

다중층 해석법을 이용한 직선형 유도전동기의 특성 해석

장석명, 조성국, 이성호, 조한욱, 권정기
충남대학교

Characteristic Analysis of Linear Induction Motor Considering Multi-Region Traveling-wave problems

Seok-Myeong Jang, Sung Kook Cho, Sung Ho Lee, Han-Wook Cho, Jung Ki Kweon
Chungnam National Univ.

Abstract - Linear induction motor with multilayer region of the single-sided is analyzed considering multi region traveling wave problem. A hybrid method of analysis consisting of field analysis in conjunction with the multilayer transfer matrix concept with adjustment of secondary iron permeability to match the tangential magnetizing field in each layer is developed.

1. 서 론

리니어 인덕션 모터는 고속운반용 추진 시스템에 있어서 가장 유망한 전자기 에너지 변환장치이다. 이러한 장치는 추진력을 발생시키기 위하여 철이나 가이드 라인의 표면사이에 부착을 이용하지 않는다. 즉, 직선형 유도전동기에서의 추진력은 운반장치에 직접적으로 전달된다. 이러한 직선형 유도전동기는 2차측 도전체의 재질이나 구조에 따라 구분이 될 수 있다. 일반적으로 간단한 구조를 지닌, 즉 2차측이 하나의 재질로 구성되어진 모델이 있으며 또는 2개 이상의 도전체로 이루어진 모델이 있다 [1].

하나의 층으로 이루어진 도전체를 갖는 모델에 관련된 전자기장 특성해석은 전자기장 지배 방정식과 경계조건으로부터 특성식 유도 과정이 비교적 간단하다. 하지만 2개 이상의 층으로 이루어진 직선형 유도전동기의 경우, 파라미터의 유도과정이 어렵고 특성식 도출 과정이 매우 복잡하다.

본 논문에서 해석하고자 하는 모델은 고정자측에 여자 전류원을 갖고 2차측은 알루미늄 리액션 레일이 세워져 있는 직선형 유도전동기이다. 2차측이 공극,도전체 레일, Back iron, 자유 공간의 4개의 층으로 이루어진 직선형 유도전동기의 특성을 해석하기 위하여 다중층 법을 이용하여 우선 n개의 2차측 도체판을 갖는 2차원 전자기장 해석을 하여 다중층 매트릭스를 유도하고 시뮬레이션을 통하여 자속 분포 및 추력과 수직력 특성을 해석하고자 한다.

2. 다중층을 갖는 직선형 유도전동기

2.1 다중층 해석 모델

그림 1은 다중층을 갖는 직선형 유도전동기의 해석 모델을 보여준다. 고정자측에 인가된 전류는 등가 표면 전류 밀도로서 처리하였으며 2차측은 임의의 n개의 층을 갖고 각각의 층은 서로 다른 재질로 구성되어 있다. 2차측의 모든 층은 x축 방향으로 무한히 뻗어있고 단지 x축 방향으로만 이동한다. 그리고 z축 방향의 변화는 무시되며 z축으로 흐르는 전류의 방향은 무시된다.

2.2 특성 해석

그림 1에 제시된 해석 모델에 대하여 맥스웰 방정식으로부터 2차측 도전성 레일 영역에서 식(1)과 같은 지배

방정식이 유도된다.

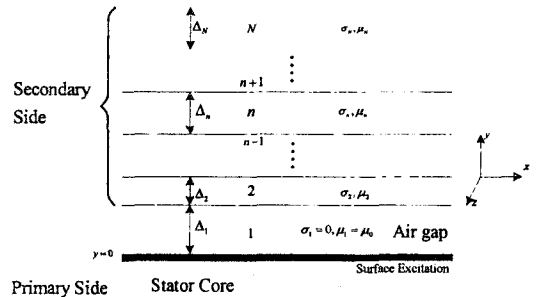


그림 1. 다중층 해석 모델

$$\frac{\partial^2 A_i}{\partial y^2} - a_i^2 A_i = 0 \tag{1}$$

여기서,

$$a_i = k\sqrt{1 + j\mu_i \sigma_i \omega V_s} / k \tag{2}$$

$$A_i = \vec{a}_i A_i(x, y) e^{j(\omega t - kx)}$$

여기서, k는 ... mu_i는 sigma_i s는 .. V_s는

지배방정식 (1)의 일반해는 식(3)과 형태를 갖는다.

