

유도형 리니어 모터의 속도특성에 관한 연구

정병호*, 최문한*, 조금배*, 백형래*, 서진연**, 김대곤***

조선대학교*, 한영대학**, 전남과학대***

A study on the speed characteristic of linear induction motor

B.H.CHUNG*, M.H.CHOI*, G.B.CHO*, H.L.BAEK*, J.Y.SEO**, D.G.KIM***

*Chosun University, **Han Yeong College, ***Chunnam Techno College

ABSTRACT

To use the SLIM for servo system, the exact account of thrust about the initial speed is needed, but analyzing by equivalent circuit analyzing method such as rotary induction motor, the error occurs because of the end effect. So, we applied the equivalent circuit considering the end effect of SLIM in this paper.

The current control system is advanced the space vector pulse width modulation by using high arithmetic performance microprocessor such as DSP.

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 examine the output characteristics of SVPWM with PI controller.

1. 서 론

현대 사회는 대도시의 인구 집중화 현상과 그에 따른 지가 상승에 의해 빌딩이 고층화 되어 가고 있다. 빌딩이 고층화 되어 감에 따라 엘리베이터의 고속화와 고성능화가 요구되고 있으나 기존의 와이어식 엘리베이터는 와이어식 엘리베이터는 공간 점유율의 증가에 의해 빌딩이 경제성이 저하되고 있다. 선형 유도전동기를 이용한 와이어리스 엘리베이터 시스템은 서스펜션 케이블이 불필요하게 되어 로프의 강도에 따른 문제와 수직진동의 문제를 동시에 해결할 수 있고 복합 승강기의 운전에 의해 기존 방식의 엘리베이터의 공간 점유율보다 낮은 공간 점유율을 가지게 된다.

본 논문에서는 선형유도전동기로 구동되는 와이어리스 엘리베이션 시스템을 제작하여 SVPWM 구동시스템에 적용하여 정속도 제어 특성을 실험하였다.

2. 유도형 리니어 모터의 원리

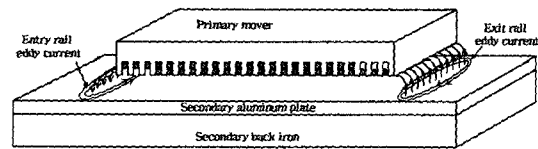


Fig. 1 Eddy current generation at the entry and exit of the air gap when the primary coil moves

그림 1 에서와 같이 편축형 선형유도전동기는 이동자가 이동할 때 공극의 입구단과 출구에서의 와전류가 발생하며 1차측이 이동하게 되면 입구단 영역에서 2차도체 쪽에는 새로운 자계가 형성되는 반면 1차측 이동자의 출구단의 자장은 사라지게 된다. 단부효과에 의해 발생된 자계의 생성과 소멸은 2차도체 코일의 와전류를 형성하게 되며 2차측 와전류는 1차측 주권선과 반전된 전류이다. 이것은 축변환된 회전자형 유도전동기의 모델식과 대비하여 볼 때 d축 입구단 와전류는 시정수 T_v 동안에 소멸되며 이 시간동안 이동자 길이에 따른 d축 입구단 평균전류값 i_{de}^e 는 식(1)을 고려할 때 식(2)와 같다.

$$Q = \frac{v \cdot T_v}{v \cdot T_r} = \frac{D \cdot R_r}{(L_m + Llr) \cdot v} \quad (1)$$

$$i_{de}^e = \frac{i_{ds}^e}{T_v} \int_0^{T_v} e^{-u\tau} dt = \frac{i_{ds}^e}{Q} \cdot \int_0^Q e^{-x} dx = i_{ds}^e \frac{1 - e^{-Q}}{Q} = i_{ds}^e f(Q) \quad (2)$$

여기서 $T_v = D/v$ 이고 D, v 는 각각 모터의 길이와 속도이다.[3] 또한 와전류에 의해서 자화전류의 감소는 자화인덕턴스에 영향을 미치므로 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$L'_m = L_m(1 - f(Q)) \quad (3)$$

이러한 특성을 회전형 유도전동기의 d-q 모델을 위한 등가모델에 적용하여 T형 등가모델을 구성하면 그림 2 에서와 같다.

