2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

유한길이의 농형 2차측을 갖는 선형유도전동기의 2차측 이동 위치에 따른 특성 해석

박 승 찬, 김 병 택
동양대학교 컴퓨터 제어공학과, 삼성 전기(주) 종합연구소

Characteristic Analysis of a Linear Induction Motor According to Various Positions of the Moving Cage-type Secondary

Seung-Chan Park, Byung-Tack Kim
Dept. of Computer Control Engineering, Dongyang Univ., Samasung Electro-mechanics Co.

Abstract - In this paper, the characteristics of a linear induction motor with the moving cage-type secondary are analyzed using finite element method. Thus thrust, normal force and the secondary bar currents distribution are obtained for different positions of the moving secondary.

1. 서 론

본 논문에서는 유한길이의 농형 2차측을 갖는 선형 유도 전동기의 1차측이 지상에 고정되어 있고 2차측이 가동자로서 이동할때, 2차측의 위치 변화에 따른 특성을 유한 요소법을 이용하여 해석한다. 유한 요소 해석시 계변수는 자기 벡터 포텐셜을 이용하였으며 와전류항의 시간미분항은 복소페이져를 도입하여 근사화하고 전압을 구동항으로 하므로써 복소 벡터 포텐셜 및 복소 전류를 미지수로 하여 정식화하였다. 또한 2차측 도체와 엔드바 간의 접촉저항을 고려할 수 있도록 2차측의 회로 방정식을 유한 요소 정식화에 도입하였다[1-3].

해석결과로서는 농형 2차측의 위치에 따른 추력, 수직력, 1차측 전류, 2차측 도체바 전류의 분포특성등을 제시한다.

2. 유한 요소 해석

2.1 해석 모델

본 논문에서의 해석모델은 유한 길이의 농형 2차측이 이동하는 선형 유도전동기로서 표 1에 주요 설계 사양을 나타내었다.

표 1. 해석 모델의 사양

파라미터		단 위	설계치
1차측 길이	L	mm	94.5
극수	p		2
1차철심 적층폭	h	mm	30
매극매상 슬롯수	q		2
슬롯피치	t_{s1}	mm	5.5
슬롯폭	W_s	mm	3.4
단절율	β		5/6
1상의 직렬턴수	N_{ph}	turns	424
반코일 길이	l_a	mm	76
1차측 저항	R_1	Ω	1.4
기계적 공극	g	mm	1.5
2차측 슬롯피치	t_{s2}	mm	4.3
back-iron 두께	d_{iron}	mm	10
back-iron 폭	W	mm	30
바저항률(Cu)		Ωm	1.73×10^{-8}
바직경	D_{bar}	mm	2
엔드바 단면적	q_r	mm^2	15

그림 1은 유한 요소 해석 영역 및 경계조건을 보여주며, 2차측이 1차측을 진입하여 이동한 거리를 d 로 표시하였다.

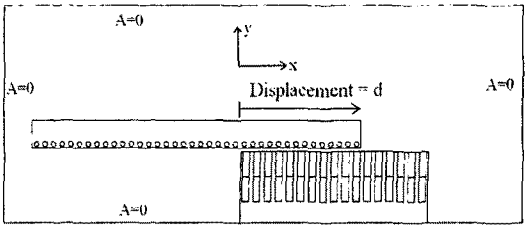


그림 1. 해석 모델 및 경계조건

2.2 유한 요소 정식화

그림 1의 해석모델에 대한 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A}{\partial y}\right) = -J_0 + \sigma\left(js\omega A - \frac{U_b}{l}\right) \quad (1)$$

여기서, A, J_o 는 각각 자기벡터 포텐셜과 1차측 전류 밀도의 페이저 표현이며, σ 는 2차측 도체의 도전율, s 는 슬립, l 은 2차측 도체바의 길이, U_b 는 도체바의 전위차이다.

