

## 순시 공간벡터를 이용한 반송용 선형 유도 전동기의 제동특성에 관한 연구

\*신동률<sup>\*</sup>, 조윤현<sup>\*</sup>, 고성현<sup>\*</sup>, 노인배<sup>\*</sup>, 정봉출<sup>\*</sup>, 우정인<sup>\*</sup>  
 \*동아대학교 전기공학과, 롯데월드건설본부<sup>\*\*</sup>

### A Study on the Stopping Characteristics of the SLIM for the Automatic Conveyance System Using Instantaneous Space Vector Modulation

\*D.R.Shin<sup>\*</sup>, Y.H.Cho<sup>\*</sup>, S.H.Gho<sup>\*</sup>, I.B.No<sup>\*\*</sup>, B.C.Jeong<sup>\*</sup>, J.I.Woo<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Dept. of Electrical Eng. Dong-A Univ, <sup>\*\*</sup>Lotte World Construction

**Abstract** - The SLIM used in the conveyance system has been generally developed the controller based on the slip frequency control and the VVVVF method to obtain the quick response for the position control signal. This paper deals with the trust control of the SLIM by vector control with Bang-Bang condition. Also, the control system is composed of the PI controller for soft start of the SLIM and the q-axis current controller for correction in phase with Space Vector for reducing the harmonic pulsation in low speed. The processing for vector control and robust dynamic breaking control is carried out by MC80196KC micro processor and IGBT module. The proposed scheme is verified through the computer simulation and experiments for the 10KW SLIM.

#### 1. 서론

최근 산업사회의 고정도화로 직선운동을 필요로 하는 시스템의 수요가 날로 증가하고 있다. 이에 따라 정속 선형 구동 유도전동기인 편축식 선형 유도전동기는 온 센서와 전력전자 기술의 발달로 위치제어에서 정밀속도 제어까지 그 적용 범위를 넓혀왔고, 제어방법으로는 주로 슬립주파수 제어나 VVVF 제어방식의 open loop 제어가 주로 사용되고 있다. 그러나 이들 제어 방식은 관성과 부하 및 외란의 영향을 받을 때 그 영향을 직접적으로 제어 할 수 없다는 문제점이 야기된다. 또한 FA의 반송시스템으로 사용되는 편축식 선형 유도전동기는 soft start, soft stop 및 정확한 위치제어를 필요로 한다. 그래서 본 연구에서는 편축식 선형 유도전동기의 정확한 위치제어를 위한 제동특성을 향상시키기 위해서 Bang-Bang 제어 이론을 적용하여 벡터제어 이론에 의해서 분리된 추력성분을 직접 제어하였다. 또한 이 순시 추력성분을 고조파 왜형을 줄일 수 있고, 직류링크 전압을 최대한 이용할 수 있는 순시 공간벡터 변조기법을 통해서 순시 전압지령치로 바꾸어 편축식 선형 유도전동기에 적용함으로써 자동 반송 시스템용 편축식 선형 유도전동기의 제동특성을 향상시켰다.

#### 2. SLIM 의 해석

저속에서 편축식 선형 유도전동기를 구동하면 단부효과를 무시할 수 있다.<sup>[1][2]</sup> 이러한 단부효과를 무시하고 등가 회로를 구성하면, 회전형 유도기와 같은 형태의 등가회로로 그림 1과 같이 구성된다.

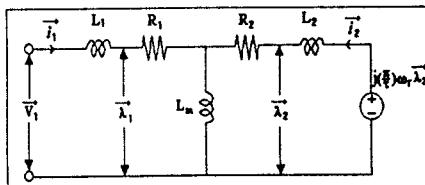


그림 1 편축식 선형유도전동기의 등가회로  
Fig. 1 Equivalent circuit of SLIM

그림 1의 등가회로로 부터 1차측과 2차측의 전압방정식은 식(1)과 같다.

$$\vec{V}_1 = R_1 \vec{i}_1 + p \vec{\lambda}_1 \quad (1)$$

$$0 = R_2 \vec{i}_2 + p \vec{\lambda}_2 - j(\frac{\pi}{r}) \omega_r \vec{\lambda}_2$$

여기서, 1, 2차의 쇄교자속은

$$\vec{\lambda}_1 = L_1 \vec{i}_1 + L_m \vec{i}_2 \quad (2)$$

$$\vec{\lambda}_2 = L_2 \vec{i}_2 + L_m \vec{i}_1$$

이고,  $p$ 는 미분 연산자,  $j(\frac{\pi}{r}) \omega_r \vec{\lambda}_2$ 는 속도 기전력이다.

