

비간섭 제어에 의한 반송용 편축식 선형 유도전동기의 속도제어

* 신동률*, 정영일**, 최선영***, 노태균****, 우정인*
 동아대학교*, 부산대학교**, (주)인원***, 일본 치과의과대학****

Speed Control of the Conveyance SLIM by the Decoupling Control

* D.R.Shin*, Y.I.Jung**, S.Y.Choi***, T.K.Roh****, J.I.Woo*
 Dong-A Univ.*, Pusan National Univ.**, In-won co.Ltd***, Tokyo Medical and Dental Univ.****

Abstract - We proposed the speed control of the SLIM(Single-sided Linear Induction Motor) for conveyance system by the decoupled thrust control. The voltage equations of SLIM are expressed on the suitable α - β axis by the proposed equivalent circuit, which can analyze the characteristics of the thrust and the normal force and so on.

These control methods, which are the slip angular frequency control and the decoupling control for the thrust and normal force by analyzing these parameters can be successfully driven without interfering of each axis. These results exemplified the linear drive of SLIM with the reference value.

1. 서 론

선형 유도전동기는 회전 이동장치를 이용하여 직선추력으로 변환시키는 것으로서 1970-80년대를 전후로 하여 극좌표 모델링에 의한 기본적인 원리가 발표된 이후부터 지속적인 연구 및 개발이 되어져 오고 있다.[1-4]

회전형 유도전동기에 비해 선형 유도전동기는 구조가 간단하며, 직선구동이 가능하고, 회전형 유도전동기에서 제한이 되고 있는 가·감속제어의 속도범위가 제한없이 확대 가능한 장점이 있고, 이들 특성으로부터 빠른 가변속 응답특성과 고속제어 특성을 얻기 위한 연구가 계속되고 있다. 또한 전력전자 기술과 선형 센서 기술의 발전에 힘입어 제어기기의 발달에 따라 정확한 속도제어 및 위치제어가 이루어지고, 새로운 구동 형태의 반송용 선형 유도전동기의 시스템이 개발되어져 오고 있다.[5-9]

반송용으로 이용되는 선형기기는 회전기기에 비하여 간단한 구조로서 구성되고 있으므로 수리 및 보수가 용이하여 유지 및 보수 비용이 절감되며, 제품을 운반하는 가동부인 1차측과 제품의 운반 이동로로 이용되는 2차측의 접촉부가 존재하지 않아 무소음 반송이 가능하다. 따라서, 반송용 SLIM은 편축식 선형 유도전동기가 연구되고 있거나 선형 유도전동기의 추력과 에어갭 자속은 전압과 주파수의 함수로 되어 있으므로 구동시에 상호 간섭을 가지게 된다. 이러한 현상은 추력에 대한 응답특성을 늦게 하므로 이를 개선하기 위해서 슬립을 증가시켜 추력을 증가시키면 자속이 감소하여 추력의 감도를 떨어뜨리게 된다.

이에 반송용 편축식 선형 유도전동기의 빠른 응답특성과 무진동 정속도 제어 및 정확한 위치제어를 하기 위해서는 상호 간섭을 일으키는 성분을 각각 독립적으로 제어하여야 한다. 본 논문에서는, 이 상호 비간섭제어를 위하여 제안된 등가회로를 이용하여 자속성분과 추력성분을 α - β 축으로 분리하여 제어하는 방법을 제안하고, 비간섭 제어에 의한 반송용 편축식 선형 유도전동기의 속도제어에 대하여 연구하고자 한다.

2. SLIM의 해석

2.1 등가회로

그림 1은 본 연구에서 설계된 반송용 선형 유도전동기로서 구조가 간단하고, 중량부하를 운송하는 1차측과 레일을 구성하고 있는 2차측으로 구성되어있다.[5,6] 또한, 그림 1의 (a)는 저속 구동에서 End-effect를 무시할 수 있는 반송용 편축식 선형 유도전동기의 실험기기와 제원을 나타내고 있으며, 그림 1(b)는 제안된 선형 유도전동기의 등가회로를 나타내고 있다.

