반송용 편측식 선형유도전동기의 센서리스 속도제어

* 신동률*, 김영빈*, 노인배*, 우정인*
동아대학교 전기공학과*

Sensorless Speed Control of the Conveyance SLIM

* D.R.Shin*, Y.B.Kim*, I.B.No*, J.I.Woo*
Dept. of Electrical Eng. Dong-A Univ.*

Abstract - Space Vector control of linear induction motor without speed sensor is one of the most up-to-date researching subjects to the engineers in the fields of power electronics and control theory. A conveyance SLIM(Single-sided Linear Induction Motor) has required a stable speed and a soft start/stop when the goods convey. So, the close loop control method to use a speed sensor have been adopted and as the speed sensor, a linear encorder has been used. But when the speed sensor used, the application boundary is limited and the confidence of system is diminished because it is sensitive to external environment variations and its cost is very expensive. So, to solve these problems, this paper deals with speed control of the conveyance SLIM using space vector without speed sensorless.

1. 서 론

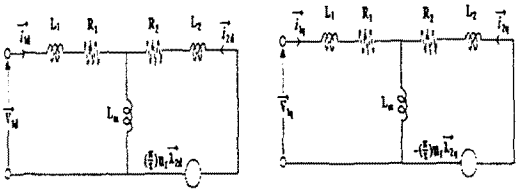
반송시스템으로 개발되어져 오고 있는 선형유도전동기는 1973년 B.T.Ooi에 의해 선형화운동에 관한 기본적인 원리가 발표된 이래, 최근에는 T.R.Easthan등에 의해 선형유도전동기의 과도특성에 관해 연구된 바 있고, 1993년 Yasumasa Ogino & Yosisige Murakami에 의해서 초저속 선형유도전동기의 벡터제어에 관한 연구가 진행되어져 왔다.

최근에는 고조파 왜형율을 줄일 수 있고, 직류 링크전압을 최대한 이용할 수 있는 공간 벡터변조(Space Vector Modulation) 기법을 이용하여 추력리플을 억제하고 있어며, 이 제어기법은 중량체의운반에 있어서 필수적인 요소로 작용되는 안정성과 soft start, soft stop 그리고 no shock driving를 가능하게 해주었다. 그러나 이 제어법은 선형유도전동기의 순시적 위치에 따르는 속도센서를 요구하고 있기 때문에 적용범위에 한계를 가져오게되었다. 따라서 속도센서가 직접 부착되지 않고 선형유도전동기의 전류나 전압등 으로부터 위치를 추정 검출한후 속도나 추력 및 수직력을 추정하여 제어하는 속도센서리스제어법이 요구된다. 본 논문에서는 반송용 편측식 선형유도전동기를 d-q축으로 분리하여 각종 파라메타를 해석하고 속도센서리스에 의한 추정연산 제어기법을 제안하고, 파라메타 값들의 동특성을 시뮬레이션을 통하여 고찰하고자 한다.

2. SLIM의 해석

2.1 등가회로

중량 부하의 저속 선형구동에서 반송용 편측식 선형유도전동기를 구동하면 단부효과를 무시할 수 있다. 이러한 단부효과를 무시하고 등가회로를 구성하면 그림 1(a), (b)와 같은 d-q축 등가회로를 구성할 수 있다.



(a)d축 (b)q축

그림 1 편측식 선형 유도전동기의 d-q축 등가회로
Fig. 1 The d-q axis equivalent circuits of SLIM

그림 1(a), (b)와 같은 편측식 선형유도전동기의 $d-q$ 축 등가회로에 의해서 자속 성분축 d축과 추력 성분축 q축으로 분리하면 식(1)과 같다.

