

Magnetic field exploration on single sided linear induction motor used finite element method

Truong Minh Tan

Department of Engineering and Technology, Quy Nhon University

Received: 25/05/2018; Accepted: 08/06/2018

ABSTRACT

Linear induction motor plays a great important part in linear motion drive and can absolutely replace the rotor induction motor. Therefore, it is very necessary to do research on linear induction motor. The in-depth exploration of electromagnetic behavior of linear induction motor has been a fundamental step for investigations of linear induction motor. In this study, the combination of the equivalent circuit model with electromagnetic field model of a single-sided linear induction motor is carried out, by giving calculation results from equivalent circuit model inputted to electromagnetic field model, based on finite element method (FEM) model in using the software 2D-FEM to solve electromagnetic field problem. At the same time, we survey the magnetic field of the air gap, the asymmetry of the magnetic field and eddy current in the secondary section.... The presented characteristics are good basis for steady-state analysis of the LIM in researches later on.

Keywords: *Linear Induction Motor, finite element method.*

Khảo sát từ trường trong động cơ không đồng bộ tuyến tính đơn biên bằng phương pháp phần tử hữu hạn

Trương Minh Tấn

Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Quy Nhơn

Ngày nhận bài: 25/05/2018; Ngày nhận đăng: 08/06/2018

TÓM TẮT

Động cơ không đồng bộ tuyến tính đóng vai trò quan trọng trong truyền chuyển động tuyến tính và hoàn toàn có thể thay thế động cơ không đồng bộ quay thông dụng. Việc nghiên cứu động cơ là việc làm rất cần thiết. Trạng thái điện từ của động cơ là nền tảng cho các nghiên cứu về động cơ cần được khảo sát kỹ lưỡng. Trong nghiên cứu này, sự kết hợp giữa mô hình mạch và mô hình trường để giải bài toán trường động cơ không đồng bộ tuyến tính được thực hiện, bằng cách đưa các kết quả tính toán nhận được từ mô hình mạch vào mô hình trường, dùng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm FEM 2D để giải bài toán trường. Đồng thời, khảo sát từ trường khe hở không khí, tính không đối xứng của từ trường và dòng điện xoáy trong phần thứ cấp... Đây có thể xem là nền tảng tốt cho việc phân tích các trạng thái ổn định của động cơ trong các nghiên cứu sau này.

Từ khóa: *Động cơ không đồng bộ tuyến tính, phương pháp phần tử hữu hạn.*

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Gần đây, động cơ điện tuyến tính đã trở nên thông dụng và được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống tự động hóa văn phòng, tự động hóa xí nghiệp, đặc biệt trong giao thông vận tải... bởi vì động cơ tuyến tính có cấu trúc đơn giản, độ chính xác điều khiển cao, truyền chuyển động tuyến tính một cách trực tiếp... Cho nên, động cơ tuyến tính đóng vai trò quan trọng nhất định trong các truyền động thẳng. Do cấu trúc mạch từ hở nên từ thông không liên tục từ cực này đến cực khác mà nó bị cắt ra ở đoạn đầu và đoạn cuối làm từ trường trong động cơ không đồng bộ tuyến tính phức tạp hơn so với động cơ không đồng bộ (KĐB) quay. Hiệu ứng đầu cuối và dòng điện xoáy trong mạch thứ cấp gây ra những tác động không mong muốn trong động cơ như hiện tượng mất đối xứng của từ trường, sức từ động không sin, làm ảnh hưởng một cách đáng

kể đến đặc tính làm việc. Để có những đánh giá đúng, việc nghiên cứu về trạng thái điện từ của động cơ là nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo cần được khảo sát kỹ lưỡng. Bằng nhiều cách tiếp cận khác nhau, các nghiên cứu đã sử dụng các phương pháp khác nhau để mô tả từ trường động cơ tuyến tính. Phương pháp phần tử hữu hạn ngược (UFEM);³ Phương pháp sai phân hữu hạn (FDM)⁴ phân tích từ trường cho đối tượng có tốc độ chuyển động cao; Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được sử dụng để nghiên cứu sự phân bố từ trường trong khe hở không khí⁵ và tính toán lực;⁶ Sử dụng mô hình mạch để dự báo đặc tính động cơ tuyến tính dùng trong giao thông.⁷ Bài báo sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm FEMM 4.2, mô hình trường động cơ được xây dựng trên cơ sở kết quả tính toán từ mô hình mạch. Qua đó, tiến hành khảo sát từ trường khe hở không khí, tính

Tác giả liên hệ chính.