$$A_i = \{ C_i e^{a_i y} + D_i e^{-a_i y} \} e^{j(\omega t - kx)} \tag{3}$$

따라서, 임의의 영역에서의 자속밀도의 수직성분과 수평 성분은 식(4)와 식(5)로 쓸 수 있다.

$$B_{x,i} = \frac{\partial A_i}{\partial y} = a_i \{ C_i e^{a_i y} - D_i e^{-a_i y} \} e^{j(\omega t - kx)} \tag{4}$$

$$B_{y,i} = -\frac{\partial A_i}{\partial x} = -jk \{ C_i e^{a_i y} + D_i e^{-a_i y} \} e^{j(\omega t - kx)} \tag{5}$$

그리고, 임의의 i 영역과 i-1 영역사이에서의 경계조건은 식(6)으로 일반화하여 쓸 수 있다.

$$B_{y,i} |_{y=(A_1, A_2, \dots, A_{i-1})^+} = B_{y,i-1} |_{y=(A_1, A_2, \dots, A_{i-1})^-}$$

$$\frac{1}{\mu_i} B_{x,i} |_{y=(A_1, A_2, \dots, A_{i-1})^+} = \frac{1}{\mu_{i-1}} B_{x,i-1} |_{y=(A_1, A_2, \dots, A_{i-1})^-} \tag{6}$$

여기서, A_i 는...

식(6)에 (4)와(5)를 대입하여 시스템 매트릭스 방정식으로 표현하면 식(7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} e^{a_i Y_i} & e^{-a_i Y_i} \\ \frac{\alpha_i}{\mu_i} e^{a_i Y_i} & -\frac{\alpha_i}{\mu_i} e^{-a_i Y_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_i \\ D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{a_{i-1} Y_i} & e^{-a_{i-1} Y_i} \\ \frac{\alpha_{i-1}}{\mu_{i-1}} e^{a_{i-1} Y_i} & -\frac{\alpha_{i-1}}{\mu_{i-1}} e^{-a_{i-1} Y_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{i-1} \\ D_{i-1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, $Y_i = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_{i-1}$ 이고, N개의 영역을 갖는 문제의 경우 2N개의 계수, C_i, D_i ($i=1,2,3,\dots,N$)를 구하여야 한다. 그런데 N개의 영역에서는 N-1 개의 경계조건이 필요하여 식(7)과 같은 방정식의 형태가 만들어진다. 따라서 2(N-1)개의 방정식에 의해 2N개의 미지계수를 찾는 연립방정식을 세우고, 해를 구하기 위하여 다음과 같은 가정을 세운다.

- ① $y \rightarrow \infty$ 일 때, 벡터포텐셜은 0이 된다.
- ② 고정자 표면에서의 여자는 등가 면전류에 의하여 정의된다.

n개의 영역에 대한 Matrix는 식 (11)과 같이 Π 함수를 사용하여 일반식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} = -\frac{1}{2r_1} \begin{bmatrix} -r_1 e^{-a_1 Y_1} & -e^{-a_1 Y_1} \\ -r_1 e^{a_1 Y_1} & e^{a_1 Y_1} \end{bmatrix} \left[\prod_{i=2}^{n-1} (M_i) \right] \times \begin{bmatrix} e^{a_n Y_n} & e^{-a_n Y_n} \\ r_n e^{a_n Y_n} & -r_n e^{-a_n Y_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_n \\ D_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, Matrix M_i 는 식(9)와 같다.

$$[M_i] = \frac{1}{r_i} \begin{bmatrix} -r_i \cosh \alpha_i \Delta_i & \sinh \alpha_i \Delta_i \\ r_i^2 \sinh \alpha_i \Delta_i & -r_i \cosh \alpha_i \Delta_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

(※ 여기서, $2 \leq i \leq n$)

이때 $[M_1]$ 과 $[M_n]$ 은 각각 다음과 같다.

$$[M_1] = \frac{1}{r_1} \begin{bmatrix} r_1 e^{-a_1 Y_1} & e^{-a_1 Y_1} \\ r_2 e^{a_1 Y_1} & -e^{a_1 Y_1} \end{bmatrix}$$

$$[M_n] = \begin{bmatrix} e^{a_n Y_n} & e^{-a_n Y_n} \\ r_n e^{a_n Y_n} & -r_n e^{-a_n Y_n} \end{bmatrix}$$