식(2)를 식(1)에 대입하여  $d-q$  좌표변환에 의해 자속 성분과 추력 성분으로 분리하면 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{1d} \\ V_{1q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + pL_1 & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_2 + pL_2 & 0 & pL_m \\ pL_m & -(\frac{\pi}{r})\omega_r L_m & R_2 + pL_2 & -(\frac{\pi}{r})\omega_r L_2 \\ (\frac{\pi}{r})\omega_r L_m & pL_m & (\frac{\pi}{r})\omega_r L_2 & R_2 + pL_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)은 편축식 선형 유도전동기의 입력전력으로 식(4)와 같이나타내어진다.

$$P_{in} = i_{de}^T R_{de} i_{de} + i_{de}^T pL_{de} i_{de} + i_{de}^T G_{de} i_{de} \\ = P_R + P_L + P_G \quad (4)$$

또한, 수직력  $F_u$ 은 흡인력 ( $F_{uu}$ )과 반발력 ( $F_{uu}$ )의 합

인 식(5)와 같이 되며,

$$F_s = F_{se} + F_{sr} \quad (5)$$

$$F_{se} = \frac{3}{2g_e} \{(L_{peri} - L_m)(i_{1e}^2 + i_{2e}^2) - L_m(i_{1e}i_{2e} + i_{1d}i_{2d})\}$$

$$F_{sr} = \frac{3}{2g_e} (-L_m(i_{1e}^2 + i_{2e}^2) - L_m(i_{1e}i_{2e} + i_{1d}i_{2d}))$$

여기서,  $L_{peri}$ 는 공극 누설 인덕턴스이다.

식(4)에서 추력속도항  $P_G$ 를 구하면 식(6)과 같다.

$$P_G = \frac{3}{2} \frac{\pi}{r} \omega_r L_m (i_{1e}i_{2d} - i_{1d}i_{2e}) \quad (6)$$

따라서, 순시 이동속도  $\omega_r$ 로 이동하는 순시 추력  $F_s$ 는 식(7)과 같이 되며,

$$F_s = \frac{P_s}{\omega_r} = \frac{3}{2} \frac{\pi}{r} L_m (i_{1e}i_{2d} - i_{1d}i_{2e}) \quad (7)$$

여기서, 추력성분을 벡터제어 하기위해서 추력을 q축 전류성분에 의해서만 제어되도록 2차축 쇄교자속을 d축과 일치하면 다음과 같은 식(8)이 성립한다.

$$\lambda_{2e} = 0 \quad (8)$$

$\lambda_{2d}$  = constant

여기서, 직접적인 추력제어를 하기위한 추력성분 전류  $i_{1e}$ 는 식(2)와 식(7)및 식(8)에 의해서 식(9)로 된다.

$$i_{1e} = \frac{2 \tau L_2}{3 \pi \lambda_{2d} L_m} F_s \quad (9)$$

### 3. 순시 공간벡터 변조법

편측식 선형 유도전동기를 저역동 선형 정속 운전하기 위해서 순시 공간 벡터제어 시스템을 구성하면 그림 2와 같고, 자속성분 전류  $i_s$ 와 추력발생 전류  $i_v$ 로 각각 분리하여 제어된다.

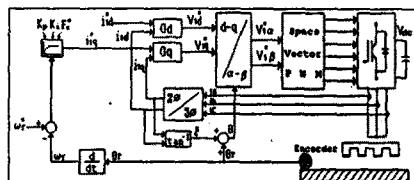


그림 2 편측식 선형 유도전동기의 순시 공간벡터 제어계  
Fig. 2 Instantaneous space voltage vector control system of SLIM

그림 2의 제어계는 지령속도  $\omega^*$ 과 궤환된 실제속도  $\omega_r$ 을 비교한 속도오차와 비례기에 의해서 강인한 파도 순시추력  $F_s^*$ 을 구할 수 있다. 만약  $\omega^*$ 가 정지지령이면 Bang-Bang제어이론에 의해서 식(10)과 같은 조건 지령치가 주어진다.

$$\omega_r^* = \begin{cases} +\omega_r^*, & \text{if } (\omega_r < 0) \\ -\omega_r^*, & \text{if } (\omega_r > 0) \\ 0 & \text{if } (\omega_r = 0) \end{cases} \quad (10)$$