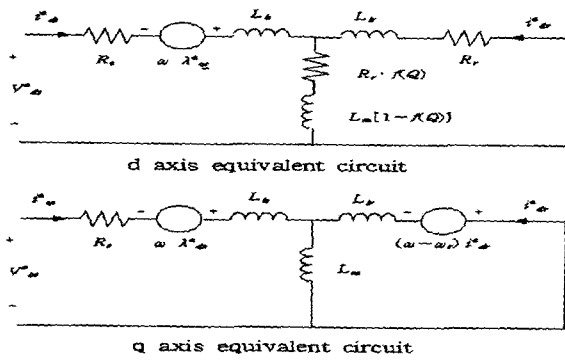


Fig 2. LIM equivalent circuits considering Eddy current Losses

T형 등가모델을 이용하여 편축형 선형유도전동기의 경우 2차측도체 전압은 0이라 하고 동적 LIM의 방정식을 회전자 자속기준 동기좌표식과 추력식을 정리하면 식(4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + R_f(\omega + \omega_r + \beta L_m(1-f(\omega)) - \omega_r(L_s + L_r)) & R_f(\omega + \omega_r(1-f(\omega))) & -\omega_r L_m \\ \omega_r(L_s + L_r(1-f(\omega))) & R_s + \beta(L_s + L_r) & \omega_r(1-f(\omega)) \\ R_f(\omega + \omega_r(1-f(\omega))) & L_m & R_s(1+f(\omega)) + L_r + \beta L_m(1-f(\omega)) \\ (\omega_r - \omega_r(1-f(\omega))) & L_r & (\omega_r - \omega_r)L_m + L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix}$$

$$F = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{N_p}{2} \cdot (\lambda_{ds}^e \cdot i_{qs}^e - \lambda_{qs} \cdot i_{ds})$$

$$= \frac{3\pi}{2\tau} \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{L_m(1-f(\omega))}{L_s + L_m(1-f(\omega))} \cdot (\lambda_{ds}^e i_{qs}^e - \frac{L_r^2 k}{L_r} \cdot \frac{f(\omega)}{1-f(\omega)} \cdot i_{ds}^e i_{qs}^e) \quad [4]$$

3. SPWM을 이용한 유도형 리니어 모터의 Control Design

교번 기준전압을 상태 공간상에서 검출하여 기준전압 벡터에 가장 근접한 유효 스위칭 벡터를 선정하고 인가되는 유효 스위칭 벡터의 합이 기준전압과 일치되도록 스위칭 시간을 결정하는 공간벡터 펄스폭 변조방식은 섹터, 영벡터를 포함한 인접벡터의 인가시간을 결정하여야 하므로 구현이 복잡하고 연산시간이 길어지는 단점이 있다. 그러나 이러한 단점은 최근에 널리 사용되는 DSP를 적용함으로써 구현이 쉬어졌다.^[5]

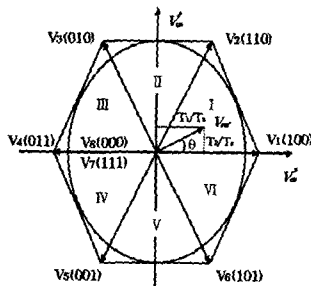


Fig 3. Space vector pulse width modulation

그림 3은 공간벡터 변조기법으로 d-q축 좌표평면을 6개의 섹터로 구분하고, 각 섹터에서 기준전압 벡터 V_{ref} 의 크기와 위상을 이용하여 인접하는 유효전압벡터와 영

전압벡터의 인가시간을 결정하여 스위칭 신호를 발생하는 펄스폭 변조방식이다.

기준전압 벡터 V_{ref} 는 식 (5)과 같이 3상전압의 합으로 정의된다.

$$V_{ref} = V_a + a V_b + a^2 V_c \quad (5)$$

여기서, $a = e^{j2\pi/3}$ 이다.

스위칭 주파수가 높을 경우 샘플링 구간과 스위칭 구간을 동일하게 선정하면 기준전압 벡터 V_{ref} 는 인접한 두 개의 유효 전압벡터와 인가시간의 곱인 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ref} T_s = V_k t_1 + V_{k+1} t_2 \quad (6)$$

여기서, T_s : 샘플링 시간, t_k : V_k 벡터를 on으로 유지하는 시간, t_2 : V_{k+1} 벡터를 on으로 유지하는 시간, k : 섹터번호, (단, $k=6$ 이면 $k+1=k+1-6$)이다.

샘플링 주기의 T_s 에서 유효시간 t_1 및 t_2 가 제거된 나머지 잔여시간 t_0 는 영벡터인 V_7 또는 V_8 에 의해 사용되며 $t_0 = T_s - t_1 - t_2$ 의 관계가 성립한다.

식 (6)의 기준전압 벡터 V_{ref} 를 d-q 성분으로 나타내면 식 (7)과 같다.

$$V_{ref} \cos \gamma T_s = \sqrt{3} V_{dc} (t_1 + t_2 \cos \frac{\pi}{6})$$

$$V_{ref} \sin \gamma T_s = \sqrt{3} V_{dc} t_2 \quad (7)$$

또한 여기서

$$V_{ref} = \sqrt{V_d^2 + V_q^2}, \quad (0 \leq \gamma \leq \frac{\pi}{3}), \quad \gamma = \theta - \frac{\pi}{3}(k-1)$$

이다.