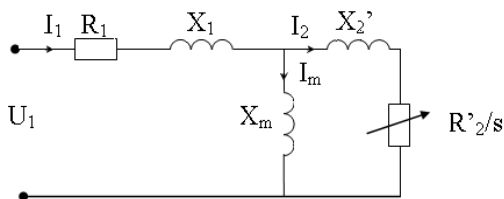
Email: truongminhtan@qnu.edu.vn

không đối xứng của từ trường và dòng điện xoáy trong phần thứ cấp... Đây có thể xem là nền tảng tốt cho việc phân tích các trạng thái ổn định của động cơ trong các nghiên cứu sau này.

2. MÔ HÌNH MẠCH CỦA ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ TUYẾN TÍNH ĐƠN BIÊN

Trong thiết kế có sử dụng một số giả thiết sau: Không xét đến hiệu ứng đầu cuối; Không xét đến hiện tượng bão hòa lõi thép; Không xét đến tổn hao trong lõi thép; Sự tác động giữa các pha là như nhau.

Mạch điện tương đương một pha gần đúng của động cơ tuyến tính, hình 1.



Hình 1. Mạch điện tương đương một pha

Trong động cơ điện tuyến tính, điện kháng tản của dây quấn phần thứ cấp rất nhỏ so với điện kháng tản của dây quấn phần sơ cấp² nên có thể bỏ qua, $X_2' \approx 0$. Các tham số của mạch điện tương đương của động cơ được xác định theo các công thức sau.^{1,2}

Điện trở tác dụng của pha dây quấn phần sơ cấp:

$$R_1 = \rho_{cu} \frac{l_w}{A_w} \quad (1)$$

Điện kháng tản của dây quấn phần sơ cấp:

$$X_1 = \frac{2\mu_0 p f \left[\left(\lambda_s \left(1 + \frac{3}{p} \right) + \lambda_d \right) \frac{W_s}{q_1} + \lambda_e l_{ce} \right] N_1^2}{p} \quad (2)$$

$\lambda_s, \lambda_e, \lambda_d$ tương ứng hệ số từ dẫn rãnh, đầu nối, tạp.

Điện kháng từ hóa:

$$X_m = \frac{24\mu_0 p f W_{se} k_w N_1^2 \tau}{\pi^2 p \delta_e} \quad (3)$$

Khe hở không khí tương đương:

$$\delta_e = k_c \delta_0 \quad (4)$$

Hệ số Carter:

$$k_c = \frac{\lambda}{\lambda - \frac{4}{\pi} \left[\frac{a}{2\delta_0} \arctg\left(\frac{a}{2\delta_0}\right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{a}{2\delta_0}\right)^2} \right] \delta_0} \quad (5)$$

Điện trở tác dụng của phần thứ cấp quy đổi

$$\text{về sơ cấp: } R_2' = \frac{X_m}{G} \quad (6)$$

$$\text{Hệ số chất lượng: } G = \frac{2\mu_0 f \tau^2}{\pi \left(\frac{\rho_r}{d} \right) \delta_e} \quad (7)$$

$$\text{Lực điện từ: } F_s = \frac{m I_1^2 R_2}{V_s s \left[\left(\frac{1}{sG} \right)^2 + 1 \right]} \quad (10)$$

Trong đó: p - số cực; m - số pha; f - tần số; W_s - độ rộng của lõi sắt phần sơ cấp; δ - độ lớn khe hở không khí; d - độ dày của tấm nhôm; a - độ rộng của rãnh; λ - bước răng; τ - bước cực; q_1 - số rãnh của một pha dưới một cực; N_1 - số thanh dẫn của một pha; k_w - hệ số dây quấn; V_s - vận tốc dài đồng bộ của từ trường chạy; s - hệ số trượt; μ_0 - độ từ thẩm của không khí; $\rho_{cu,r}$ - điện trở suất của đồng và nhôm; l_w - chiều dài dây quấn 1 pha; A_w - tiết diện dây quấn; I_1 - dòng điện của pha dây quấn phần sơ cấp; U_1 - điện áp pha.