순시 추력전류 지령치인  $i_{1e}^*$ 는 속도오차와 비례기에 의해서 구해진 순시 추력  $F_s^*$ 에 의해서 식(11)과 같이 된다.

$$i_{1e}^* = G_s \cdot F_s^* \quad (11)$$

$$\text{여기서, } G_s = \frac{2 \tau L_2}{3 \pi \lambda_{2d} L_m}$$

식(11)의 순시 추력 전류 지령치  $i_{1e}^*$ 를 궤환된  $i_{1e}$ 와 비교하여 순시 전압 지령치로 변환시키면 식(12)와 같이 되고, 추력분과 자속분으로 분리 제어가 가능하다.

$$V_{1d} = G_d (i_{1d}^* - i_{1d}) \quad (12)$$

$$V_{1e} = G_e (i_{1e}^* - i_{1e})$$

여기서,  $G_d$ 와  $G_e$ 는 전류제어기의 이득이다.

추력이 q축성분에 의해서만 제어되도록 상  $\zeta$ 에 대해 보정을 하면 식(13)과 같이되며, 지령 공간벡터 회전각  $\theta$ 는 회전자 점출각  $\theta_r$ 과  $\zeta$ 의 합이 된다.

$$\zeta = \tan^{-1} \left( \frac{i_{1e}}{i_{1d}} \right) \quad (13)$$

$$\theta = \theta_r + \zeta \quad (14)$$

식(12)의 순시 공간벡터는 고정좌표계의 식(15)로 변환되어 순시 공간벡터의 지령 전압벡터가 된다.

$$\begin{bmatrix} V_{1e}^* \\ V_{1d}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{1e} \\ V_{1d} \end{bmatrix} \quad (15)$$

순시 공간벡터는 기준 전압벡터를 벡터공간상의 위치에 기준을 두어 스윗칭 시간을 결정하므로 그림 3과 같이 표시할 수 있다.

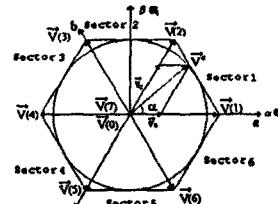


그림 3 공간 전압벡터의 도표

Fig. 3 Diagram of Space voltage vector

식(15)에서  $V_{1e}^*$ ,  $V_{1d}^*$ 를 지령하기위한 순시 공간벡터 지령치  $\overrightarrow{V^*}$ 를 한 샘플링 기간( $T_s$ )동안 인버터 출력 전압의 평균치와 같아지게 하기 위해서는 그림 3에서  $\overrightarrow{V^*}$ 가 위치한 삼각형의 두변의 인버터 출력벡터를 인가하는 유효시간  $T_1$ ,  $T_2$ 를 조절해야 한다.  $\overrightarrow{V^*}$ 가 그림 3에서 섹터1에 있는 경우  $\overrightarrow{V(1)}$ 과  $\overrightarrow{V(2)}$ 벡터를 투영된  $\overrightarrow{V_a}$ ,  $\overrightarrow{V_c}$ 로  $\overrightarrow{V^*}$ 를 합성할 수 있다.

$$\overrightarrow{V^*} \cdot T_s = \overrightarrow{V(1)} \cdot T_1 + \overrightarrow{V(2)} \cdot T_2 \quad (16)$$

여기서,  $T_1$ 과  $T_2$ 는 각각 전압 벡터  $\overrightarrow{V(1)}$ 과  $\overrightarrow{V(2)}$ 를 인가하는 시간을 나타낸다.

그림 3에서 섹터가 1~6(n=1~6)일때의 유효시간과 영벡터 출력시간은 식(17)과 같다.

$$T_1 = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left( \overrightarrow{V_{1e}} \cos \frac{n}{3} \pi + \overrightarrow{V_{1d}} \sin \frac{n}{3} \pi \right)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{3} T_s}{V_{dc}} \left( -\overrightarrow{V_{1e}} \cos \frac{(n-1)}{3} \pi - \overrightarrow{V_{1d}} \sin \frac{(n-1)}{3} \pi \right) \quad (17)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2)$$