$$
\begin{aligned}
V_{1q} &= (R_1 + pL_1)\cdot i_{1q} + pL_m \cdot i_{2q} \\
V_{1d} &= (R_1 + pL_1)\cdot i_{1d} + pL_m \cdot i_{2d}
\end{aligned} \qquad (1)
$$

$$
\begin{aligned}
0 &= (\tfrac{\pi}{\tau})u_r L_m \cdot i_{1q} + pL_m \cdot i_{1d} \\
&\quad + (\tfrac{\pi}{\tau})u_r L_2 \cdot i_{2q} + (R_2 + pL_2)\cdot i_{2d} \\
0 &= (\tfrac{\pi}{\tau})u_r L_m \cdot i_{1q} + pL_m \cdot i_{1d} \\
&\quad + (\tfrac{\pi}{\tau})u_r L_2 \cdot i_{2q} + (R_2 + pL_2)\cdot i_{2d}
\end{aligned}
$$

식(1)로 부터 편측식 선형 유도 전동기의 입력전력은 식(2)와 같이 강하손실분전력 P_R, 자기축적분전력 P_L, 속도유기전력 P_G로 평형되어 진다.

$$P_{in} = i_{dq}^T R_{dq} i_{dq} + i_{dq}^T p L_{dq} i_{dq} + i_{dq}^T G_{dq} i_{dq}$$
$$= P_R + P_L + P_G \quad (2)$$

여기서, R_{dq}, L_{dq}, G_{dq}는 각각 편측식 선형유도전동기의 d축과 q축으로 분리된 등가저항과 등가인덕턴스 그리고 등가운동기자력이다.

2.2. 수직력

공극에서 발생되는 수직력 F_n는 흡인력 F_{na}와 반발력 F_{nr}의 합인 식(3)과 같이 되며,

$$F_n = F_{na} + F_{nr} \quad (3)$$

흡인력 F_{na}와 반발력 F_{nr}은 식(4)와 식(5)로 된다.

$$F_{na} = \frac{3}{2g_e}\{(L_{peri} - L_m)(i_{1q}^2 + i_{1d}^2) - L_m(i_{1q}i_{2q} + i_{1d}i_{2d})\} \quad (4)$$

$$F_{nr} = \frac{3}{2g_e}\{-L_m(i_{2q}^2 + i_{2d}^2) - L_m(i_{1q}i_{2q} + i_{1d}i_{2d})\} \quad (5)$$

여기서, L_{peri}는 공극 누설 인덕턴스이고, $L_{peri} = x_{peri}/2\pi f$이다.

2.3. 추력

이동속도를 u_r, 순시 추력을 F_e라 할때 $F_e = P_G/u_r$이므로 식(2)로 부터 속도기전력의 항 P_G를 구하면 식(6)이 된다.

$$P_G = \frac{3}{2}\frac{\pi}{\tau} u_r L_m (i_{1q}i_{2d} - i_{1d}i_{2q}) \quad (6)$$

따라서, 순시 이동속도 u_r로 이동하는 순시 추력 F_e는 식(7)과 같이 된다.

$$F_e = \frac{3}{2}\frac{\pi}{\tau} L_m (i_{1q}i_{2d} - i_{1d}i_{2q}) \quad (7)$$

3. SLIM의 시뮬레이션 고찰

본 시스템의 응답특성을 고찰하기 위해서 1차측 가동자의 가로의 길이가 58.5cm, 세로의 길이가 57cm, 높이가 8.5cm, 무게가 110Kg인 센서리스 편측식 선형유도전동기를 공간벡터제어에 의한 1[m/sec]의 속도로 기동시켜 반송용 편측식 선형유도전동기의 파마메타들의 특성을 고찰하였다. 표 1은 본 시스템에 사용된 편측식 선형 유도전동기의 제원이며, 표 2는 제안된 등가회로의 각 정수를 나타낸다.

