

**VỀ THUẬT TOÁN THIẾT KẾ TỐI ƯU LỰC  
ĐỘNG CƠ KHÔNG ĐỒNG BỘ TUYẾN TÍNH ĐƠN BIÊN**  
ALGORITHM TO DESIGN SINGLE SIDED LINEAR INDUCTION MOTOR  
THRUST OPTIMIZATION

**Nguyễn Thế Công, Lê Văn Doanh, Phùng Anh Tuấn**  
Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

**Trương Minh Tân**  
Trường Đại học Quy Nhơn

**TÓM TẮT**

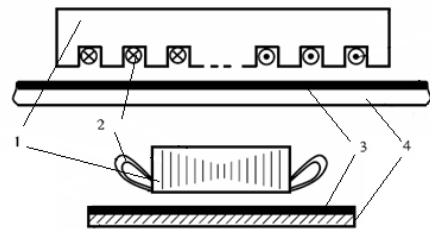
Một thuật toán và chương trình được xây dựng để tính toán các thông số của động cơ không đồng bộ tuyến tính (ĐTT) đơn biên nhằm đạt được giá trị tối ưu lực đã được giới thiệu trong bài báo. Các công thức và các tham số được giải thích chi tiết. Đặc tính của ĐTT đơn biên cũng được xét đến và phân tích sử dụng phương pháp mạch điện tương đương. Lực và hiệu suất là các tham số đặc trưng được chú ý trong nghiên cứu này. Nhiệm vụ thiết kế và thuật toán thiết kế được thiết lập trong bài báo. Các phép lập được đưa ra trong thuật toán cũng được thảo luận đến. Kết quả được kiểm tra lại bằng phương pháp phần tử hữu hạn trên cơ sở phần mềm FEMM 2D. Phương pháp được xây dựng trên 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 ba đỉnh của tam giác. Kết quả đầu ra là sự phân bố từ trường trong miền đã được phân tích của ĐTT. Lực tổng theo trục x được xác định theo phương pháp tenxơ ứng suất Maxwell trong FEMM chỉ bằng khoảng 94% tại vận tốc 6m/s so với lực tính theo các công thức mô hình mạch. Điều này cho thấy ảnh hưởng của hiệu ứng đầu cuối, hiệu ứng dòng xoáy là đáng kể dẫn đến làm suy giảm độ lớn lực.

**ABSTRACT**

An algorithm and a program for calculating parameters to achieve optimal thrust value of single sided linear induction motor (LIM) is proposed in this paper. The basic equations and parameters are explained in detail. The performance of a single sided LIM is predicted and analyzed using the equivalent circuit approach. Thrust and efficiency are the specific parameters and are considered in this study. The procedure and algorithm design are presented in the paper. The iterative procedures given in the algorithm are also discussed. Concurrently, the results will be examined by the Finite Element Method in using the software 2D-FEMM. Method is based on parallel resolution algorithm of equations Maxwell with domains divided deltas. Every element should be approximated by linear interpolation of value at three caps from delta. The output result is the magnetic field distribution in the analyzed domain of the linear induction motor. To compute the thrust on a region entirely surrounded by air and/or abutting a boundary, the simplest way is to use Maxwell Stress Tensor Method. The results computed thrust is about 94% at 6m/s by the equivalent circuit model. These results show that at the effects of end and eddy are considerable and they cause the damped thrust.

**1. GIỚI THIỆU**

Kết cấu của động cơ không đồng bộ tuyến tính (ĐTT) đơn biên (hình 1) gồm: Mạch dẫn từ stator 1 (còn gọi là phần sơ cấp) có dạng hình hộp, dây quấn sơ cấp ba pha kiểu cực từ xen kẽ 2 được đặt trong các rãnh ở trên một trong hai bờ của hình hộp. Phần động trong ĐTT chuyển động tịnh tiến. Mạch dẫn từ 4 (còn gọi là phần thứ cấp) của nó cũng như mạch dẫn từ của stator có dạng hình hộp, trên mặt của mạch dẫn từ động hướng về stator được bố trí dây quấn ngắn mạch 3 (thường bằng tấm nhôm) [1,2].