Theo¹, phương pháp thiết kế gần đúng động cơ không đồng bộ tuyến tính 3 pha đơn biên sử dụng mạch điện tương đương, được xây dựng với mục tiêu đạt được giá trị lực mong muốn. Kết quả tính toán được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Thông số động cơ KTB tuyến tính đơn biên

Diễn giải	Đơn vị	Giá trị
Lực yêu cầu	N	100
Số cực	-	2
Tần số	Hz	50
Điện áp dây	V	380
Số rãnh của lõi thép phần sơ cấp	-	6
Độ rộng của lõi thép phần sơ cấp	mm	200
Chiều dài của lõi thép phần sơ cấp	mm	126,3

Bước cực	mm	63,15
Số rãnh	-	6
Độ dày tấm nhôm	mm	5
Khe hở không khí	mm	5
Hệ số trượt định mức	%	5
Lực tính toán	N	100,634
Số vòng dây của một pha	Vòng	280

3. MÔ HÌNH TRƯỜNG ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ TUYẾN TÍNH ĐƠN BIÊN

Thiết lập mô hình trường điện từ để phân tích trường động cơ không đồng bộ tuyến tính đơn biên, ta xuất phát từ mô hình trường điện từ tổng quát viết cho từ thế vectơ $\vec{A}$ và điện thế vô hướng φ .

$$\nabla^2 \vec{A} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} - \sigma \mu \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\mu \vec{J} \quad (11)$$

$$\nabla^2 \varphi - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \sigma \mu \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (12)$$

Trong đó: ε - hằng số điện môi (Fm^{-1}); μ - hệ số từ thẩm (Hm^{-1}); σ - điện dẫn suất ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$); ρ - mật độ điện tích khối (Cm^{-3}).

Dựa vào (11) và (12), xác định được:

$$\text{Vectơ cảm ứng từ: } \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (13)$$

Vectơ cường độ từ trường:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) \quad (14)$$

Vectơ mật độ dòng điện dẫn:

$$\vec{J} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times \vec{A} \right) \quad (15)$$

Lực được xác định theo phương pháp tenxơ ứng suất Maxwell

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \int_V (\vec{J} \times \vec{B} - \frac{1}{2} H^2 \text{grad} \mu) dV \\ &= \int_S \vec{T} d\vec{S} = \int_V \vec{T} dV \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{Với } \vec{T} = (\vec{B} \cdot \vec{n}) \vec{H} - \frac{1}{2} \mu H^2 \cdot \vec{n} \quad (17)$$

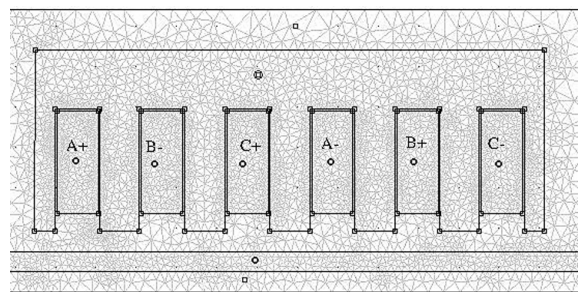
$\vec{n}$ là vectơ pháp tuyến đơn vị.

Bài toán trường được giải bằng phương

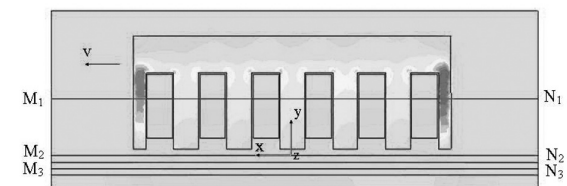
pháp phần tử hữu hạn trên cơ sở chương trình FEMM 2 chiều. Thuật toán được xây dựng dựa vào thuật giải song song, giải hệ phương trình Maxwell với các miền con được phân chia thành các tam giác. Mỗi phần tử được làm gần đúng bằng nội suy tuyến tính của giá trị tại 3 đỉnh của tam giác. Bài toán được thực hiện qua các phần: Phần tiền xử lý, phần xử lý, phần hậu xử lý.

