

편축식 직선형 유도전동기의 효율 향상을 위한 설계 및 특성 해석

장 석명, 권 정기, 조 한욱, 유 대준
충남대학교

Improved Efficiency Design and Analysis of Single-Sided Linear Induction Motors

Seok-Myeong Jang, Jeong-Ki Kwon, Han-Wook Cho, Dae-Joon You
Chungnam National Univ.

Abstract - In this paper, a new design method to improve efficiency of single-sided linear induction motor (SLIM) is presented. The method utilizes the space harmonic analysis, the equivalent circuit analysis and numerical analysis method. This paper deals with calculation of the design dimension of primary and secondary and the equivalent circuit parameters for SLIM. Finally, analytical results for SLIM designed are verified by FE results.

1. 서 론

구조가 단순하고, 유지보수가 용이한 직선형 유도전동기는 동력 변환 장치 없이 추진력을 직접 얻을 수 있으므로 직선 운동이 필요한 공장자동화 서보 시스템 및 반송 시스템에서 그 용도가 점차 증가되고 있다. 이러한 직선형 유도전동기는 정격 속도와 전원 주파수에 의해서 극피치가 결정되므로 극피치내에 권선을 배치해야 하는 기계적 제약이 따른다. 또한 회전형 유도전동기에 비해 자기적 공극이 매우 크고, 입력단과 출력단에 단부 효과가 존재하므로 장하분배법이나 집중회로정수를 이용한 회전형 유도전동기의 설계 방식을 그대로 사용하기에는 한계가 있으며, 효율 및 역률도 상대적으로 나쁘다. 그러나 현재 세계적인 추세가 에너지 절약 및 효율적인 측면을 강조하고 있으므로 효율 및 역률 향상을 위한 직선형 유도전동기의 설계는 필연적이라 할 수 있다.[1]

본 논문에서는 편축식 직선형 유도전동기를 설계하기 위하여 공간고조파법, 등가회로법 및 유한요소법 등의 특성 해석법을 이용하였다. 공간고조파법을 이용하여 여자 전류원을 갖는 편축식 직선형 유도전동기의 초기 설계 모델에 대하여 추력 특성을 해석하고, 초기 모델의 외형적 설계 변수를 변화시켜, 요구 추력이 발생하도록 하였다. 또한 공간고조파법과 수치해석을 이용하여 등가 회로정수 및 등가 임피던스를 산출하여 전압원에 의한 설계 모델을 해석하고, 효율 및 역률이 최대가 되도록 설계 변수를 변화시켰다. 마지막으로 요구 사양이 다른 세 가지 모델을 설계하고, 설계 모델의 특성값을 유한요소해석치와 비교하여 본 논문에서 제시한 설계의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 편축식 직선형 유도전동기의 특성 해석

그림 1은 편축식 직선형 유도전동기(SLIM)의 특성 해석을 위한 해석 모델이다. 그림 1에서 1차측은 차-슬롯을 갖는 구조를 카터 계수를 이용하여 등가 전류밀도로 치환하였으며, 2차측은 도체판과 백아이언으로 구성되어 있다. 그림에서 모든 전류의 방향은 z-성분만을 가지며, 자성체는 등방성의 투자율을 갖는다. 또한 특성 해석에서 단부 효과는 고려하지 않았다.

2.1.1 공간고조파법에 의한 자계 및 힘 특성

다중층 해석을 위하여 맥스웰 방정식과 쿨롱의 조건으로부터 그림 1의 각 영역에 대한 자기 벡터포텐셜은 식 (1)과 같이 표현된다.

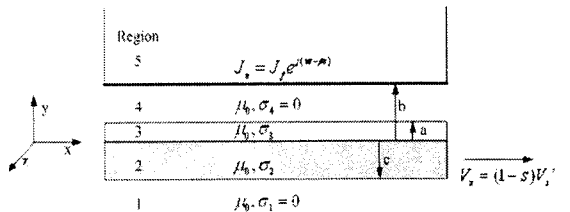


그림 1 편축식 직선형 유도 전동기의 등가 해석 모델

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

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

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

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

여기서 $a_n^2 = \beta_n^2 + j\beta_n \mu_n \sigma_n$ 이며, 그림 1의 모든 영역에 적용할 수 있는 일반적인 형태이다.

각 영역의 자속밀도는 식(2)의 자기 벡터포텐셜과 정의 $\nabla \times A = B$ 에 의하여 식 (3)과 같이 표현된다.