#### 4. 시뮬레이션 및 실험고찰

본 시스템의 제동시의 응답특성을 무부하시와 부하시로 실측하여 그림 5와 6에 나타내고, 1차축의 가로의 길이 58.5cm, 세로의 길이 57cm, 높이 8.5cm, 무게 110Kg인 편축식 선형 유도전동기를  $0.5[m/sec]$ 로 4.5sec동안 기동시킨 결과이다. 그림 5(a)와(b)는 각각 무부하시의 시뮬레이션 결과와 실측에 의한 속도와 전류파형을 나타내며, 편축식 선형 유도전동기의 1차축 자체가 부하의 역할을 함에 따라 생기는 관성과 외란의 영향으로 제동시간이 약 500msec정도의 차이를 보이고 있다. 그림 5(c)와(d)는 각각 제동특성이 개선된 시뮬레이션 결과와 실측파형이며, 제동시간이 약300msec로써 그림 5(a)와(b)에 비해 빠른 제동특성을 보이고 있고, 시뮬레이션 결과와 속도파형이 거의 일치함을 볼 수가 있다. 그림 6(a)와(b)는 각각 부하에 따른 속도와 전류파형의 시뮬레이션 결과와 실측파형이며, 제동시간이 약300msec로 그림5(c)와(d)의 무부하시의 제동시간과 거의 같은 soft제동특성을 보여주고있다.

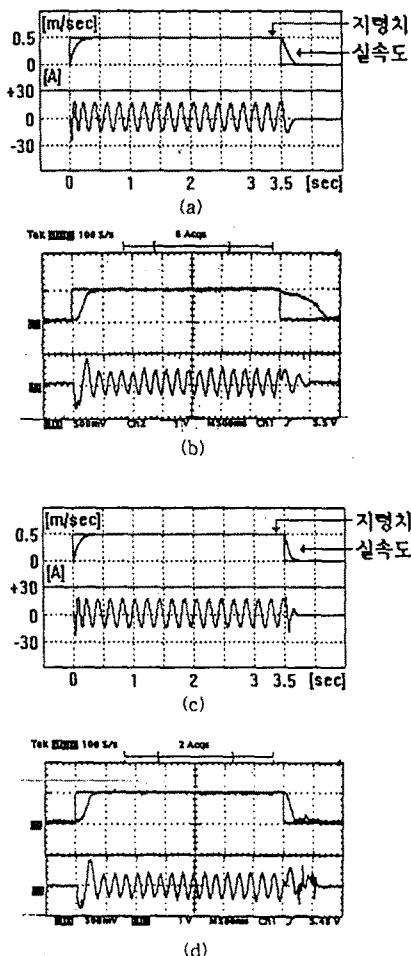
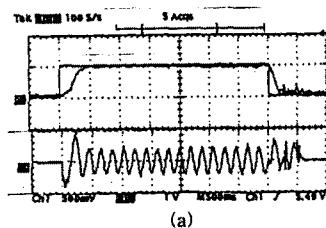
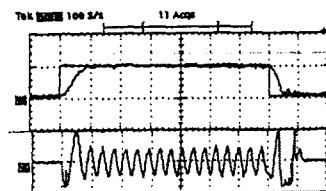


그림 5 무부하시 속도와 상전류의 시뮬레이션 및 실험  
Fig. 5 velocity and phase current(simulation and experiment) when no load



(a)



(b)

그림 6 부하시 속도와 상전류 (a)50Kg (b)80Kg

Fig. 6 velocity and phase current when load  
(a)50Kg (b)80Kg

#### 5. 결론

본 논문에서는 저속에서의 반송용 편축식 선형 유도전동기의 제동특성을 개선하기 위해서서 뱅뱅제어 이론을 바탕으로 하고, 직선 구동특성을 얻기 위해서 벡터제어에 의한 주력성분을 얻었다. 또한 순시 공간벡터에 의한 스위칭으로 관성과 외란 및 부하에 대한 제동특성이 개선된것을 실측과 시뮬레이션 결과를 통해서 고찰해 보았다.

#### 참고문헌

- [1]Jacek F. Gieras, "Linear Induction Drives", OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS, 1994
- [2]C.Lu, T.R.Eastham, G.E.Dawson, "Transient and Dynamic Performance of a Linear Induction Motor", IEEE Conf. IAS Annual Meeting, pp266~273, 1993.
- [3]Yasumasa Ogino & Yosisige Murakami, "High Performance Control in Ultra-Low Speed Range of Inverter-Fed Linear Induction Motor Using Vector Control Scheme", IEEE Conf. IAS Annual Meeting, pp.551~557, 1993.
- [4]Heinz willi van der broeck, "Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vector" IEEE, Vol.24 No.1, 1988
- [5]J.S.Kim, S.K.Sul, "A Novel Voltage Modulation Technique of the Space Vector PWM," IPEC'95 Yokohama Conf, pp 742~747, 1995