

새로운 등가회로정수 산출법에 의한 편축식 직선형 유도전동기의 동특성 해석

장 석명, 권 정기, 조 한욱, 유 대준, 이 성호.
충남 대학교, LG D/A연구소

Dynamics Analysis of Single-Sided Linear Induction Motor with New Method of Equivalent Circuit Parameter

S.K. Jang, J.K. Kwon, H.W. Cho, D.J. Yoo, S.H. Lee
Chungnam National Uni., LG D/A

Abstract - Linear induction motors are characterized by a large air gap and, as a result, large leakage inductances. Moreover, due to its unslotted structure and the absence of end rings in the secondary part, the equivalent circuit parameter calculation is very difficult. Therefore this paper introduces the new method of equivalent circuit parameter and analyzes dynamics characteristic of single-sided LIM

자성체는 등방성의 투자율을 갖는다. 또한 특성 해석에서 단부 효과는 고려하지 않았다. 맥스웰 방정식과 물류의 조건으로부터 그림 1의 각 영역에 대한 자기 벡터포텐셜은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\nabla^2 A = 0 \tag{1.a}$$

$$\nabla^2 A = \mu \sigma \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} - u \times (\nabla \times A) \right\} \tag{1.b}$$

식 (1.a)는 와전류가 존재하지 않는 모든 영역의 지배방정식이며, 식 (1.b)는 와전류가 존재하는 영역에서의 지배방정식이다. 식 (1)의 편미분 방정식의 해는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$A_{zn} = (C_n e^{a_n x} + D_n e^{-a_n x}) e^{j(\omega t - \beta_n x)} \tag{2}$$

여기서 $a_n^2 = \beta_n^2 + j\beta_n \mu_n \sigma_n u_n$ 이며, 그림 1의 모든 영역에 적용할 수 있는 일반적인 형태이다. 각 영역의 자속 밀도는 식(2)의 자기 벡터포텐셜과 정의 $\nabla \times A = B$ 에 의하여 식 (3)과 같이 표현된다.

$$B_{yn} = \frac{\partial A_{zn}}{\partial y} = a_n (C_n e^{a_n x} - D_n e^{-a_n x}) e^{j(\omega t - \beta_n x)} \tag{3.a}$$

$$B_{xn} = -\frac{\partial A_{zn}}{\partial x} = j\beta_n (C_n e^{a_n x} + D_n e^{-a_n x}) e^{j(\omega t - \beta_n x)} \tag{3.b}$$

여기서 C_n, D_n 은 각 영역의 편미분 방정식의 미정계수이며, 경계 조건을 대입하여 얻을 수 있다.

2.1.1 공간 고조파법에 의한 1차측 인덕턴스 산출

2. 본 론

2.1 편축식 직선형 유도전동기의 자계 특성

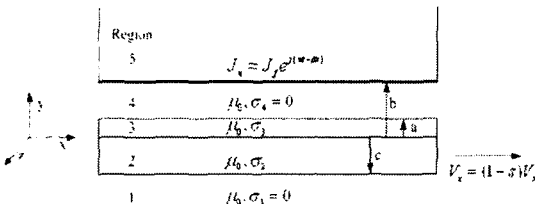


그림 1 편축식 직선형 유도 전동기의 등가 해석 모델

그림 1은 편축식 직선형 유도전동기(SLIM)의 특성해석을 위한 해석 모델이다. 그림 1에서 1차측은 치-슬롯을 갖는 구조를 카터 계수를 이용하여 등가 전류밀도로 치환하였으며, 2차측은 도체판과 백아이언으로 구성되어 있다. 그림에서 모든 전류의 방향은 z-성분만을 가지며,

