

이차측에 접합 부분을 갖는 선형 유도전동기의 동특성 해석

• 우경일^a, 권병일^a, 박승찬^b
 한양대학교 전기공학과^a, 한양대학교 공학기술 연구소^b

Dynamic Characteristics Analysis of Linear Induction Motor with Joints in the Secondary Conductor

• Woo Kyung-Il^a, Kwon Byung-Il^a, Park Seung-Chan^b
 Dept. of Electrical Eng., Graduate School of Hanyang Univ.^a, RIET^b

Abstract - In this paper, dynamic characteristics analysis of linear induction motor with joints in the secondary conductor is discussed. The time stepped finite element method and moving mesh technique are used for simulation. $\nabla\phi$ of jointed secondary conductor is defined for simulation, respectively. Simulation results have shown that joints in the secondary conductor affect thrust ripple and attractive force ripple.

1. 서 론

최근 선형 유도 전동기는 구조 및 전기적인 특성으로 인하여 운송 수단, conveyor system[1], 공장 자동화 등에 널리 사용되고 있다. 이런 응용 분야에서는 단 일차측이 이동자가 되고, 긴 이차측은 고정자가 되는 형태를 취한다[2]. 이런 형태의 선형 유도 전동기를 사용함에 있어서, 긴 이차측은 여러개 접합해서 구성한다.

만일, 선형 유도 전동기의 이차측이 접합 부분을 갖는 형태라면, 공극의 이동 자계에 의하여 발생한 이차측의 와전류 분포가 운동방향에 대하여 불연속적으로 된다[3]. 이러한 불연속적 와전류 분포는 순시 추력 및 수직력, 또한 공극 자속 벡터의 위상각 등의 제반 특성들을 변화시키므로, 접합부를 고려한 해석이 필수적이다.

따라서, 본 논문에서는 이차측에 접합부를 갖는 선형 유도 전동기의 동특성 해석을 위하여 이동 mesh 기법[4]과 유한 요소법을 적용한다. 이때, 와전류 해석을 위하여 접합된 2차측 도체판의 각각에 대하여 $\nabla\phi$ 를 정한다. 각 절점의 벡터 포텐셜과 입력 전류 그리고 $\nabla\phi$ 를 미지수로 하는 계 매트릭스를 구성하고 풀어서 추력, 수직력 및 와전류 분포 등을 구하고 접합부가 없는 경우의 해석 결과와 비교 검토한다.

2. 유한 요소 해석

2.1 해석 모델

다음 그림의 본 논문에서 해석하고자 하는 선형 유도 전동기를 나타낸다.

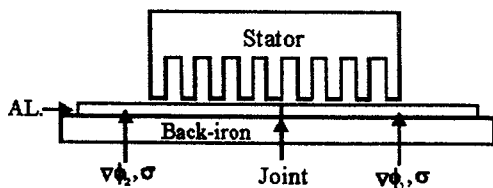


그림 1 해석 모델
 Fig. 1 Analysis model

2.2 지배 방정식

해석 영역을 2차원 유한요소법으로 풀기 위해 Maxwell 전자계 방정식으로부터 이동좌표계를 사용하여 었을 경우 지배방정식을 구하면 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_x + \sigma \left(\frac{\partial A_z}{\partial t} + \nabla\phi_1 + \nabla\phi_2 \right) \quad (1)$$

- 단, A_z : 자기벡터 포텐셜의 z축 성분,
- J_x : 슬롯내의 코일에 흐르는 전류밀도,
- σ : 2차측 도체판의 도전율,
- μ : 재료의 투자율,
- ϕ_1, ϕ_2 : 전기 스칼라 포텐셜.

이 지배방정식에 Galerkin 법을 적용하고, 영역 내에서의 근사함수를 사용하여 요소 (e)에서의 잔차를 구하면 다음과 같다.

$$R_{*e} = \int_{e} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z^{(e)}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z^{(e)}}{\partial y} \right) \right) N_{*e} dx dy - \sigma \int_{e} \frac{\partial A_z^{(e)}}{\partial t} N_{*e} dx dy - \sigma \int_{e} \nabla\phi_1 N_{*e} dx dy - \sigma \int_{e} \nabla\phi_2 N_{*e} dx dy + \int_{e} J_x N_{*e} dx dy \quad (j=1,2,3)$$

여기서, $A_z^{(e)}$ 는 한 요소내의 자기 벡터 포텐셜이고 N_{*e} 는 요소의 형상함수이다.