식 (6), 식 (7)로부터 인접한 유효벡터의 스위칭 시간은 식 (8)와 같이 주어진다.

$$t_1 = m \frac{\sqrt{3} V_{ref}}{V_{dc}} T_s \sin(\frac{\pi}{3} + \gamma)$$

$$t_2 = m \frac{\sqrt{3} V_{ref}}{V_{dc}} T_s \sin \gamma \quad (8)$$

여기서, 변조지수 m 은 식 (9)와 같다.

$$m = \sqrt{3} \frac{V^*}{V_{dc}} \quad (9)$$

표 1은 스위칭 시간동안 인가되는 인접벡터의 크기를 2상 전압으로 나타낸 것이다.

Table 1. Voltage vector of SVPWM on d-q axis

Vector	Angle	Switching status	V_d	V_q	V_{dq}
V_1	0	1 0 0	E	0	E
V_2	$\pi/3$	1 1 0	$E/2$	$\sqrt{3}E/2$	E
V_3	$2\pi/3$	0 1 0	$-E/2$	$\sqrt{3}E/2$	E
V_4	π	0 1 1	E	0	E
V_5	$4\pi/3$	0 0 1	$-E/2$	$\sqrt{3}E/2$	E
V_6	$5\pi/3$	1 0 1	$E/2$	$\sqrt{3}E/2$	E
V_7	-	1 1 1	0	0	0
V_8	-	0 0 0	0	0	0

그림 4는 공간벡터 변조방식에서 스위칭손실을 최소화하기 위한 스위칭 배열로 섹터 1을 일 예로 든 것이다.

그림 4에서 보는 바와 같이 샘플링 타임 $T_s(n)$ 에 대하여 스위칭 타임 $t_0/2 \rightarrow t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow t_0/2$ 순으로 배열하고 각각에 대하여 $V_8 \rightarrow V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_7$ 벡터를 인가하고, 다음 샘플링 기간 $T_s(n+1)$ 에 대해서는 스위칭 타임을 $t_0/2 \rightarrow t_2 \rightarrow t_1 \rightarrow t_0/2$ 순으로 반전하여 배열하고 각 인가 시간에 대하여 $V_7 \rightarrow V_2 \rightarrow V_1 \rightarrow V_8$ 벡터를 인가하면 표 1의 각 벡터의 스위칭 상태와 같이 매 스위칭 순간에서 지정된 어느 한 상에서만 전이가 이루어지므로 스위칭 손실이 최소화 된다.

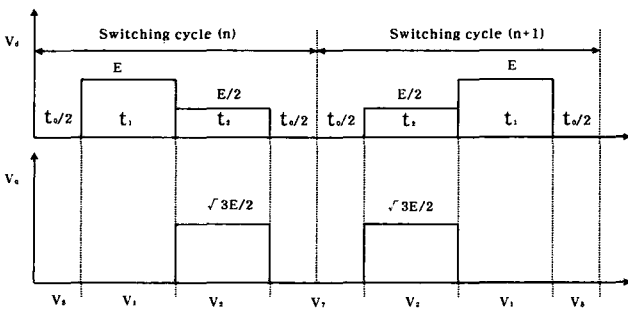


Fig. 4 Optimal switching pattern for minimal switching loss

5. 실험 및 결과 고찰

5.1.1 시스템 구성^[2]

본 논문에서는 리니어 인덕션모터의 SVPWM 구동특성을 고찰하기 위하여 실험 제작한 리니어 인덕션모터와 PI 제어 알고리즘이 적용된 DSP 제어 보드를 이용하여 실험하였다.

부하의 가변조건 및 전부하 조건은 본 실험에서 속도의 출력안정에 맞추어 제어를 설계하였으므로 정확한 값을 부여하지 않고 로드셀을 통해 동일하게 추력을 발생하는 조건으로 설정을 하여 부하를 인가시키는 조건으

로 설정하였으며 무부하 시, 부하인가 시, 부하 가변시로 나누어 실험을 수행하였다.

그림 5-1은 시스템 구성도를 나타낸 것으로 기준자속 λ_{dr}^* 및 기준속도 ω_r 을 사용자 인터페이스를 통해 DSP 보드상으로 다운로드되어 구동되는 시스템이다.