Hình 1. Mô hình động cơ không đồng bộ tuyến tính

ĐTT làm việc dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ, về bản chất giống như động cơ quay thông dụng. Từ trường chạy trong khe hở

không khí tác dụng với dòng điện ứng trong phần thứ cấp sinh ra lực từ có xu hướng kéo phần động trong ĐTT chuyển động tịnh tiến vận tốc  $V_r$ .

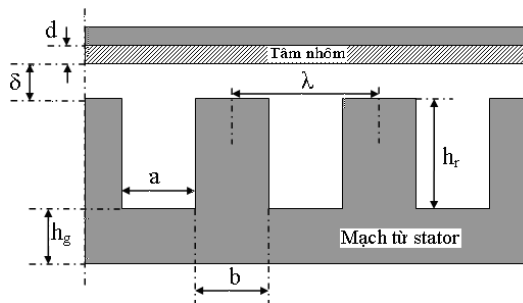
Về nguyên lý cơ bản của ĐTT được đề cập vào năm 1895. Đến năm 1947, Eric Laithwaite đã chế tạo thành công và ứng dụng trong hệ thống truyền động máy dệt công nghiệp. Trên cơ sở này, các nghiên cứu cũng đề cập như: thiết kế ĐTT hình ống dùng trong hệ thống ống khoan khí nén [3]; lắp đặt ĐTT và các tính toán đơn giản [4]; tối ưu giá trị dòng trong thiết kế [5]. . Ở Việt Nam, theo quyết định số:1696 /QĐ-BKHCN ngày 16/8/2007 của Bộ trưởng Bộ KH&CN, ĐTT được đưa vào danh mục các đề tài thuộc chương trình KH&CN trọng điểm cấp nhà nước giai đoạn 2006-2010. Nội dung bài báo đề cập đến việc xây dựng thuật toán và chương trình để tính toán kết cấu của động cơ không đồng bộ tuyến tính đơn biên nhằm đạt được giá trị tối ưu lực.

## II. MÔ HÌNH THIẾT KẾ

Trong tính toán 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

Mô hình thiết kế được vẽ như hình 2.



Hình 2. Mô hình thiết kế

$$\text{Hệ số trượt: } s = \frac{V_s - V_r}{V_s} \quad (1)$$

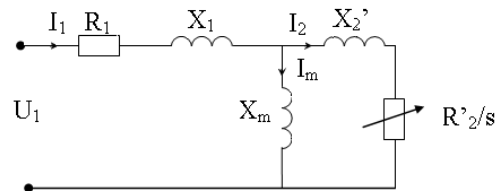
$$\text{Với } V_s = 2\pi f \text{ và } \tau = \frac{L_s}{p} \quad (2)$$

Ở chế độ định mức  $V_r$  gần bằng  $V_s$  và hệ số trượt  $s$  cũng nhỏ như các máy không đồng bộ thông thường.

Sơ đồ thay thế [1], hình 3:

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

$$R_1 = \rho_{cu} \frac{l_w}{A_w} \quad (3)$$



Hình 3. Sơ đồ thay thế một pha

Điện kháng tản của dây quấn phần sơ cấp:

$$X_1 = \frac{2\mu_0 \pi f \left[ \left( \lambda_s \left( 1 + \frac{3}{p} \right) + \lambda_d \right) \frac{W_s}{q_1} + \lambda_e l_{ce} \right] N_1^2}{p} \quad (4)$$

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

Điện kháng từ hóa:

$$X_m = \frac{24\mu_0 \pi f W_{se} k_w N_1^2 \tau}{\pi^2 p \delta_e} \quad (5)$$

Khe hở không khí tương đương:

$$\delta_e = k_c \delta_0 \quad (6)$$

Hệ số Carter:

$$k_c = \frac{\lambda}{\lambda - \frac{4}{\pi} \left[ \frac{a}{2\delta_0} \arctg \left( \frac{a}{2\delta_0} \right) - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{a}{2\delta_0} \right)^2} \right] \delta_0} \quad (7)$$