식 (2)를 전요소에 대하여 적분하여 매트릭스 형식으로 나타내면 식 (3)과 같으며, 미지수는 각 절점에서의 자기 벡터 포텐셜과 상 전류 그리고 각 영역의 $\nabla\phi_{1,2}$ 이다.

$$[\Delta t [T] + [M]][A]_{t+\Delta t} + \Delta t [E_{1,2}][\nabla\phi_{1,2}]_{t+\Delta t} + \Delta t [D][I]_{t+\Delta t} = \Delta t [N][A], \quad (3)$$

이 식을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$[[S] - [C] [Z_1] [Z_2]] \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \\ [\nabla\phi_1] \\ [\nabla\phi_2] \end{bmatrix} = [G] \quad (4)$$

식 (4)에서 [S]는 절점의 위치와 투자율 및 와전류 밀도에 관련된 계수 매트릭스, [C]는 코일의 전류에 관련된 계수 매트릭스를 나타내며, [Z₁], [Z₂]는 $\nabla\phi$ 에 관련된 계수 매트릭스, [$\nabla\phi_1$], [$\nabla\phi_2$]는 각각 접합부 좌우의 영역을 나타내며, [G]는 강제 전류에 해당하는 구동 매트릭스를 나타낸다.

2.3 전압 방정식의 결합

식 (4)와 같이 자기 벡터 포텐셜과 권선의 전류값 및 $\nabla\phi$ 을 미지수로 해를 구하는 경우, 방정식의 수보다 미지수의 수가 많기 때문에 전압 방정식이 필요하게 된다. 각 상의 전압 방정식은 다시 자기 벡터 포텐셜과 전류와 관계되는 식으로 변형된다.

Krichhoff 전압 법칙을 회로에 적용하면 다음과 같다.

$$\frac{d\psi_a}{dt} - \frac{d\psi_c}{dt} + L \frac{dI_a}{dt} - L \frac{dI_c}{dt} + R_a I_a - R_c I_c = V_a - V_c \quad (5)$$

$$\frac{d\psi_a}{dt} - \frac{d\psi_b}{dt} + L \frac{dI_a}{dt} - L \frac{dI_b}{dt} + R_a I_a - R_b I_b = V_a - V_b \quad (6)$$

여기서, $\psi_{a,b,c}$ 는 각 상에 대한 자속 쇄교수, L 은 각 상의 코일단의 누설 인덕턴스이다.

선형 유도 전동기가 3상 Y결선이므로 Krichhoff 법칙에 의해 식 (7)이 성립된다.

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (7)$$

식 (5)와 (6)의 시간 미분항 처리를 위하여 후퇴 차분법을 사용하고, 식 (7)과 연립하면 다음과 같이 된다.

$$[K][A]_{t+\Delta t} + [X][I]_{t+\Delta t} = [F]_t \quad (8)$$

단, $[K]$ 는 역기전력에 관련된 계수 매트릭스, $[X]$ 와 $[I]_{t+\Delta t}$ 그리고 $[F]_t$ 은 다음과 같으며, Δt 는 샘플링 시간이다.

$$[X] = \begin{bmatrix} L + \Delta t R_a & 0 & -(L + \Delta t R_c) \\ L + \Delta t R_a & -(L + \Delta t R_b) & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[I]_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[F]_t = \begin{bmatrix} \Delta K (V_a - V_c) + \psi_a^t - \psi_c^t + L(I_a^t - I_c^t) \\ \Delta K (V_a - V_b) + \psi_a^t - \psi_b^t + L(I_a^t - I_b^t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.4 전류의 연속성

식 (4)를 풀기 위해서 전압 방정식 이외에 전류의 연속성을 나타내는 식 (12)을 사용한다.

$$\nabla \cdot J_a = 0 \quad (12)$$

여기서 J_a 는 와전류 밀도를 나타낸다.