해석 영역을 삼각형 요소로 분할하고, 식 (1)에 Galerkin 법을 적용하면 식 (2)의 관계식을 얻을 수 있다.

$$[S]\{A\}+js\omega[L]\{A\}+[Q]\{U_b\}+[D]\{I_s\}=\{0\} \quad (2)$$

전압을 구동원으로 하여 전류를 미지수로 하기 위하여, 식 (3)와 같은 1차측 회로 방정식을 이용한다.

$$j\omega\Phi + j\omega L_o I_s + R_o I_s = V_s \quad (3)$$

여기서, Φ, I_s, V_s 는 각 상의 권선 쇄교자속, 1차측 상전류, 1차측 상전압에 대한 페이져 표현식이며, L_o, R_o 는 각각 1상의 누설인덕턴스와 권선 저항이다. 식 (3)을 자기 벡터 포텐셜과 상전류를 미지값으로 하는 행렬 방정식으로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$j\omega[G]\{A\}+[Z]\{I_s\} = \{V_s\} \quad (4)$$

여기서, I_s, V_s 는 1차측 상전류, 1차측 상전압에 대한 페이져 표현식이며, $Z_{ij}=(R_o+j\omega L_o)\delta_{ij}$, L_o, R_o 는 각각 1상의 누설인덕턴스와 권선 저항이다.

전체 도체바 전류에 대한 행렬 방정식을 구성하면,

$$\{I_b\} = -js\omega[H]\{A\}+\frac{1}{R_b}[E]\{U_b\} \tag{5}$$

여기서, R_b는 바의 저항, $[E]$ 는 단위행렬이다.

그림 2는 2차측의 회로 방정식을 유도하기 위한 등가회로 모델을 나타낸다. 그림 2에서 Z_e는 엔드바 segment의 임피던스, R_c는 도체바와 엔드바간의 접촉저항, R_b는 도체바의 자항을 나타낸다.

그림 2의 회로에 키르히호프의 전압법칙을 적용하면 다음의 수식들을 얻게된다.

$$\begin{aligned}
-U_{b1}+U_{b2} &= 2Z_e' I_{b1} \\
-U_{b2}+U_{b3} &= 2Z_e'(I_{b1}+I_{b2}) \\
&\vdots \\
-U_{b(n-1)}+U_{bn} &= 2Z_e'(I_{b1}+I_{b2}+\cdots+I_{b(n-1)})
\end{aligned} \tag{6}$$

여기서, $Z_e' = Z_e+2R_c$ 이다.

식 (6)과 $\sum_{k=1}^{n} I_{bk}=0$ 의 관계식을 이용하면,

$$\{I_b\} = \frac{1}{2Z_e'}[Y]\{U_b\} \tag{7}$$

여기서, $[Y]$ 결합행렬로서 다음과 같다.

$$[Y]=\begin{bmatrix}1&0&.&.&.&0\\1&1&0&.&.&0\\1&1&1&0&.&0\\.&.&.&.&.&.\\1&1&1&1&.&0\\1&1&1&1&.&1\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}-1&1&.&.&.&0\\0&-1&1&.&.&0\\0&0&-1&1&.&0\\.&.&.&.&.&.\\.&.&.&.&-1&1\\0&0&0&0&0&0\end{bmatrix} \tag{8}$$

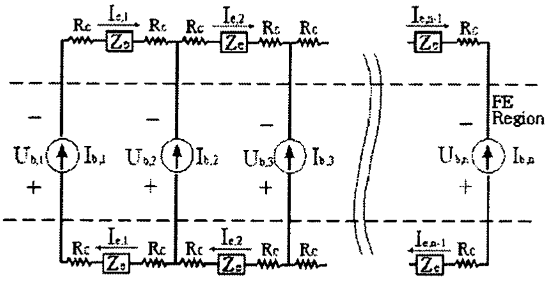


그림 2. 2차측의 등가회로 모델

식 (5)와 식 (7)을 같게 놓으면 자기벡터 포텐셜과 도체 바에서의 전위차를 미지값으로 하는 식 (9)의 방정식을 얻을수 있다.