Kết hợp mô hình mạch và mô hình trường để giải bài toán trường động cơ không đồng bộ tuyến tính bằng cách đưa các kết quả tính toán nhận được từ mô hình mạch (mục 2) vào mô hình trường, dùng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm FEM để giải bài toán trường.

Mô hình trường động cơ không đồng bộ tuyến tính được phân tích với số nút là 6737, số phần tử là 13234, hình 2. Kết quả phân tích như hình 3.



Hình 2. Hình học đầu vào và sự phân chia thành các tam giác phần tử



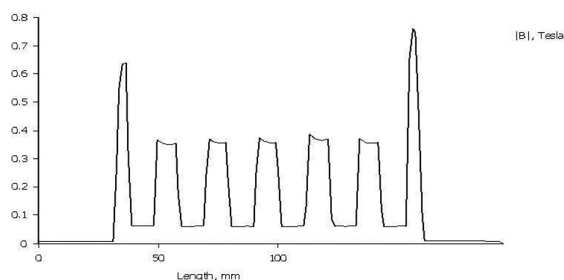
Hình 3. Phân bố mật độ từ thông trong động cơ với dòng điện định mức

4. KHẢO SÁT TỪ TRƯỜNG TRONG ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ TUYẾN TÍNH ĐƠN BIÊN

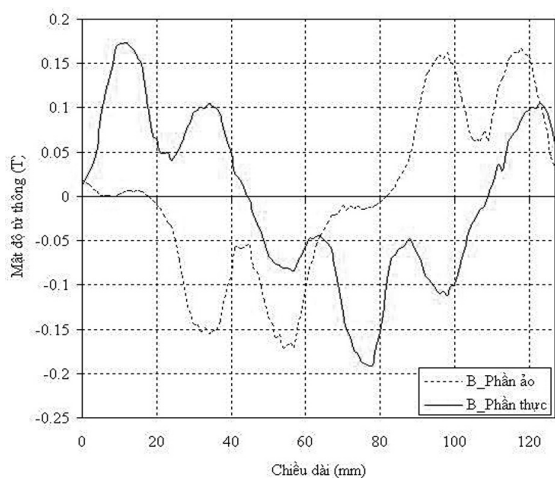
Các đường khảo sát trên mô hình động cơ như hình 3, đường $M_1 N_1$ khảo sát từ trường trong răng rãnh, đường $M_2 N_2$ khảo sát từ trường trong khe hở không khí và đường $M_3 N_3$ khảo sát dòng điện xoáy trong tấm nhôm của động cơ.

Ở chế độ ứng với dòng điện đặt vào các cuộn dây phân sơ cấp định mức, độ lớn cảm ứng từ trong răng và trong khe hở không khí được xác định như hình 4 và hình 5.

Trong trường hợp này, từ trường trong khe hở không khí thấp (0,197T), mạch từ sẽ không bị bão hòa. Từ trường trong khe hở không khí chịu ảnh hưởng lớn đến vận tốc chuyển động của phân sơ cấp. Nguyên nhân là do ảnh hưởng của hiệu ứng đầu cuối đến độ lớn của từ trường trong khe hở không khí theo tỉ lệ thuận với vận tốc, khi phân động chuyển động với vận tốc càng lớn thì từ trường ở phía đầu vào của động cơ giảm xuống càng mạnh (theo hướng chuyển động), đồng thời từ trường ở phía đầu ra tăng lên và mất đi, kéo theo độ lớn từ trường tổng trong khe hở không khí sẽ giảm đi.