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

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

여기서 C_n, D_n 은 각 영역의 편미분 방정식의 미경계 수이며, 경계 조건을 대입하여 얻을 수 있다. 모든 영역에서 만족하는 경계 조건은 다음과 같다.

- 1) $y = \pm\infty$ 에서 자기 벡터 포텐셜은 존재하지 않는다.
- 2) 각 경계면에서 자속밀도의 법선 성분은 연속이다.
- 3) 각 경계면에서 전류가 존재하지 않는다면, 접선 성분 자계의 세기는 연속이고, 전류가 존재한다면

$$H_i - H_{(i-1)} = J_n \text{ 이다.}$$

경계 조건으로부터 미정 계수를 결정하는 행렬식은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$[T][X] = [M] \quad (4)$$

여기서 n-영역을 갖는 해석 모델에서 행렬 [T]는 (2n-1) 차원의 정사각행렬이며, 행렬 [X]와 행렬 [M]은 식 (5)와 같다.

$$[X] = [C_1, C_2, D_2, \dots, C_{n-1}, D_{n-1}, D_n]^T \quad (5.a)$$

$$[M] = [0, 0, 0, \dots, 0, J_n]^T \quad (5.b)$$

식 (4)의 행렬식을 계산하여 각 영역의 자속밀도를 확인하고, 공극 자속밀도를 이용하여 해석 모델의 추력 특성을 확인할 수 있다. 해석 모델의 추력은 맥스웰 응력법을 사용하여 구할 수 있으며, 식 (6)과 같다.

$$\begin{cases} F_t = \frac{w_s p}{2\mu_0} \int_0^{2\tau} \text{Re}(B_t B_n^*) dx \\ F_n = \frac{w_s p}{4\mu_0} \int_0^{2\tau} (|B_n|^2 - |B_t|^2) dx \end{cases} \quad (6)$$

여기서 p는 극수이며, w_s는 1차측의 유효 깊이이고 τ는 극피치이다.

2.1.2 공간고조파법에 의한 등가회로정수 산정

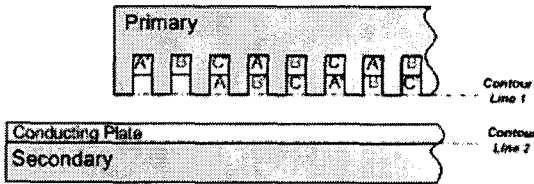


그림 2 1차측 누설 및 자화 인덕턴스 해석 모델

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

그림 2의 Contour Line 1과 2에서 공간고조파법에 의한 자속밀도로 식 (7)과 같은 인덕턴스를 산출할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{N}{l} \oint_s B_n ds \text{ at Contour Line 2} \\ L_2 &= \frac{N}{l} \oint_s B_n ds \text{ at Contour Line 1} \end{aligned} \quad (7)$$

$$L_3 = \frac{N}{l} \oint_s B_t ds \text{ at Contour Line 1}$$

식 (7)에서 자화 인덕턴스는 Contour Line 2에서 법선 성분 자속밀도를 면적분하여 구할 수 있으며 식(8)과 같다.

$$L_m = L_{m1} \quad (8)$$

누설 인덕턴스는 Contour Line 1과 2의 법선 성분 자속밀도의 차와 Contour Line 1의 접선 성분 자속밀도로 구할 수 있으며 식 (9)와 같다.

$$L_l = (L_{m2} - L_{m1}) + L_{l1} \quad (9)$$

2차측의 임피던스를 산출하기 위하여 임의의 2차측 임피던스에 대한 유도기 등가회로의 슬립-추력 곡선과 다중층 해석에 의한 슬립-추력 곡선을 비교하여 슬립-추력 곡선이 같아지도록 2차측 임피던스를 결정하는 방법을 이용하였다. 등가회로의 1차측 임피던스 및 2차측 저항값이 결정된 경우에 2차측 누설 인덕턴스의 변화에 따라 슬립-추력 곡선의 최대값이 변한다. 유사한 방법으로, 2차측 저항값의 변화에 따른 슬립-추력 곡선은 비례 추이 특성에 의하여 최대값은 일정하지만 최대값이 발생하는 슬립이 변하며, s=1일 때 추력값이 변한다. 따라서 2차측 누설 인덕턴스는 두 가지 해석법에 의한 슬립-추력 곡선의 최대값이 같아지도록 2차측 누설 인덕턴스의 값을 조절하여 결정하였다. 동일한 방법으로 s=1일 때 추력이 같아지도록 2차측 저항값을 산출하였다.

