

단부효과 영향에 따른 편축형 선형유도전동기 벡터제어 시뮬레이션

임홍우*, 장용해**, 김동휘***, 서진연***, 조근배*, 백형래*
 *조선대학교 전기공학과, **광주기능대학, **한영대학

Vector Control Simulation of Single-sided Linear Induction Motor affected end-effect

Hong-Woo Lim*, Yong-Hae Jang**, Dong-whi Kim***, Jin-Youn Seo***, Geum-Bae Cho*, Hyung-Lae Baek*
 *Dept. of Electric Eng. Chosun Univ. **Kwang-ju polytechnic college, ***Han-young college

Abstract - It is difficult to realize the complicate SLIM which is applied vector control system, but widely used in AC motor vector motor control system or servo control system because of its high performance in current control. In this paper, we use the dynamic characteristic analyzing method that can calculate efficiently the end effect by using equivalent circuit method in the operating SLIM system modeling and doing simulation of output characteristics of vector controller.

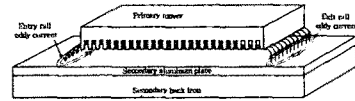


Fig. 1 Eddy current form at the entry and exit of the air gap when the primary coil moves

1. 서 론

편축형 선형유도전동기(SLIM)의 구동원리는 일반 회전기와 같으나 구조적으로 공극이 비교적 크며 등가회로는 단부의 영향으로 인하여 회전기와 같이 해석하여서는 안 된다. 특히 단부효과로 인하여 추력 분포의 왜형은 물론 역률의 저하 등이 필연적으로 수반된다.^[1,2]

편축형 선형유도전동기는 구조상으로 1차측 길이 방향이 유한하여 입구단과 출구단에서의 자속이 불균형하게 되는 종방향 단부효과가 발생하게 되며 1차측 이동자계에 의해 평판 도체로 구성된 2차측에 유기되는 와전류 성분 중 자속의 진행방향과 같은 성분이 존재하기 때문에 유효 공극 길이의 증가와 자속의 왜곡 등 횡방향 단부효과가 발생한다. 또한 1차측과 2차측 사이에서 발생하는 수직력은 종방향 단부효과와 횡방향 단부효과와 함께 회전기에서는 발생하지 않는 특성을 지니고 있다. 그러므로 선형유도전동기를 정확히 해석하기 위해서는 이들 현상들이 모두 명확하게 고려되어야 한다.^[3,4]

본 논문에서는 운동 상태에 따라 변화하는 선형유도전동기의 특성을 충분히 고려하기 위해 이동자의 속도와 길이에 따른 단부효과의 영향을 포함한 등가회로 해석법을 적용하여 단부효과의 영향을 최소 정수에서 보정하는 방법을 적용하여 벡터제어 수평의 정확성을 기하였고 단부효과가 고려된 등가회로모델로 편축형 선형유도전동기의 회전자 자속기제어를 수행한 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

2. SLIM 등가회로

편축형 선형유도전동기 구조는 1차측이 규소강판으로 된 적층 철심과 슬롯 및 전류를 흘릴 수 있는 권선으로 되어 있고, 2차측은 도체판(Al plate)과 철심에 해당하는 back-iron으로 구성되어 있다.

편축형 선형유도전동기에서는 1차측이 이동함에 따라 2차측은 포화되지 않는 새로운 도체판 및 back-iron으로 연속해서 대체된다. 이동자가 이동하면서 대체되는 2차측은 자속의 투과를 방해하는 방향으로 자속을 급속히 증가시키는 성질을 지니면서 또한 공극 내의 자속밀도를 점진적으로 포화시키는 역할을 한다.

편축형 선형유도전동기의 등가회로를 얻기 위해 단부효과로 인한 공극의 자속분포를 2차 도체판의 입구단과 출구단의 물리적인 정확한 산정이 필요하며 단부효과에 의해 발생하는 와전류의 형성 및 자속의 변화 형태를 그림 1에 나타내었다.

2-1. 단부효과의 영향

그림 2는 d축을 기준으로 놓은 공극에서의 FEM을 일반화된 타임 스케일로 나타낸 FEM의 형성을 나타낸 것이다.

d축 입구단 와전류는 시정수 T_v 동안에 소멸되며 이 시간동안 이동자 길이에 따른 d축 입구단 평균전류값 i_{av}^d 는 식(1)과 같다.

$$i_{av}^d = \frac{i_{av}^d}{T_v} \cdot \int_0^{T_v} e^{-t/T_v} dt \quad (1)$$

여기서 $T_v = D/v$ 이고 D, v 는 1차측 이동자의 길이와 이동자 속도를 나타낸 것이다.

$T_v = D/v$ 는 이동자가 지나가는 입구의 한 점에서 취한 시정수이다.