그러면, 식 (9)는 식(10)과 같이 다시 표현이 될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} = [P_n] \begin{bmatrix} C_n \\ D_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 계수 행렬 $[P_n]$ 은 식(11)과 같다.

$$[P_n] = \begin{bmatrix} P_{n1} & P_{n1} \\ P_{n2} & P_{n2} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left[\prod_{i=2}^{n-1} (M_i) \right] \quad (* 2 \leq n \leq N) \quad (11)$$

고정자 표면에서는 수직방향의 공극 자속밀도는 $y=0$ 에서의 경계조건에 의해 식(12)에서와 같이 표현을 할 수 있다.

$$B_{y,y=0} = jk(C_1 + D_1)e^{j(\omega t - kx)} = B_m e^{j(\omega t - kx)} \quad (12)$$

식(11)과(12)에 의해 계수 D_n 은 식(17)로 구해진다.

$$D_n = \frac{-jB_m}{k(P_{n2} + P_{n1})} \quad (13)$$

한편, 실제 문제를 풀어야 하는 경우 면전류로 등가화하는 과정이 필수적이므로, 고정자의 표면에서의 면전류를 경계 조건에 적용하면 식(14)와 식(15)의 과정을 거쳐 전달 관계 매트릭스가 구해진다.

$$\frac{\alpha_1}{\mu_0} (C_1 - D_1)e^{j(\omega t - kx)} = J_m e^{j(\omega t - kx)} \quad (14)$$

$$C_1 - D_1 = \frac{\mu_0 J_m}{\alpha_1} \quad (15)$$

$$D_n = \frac{\mu_0 J_m}{\alpha_1 (P_{n2} - P_{n1})}$$

두가지 경우에 있어, C_1, D_1 은 식(15)로부터 결정이 될 것이다. 그리고 모든 다른 계수들, $2 \leq n \leq N$ 의 영역에 있어 C_n, D_n 은 식(16)에 의하여 얻어진다. 즉,

$$\begin{bmatrix} C_n \\ D_n \end{bmatrix} = [P_n]^{-1} \begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{P_{n1}P_{n2} - P_{n2}P_{n1}} \begin{bmatrix} P_{n2} & -P_{n2} \\ -P_{n1} & P_{n1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$2 \leq n \leq N$

일단 C_i, D_i 가 결정되었고, 이 값들은 식(3)과 (4)에서 모든 영역에서의 벡터포텐셜과 자속 밀도로 분포되어진다. 이때, 각 영역에서 유도되는 전류 밀도는 다음과 같다.

$$J_{z,i} = \sigma_i \left\{ -\frac{\partial A}{\partial t} - V \frac{\partial A_n}{\partial x} \right\} = -j\sigma_s V_s k (C_i e^{a_i y} + D_i e^{-a_i y}) e^{j(\omega t - kx)} \quad (17)$$

2.2 추력 및 부상력 특성식

$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B}$ 이므로, 시간적 평균 힘 밀도를 식(18)와 같이 구하고 2차측 전체 영역에 대하여 적분하여 식(19)과 식(19)에서와 같이 전체 힘을 구하였다.

$$f_{x,i} = \frac{1}{2} \text{Re} \{ -J_{z,i} B_{x,i}^* \} \quad (18)$$

$$f_{y,i} = \frac{1}{2} \text{Re} \{ J_{z,i} B_{x,i}^* \}$$

$$F_x = \int_0^\lambda dx \int_{w/2}^{-w/2} dz \int_{y_s}^{y_{s+1}} Re \frac{1}{2} (J_z \times B_y) dy \quad (19)$$

$$F_y = \int_0^\lambda dx \int_{w/2}^{-w/2} dz \int_{y_s}^{y_{s+1}} Re \frac{1}{2} (J_z \times B_x) dy$$

2.3 해석 결과

표1은 해석하고자 하는 모델에 대한 설계 사양을 보여준다. 그림2는 각각 2차측에 알루미늄이 씌워진 직선형 유도전동기의 표1에 제시된 설계 사양에 대하여 시뮬레이션을 통하여 구한 공극에서의 자속밀도의 수직성분과 수평성분을 보여준다. 그림3과 그림4는 공극의 길이 변화에 따른 추력과 수직력 변화추이를 나타낸다. 그리고 그림5는 공극이 5mm일 때, Arc-LIM의 추력 및 수직력 특성을 나타낸다.