표 1 편측식 선형 유도전동기의 제원
Table 1 Specification of the SLIM

	Winding	Core/Slot
Pri -mary	Number of phases:3 Number of poles:4 Winding connection:Y Pole pitch:55.9[mm] Turns:544	Core:height:72[mm] length:380[mm] Number of slots:24 Slot:depth:35[mm] width:12[mm] pitch:14[mm]
Secon -dary	Al : Thickness:8.0[mm] Width:170.0[mm]	Fe : Thickness:15.5[mm] Width:440.0[mm]

표 2 SLIM의 등가회로 정수
Table 2 Element values of SLIM

R_1(1차측저항)	3.7 (Ω)
L_1(1차측자기인덕턴스)	0.058 (H)
L_m(상호인덕턴스)	0.052 (H)
J_m(관성모멘트)	0.01 (Kgm^2)
R_2(2차측저항)	33.1 (Ω)
L_2(2차측자기인덕턴스)	0.058 (H)
g_e(공극)	1.7 (mm)
B_m(점성마찰계수)	0.559 (Nms/rad)

3.1. 센서리스 제어시스템

편측식 선형유도전동기의 센서리스제어하기위한 전체시스템계는 그림 2와 같다.

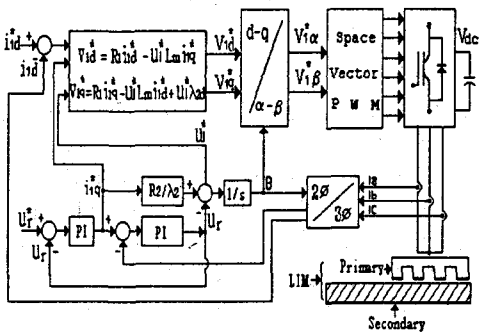


그림 2 편측식 선형유도전동기의 센서리스 제어시스템
Fig. 2 Sensorless control system of SLIM

식(1)의 첫 번째 두방정식을 풀면 2차측 전류는 식(2)로 계산되어 진다.

$$i_{2d} = \frac{1}{pL_m}(v_{1d} - R_1 i_{1d}) - \frac{L_1}{L_m} i_{1d} = \frac{1}{L_m}(\lambda_{1d} - L_1 i_{1d})$$
$$i_{2q} = \frac{1}{pL_m}(v_{1q} - R_1 i_{1q}) - \frac{L_1}{L_m} i_{1q} = \frac{1}{L_m}(\lambda_{1q} - L_1 i_{1q}) \quad (8)$$

식(1)의 3, 4항을 식(13)에 대입하면 u_r과 R_2가 계산되어 지고, 이동속도 u_r은 R_2 항의 제거에 의해 식(14)와 같이 구해진다.

$$u_r = \frac{(\lambda_{1d} - L_1 i_{1d}) p\lambda_{2q} - (\lambda_{1q} - L_1 i_{1q}) p\lambda_{2d}}{(\lambda_{1d} - L_1 i_{1d})\lambda_{2d} + (\lambda_{1q} - L_1 i_{1q})\lambda_{2q}} \quad (9)$$

여기서, 1, 2차측의 누설자속은 식(10)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \lambda_{1q} &= \int (v_{1q} - R_1 i_{1q}) dt \\ \lambda_{1d} &= \int (v_{1d} - R_1 i_{1d}) dt \\ \lambda_{2d} &= \frac{L_2}{L_m}\lambda_{1d} - \frac{l^2}{L_m} i_{1d} \\ \lambda_{2q} &= \frac{L_2}{L_m}\lambda_{1q} - \frac{l^2}{L_m} i_{1q} \quad (l^2 = L_1 L_2 - L_m^2) \end{aligned} \quad (10)$$

식(8)과 (10)에 의해서, 속도항인 식(9)는 2차측 전류 i_2 와 자속벡터 λ_2 의 표현은 식(11)과 같다.