주기 T_r 동안 이동자가 이동한 거리는 $v \cdot T_r$ 가 되며 속도 v 와 주기 T_r 및 1차측 이동자의 길이 D 를 통해 Q 에 대한 일반식은 식(2)와 같다.

$$Q = \frac{v \cdot T_r}{D} = \frac{D_r}{(L_m + L_p) \cdot v} \quad (2)$$

여기서 Q 는 길이도 폭도 두께도 없는 변수이지만 일반화된 타임 스케일에서 이동자의 길이라는 의미를 나타낸 것이다. 이러한 점에서 Q 는 이동 속도에 따라 달라지는 변수가 된다.

이동자 이동속도가 0 일 때 Q 는 무한대가 되며 이동자 이동속도가 증가함에 따라 Q 는 사실상 줄어들게 된다.

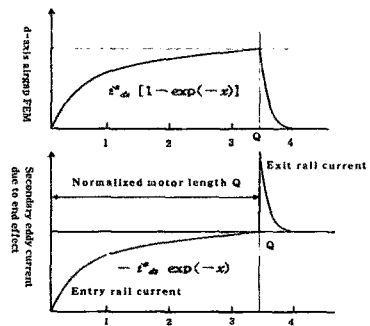


Fig. 2 Effective air gap in normalized time scale

식 (1)과 식(2)를 이용하여 Q 를 포함한 식 (3)으로 재 구성할 수 있다.

$$i'_s = \frac{i'_{ds}}{Q} \cdot \int_0^Q e^{-x} dx = i'_{ds} \cdot \frac{1-e^{-Q}}{Q} \quad (3)$$

여기서 x 는 일반화된 타임 스케일을 나타낸다.

이러한 와전류에 의해 1차측 자화전류는 감소하게 되며 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i'_{ds} - i'_s = i'_{ds} \cdot [1 - \frac{1-e^{-Q}}{Q}] \quad (4)$$

또한, 와전류에 의해 1차측 자화전류는 감소되며 감소된 자화인덕턴스의 값은 식(5)와 같다.

$$L'_m = L_m(1-f(\omega)) \quad (5)$$

여기서 $f(\omega) = [1 - \frac{1-e^{-Q}}{Q}]$ 이다.

1차측 이동자 이동속도가 0 에 가까울수록 L'_m 은 자화인덕턴스 L_m 쪽에 가까우며 선형유도전동기의 동적특성은 단부효과가 없어지기 때문에 회전형 유도전동기와 같은 등가 식을 적용 시킬 수 있다.

한편, 1차측 이동자가 이동하여 2차 도체로 입구단과 출구단의 와전류가 발생하게 될 때 오옴손은 r_r 에 의해 발생하게 된다. 이동자 길이에 따른 입구단 와전류의 실효값은 식(6)과 같다.

$$i_{rms} = \left[\frac{i'^2}{Q} \cdot \int_0^Q e^{-2x} dx \right]^{1/2} = i'_{ds} \cdot \left[\frac{1-e^{-2Q}}{2Q} \right]^{1/2} \quad (6)$$

따라서 입구단의 와전류에 의한 손실은 다음 식 (7)과 같다.

$$P_{cwy} = i_{rms}^2 r_r = i'_{ds} \cdot \frac{1-e^{-2Q}}{2Q} \quad (7)$$

등가회로 해석방법을 적용시키기 위해 1차측 이동자와 2차측 도체판이 벗어나면서 발생하는 단위시간당 자화에너지 변화로 출구단 와전류에 의한 손실을 산출한다.

식 (3)으로부터 공극에서의 전체 와전류는 $i'_{ds} \cdot (1-e^{-Q})$ 로 쓸 수 있다. 이 전류는 공극 자속 내에서 안정된 상태조건을 유지하기 위해 1차측 이동자가 지나가는 시정수 T_r 동안 출구단의 2차 도체에서 사라져야 된다. 따라서 출구단의 와전류에 의한 손실은 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{ca} = L_r i'_{ds} \cdot \frac{(1-e^{-Q})^2}{2T_r} = i'_{ds} r_r \frac{(1-e^{-Q})^2}{2Q} \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)을 더하면, 2차 도체판에 발생한 와전류에 의한 전체 오옴 손은 식(9)와 같다.

$$P_{cwy} = \frac{i'_{ds}^2 r_r (1-e^{-Q})}{Q} = i'_{ds}^2 r_r f(\omega) \quad (9)$$

이러한 입구단과 출구단에서의 전력손실은 병렬로 결선된 자화전류 분기회로에 직렬로 결선된 저항 $r_r f(\omega)$ 로 대체할 수 있다.

