các thông số động cơ sẽ được công bố trong thời gian thích hợp.

5. Kết luận

Bài báo này trình bày những phân tích, đánh giá về ảnh hưởng của sóng hài dòng điện trong động cơ từ trở. Sóng hài dòng điện là một trong những nguyên nhân khách quan gây ra mô-men đập mạch và tăng tổn hao trong động cơ. Giải pháp sử dụng vật liệu vô định hình chế tạo động cơ mang lại hiệu quả khi giảm mô-men đập mạch và hạn chế tổn hao. Có thể kết luận rằng, ảnh hưởng của sóng hài dòng điện trong SRM tuy không lớn, nhưng là vấn đề không thể bỏ qua.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. F. Fuller, E. F. Fuchs, D. J. Roesler, "Influence of harmonics on power distribution system protection", *IEEE*, Vol. 3, No. 2, April 1988, pp. 549 - 557.
- [2] V. E. Wagner, "Effects of Harmonics on Equipment", *IEEE*, Vol. 8, No. 2, April 1993, pp. 672 - 680.
- [3] A. C. Koenig, S. D. Pekarek, *Feedback-Based Mitigation of Torque Harmonics in Switched Reluctance Motor Drives*, Applied Power Electronics Conference, APEC 2007, Anaheim, CA, USA, USA.
- [4] Christian Carstensen, *Eddy Currents in Windings of Switched Reluctance Machines*, Ph. D. Thesis, 2007.
- [5] D. P. Connors, D. A. Jarc, R. H. Daugherty, "Considerations in Applying Induction Motors with Solid-State Adjustable Frequency Controllers", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-20, Issue 1, Jan. 1984, pp. 113 - 121.
- [6] J. M. D. Murphy and M. G. Egan, "A Comparison of PWM Strategies for Inverter-Fed Induction Motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-19, Issue 3, May 1983, pp. 363 - 369.
- [7] S. R. Bower and R. I. Bullough, "Harmonic Minimisation in Microprocessor Controlled Current Fed PWM Drives", *IEE Proceedings*, Vol. 134, No. 1, Jan 1987, pp. 25 - 41.
- [8] R. J. M. Melmans, A. J. Vandenput, and W. Geysen, "Influence of Unbalanced Magnetic Pull on the Radial Stability of Flexible-Shaft Induction Machines", *IEE Proceedings*, Vol. 134, No. 2, March 1987, pp. 101 - 109.
- [9] Kenta Deguchi, Satoshi Sumita, Yuji Enomoto, *A 3.7-kW Axial-gap Switched-reluctance Motor Robustly Designed by Using a Mathematical Model*, International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2014, Berlin, Germany.
- [10] Vasyi Tkachuk, Marius Klytta, *Switched Reluctance Motor and its Mathematical Model*, Compatibility in Power Electronics, 2007, Gdansk, Poland.
- [11] Sang-Hun Lee, Fell-soon Kang, Su Eog Cho, Man Hyung Lee, "Single-stage power-factor-corrected converter for switched reluctance motor drive", *Electric Power Systems Research*, Vol. 76, Issues 6-7, 2006, pp. 534 - 540.