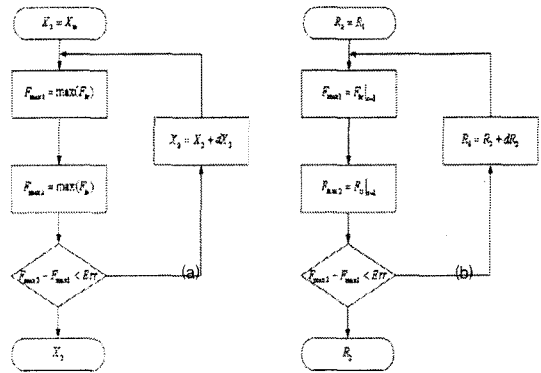


그림 3 2차측 누설 인덕턴스(a) 및 저항(b) 산출을 위한 순서도

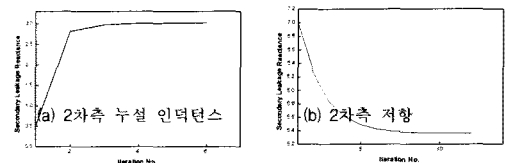


그림 4 수치 해석에 의한 2차측 임피던스의 수렴 곡선

그림 3은 2차측 임피던스를 산출하는 알고리즘을 도시하고 있으며, 그림 4는 2차측 임피던스의 수렴 곡선을 도시하고 있다.

2.2 효율 향상을 위한 설계

편축식 직선형 유도전동기의 효율 향상 설계를 위하

이 초기 설계 변수에 대하여 특성 해석을 수행하고, 목적 함수인 효율 및 역률이 최대가 되도록 설계 변수를 변화시키는 과정을 반복 수행하며, 그림 5에 설계 순서를 도시하였다. 그림 5에서 설계의 요구 사양으로는 정격전압, 정격추력, 주파수 및 정격속도를 갖으며, 고정된 설계 값으로는 기계적 공극, 정격슬립 및 사용 재질의 전자기적 특성 값을 갖는다. 설계 변수로는 고정자 및 가동자의 기계적 치수와 사용하는 권선을 JIS C-3203의 규격에서 결정하도록 하였다. 일반적으로, 직선형 유도전동기의 공극 자속밀도는 0.3[T]정도이므로 치의 포화는 고려하지 않았다. 또한 정격슬립은 0.2-0.3의 범위를 갖으며, 점적률은 0.5-0.6, 권선의 전류밀도는 4-6.5(A/㎠) 정도의 범위를 가지므로 이 범위에서 선택하였다.

점적률과 권선의 전류밀도를 고려하여 초기 모델에 대하여 공간고조파 해석을 수행하고, 정격슬립에서 요구 추력이 발생하는 설계 치수를 결정한다. 설계 치수가 결정되면, 등가회로 파라미터를 구하기 위한 슬립-추력 곡선을 계산하고, 공간고조파법을 이용하여 단위 상당 턴수 및 단위 입력 전류에서 1차측 누설 및 자화 인덕턴스를 구한다. 공간고조파법에서는 입력을 정전류원으로 가정하였다. 하지만 정격전압을 요구사양으로 갖는 SLIM의 설계에서 입력전류는 등가회로의 회로방정식으로부터 얻을 수 있기 때문에 등가회로의 파라미터를 구하여야 한다.

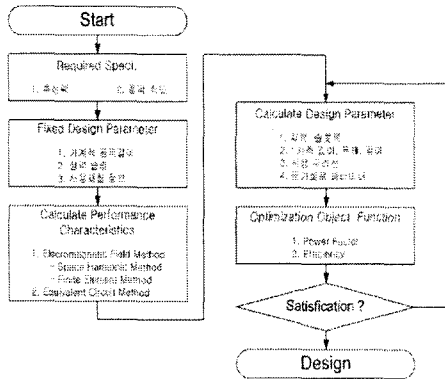


그림 5 편측식 직선형 유도전동기 설계 순서도

1차측과 2차측의 설계 치수가 결정된 경우, 요구 추력이 발생하도록 기자력을 만들기 위해서는 입력전류와 상당 턴수를 적절히 선택해야 한다. 그러나 입력전류는 기계적 출력과 전기적 입력의 관계로부터 범위가 결정되므로, 상당 턴수가 SLIM의 효율 및 역률에 가장 민감한 설계 변수이다. 따라서 상당 턴수를 변화시키며 등가회로 파라미터를 구하고, 효율 및 역률이 최대가 되도록 알고리즘을 구현하였으며, 효율 및 역률이 기대치 이하로 계산되면 기계적 설계 치수를 재계산하여 그림 5의 설계 과정을 반복 수행한다.