2-2. 단부효과를 고려한 SLIM 모델링

편측형 선형유도전동기의 1차측 이동자 전압 V_s 를 동기좌표의 d-q 성분으로 나타내면 식 (10)과 같다.

$$V'_d = r_s i'_d + r_r f(\omega) (i'_d + i'_{\omega}) + p \lambda'_d - \omega_s \lambda'_{\omega} \quad (10)$$

$$V'_\omega = r_s i'_\omega + p \lambda'_{\omega} + \omega_s \lambda'_d$$

여기서, e 는 동기좌표를 의미한다.

동기속도 ω_s 로 움직이는 좌표상에서 ω_r 로 이동하는 이동자의 속도를 관찰하면 $\omega_s - \omega_r = \omega_d$ 의 상대속도로 움직이는 것처럼 보이므로 2차측 도체 전압 V_r 을 동기좌표성분으로 나타내면 식 (11)과 같다.

$$V'_d = r_r [i'_d + f(\omega) (i'_d + i'_{\omega})] + p \lambda'_{\omega} \quad (11)$$

$$V'_\omega = r_r i'_\omega + (\omega_s - \omega_r) \lambda'_d$$

편측형 선형유도전동기의 동기 좌표방정식에서 1차측 이동자 자속 및 2차측 자속은 식 (12) 및 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda'_{ds} = L_s i'_{ds} + L_m (1-f(\omega)) (i'_{ds} + i'_{\omega})$$

$$\lambda'_{\omega} = L_s i'_{\omega} + L_m (i'_{\omega} + i'_{\omega})$$

$$\lambda'_{\omega} = L_m (1-f(\omega)) (i'_{ds} + i'_{\omega}) + L_s i'_{\omega} \quad (13)$$

$$\lambda'_{\omega} = L_m (i'_{\omega} + i'_{\omega}) + L_s i'_{\omega}$$

편측형 선형유도전동기의 경우 2차측 도체전압은 0이므로 행렬식으로 나타내면 식 (14)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V'_d \\ V'_\omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + r_r f(\omega) + L_s + p L_m (1-f(\omega)) & -\omega_s (L_s + L_m) & r_s f(\omega) + L_m (1-f(\omega)) & -\omega_s L_m \\ \omega_s (L_s + L_m) (1-f(\omega)) & r_s + p (L_s + L_m) & \omega_s (1-f(\omega)) & p L_m \\ r_s f(\omega) + L_m (1-f(\omega)) & L_m & r_s (1-f(\omega)) + L_s + p L_m (1-f(\omega)) & L_s + L_m \\ (\omega_s - \omega_r) L_m (1-f(\omega)) & L_m & (\omega_s - \omega_r) (L_s + L_m) & r_s + L_s + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{ds} \\ i'_{\omega} \\ i'_{ds} \\ i'_{\omega} \end{bmatrix} \quad (14)$$

그림 3은 식 (14)에 따라 1차측 이동자가 이동하면서 발생하는 단부효과를 고려한 편측형 선형유도전동기 동기좌표에서 나타낸 등가회로이다.

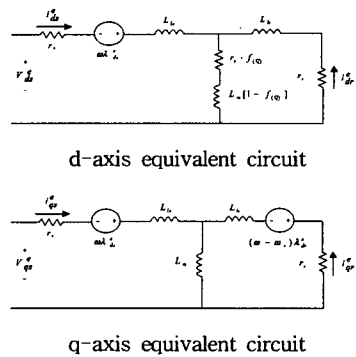


Fig. 3 Equivalent circuit considering end effect

3. 시스템 시뮬레이션

3-1. 시스템 모델링

시뮬레이션은 MATLAB/SIMULINK 패키지로 시스템 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였다. 모델링한 SLIM에 부하토크를 외란으로 간주하여 외부에서 가변하여 인가할 수 있도록 구성하였고 SLIM을 별도의 M파일에 저장하여 파라미터를 MATLAB 프롬프트 상에서 초기화 할 수 있도록 구성하였다.

부하측 컨버터는 스위칭 손실이 없는 이상적인 컨버터로 가정하고 선형제어범위가 넓은 제어기에 의해 출력전압이 발생하도록 모델링하였다.

그림 4는 공간벡터변조방식을 적용한 편측형 선형유도전동기의 시스템 모델링 전체 구성도를 나타낸 것으로 표 1의 파라미터를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