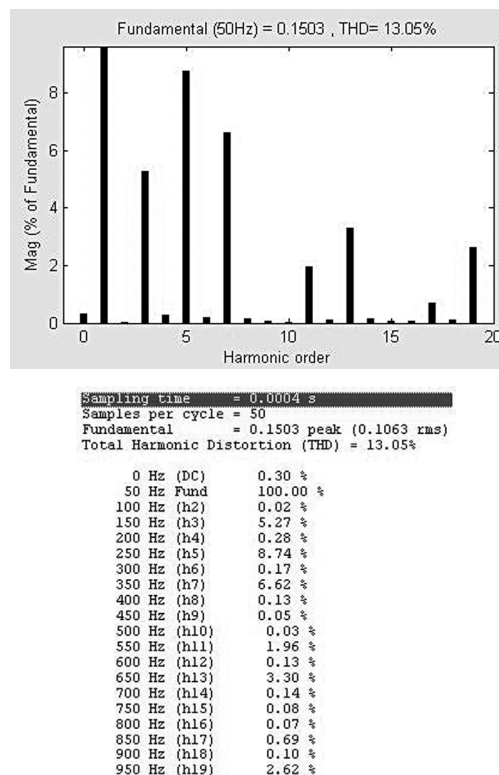
Hình 4. Độ lớn cảm ứng từ B trong răng



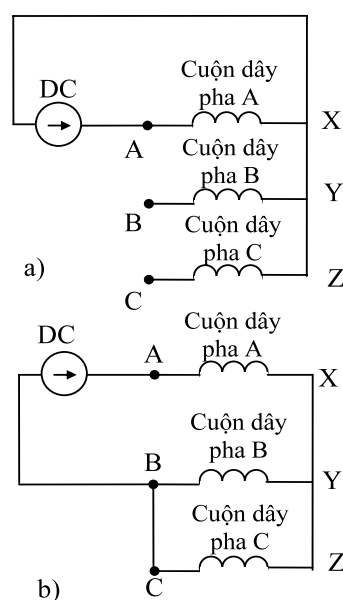
Hình 5. Độ lớn cảm ứng từ B trong khe hở không khí

Với kết quả phân tích các thành phần sóng điều hòa từ thông trong khe hở không khí động cơ KĐB tuyến tính, tỷ lệ tổng các thành phần sóng hài (THD) chiếm 13,05%, sóng hài xuất hiện hầu hết ở các bậc nhưng chủ yếu là ở các bậc 3, bậc 5, bậc 7...

Bên cạnh thành phần từ trường cơ bản sinh ra lực điện từ còn có lực điện từ phụ do các thành phần từ trường bậc cao sinh ra, lực điện từ phụ mang bản chất kim hãm và gây ra các ảnh hưởng khác. Điều này ảnh hưởng không tốt đến độ lớn lực và đặc tính làm việc của động cơ.



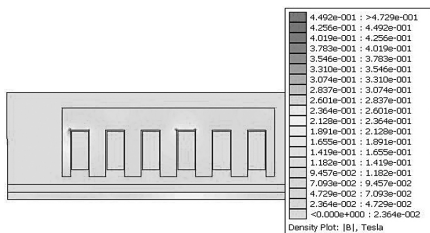
Hình 6. Phổ của sóng điều hòa từ thông trong khe hở không khí



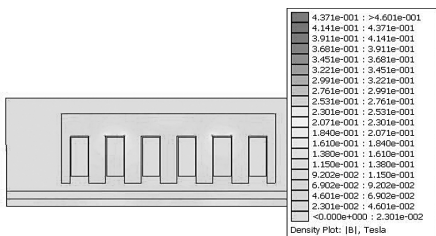
Hình 7. Mô hình kích thích nguồn một chiều các cuộn dây động cơ

Không giống như động cơ điện KĐB quay thông dụng, động cơ KĐB tuyến tính có cấu trúc mạch từ hở. Tùy theo các vị trí tương đối khác nhau của pha A, B và C trong phần sơ cấp mà sức từ động do dòng điện chạy trong dây quấn của mỗi pha sinh ra sẽ không bằng nhau và từ trường mất đối xứng. Để khảo sát vấn đề này, lần lượt kích thích riêng biệt các cuộn dây bằng nguồn một chiều (DC) theo mô hình mạch điện kích thích như hình 7a và 7b.