Điện trở tác dụng của phần thứ cấp qui đổi về sơ cấp:

$$R'_2 = \frac{X_m}{G} \quad (8)$$

$$\text{với } G = \frac{2\mu_0 f \tau^2}{\pi \left( \frac{\rho_r}{d} \right) \delta_e} \quad (9)$$

$$\text{Lực điện từ: } F_s = \frac{mI_1^2 R_2}{V_s \cdot s \left[ \left( \frac{1}{sG} \right)^2 + 1 \right]} \quad (10)$$

$$\text{Công suất đầu ra: } P_0 = F_s V_r \quad (11)$$

Công suất đầu vào:

$$P_1 = F_s V_s + mI_1^2 R_1 \quad (12)$$

$$\text{Hiệu suất: } \eta = \frac{P_0}{P_1} \quad (13)$$

Hệ số công suất

$$\cos\varphi = \frac{F_s V_s + mI_1^2 R_1}{mU_1 I_1} \quad (14)$$

Trong đó: p-số cực; m-số pha; f-tần số;  $L_s$ -chiều dài của stator;  $W_s$ -độ rộng của lõi sắt phân sơ cấp;  $\delta$ -độ lớn khe hở không khí; d-chiều dày của tấm nhôm; a,b - độ rộng của rãnh và răng;  $h_r, h_g$ - chiều cao của rãnh và gông;  $\lambda$ -bước răng;  $\tau$ -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;  $V_r$ -vận tốc dài chuyển dịch của phần động;  $\mu_0$ - 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 phân sơ cấp;  $U_1$ -điện áp pha.

### III. THUẬT TOÁN THIẾT KẾ

Thuật toán thiết kế tối ưu lực ĐTT như trên hình 4. Những số liệu đưa vào gồm:  $\mu_0$ ,  $\rho_{cu,Al}$ , m,  $U_d$ , f, p,  $\delta$ , d,  $F_{syc}$ ,  $V_r$ ,  $s_{dm}$ ,  $q_1$ , mật độ dòng điện (j), mật độ từ thông lớn nhất trong răng, gông ( $B_{rmax}$ ,  $B_{gmax}$ ).

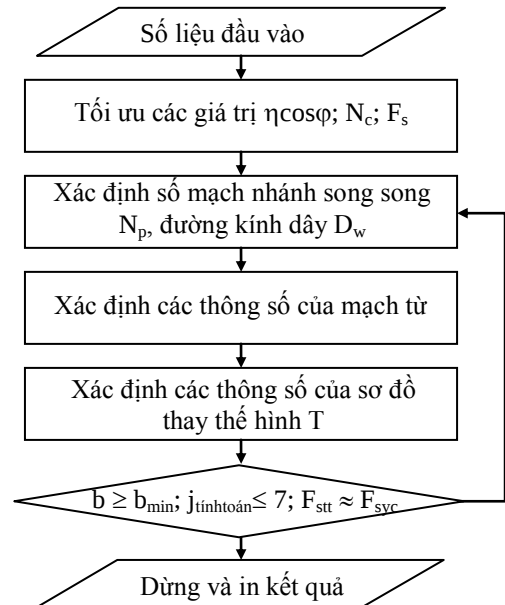
Mô đun tối ưu các giá trị  $\eta$ ,  $\cos\varphi$ ,  $N_c$ ,  $F_s$  được thực hiện bằng hai vòng lặp lồng vào nhau. Khi giá trị hiệu suất điện năng  $\eta$ ,  $\cos\varphi$  đã được xác định thì thuật toán thực hiện thay đổi số thanh dẫn trong rãnh đến khi  $F_s$  gần bằng  $F_{syc}$

Trên cơ sở dữ liệu của dây quấn chuẩn, bài toán tiến hành xác định số mạch nhánh song song  $N_p$ , đường kính dây  $D_w$  (chưa kể cách điện), kích thước mạch từ và các thông số của sơ đồ thay thế hình T. Để tránh hiện tượng bão hòa từ răng, chiều rộng của răng được giới hạn:

$$b_{min} = \frac{\pi}{2} B_{\delta tb} \frac{\lambda}{B_{rmax}} = \frac{2\sqrt{2}mk_w N_1 I_m \mu_0 \lambda}{p\pi\delta_e B_{rmax}} \quad (15)$$

$B_{\delta tb}$ -mật độ từ thông trung bình trong khe hở không khí.