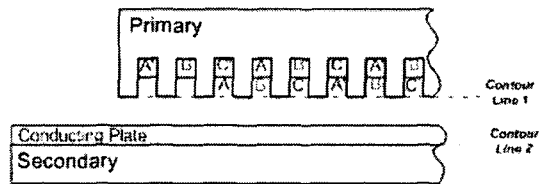


그림 2 1차측 누설 및 자화 인덕턴스 해석 모델

그림 2는 1차측 누설 및 자화 인덕턴스 산출을 위해 간략화된 SLIM 해석 모델을 도시하고 있다. 그림 2에서 1차측은 2층권으로 구성되어 있으며, 집중권에 2/3 단절권을 사용하였다. 2차측은 서로 다른 도전율을 갖는 판으로 구성되어 있다. 그림 2와 같은 구조를 갖는 모델의 인덕턴스를 계산하기 위해 Sakutarō Nonaka 교수는 등가 퍼미언스를 사용하였고, Gieras, J. F. 교수는 공간고조파법을 이용하여 전체의 세기와 자계의 세기의 비를 이용하였다. 하지만, 실험값을 갖는 모델에 대하여 앞서 제시한 두 가지 해석법이 서로 다른 2차측 임피던

스 값을 보였으며, 실험값과도 차이를 보였다. 따라서 본 논문에서는 코일단을 통과하는 쇠교 자속을 구하여 1차측 누설 인덕턴스와 자화 인덕턴스를 계산하였다. 그리고, 1차측으로 환산된 2차측의 누설 인덕턴스 및 저항값은 수치해석을 이용하여 구하였다.

1차측의 누설 및 자화 인덕턴스는 인덕턴스의 정의식 (4)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\Phi = \int_s B \cdot da = \int_s (\nabla \times A) \cdot da = \oint_c A \cdot dl \quad (4.a)$$

$$L_{ph} = \frac{N}{I} \oint_s B ds = \frac{N}{I} \oint_c A \cdot dl \quad (4.b)$$

그림 2의 Contour Line 1과 2에서 공간고조파법에 의한 자속밀도 특성식 (3)과 인덕턴스 정의식 (4)를 이용하여 식 (5)와 같은 인덕턴스를 산출할 수 있다.

$$L_1 = \frac{N}{I} \oint_s B_n ds \quad \text{at Contour Line 2}$$

$$L_2 = \frac{N}{I} \oint_s B_n ds \quad \text{at Contour Line 1} \quad (5)$$

$$L_3 = \frac{N}{I} \oint_s B ds \quad \text{at Contour Line 1}$$

식 (5)에서 자화 인덕턴스는 Contour Line 2에서 법선 성분 자속밀도를 면적분하여 구할 수 있으며 식 (6)과 같다.

$$L_m = L_1 \quad (6)$$

누설 인덕턴스는 Contour Line 1과 2의 법선 성분 자속밀도의 차와 Contour Line 1의 접선 성분 자속밀도로 구할 수 있으며 식 (7)과 같다.

$$L_l = (L_2 - L_1) + L_3 \quad (7)$$

2.1.2 수치 해석법에 의한 2차측 임피던스의 산출

2차측의 임피던스를 산출하기 위하여 임의의 2차측 임피던스에 대한 유도기 등가회로법의 슬립-추력 곡선과 공간고조파법에 의한 슬립-추력 곡선을 비교하여 슬립-추력 곡선이 같아지도록 2차측 임피던스를 결정하는 방법을 이용하였다.

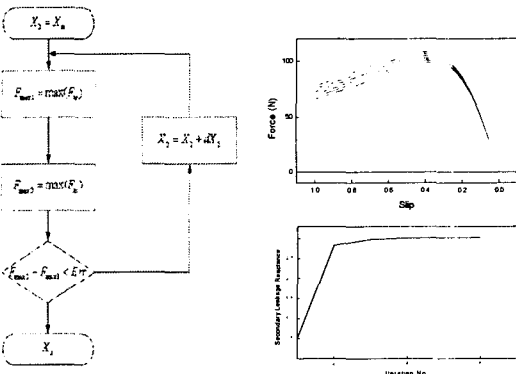


그림 3 2차측 누설 인덕턴스의 산출

등가회로의 1차측 임피던스 및 2차측 저항값이 결정된 경우에 2차측 누설 인덕턴스의 변화에 따라 슬립-추력 곡선의 최대값이 변한다. 따라서 2차측 누설 인덕턴스는 두 가지 해석법에 의한 슬립-추력 곡선의 최대값이

같아지도록 2차측 누설 인덕턴스의 값을 조절하여 결정하였다. 그림 3은 2차측 누설 인덕턴스를 구하기 위한 수치 해석의 순서도와 2차측 누설 인덕턴스 변화에 따른 슬립-추력 곡선 및 수치 해석에 의한 2차측 누설 인덕턴스의 수렴 곡선을 보여주고 있다.