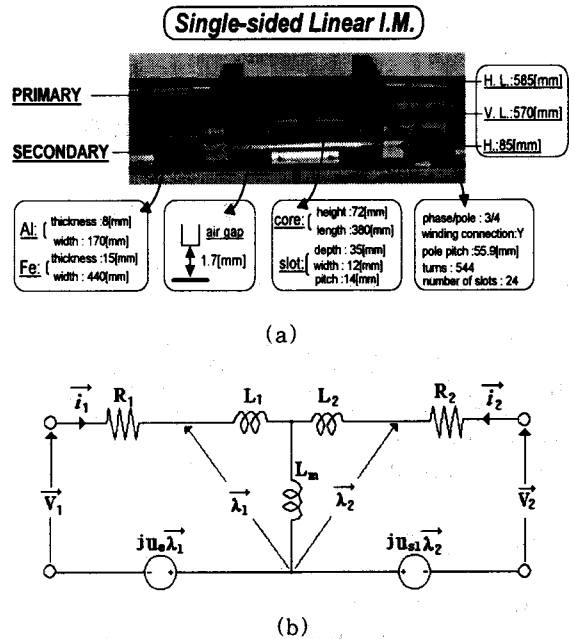


그림 1 반송용 편축식 선형 유도전동기
 (a)실험기기 (b)등가회로

Fig. 1 SLIM(Single-sided Linear I.M.)
 (a)Experiment machine
 (b)Equivalent circuit

그림 1(b)의 등가회로로부터, 반송용 편축식 선형 유도전동기의 1차측과 2차측의 전압방정식은 식(1)과 같이 나타내어진다.

$$\vec{V}_1 = R_1 \vec{i}_1 + p \vec{\lambda}_1 + j \left(\frac{\pi}{\tau} \right) u_e \vec{\lambda}_1 \quad (1)$$

$$\vec{V}_2 = R_2 \vec{i}_2 + p \vec{\lambda}_2 + j \left(\frac{\pi}{\tau} \right) u_{sl} \vec{\lambda}_2$$

여기서, 그림 1(b)의 등가회로로부터 1차측과 2차측의 쇄교자속은 식(2)로 표현된다.

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

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

식(1)과 식(2)에 의해서 반송용 편축식 선형 유도전동기의 비간섭제어를 하기위하여 자속성분을 포함하고 있는 α 축과 추력성분을 포함하고 있는 β 축으로 방정식을 분리하면 식(3)과 같이 다시 나타내어진다.

$$\vec{V}_{1\alpha} = (R_1 + pL_1) \vec{i}_{1\alpha} + pL_m \vec{i}_{2\alpha} - \frac{e_{v1\alpha}}{\tau} \quad (3)$$

$$\vec{V}_{1\beta} = (R_1 + pL_1) \vec{i}_{1\beta} + pL_m \vec{i}_{2\beta} - \frac{e_{v1\beta}}{\tau}$$

$$\vec{V}_{2\alpha} = (R_2 + pL_2) \vec{i}_{2\alpha} + pL_m \vec{i}_{1\alpha} - \frac{e_{v2\alpha}}{\tau}$$

$$\vec{V}_{2\beta} = (R_2 + pL_2) \vec{i}_{2\beta} + pL_m \vec{i}_{1\beta} - \frac{e_{v2\beta}}{\tau}$$

여기서, $\frac{e_{v1\alpha}}{\tau}$, $\frac{e_{v1\beta}}{\tau}$, $\frac{e_{v2\alpha}}{\tau}$, $\frac{e_{v2\beta}}{\tau}$ 는 1차 및 2차의 α , β 각각의 축에 나타내어지는 속도 유기기전력이고, 식(4)로 표현된다.

$$\frac{e_{v1\alpha}}{\tau} = \left(\frac{\pi}{\tau}\right) u_e (L_1 \vec{i}_{1\beta} + L_m \vec{i}_{2\beta}) \quad (4)$$

$$\frac{e_{v1\beta}}{\tau} = -\left(\frac{\pi}{\tau}\right) u_e (L_1 \vec{i}_{1\alpha} + L_m \vec{i}_{2\alpha})$$

$$\frac{e_{v2\alpha}}{\tau} = \left(\frac{\pi}{\tau}\right) u_{sl} (L_2 \vec{i}_{2\beta} + L_m \vec{i}_{1\beta})$$

$$\frac{e_{v2\beta}}{\tau} = -\left(\frac{\pi}{\tau}\right) u_{sl} (L_2 \vec{i}_{2\alpha} + L_m \vec{i}_{1\alpha})$$

식(3)과 같이 α - β 축으로 분리된 회전좌표축의 전압 방정식은 식(5)와 같이 되고,

$$V_{\alpha\beta} = R_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta} + L_{\alpha\beta} \dot{i}_{\alpha\beta} + G_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta} \quad (5)$$

식(5)에 의해서 반송용 편축식 선형 유도전동기의 입력전력은 식(6)과 같이 표현된다.

$$P_{in} = i_{\alpha\beta}^T R_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta} + i_{\alpha\beta}^T p L_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta} + i_{\alpha\beta}^T G_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta} = P_R + P_L + P_C \quad (6)$$

여기서, $i_{\alpha\beta}$ 는 α - β 축으로 분리된 1차측 및 2차측의 전류행렬이고, $i_{\alpha\beta}^T$ 는 $i_{\alpha\beta}$ 의 전치행렬이다.