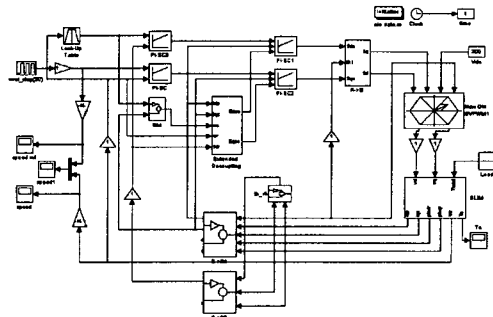


Fig. 4 Modeling of SLIM using SVPWM

Table 1. Parameter of SLIM

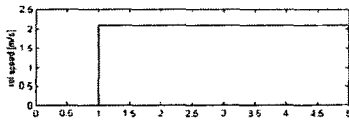
Motor length	550[mm]	Secondary sheet	3[mm]
Motor width	200[mm]	r_s	1.25[Ω]
Number of poles	4	r_r	2.7[Ω]
Slots per pole	3	L_s	40.1[mH]
Coil pitch	12[mm]	L_m	32.6[mH]
Primary back iron	15[mm]	L_r	33.1[mH]
Series turns/phase	96[turn/p]	Effective air gap	6.6[mm]
Iron width	175[mm]	Effective motor length	500[mm]
Iron depth	50[mm]	Q	23.3/v

3-2. 결과고찰

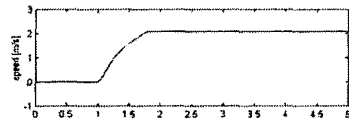
시뮬레이션에서 공간벡터 펄스폭변조방식의 전압형 인버터의 스위칭 주파수 f_{sw} 와 샘플링시간 T_s 는 각각 10 [kHz] 및 100 [μs] 로 설정하였다.

그림 5는 부하 상태에서의 기준속도 2 [m/s]에서 동적 특성을 나타낸 것으로 (a)기준속도에 대한 (b) 응답속도로써 rising time 의 차가 약 10[%]로 나타나고 있다.

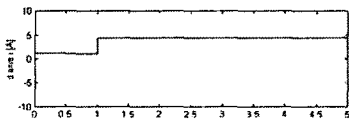
그림 5 (c) 및 (d)는 전류응답 자속을 나타낸 것으로 기준자속 i_{ds}^* 에 대한 i_{dse} 자속의 응답으로 약 0.5초 후 안정됨을 알 수 있다. 그림 5의 (e) 및 (f)는 추력에 대한 응답으로 기준자속 q_{gse}^* 에 대한 q_{gse} 축 성분전류의 응답이다. 역시 빠른 응답을 보임을 알 수 있다. 그림 5의 (g) 속도 제어시 출력전류와 같이 세 상모두 같은 직폭을 가지며 안정된 주파수를 나타내고 있다.



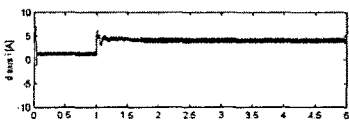
(a) reference speed



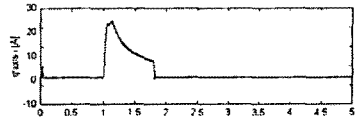
(b) Motor speed



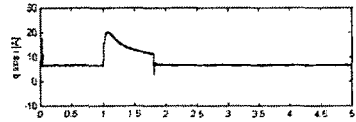
(c) d-axis reference current (i_{ds}^*)



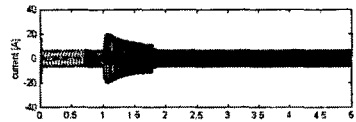
(d) d-axis current (i_{dse})



(e) q-axis reference current (q_{gse}^*)



(f) q-axis current (q_{gse})



(g) motor current

Fig. 5 Dynamic characteristics of reference and actual

6. 결론

단부 효과의 영향을 포함한 편측형 선형유도전동기 등가회로를 통한 모델링을 하여 시뮬레이션을 수행한 결과는 기준속도에 대한 출력속도는 이동자가 기준속도로 추종하기까지의 과도시간과 일치하였고 자속이 변함에 따라 출력을 안정시키는 결과를 가져왔다. 또한 정상상태에서 정상상태에 도달하는 속도의 출력이 정상에 도달후 안정된 속도출력을 내었다.

이상으로 본 논문에서는 편측형 선형유도전동기의 순시 속도에서의 1, 2차 상대 위치동으로 나타나는 동특성과 단부효과를 고려한 해석의 영향이 제어기의 수행이 어긋나지 않음을 알 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] J. H. Sung, K. G. Nam " A new approach to vector control for a linear induction motor considering end effects ", IEEE Trans. pp.2284-2289, 1999
- [2] S. Kim, K. I. Woo, B. I. Kwon " Implementation of indirect field oriented control of linear induction motor using voltage source inverter ", ICEE'99, pp.263-266, 1999
- [3] Ludvik Kumin, Gorazd Stumberger, Drago Dolinar " Modeling and control of a linear induction motor ", ISIE'99, pp. 963-967, 1999
- [4] Iwe Badder, Manfred Depenbrock, Georg Gierse " Direct Self Control (DSC) of Inverter-Fed Induction Machine ", IEEE Trans. on. IA, vol. 28. No. 3. pp. 581-588. 1992