이 식은 식 (13)과 같이 표현이 가능하다.

$$\int_V (\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \nabla \phi) dx dy = 0 \quad (13)$$

식 (13)에 후퇴 차분법을 적용하고, 요소 내의 근사 함수와 형상함수를 사용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\sum_{m=1}^3 \frac{\Delta \sigma}{3} A_m^{t+\Delta t} + \sigma S_{1,2} \nabla \phi \Delta t = \sum_{m=1}^3 \frac{\Delta \sigma}{3} A_m^t \quad (14)$$

이 식을 매트릭스 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$[U][A]_{t+\Delta t} + [H_{1,2}][\nabla \phi_{1,2}]_{t+\Delta t} = [M]_t \quad (15)$$

식 (14)에서 $S_{1,2}$ 는 이차측 접합부의 좌우의 면적이다. 식 (4)과 식 (8) 및 식 (15)를 조합해서 표현하면 다음과 같은 전체 계 매트릭스가 된다. 전체 계 매트릭스의 계수 매트릭스는 $\nabla\phi$ 의 도입으로 인하여 비대칭 매트릭스가 되므로 비대칭 매트릭스를 풀 수 있는 해법을 사용하여야 한다.

$$\begin{bmatrix} [S] & -[C] & [Z_1] & [Z_2] \\ [K] & [X] & [0] & [0] \\ [U] & [0] & [H_1] & [H_2] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \\ [\nabla \phi_1] \\ [\nabla \phi_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [G] \\ [F] \\ [M] \end{bmatrix} \quad (16)$$

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

다음 그림들은 접합부가 있는 선형 유도 전동기를 정현파 구동을 한 경우의 결과들이다. 그림 2는 접합부가 일차측의 active 영역을 지나갈 때, $t_1=0.29$ [sec], $t_2=0.39$ [sec]일 때의 전류밀도를 나타낸다. 접합부가 있는 위치에서 전류밀도가 0가 됨을 알 수 있다. 그림 3은 각 시간에서의 자속 밀도 분포를 나타내며, 그림 4와 그림 5 그리고 그림 6과 그림 7은 이 시각에서의 공극에 존재하는 각 요소에서의 추력 분포 및 자속 선도를 나타낸다. 그림 8과 그림 9은 선형 유도 전동기를 정현파 구동 한 경우에서 접합부의 존재 유무에 따른 추력 특성과 수직력 특성을 나타낸다. 그림 8에서 접합부의 존재로 인하여 추력 리플이 접합부가 존재하지 않는 경우보다 크게 나타난다. 그림 9에서 접합부의 존재로 인하여 이차 저항의 증가 및 와전류의 불균일성으로 인하여 수직력 리플의 크기에 변화가 존재함을 알 수 있다.

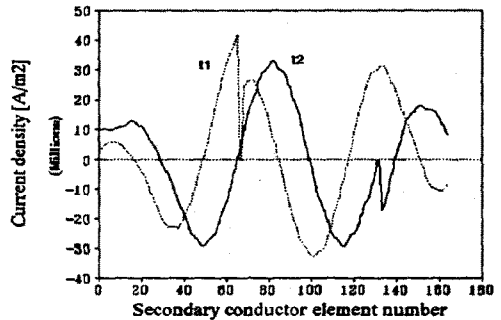


그림 2 전류 밀도 분포($t_1=0.29$ [sec], $t_2=0.39$ [sec])
Fig. 2 Current density distribution

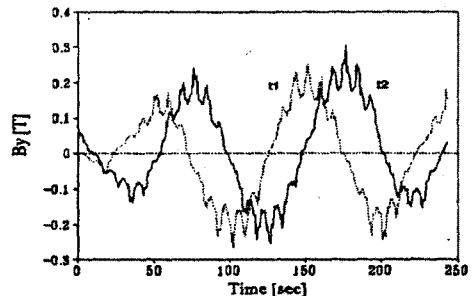


그림 3 자속 밀도 분포($t_1=0.29$ [sec], $t_2=0.39$ [sec])
Fig. 3 Flux density distribution