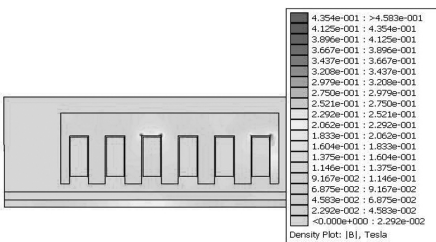
Phân bố mật độ từ thông khi pha A, B và C lần lượt được kích thích riêng biệt theo mô hình 7a được trình bày như hình 8. Giá trị của từ thông lớn nhất tương ứng mỗi trường hợp là 0,4492 T, 0,4371 T và 0,4354 T. Điều này cho thấy có sự khác nhau đáng kể của mật độ từ thông giữa các pha A, B và C. Độ lớn mật độ từ thông B_n (thành phần pháp tuyến), B_t (thành phần tiếp tuyến) dọc theo khe hở không khí như hình 9. Hình dạng sóng của pha A là hình ảnh phản chiếu của hình dạng sóng pha C. Tuy nhiên, hình dạng sóng của pha B thì ngược lại.



Kích thích pha A

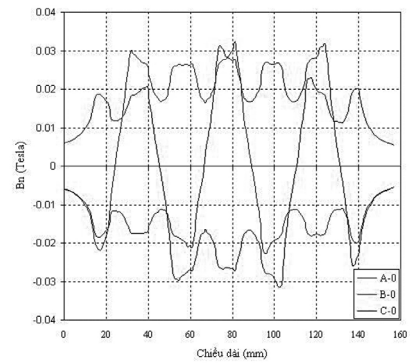


Kích thích pha B

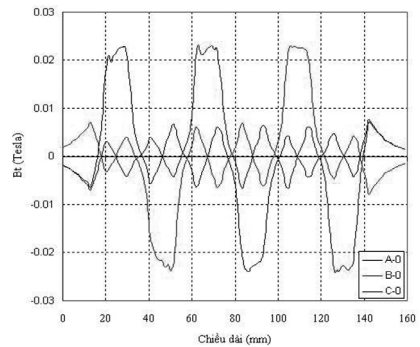


Kích thích pha C

Hình 8. Phân bố mật độ từ thông khi được kích thích nguồn DC

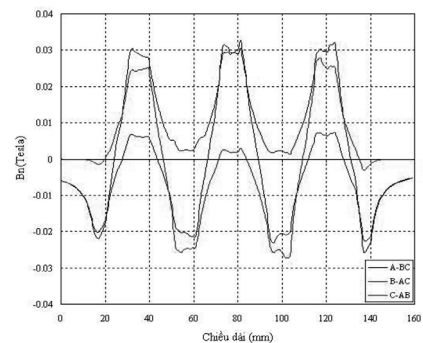


Độ lớn mật độ từ thông B_n

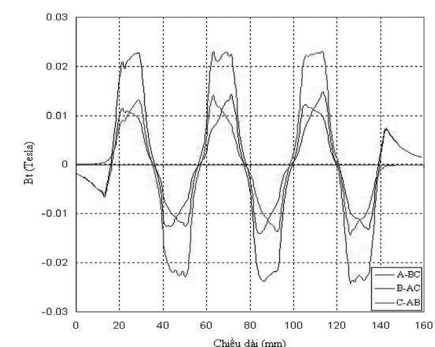


Độ lớn mật độ từ thông B_t

Hình 9. Độ lớn mật độ từ thông dọc theo đường M_2N_2 khi kích thích riêng biệt các pha A, B, C



Độ lớn mật độ từ thông B_n

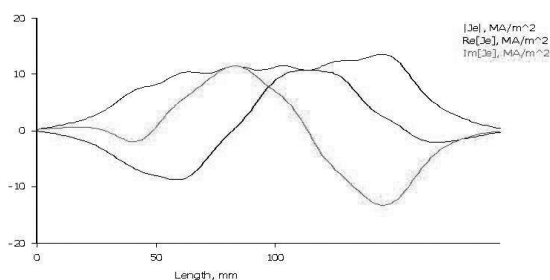


Độ lớn mật độ từ thông B_t

Hình 10. Độ lớn mật độ từ thông dọc theo đường M_2N_2 khi kích thích theo A-BC, B-AC, C-AB