유사한 방법으로, 2차측 저항값의 변화에 따른 슬립-추력 곡선은 비례추기 특성에 의하여 최대값은 일정하지만 최대값이 발생하는 슬립이 변화하며, 따라서 s=1일 때 추력값이 변한다. 그러므로 2차측 인덕턴스의 산출 방법과 유사하게 두 가지 해석법에 의한 슬립-추력 곡선 중 s=1일 때 추력값이 같아지도록 2차측 저항값을 산출하였다. 그림 4는 2차측 저항값을 구하기 위한 수치 해석의 순서도와 2차측 저항값의 변화에 따른 슬립-추력 곡선 및 수치 해석에 의한 2차측 저항값의 수렴 곡선을 보여주고 있다.

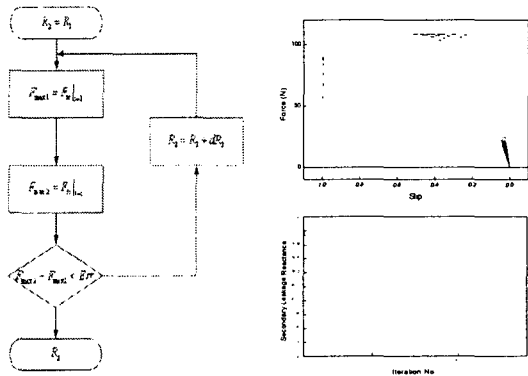


그림 4 2차측 저항값의 산출

표 1은 임의의 요구사항을 갖는 SLIM에 대하여 외형적 치수를 설계하고, 앞서 제시한 방법으로 등가회로정수를 산출한 값을 보여주고 있다.

표 1 편축식 직선형 유도전동기의 설계변수

모델 사양		설계값
요구 사양	정격전압	220 (V)
	정격추력	300 (N)
	주파수	50 (Hz)
	정격속도	7 (m/s)
SLIM 구조	극수	6
	공극	4 (mm)
	도체판 두께	5 (mm)
	백아이언 두께	20 (mm)
	극피치	96 (mm)
	슬롯피치	15 (mm)
	슬롯깊이	72 (mm)
	치피치	17 (mm)
	상당 턴수	258
등가회로 파라미터	R ₁	0.3821 (Ω)
	R ₂	1.088 (Ω)
	X ₁	0.0032 (Ω)
	X _m	0.0088 (Ω)
	X ₂	0.0107 (Ω)
가동자의 질량	M	5 (kg)

2.2 편축식 직선형 유도전동기의 동특성

회전형 유도전동기의 경우 유도전동기의 중성점이 외부에 연결되어 있지 않고, 각 상전압의 순시합이 0이고 가정하면 임의의 속도 ω로 회전하는 좌표축에서 고정자와 회전자의 dq축 전압 방정식은 식 (8)과 같다.

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + P \dot{\lambda}_{ds} - \omega \lambda_{qs}$$

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + P \dot{\lambda}_{qs} + \omega \lambda_{ds}$$

$$0 = r_r i_{dr} + P \dot{\lambda}_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr}$$

$$0 = r_r i_{qr} + P \dot{\lambda}_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr}$$

또한, 고정자와 회전자와의 쇄교 자속은 식 (9)와 같다.

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}$$

$$\lambda_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr}$$

$$\lambda_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr}$$

회전형 유도전동기에의 dq축 모델을 직선형 유도전동기로 치환하기 위하여 식 (8)에서의 ω_r 은 이동자의 전기각속도이므로 이동자의 속도 v_r 과는 식 (10)과 같은 관계가 성립한다.

$$\omega_r = \frac{\pi}{\tau} v_r$$

직선형 유도전동기의 추력식은 식 (11)와 같이 표현된다.

$$F_d = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} (\lambda_{ds}^s i_{qs}^s - \lambda_{qs}^s i_{ds}^s)$$

이 계에 존재하는 운동방정식은 식 (12)과 같다.

$$M \frac{dv_r}{dt} + B_m v_r + F_L = F_d$$

여기서 M 은 가동자의 질량이며, B_m 은 마찰계수이고, F_L 은 부하이다.