$$js\omega[H]\{A\}+(\frac{1}{2Z_e'}[Y]-\frac{1}{R_b}[E])\{U_b\} = 0 \tag{9}$$

따라서, 식 (4), 식 (5), 식 (9)을 조합하면 전체 시스템 방정식은 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix}[S]&[Q]&[D]\\js\omega[H]&[Y']&[0]\\j\omega[G]&[0]&[Z]\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\{A\}\\\{U_b\}\\\{I_s\}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\{0\}\\\{0\}\\\{V_s\}\end{bmatrix} \tag{10}$$

2.3 추력 및 수직력 계산

추력 및 수직력은 식 (11)과 식 (12)와 같이 Maxwell 응력법을 이용하여 구하였으며, 적분 경로는 2차측이 변위하여 1차측과 중첩된 거리만을 선택하였다.

$$F_x=\frac{h}{4\mu_o}\int_l\{Re(B_xB_x^*)n_x-Re(B_yB_y^*)n_x\}dl + \frac{h}{2\mu_o}\int_l Re(B_xB_y^*)n_y dl \tag{11}$$

$$F_y=\frac{h}{4\mu_o}\int_l\{Re(B_yB_y^*)n_y-Re(B_xB_x^*)n_y\}dl + \frac{h}{2\mu_o}\int_l Re(B_xB_y^*)n_x dl \tag{12}$$

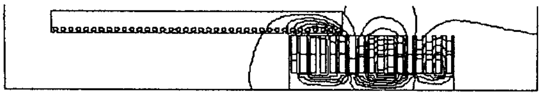
여기서, h는 1차철심의 적층폭, * 는 공액복소수를 표현한다.

3. 해석 결과

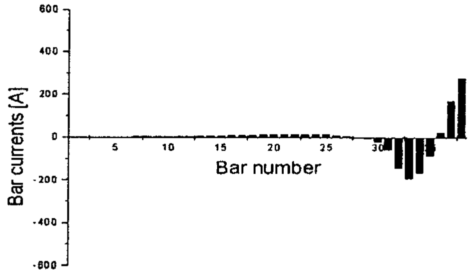
그림 3 ~ 그림 6은 각각 2차측의 변위가 d = 30 (mm), 60(mm), 90(mm), 120(mm) 이고 slip = 1 일때의 자속분포와 2차측 도체바의 전류분포를 보여준다. 이때의 인가전압 및 주파수는 110 (V), 60(Hz) 이며 도체바와 엔드바간의 접촉저항은 엔드바 segment 저항의 5%로 가정하였다.

2차측의 변위가 작을때에는 자속분포 및 바전류 분포가 매우 비대칭적으로 발생하여 2차측의 운동방향 방향으로 공극자속밀도와 바전류가 집중되어 있음을 알 수 있다. 변위가 커져서 2차측이 1차측과 완전히 overlap 된 상태인 d=120(mm)인 경우에는 2차측의 도체바 전류의 불평형 분포가 매우 감소되었으나 단부 효과의 영향으로 여전히 비대칭적으로 분포하게됨을 알 수 있다.

그림 7에는 2차측의 변위에 따른 기동 추력과 흡인력을 나타내었다. 2차측이 극간격(τ=33 (mm))의 2배, 즉 1차측 길이의 2/3 가량 진입한 후부터는 추력 및 흡인력이 포화특성을 가지므로 이 시점에서 전원을 인가하면 효과적인 운전이 가능하다. 그러나, 기동시의 흡인력이 추력의 4배 가량 크게 발생하고 있으므로 2차측의 진입시에 흡인력 불평형에 의한 1, 2차측 지지구조의 변형을 초래할 수 있다. 따라서, 공극 지지 기구의 구조 설계시에 이 점을 충분히 고려할 필요가 있다.