Điều kiện:  $b \geq b_{min}$ ;  $j_{tínhtoán} \leq 7$ ;  $F_{stt} \approx F_{syc}$  được kiểm tra, nếu không thỏa mãn thì vòng lặp chọn lại kích thước dây. Khi đã thỏa mãn, thuật toán dừng và in kết quả.



Hình 4. Thuật toán thiết kế tối ưu  $F_s$

### IV. KẾT QUẢ

Bài toán được xây dựng với ĐTT đơn biên 3 pha; Điện áp 380/220V đấu Y/Δ; Tần số  $f = 50\text{Hz}$ ; số cực  $p = 2$ ; Tốc độ  $V_r = 6\text{m/s}$ ; Lực  $F_{syc} = 100\text{N}$ ; Độ lớn khe hở không khí 5mm; Chiều dày tấm nhôm 5mm; Hệ số trượt định mức 5%.

Kết quả tính toán bằng thuật toán cho trong bảng 1.

Phương pháp được xây dựng trên 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 [6]:

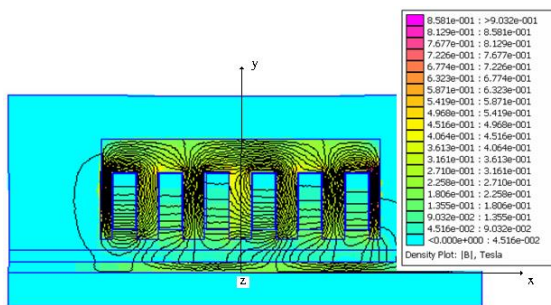
- Phần tiền xử lý: Thiết lập mô hình, đặc tính vật liệu, điều kiện biên, các thông số về dòng điện, tạo lưới (với số nút 13006 và số phần tử 25402)

- Phần xử lý: Giải bài toán bằng các phương pháp số, phương pháp lập đề xác định nghiệm tại các nút lưới.

- Phần hậu xử lý: Khai thác kết quả.

Bảng 1. Kiểm nghiệm lại trên mô hình FEM 2D

| Diễn giải                                         | Đơn vị | Giá trị |
|---------------------------------------------------|--------|---------|
| Độ rộng của lõi thép phần sơ cấp ( $W_s$ )        | mm     | 200     |
| Chiều dài của lõi thép phần sơ cấp ( $L_s$ )      | mm     | 126,3   |
| Bước cực ( $\tau$ )                               | mm     | 63,15   |
| Độ rộng của rãnh (a)                              | mm     | 11,2    |
| Độ rộng của răng (b)                              | mm     | 9,9     |
| Chiều cao của rãnh ( $h_r$ )                      | mm     | 30,3    |
| Chiều cao của gông ( $h_g$ )                      | m      | 14,6    |
| Số thanh dẫn trong rãnh ( $N_c$ )                 | -      | 30      |
| Đường kính dây chuẩn không kể cách điện ( $D_w$ ) | mm     | 1,4     |
| Số mạch nhánh song song ( $N_p$ )                 | -      | 5       |
| Giá trị lực tính toán ( $F_{stt}$ )               | N      | 100,634 |
| Hiệu suất ( $\eta$ )                              | %      | 79,49   |
| Hệ số công suất ( $\cos\varphi$ )                 | -      | 0,75    |