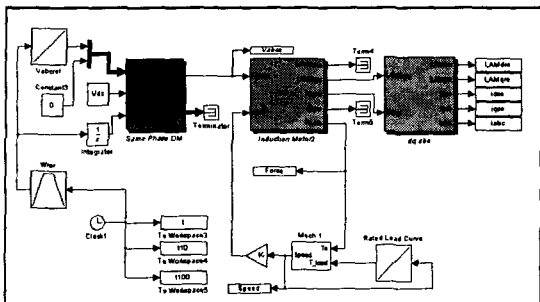


그림 5 V/F 일정 제어 시뮬레이션

그림 5는 편측식 직선형 유도전동기의 V/F 일정 제어를 시뮬레이션하기 위한 블록도이다. 그림 6은 표 1에 제시된 모델을 정격부하에서 직입 기동한 특성을 보

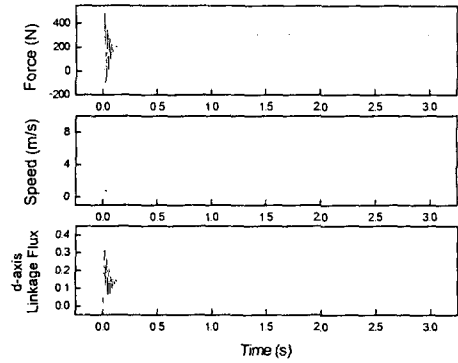


그림 6 정격 부하에 따른 직선형 유도전동기의 동특성

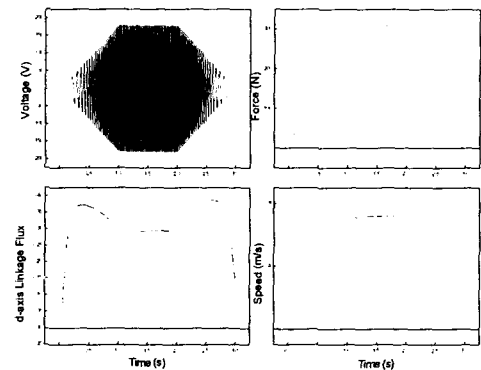


그림 7 V/F 일정 제어에 따른 직선형 유도전동기의 동특성

이고 있으며, 그림 7은 V/F 일정 제어에 따른 편측식 직선형 유도전동기의 동특성을 보이고 있다. 그림에서 설계된 모델은 정격에서 안정적으로 운전되고 있으며, V/F 일정 제어가 가속, 정속, 감속에 따라 안정적으로 운전됨을 확인할 수 있다.

3. 결 론

직선형 유도 전동기는 구조적으로 등가회로 정수를 산출하는데 많은 어려움이 있다. 일반적으로 제작된 모델에 대하여 무부하 시험 및 구속 시험을 통하여 등가회로 정수를 산출하지만, 설계 과정에서 등가회로정수를 예측하고 동특성을 고려하여 설계한다면 고효율의 직선형 유도 전동기를 설계할 수 있고, 제어 시스템의 설계도 수월할 것이다. 따라서 본 논문에서는 새로운 등가회로정수 산출법과 동특성을 해석하여 직선형 유도전동기의 설계에 도움을 주고자 한다.

[참 고 문 헌]

[1] Dae kyong Kim, Byung il Kwon, Kyung il Woo, "The Characteristic Analysis of Vector Control in a Linear Induction Motor Considering Static and Dynamic End Effects", 전기학회논문지 2002년 pp.413-424
 [2] J.K. Gieras, G.E. Dawson, A.R. Eastham, "Performance Calculation for Single Sided Linear Induction Motors with a Double Layer Reaction Rail Under Constant Current Excitation", IEEE Trans. on MAGNETICS, Vol. MAG 22, Jan. 1986