$$u_r = \frac{i_2 \times p\lambda_2}{i_2 \cdot \lambda_2} \quad (11)$$

3.2. 속도 및 전류

그림 3은 지령속도 1[m/sec]를 가진 센서리스 편측식 선형유도전동기의 공간벡터 제어방법에 의한 속도특성(1)과 상전류(2)에 대한 시뮬레이션 결과를 각각 나타낸다. 그림 3에서 파형(1)의 속도특성에서는 지령치에 도달하는 시간이 약 600[m/sec]정도 걸리고 있으며, 제동시에는 약 400[m/sec]걸리며, 또한 정상상태시에는 속도리플없이 안정하게 기동되고 있는 것을 시뮬레이션을 통해 알수 있었다. 따라서 이 결과에 의해서 속도센서리스제어기법에 의해서 반송용 편측식 선형유도전동기의 정확한 위치제어가 되는 것을 본 결과를 통해서 알 수가 있다. 그림3의 파형(2)의 전류파형은 그림3의 파형(1)의 지령속도에 따른 전류파형을 나타내고 있다.

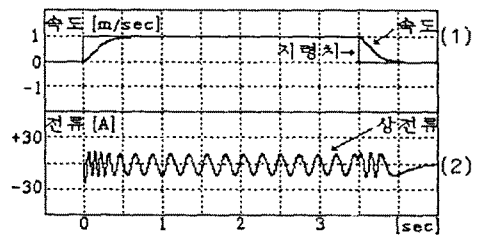
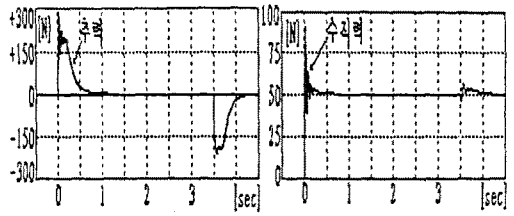


그림 3 속도와 상전류(시뮬레이션)
Fig. 3 Speed and phase current(simulation)

3.3. 추력 및 수직력

그림 4의 (a) 및 (b)는 센서리스 편측식 선형유도전동기의 공간벡터 제어방법에 의한 추력특성과 수직력특성을 나타낸다. 공간벡터제어를 했을 경우 그림 4(a)의 추력특성은 약 600[m/sec]이후 속도가 지령치에 도달할때 0[N]에 가까와져 수렴하여 안정화 됨을 알 수 있고, 그림 4(b)의 수직력은 약 600[m/sec]이후부터 안정화됨을 고찰할 수 가있다.



(a)추력 (b)수직력

그림 4 시뮬레이션 (a)추력 (b)수직력
Fig.4 Simulation (a)thrust (b)normal force

4. 결 론

본 논문에서는 속도에 따른 추력및 수직력의 정확한 파라메타의 값들을 구하기 위해서 d-q축 등가회로를 구성하였다. 또한 속도 지령치추종에 따른 속도센서리스 반송용 편측식 선형 유도전동기의 파라메타값들의 동특성을 고찰하기 위해서 공간벡터제어방법을 사용하였다. 본 시스템에서 속도센서리스를 이용한 공간벡터제어는 정확한 위치제어를 위한 속도 지령치 추정성이 뛰어남을 알 수가 있으며, 속도가 지령치에 도달한 후에는 진동없이 안정화되므로 제품을 안정성있게 운반할 수 있음을 알수 가 있다. 이 결과를 토대로 속도센서리스 편측식 선형 유도전동기의 설계를 위한 파라메타 값들의 계산결과 위에서 공간벡터제어의 기법이 채택되므로서 그 활용이 기대될 것이다.

[참 고 문 헌]

[1]T.R.Eastham,"Transient and Dynamic Performance of a Linear Induction Motor", IEEE Conf. IAS Annual Meeting, pp. 266~273, 1993.

[2]J.S.Kim"A Novel Voltage Modulation Technique of the Space Vector PWM," IPEC '95 Yokohama Conf, pp.742~747, 1995.

[3]T.Kanmachi,I.Takahashi,"Sensorless Speed Control of An Induction Motor with No Influence of Secondary Resistance Variance."IEEE,IAS Annual Meeting.pp. 408-413,1993