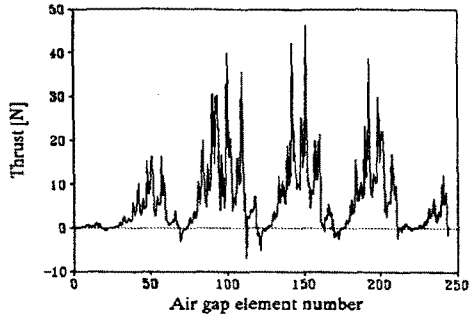


그림 4 추력 분포($t_1=0.29(\text{sec})$)
Fig. 4 Thrust distribution

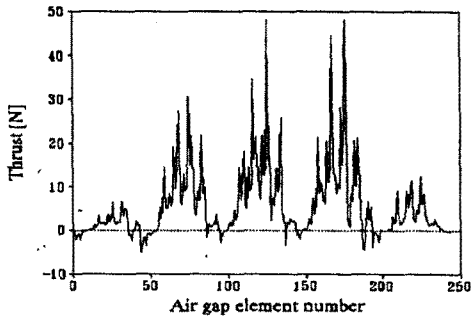


그림 5 추력 분포 ($t_2=0.39(\text{sec})$)
Fig. 5 Thrust distribution

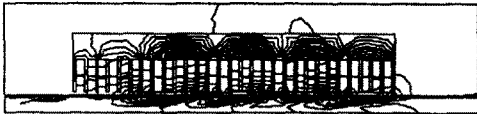


그림 6 자속 선도($t_1=0.29(\text{sec})$)
Fig. 6 Flux line

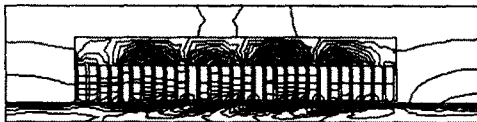


그림 7 자속 선도 ($t_2=0.39(\text{sec})$)
Fig. 7 Flux line

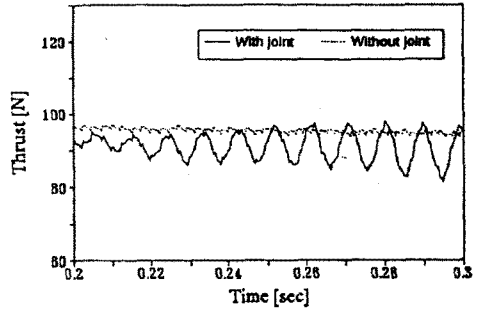


그림 8 추력 특성
Fig. 8 Thrust characteristics

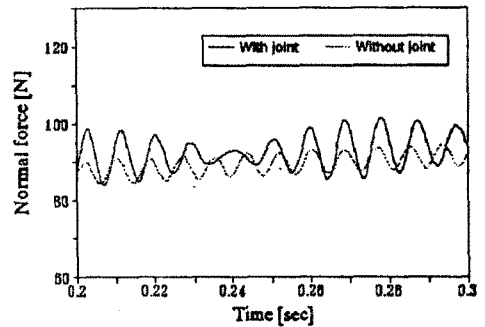


그림 9 수직력 특성
Fig. 9 Normal force characteristics

4. 결 론

본 논문에서는 이차측에 접합부를 갖는 선형 유도 전동기의 동특성 해석에 대하여 설명하였다. 이차측에 존재하는 접합부가 일차측의 아래 부분에 존재 할 때, 일차측의 이동 자계에 의하여 발생하는 이차측의 와전류 분포의 불균일성으로 인하여 추력 및 수직력 리플의 크기가 증가함을 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Dal-Ho Im, Eung-Chan Park, Gyu-Tak Kim, "Development of Auto-Conveyor System using Linear Induction Motor", *National Convention I.E.E. Japan-IAS*, pp. 1.85-1.91, 1990
- [2] E. R. Laithwaite, "Linear Electric Machines-A Person View", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 63, No. 2, February 1975.
- [3] A. Gastli, "Compensation for the effect of joints in the secondary conductors of a linear induction motor", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 13, No. 2, June 1998
- [4] Dal-Ho Im, Chang-Eob Kim, "Finite Element Force Calculation of a Linear Induction Motor Taking Account of the Movement", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 30, No. 5, September 1994