표1 Arc-LIM 설계 사양

항목	계원
1 차 측	
극수	6
공극	5 (mm)
1차측길이×폭×높이	570×190×130(mm)
1차측 arch 반경	R545
단절율	2/3
극간격	66(mm)
코일 간격	44(mm)
슬롯 간격	23(mm)
치 폭	11(mm)
병렬회로수	2
매 슬롯당 권선수	(25턴/층)×2층
2 차 측	
지름	0.86(m)
폭	0.15(m)
알루미늄 두께	5(mm)
Back iron 두께	10(mm)

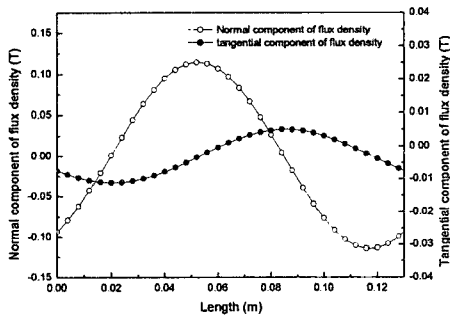


그림2 공극 자속밀도의 수직 및 수평 방향 성분

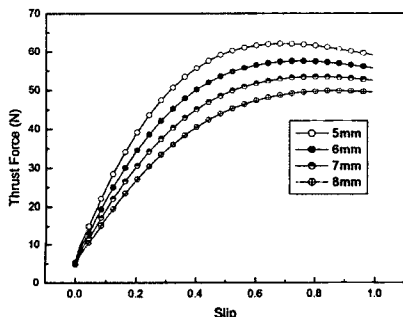


그림3 공극 길이에 따른 추력 특성 변화 추이

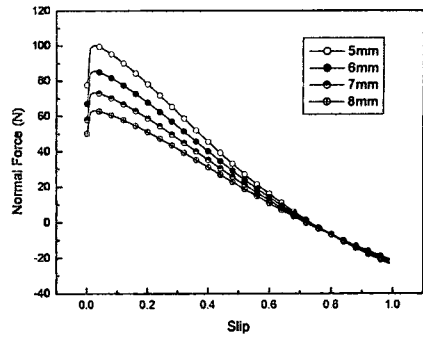


그림4 공극 길이에 따른 수직력 변화 추이

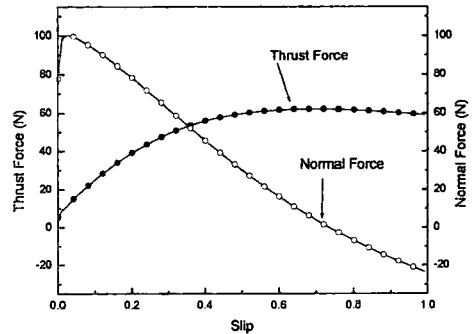


그림5 LIM의 추력 및 수직력 특성

3. 결론

본 논문에서는 다중층 영역을 갖는 직선형 유도전동기에 대하여 전자장 지배방정식으로부터 시스템 매트릭스를 도입하여 2차측이 n개인 모델에 대하여 추력 및 수직력 특성식을 유도하였다. 2차측 영역의 수가 4개인 직선형 유도전동기 대하여 매트릭스 식을 유도하고 특성식을 구해 시뮬레이션을하여 자체 특성 및 추력 및 수직력 특성을 검토하였다.

[참고 문헌]

- [1] R.S.Lipkis, "Single-Sided Linear Induction Motor A study of Thrust And Lateral Forces". TRW Systems, June 1971
- [2] R.M.PAI, "A Hybrid Method of Analysis of Low-Speed Linear Induction Motors", IEEE Trans on Magnetics, vol Mag-23, No. 6, Nove 1987
- [3] K.Idir, "Modeling and Performance of Linear Induction motor with SaturablePrimary", IEEE IAS, vol. 29, No. 6, Nove/Dec 1993