식(6)의 강하손실분 전력 P_R , 자기축적분 전력 P_L , 속도유기분 전력 P_C 은

$$P_R = R_1 (i_{1\beta}^2 + i_{1\alpha}^2) + R_2 (i_{2\beta}^2 + i_{2\alpha}^2) \quad (7)$$

$$P_L = \frac{p}{2} (i_{\alpha\beta}^T L_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta}) \quad (8)$$

$$P_C = \frac{\pi}{\tau} u_r L_m (i_{2d} i_{1q} - i_{1d} i_{2q}) \quad (9)$$

이 되며, 1차측 캐리어의 이동속도를 u_r , 순시 추력을 F_e 라 할때 $F_e = P_C / u_r$ 이므로 속도유기분 전력의 항 P_C 로부터 순시 추력 F_e 는 식(10)으로 된다.

$$F_e = \frac{P_C}{u_r} = \frac{\pi}{\tau} L_m (i_{1q} i_{2d} - i_{1d} i_{2q}) \quad (10)$$

2.2 슬립주파수 제어

2축 회전좌표계에 의한 슬립주파수 벡터제어를 하기 위해서 추력성분을 포함하고 있는 2차측 쇄교자속과 자속성분을 포함하고 있는 2차측 전류는 일치되어야 하며, 식(11)과 같이 표현된다.

$$\lambda_{2\beta} = 0, \quad i_{2\alpha} = 0 \quad (11)$$

식(10)과 (11)에 의해서 추력은 다음과 같이 재표현된다.

$$\lambda_{2\alpha} = L_m i_{1\alpha} \quad (12)$$

$$F_e = -\frac{3\pi}{2\tau} L_m i_{1\alpha} i_{2\beta} \quad (13)$$

$$F_e = -\frac{3\pi}{2\tau} \lambda_{2\alpha} i_{2\beta} \quad (14)$$

위의 방정식으로부터 식(2)와 (11)을 이용하면 반송용 편축식 선형 유도전동기의 추력제어를 위한 1차측 전류 $i_{1\beta}$ 는 식(15)로 표현된다.

$$i_{1\beta} = G_S \cdot F_e \quad (15)$$

여기서, 유효추력계수 $G_S = \frac{2\tau L_2}{3\pi \lambda_{2\alpha} L_m}$ 이다.

슬립주파수 제어를 하기위해서, 슬립속도항을 포함하고 있는 식(10)-(15)에 의해서 슬립속도를 유효추력계수식(16)으로 표현하면 다음과 같다.

$$u_{sl} = u_e - u_r = \frac{\pi L_m R_2}{\tau \lambda_{2\alpha} L_2} i_{1\beta} \quad (16)$$

여기서, u_{sl} 는 슬립속도이고, u_e 는 동기속도이다.

식(16)로부터, 슬립속도는 추력성분전류 $i_{1\beta}$ 에 선형비례 관계가 있는 것을 알수 가 있다.

2.3 비간섭제어

벡터제어를 채택한 전류제어기에서 전류를 제어하는 경우 속도 기전력 성분은 각 축간에 간섭을 야기시키며, 시스템의 외란 요소로서 작용한다. 이러한 외란 요소를 제거하기 위해서는 상호간섭분 만큼 전압을 미리 인가하여 α - β 축간의 상호 간섭 현상을 제거할 수 있다.

식(3)의 전압평형식에서 첫째항과 둘째항에 식(2)를 대입하면 식(17)과 같은 속도 기전력성분을 얻을 수 있다.

$$v_{\alpha \rightarrow \beta} = \left(\frac{\pi}{\tau}\right) u_e L_1 i_{1\alpha} \quad (17)$$

$$v_{\beta \rightarrow \alpha} = -\left(\frac{\pi}{\tau}\right) u_e \left(\frac{L_1 L_2 - L_m^2}{L_2}\right) i_{1\beta}$$

여기서, $v_{\alpha \rightarrow \beta}$ 는 α 축에서 β 축으로 영향을 주는 속도 기전력을 나타내는 것이며, $v_{\beta \rightarrow \alpha}$ 는 그 반대이다.