(a) SVPWM inverter (b) Sub control unit

Fig. 5-1 Configuration of system

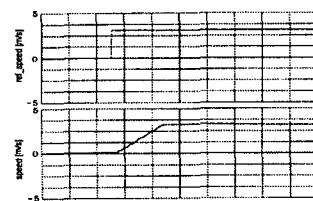
5.1.2. 실험 결과

그림 5-2은 부하 가변 시 기준속도 2.5 [m/sec]에서 출력특성으로 (a) 기준속도대 이동자 속도 (b) d축 전류대 출력전류 (c) q축 전류대 출력전류를 나타낸 것이다. 이동자 출력속도가 정지상태에서 응답속도는 1.4[sec]이며 상상태 도달후 속도가 일정하게 유지됨을 알 수 있다.

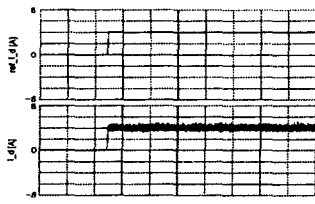
d축에 대한 회전자 자속과 고정자 자속의 영향으로 초기상태에서 d축 전류가 왜곡되어 나타났으나 추력 특성은 q축 전류와 비례하게 발생함을 알 수 있다. 또한 추력은 역방향에서 정방향으로 전환되는 순간에 최대 로 나타났으며 q축 전류는 최대 8[A]로 나타났다.

그림 5-3는 무부하시 출력특성을 기준 속도 0.5 [m/sec]일 때 (a) 기준속도대 이동자속도 (b) d축 기준전류대 출력전류를 나타낸 것으로 부족제동이 생겨 일시 기준속도보다 증가하나 이내 자속이 추종하여 안정된 속도에 이름을 볼 수 있다.

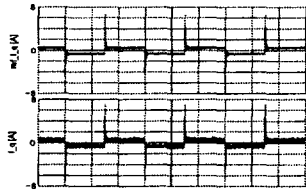
그림 5-4은 부하 가변시 역에서 정으로 기준속도를 설정했을 때 출력특성으로 (a) 기준속도대 이동자속도 (b) q축 전류 및 자속을 나타낸 것이다. 속도 추종이 이루어짐을 볼 수 있다.



(a) reference speed vs mover speed at 2.5 m/sec

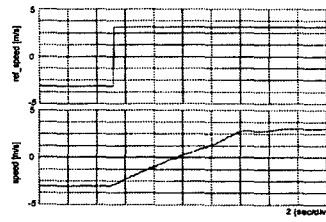


(b) d-axis reference current vs output current

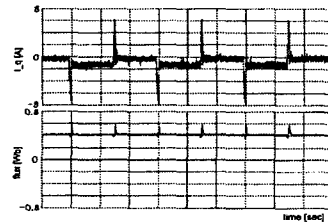


(c) q-axis reference current vs output current

Fig. 5-2 Output characteristics under no load condition

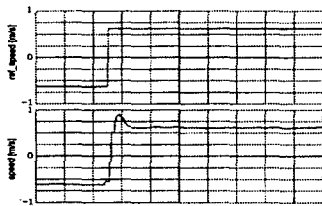


(a) Reference speed vs primary speed

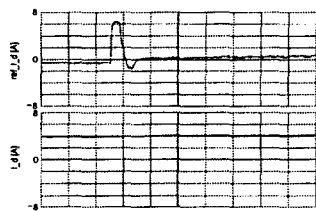


(b) q-axis current and flux

Fig. 5-4 Output characteristics under load condition



(a) Reference speed vs mover speed at 2.5 m/sec



(b) d-axis current vs output current

Fig. 5-3 Output characteristics under no load condition

6. 결 론

본 논문에서는 리니어 인덕션모터의 순시 속도에서의 1, 2차 상대 위치이동으로 나타나는 동 특성과 단부효과를 고려한 등가회로 해석방법을 이용한 시스템 모델링을 고찰하였고 리니어 인덕션모터 구동 와이어리스 엘리베이션 시스템을 설계 및 제작하여 SVPWM을 구현한 제어기를 적용하여 그 정속제어 특성을 고찰하였다

향후 벡터제어 시스템에서 회전자 저항값의 변동 등에 따른 파라미터의 부정확한 결과로 시스템 안정도 저하를 보완하여야 할 것이며 자속 관측기 등의 알고리즘을 적용하여 안정도를 보다 보완한 제어기의 구현에 앞서 기본 자료로 활용될 논문이라 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] T. Onuki, Y. Kamiya, Y. Kurimoto, M. Yoshizawa " A novel block method in the single-sided linear induction motor with a short secondary member ", IEEE Trans., vol.14, No.4, pp.1323-1328, 1999
- [2] B. I. Kwon, K. I. Woo, S. Kim " Finite element analysis of direct thrust controlled linear induction motor ", IEEE Trans. Vol.35, No.3, pp.1306-1309, 1999