Tương tự, độ lớn mật độ từ thông Bn (thành phần pháp tuyến), Bt (thành phần tiếp tuyến) dọc theo khe hở không khí như hình 10 khi kích thích theo mô hình 7b (A-BC) và B-AC, C-AB. Hình dạng sóng trường hợp kích thích theo A-BC là hình ảnh phản chiếu của hình dạng sóng kích thích theo C-AB, còn hình dạng sóng trường hợp kích thích theo B-AC thì ngược lại. Cho nên, các vị trí tương đối khác nhau của pha A, B và C trong phần sơ cấp dẫn đến tính không đối xứng của từ trường trong động cơ.

Hiện tượng dòng điện xoáy trong tấm nhôm phía thứ cấp, đây là kết quả tự nhiên của hiện tượng từ trường biến thiên theo thời gian do phần sơ cấp sinh ra chuyển động cắt ngang phần thứ cấp, làm cảm ứng trong tấm nhôm một dòng điện xoáy. Thành phần này gây ra những tác động không mong muốn trong động cơ như hiện tượng mất đối xứng của từ trường, sức từ động không sin, làm ảnh hưởng một cách đáng kể đến đặc tính làm việc của động cơ. Mật độ dòng điện xoáy trong tấm nhôm được xác định dọc theo đường M_3N_3 như hình 11.



Hình 11. Mật độ dòng điện xoáy trong tấm nhôm ứng với I_{dm} và $\delta = 5$ mm

5. KẾT LUẬN

Từ trường trong động cơ KĐB tuyến tính đơn biên là từ trường không đối xứng, thành phần sóng hài đáng kể, chiếm 13,05% và chịu ảnh hưởng bởi vận tốc chuyển động của phần sơ cấp. Thành phần dòng điện xoáy trong tấm nhôm phía thứ cấp có độ lớn đáng kể. Điều này gây ra những tác động không mong muốn trong động cơ, làm ảnh hưởng một cách đáng kể đến đặc tính làm việc của động cơ.

Phương pháp phân tử hữu hạn kết hợp với phần mềm FEMM dùng để giải bài toán trường

động cơ KĐB tuyến tính có độ chính xác cao, linh hoạt, đánh giá đúng sự tác động của các hiệu ứng trong động cơ.

Đây có thể xem là nền tảng cơ bản cho nghiên cứu thiết kế động cơ không đồng bộ tuyến tính và để tiến hành phân tích các trạng thái ổn định khi động cơ làm việc và thực hiện mô hình điều khiển phù hợp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Trương Minh Tấn, Nguyễn Thế Công, Lê Văn Doanh. *Về thuật toán thiết kế tối ưu lực động cơ không đồng bộ tuyến tính đơn biên*, Tạp chí KH & CN các trường Đại học kỹ thuật, **2009**, số 70, trang 1-5.
2. Nasar S. A. and Boldea. *Linear Electric Motors*; Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
3. M. Odamura. *Upwind finite element solution for saturated traveling magnetic field problems*, Electrical engineering in Japan, **1985**, 105(4), 126-132.
4. Y. Nozaki, T. Koseki. *Analysis of linear induction motor for HSST and linear metro using finite difference method*, The University of Tokyo, Hongo 7-3-1, Bunkyo, Tokyo 113-0033, JAPAN, 2006.
5. T. Sadauskas, A. Smilgevičius, Z. Savickienė. *Distribution of Magnetic Field of Linear Induction Motor*, **2007**, ISSN 1392-1215, electronics and electrical engineering, 4(76).
6. Dr. Ferenc Tóth - Norbert Szabó. *Computing the force of linear machines using finite-element analysis*, Workshop on electrical machines' parameters, Technical University of Cluj-Napoca, 26th, 41-46, 2001.
7. Ali Suat Gerçek, Vedat M. Karslıt, *Performance prediction of the single sided linear induction motor for transportation considers longitudinal end effect by analytic method*, **2009**, Contemporary engineering sciences, 2(2), 95-104.