따라서, 각 축의 전압 지령치 $v_{1\alpha}^*$, $v_{1\beta}^*$ 을 인가할 경우, 양 축간의 비간섭화를 위한 1차측 전압 $v_{1\alpha}$, $v_{1\beta}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{1\alpha} = v_{1\alpha}^* - v_{\beta \rightarrow \alpha} \quad (18)$$

$$v_{1\beta} = v_{1\beta}^* - v_{\alpha \rightarrow \beta}$$

여기서, 각 축의 전압 지령치 $v_{1\alpha}^*$, $v_{1\beta}^*$ 는 동기입력 저항 R 과 함께 식(19)로 표기된다.

$$v_{1\alpha}^* = R_1 i_{1\alpha}^* \quad (19)$$

$$v_{1\beta}^* = R_1 i_{1\beta}^*$$

위의 식으로부터 추력 성분을 포함하고 있는 전류 지령치를 고려한 전압원 구동-반송용 편축식 선형 유도전동기의 벡터제어 블록도를 구성하면, 그림 2와 같다.

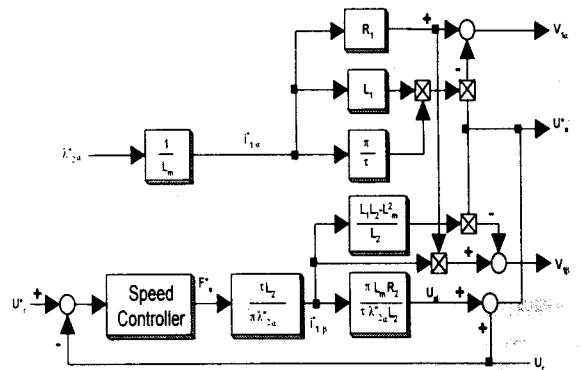


그림 2 비간섭제어를 위한 블록도
Fig. 2 Block diagram for the decoupling control

3. 결과 고찰

그림 3은 본 논문에서 제안한 편축식 선형 유도전동기의 비간섭제어에 대한 시스템의 구성도를 나타내고 있다.

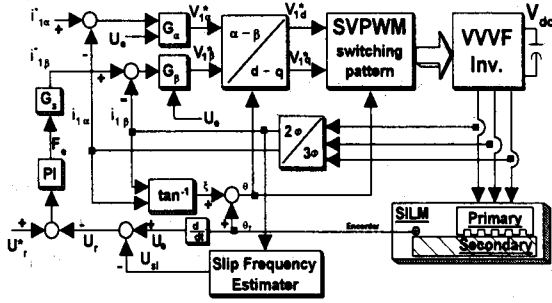


그림 3 편축식 선형 유도전동기의 제어시스템
Fig. 3. Control system of SLIM

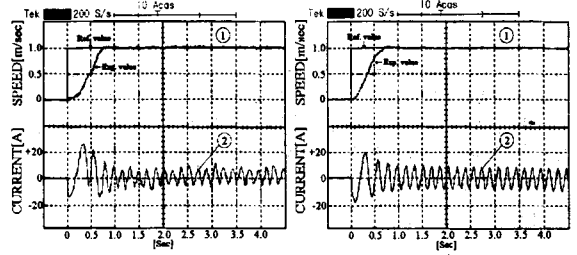
3.1 파라메타특성

그림 4에서 (a)는 비간섭 제어를 가하지 않았을 때의 추력파형이고, 이때 그림 4(b)에서 파형 ①은 추력분의 전류파형, 파형 ②는 공극진동이며 그림 4(c)에서 파형 ①은 속도특성, 파형 ②는 상전류 파형의 특성을 나타내고 있으며, 그림 4의 (b), (d), (f)는 비간섭제어를 가했을 때의 추력파형과 추력전류파형, 공극 및 속도와 상전류파형의 특성에 대하여 각각 나타내고 있다.

그림 4(a)의 추력파형에서 보면 추력과 에어갭자속사이에서 상호간섭의 영향으로 추력파형이 약 1.0(sec)에서 지령치에 접근되고 있으나 상당한 리플을 나타내고 있으며, 그림 4(b)의 추력파형은 비간섭제어에 의해서 리플없는 추력특성을 볼 수 있다.