표 1은 SLIM의 서로 다른 정격을 갖는 세가지 모델을 제시하고 있으며, 본 논문에서 제시하는 설계 방법으로 효율 및 역률이 최대가 되는 고정자 및 가동자의 설계값을 보여주고 있다. 또한 산출된 등가회로 파라미터 값과 기기의 효율 및 역률을 보여주고 있다. 표 1에서 알 수 있듯이 산출된 효율 및 역률값은 회전형 기기에 비하여 매우 낮다. 따라서 직선형 기기의 설계에서 효율 및 역률 개선이 가장 중요한 관점이다.

그림 6은 표 1에 설계된 세가지 모델에 대하여 유한요소해석과 비교한 것이다. 그림 6에서 세가지 모델의 정격 슬립을 0.25로 하였으며, 정격 슬립에서 각각 100[N], 130[N] 및 300[N]의 요구 추력을 갖도록 설계하였으며, 설계된 모델의 특성이 유한요소해석의 결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다.

표 2 세가지 모델의 설계 파라미터

		Model I	Model II	Model III
요구 사양	정격전압	220 (V)	220 (V)	220 (V)
	정격추력	100 (N)	130 (N)	300 (N)
	주파수	60 (Hz)	60 (Hz)	50 (Hz)
SLIM 구조	정격속도	6 (%)	6 (%)	7 (%)
	극수	6	6	6
	공극	5 (mm)	5 (mm)	4 (mm)
	도체판 두께	5 (mm)	5 (mm)	5 (mm)
	백아이언 두께	10 (mm)	10 (mm)	20 (mm)
	극피치	69 (mm)	69 (mm)	96 (mm)
	슬롯피치	12 (mm)	12 (mm)	15 (mm)
	슬롯깊이	44 (mm)	44 (mm)	72 (mm)
	치피치	11 (mm)	11 (mm)	17 (mm)
상당 턴수	396	330	258	
등가회로 파라미터	R_1	1.7927 (Ω)	1.0375 (Ω)	0.38205 (Ω)
	R_2	4.2642 (Ω)	2.9612 (Ω)	1.0198 (Ω)
	X_1	7.1573 (Ω)	4.9704 (Ω)	2.7797 (Ω)
	X_m	2.9374 (Ω)	2.3004 (Ω)	1.088 (Ω)
	X_2	7.5465 (Ω)	6.1827 (Ω)	3.3522 (Ω)
효율	45 %	45 %	48 %	
역률	60 %	58 %	66 %	

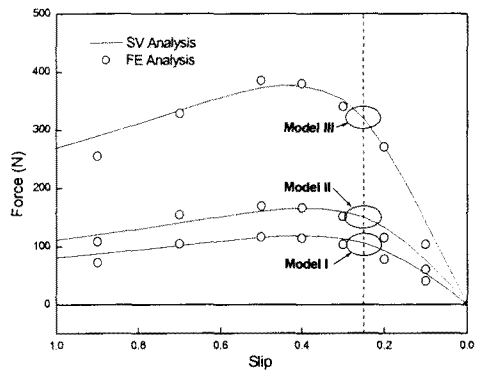


그림 12 설계된 모델의 슬립-추력 특성 비교

3. 결론

본 논문에서는 SLIM의 효율 및 역률이 최대가 되도록 여러 가지 해석법을 이용하여 기계적 설계 치수와 등가회로 파라미터를 결정하였다. 또한 서로 다른 요구 사양의 SLIM을 설계하고 유한요소해석과 비교하여, 설계의 타당성을 검증하였다.

[참고 문헌]

- [1] 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
- [2] S. Nonaka, K. Yoshida, "Equivalent circuit quantities and equations for calculation of characteristics of double-sided linear motors", Jour. IEE Japan, Vol. 90, 1970
- [3] 장석명, 이성호, 강건우, 정삼섭, "유도형 리니어모터 성능의 온-라인 모니터링을 위한 가상계측시스템 구현", 전기학회 논문지, 제 50권 5호, pt.B-5-1(50B-5-1), pp.263-272, 2001.6