Hình 5. Mô hình phân bố mật độ từ thông trong DTT đơn biên với tốc độ 6m/s

Lực được xác định theo phương pháp tenxơ ứng suất Maxwell

$$\vec{F} = \int_V (\vec{J} \times \vec{B} - \frac{1}{2} H^2 \text{grad} \mu) dV$$

$$= \int_S \underline{T} d\vec{S} = \int_V \underline{T} d\vec{V}$$

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

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

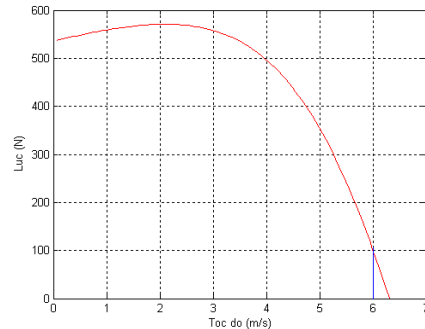
So sánh kết quả lực tính theo mô hình mạch và mô hình trường trong bảng 2.

Bảng 2. So sánh kết quả theo thuật toán và phần mềm FEM

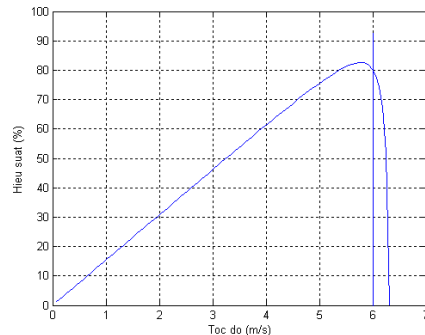
| Diễn giải | $F_s$ (tính toán) | $F_s$ (FEM) | Sai số |
|-----------|-------------------|-------------|--------|
| Lực (N)   | 100,634           | 94,555      | 6,079  |

Lực tổng theo trục x tính theo phương pháp phân tử hữu hạn chỉ bằng khoảng 94% của lực tính theo các công thức mô hình mạch. Điều này cho thấy, khi xét trên mô hình trường, do ảnh hưởng của hiệu ứng đầu cuối, hiệu ứng dòng xoáy làm từ cảm trong khe hở không khí bị giảm dẫn đến sự suy giảm độ lớn lực.

Các đặc tính:



Hình 6. Đặc tính  $F_s = f(V_r)$



Hình 7. Đặc tính  $\eta = f(V_r)$

**V.KẾT LUẬN**

- Xây dựng được phương pháp thiết kế gần đúng động cơ không đồng bộ tuyến tính 3 pha đơn biên với mục tiêu đạt được giá trị lực mong muốn. Đây có thể xem là kết quả bước đầu trong quá trình nghiên cứu động cơ không đồng bộ tuyến tính trong nước.

- Bằng cách sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn FEM, giá trị lực được kiểm chứng lại với sai số khoảng 6% so với giá trị tính toán trên mô hình trường. Điều này cho thấy kết quả tin cậy được.

- Ảnh hưởng của hiệu ứng đầu cuối, dòng xoáy đến độ lớn của lực trong ĐTT là đáng kể.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

1. *Nasar S.A. and Boldea*; Linear Electric Motors; Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
2. *Gieras J.F*; Linear Induction Drives; Oxford University Press, Inc., New York 1994.
3. *Wisuwat Plodpradistha*; Study of Tubular Linear Induction Motor for Pneumatic Capsule Pipeline system; Ph.D. Dissertation, Department of Electrical Engineering, University of Missouri- Columbia, May 2002.
4. *Viet Nam Hoang*; Design of a single sided linear induction motor; Bachelor of electrical engineering project; School of information technology and electrical engineering, University of Queensland, 2003
5. *Sang-Baeck Yoon, Jin Hur*; A method optimal of single sided linear induction motor for transit; IEEE Trans. On magnetics, Vol.35, No.3, BR-04, 1997
6. *David Meeker*; Finite Element Method Magnetics; User's Manual, March 17, 2003. <http://femm.berlios.de>

---

*Địa chỉ liên hệ:* Nguyễn Thế Công - Tel: 0903.418.713  
Khoa Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội  
Trương Minh Tấn - Email: tantmqn@gmail.com  
Khoa KT&CN, Trường Đại học Quy Nhơn