그림 4(c)는 추력전류지령치에 대한 추력전류가 상호간섭에 의하여 추력전류지령치에 추종하지 못하고 있으며 공극 또한 심하게 진동하는 것을 보이고 있으나, 그림 (d)의 경우는 추력전류지령치의 추종과 공극의 변동이 거의 없는 것을 알 수 가있다.

그림 4(e)는 속도와 상전류에 대한 파형으로써 간섭에 의해서 속도특성이 상당히 진동하고 있으나 상전류파형이 제대로 인가되지 않고있는 것을 알 수 있으며 그림 4(f)의 속도파형 및 상전류가 안정되게 인가되어 속도에 대한 진동이 없어 반송용에서의 최대 관건이 무진동에 의한 제품의 안정된 운반이 본 실험을 통하여 가능한 것을 알 수 가있었다.



(e)

(f)

그림 4 편축식 선형 유도전동기의 파라메타 특성
Fig. 4 Parameter characteristics of SLIM

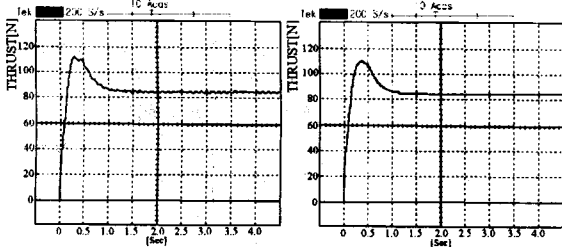
4. 결론

본 논문에서는 반송용 기기의 중량체 운반에서의 최대관건인 무진동에 의한 안전한 제품의 운반을 위하여 추력과 에어갭자속사이에서 전압과 주파수의 함수로 상호 간섭을 일으키는 성분을 각각 독립적으로 제어하므로서 편축식 선형 유도전동기의 반송기기로서의 사용의 우수성을 입증하고자 하였다.

상호 간섭분을 제거하기 위해서 본 논문에서 제안한 등가회로에 의해서 자속성분과 추력성분을 포함하고 있는 $\alpha-\beta$ 축으로 각각 독립적으로 분리하여 제어하여 반송용 편축식 선형 유도전동기의 각각의 파라메타에 대한 특성을 분석하였으며, 이 결과를 통하여 본 논문에서 제안한 비간섭제어에 의한 속도제어의 우수성과 앞으로 산업체의 운반기기로서 편축식 선형 유도전동기를 사용할때에 파라메타의 해석과 제어시스템에 상당한 도움이 될 것으로 여겨진다.

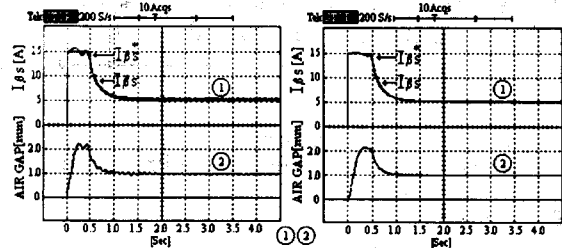
참고 문헌

- [1] Ion Boldea, Syed A. Nasar, "Vector Control of AC Drives", CRC Press, 1992.
- [2] T.A.Nondahl & D.W. Novotny, "Pole-by-Pole Model of a Linear Induction Machine Using Conformal Mapping Coefficients", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, No.4, July/Aug, 1979.
- [3] T.A.Nondahl & D.W. Novotny, "Three-phase pole-by-pole model of a linear induction machine", IEE Proceedings vol.127, No.2, MARCH, 1980.
- [4] S. Nonaka, et al 2, "Experimental Study on Characteristics of Linear Induction Motor for Urban Transit" 電學論D, 108券5號, pp477~484, 1988.
- [5] S.A Nasar, I.Boldea, "Linear Motion Electric Machine", Wiley-Interscience Publication, 1976.
- [6] BOLDEA & S.A.NASAR, "Linear Motion Electromagnetic System", Wiley-Interscience Publication, 1985.
- [7] B.K.Bose, "Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall, 1986.
- [8] 山田一, "産業用リニアモータ", 工業調査會, 1985.
- [9] 見城尚志, 赤木泰文, 川村 昭, 三上 且, "ACサーボモータとマイコン制御", 總合電子 出版社, 1984.



(a)

(b)



(c)

(d)