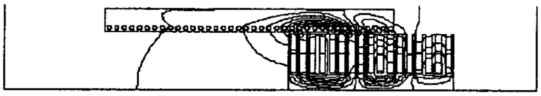


(a)

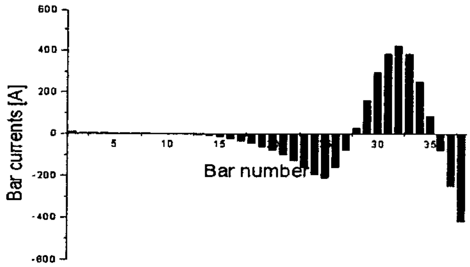


(b)

그림 3. 2차측 변위 d = 30[mm] 일때의 a)자속분포, b) 2차측도체바 전류분포(slip=1, 110V, 60Hz)

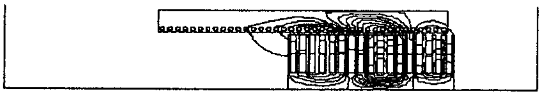


(a)

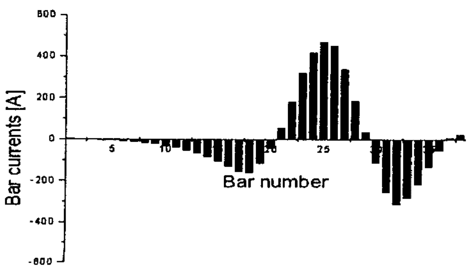


(b)

그림 4. 2차측 변위 d = 60[mm] 일때의 a)자속분포, b) 2차측도체바 전류분포(slip=1, 110V, 60Hz)

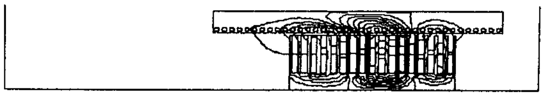


(a)

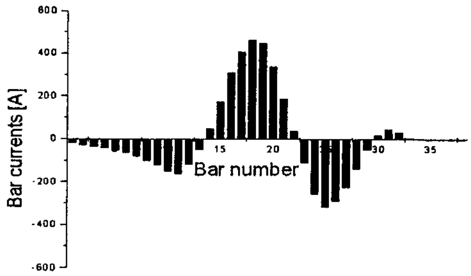


(b)

그림 5. 2차측 변위 d = 90[mm] 일때의 a)자속분포, b) 2차측도체바 전류분포(slip=1, 110V, 60Hz)



(a)



(b)

그림 6. 2차측 변위 d = 120[mm] 일때의 a)자속분포, b) 2차측도체바 전류분포(slip=1, 110V, 60Hz)

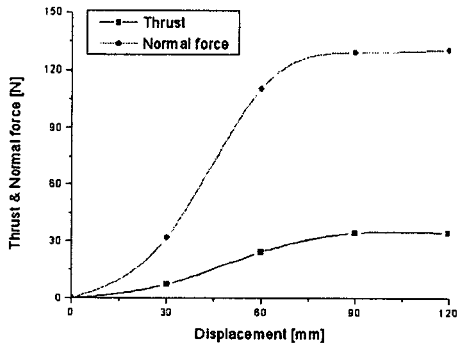


그림 7. 2차측의 변위에 대한 추력 및 수직력 특성 (slip=1, 110V, 60 Hz)

4. 결 론

본 논문에서는 유한길이의 농형 2차측을 갖는 선형유도전동기의 2차측의 변위에 따른 추력, 수직력, 2차측 도체바의 전류분포 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 이로부터 가동자인 2차측이 1차측 길이의 2/3만큼 진입하였을 경우에 전원을 인가하면 가장 효과적인 운전이 가능함을 알 수 있었다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2001-000-00945-0) 지원으로 수행되었읍니다.

[참 고 문 헌]

[1] Arkkio. A.,"Analysis of induction motors based on the the numerical solution of the magnetic field and circuit equations", Act Polytechnica Acandnavica, Helsinki, 1987.

[2] D.H.Im, S.C.Park, B.T.Kim, B.I.Kwon, "Cogging Torque Calculation of Induction Motor with Skewed Slots", Proc. of ICEE'95, pp.529-532, July, Korea.1995.

[3] 박승찬, 김병택, "농형 2차측을 갖는 선형유도전동기의 엔드바 저항을 고려한 유한요소해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 846-848, 2001. 7