

등가회로법을 이용한 PMLSM의 직접추력제어 특성 시뮬레이션

* 김덕진*, 우경일*, 권병일*, 박승찬**
 한양대학교 전기공학과*, 한양대학교 공학기술연구소**

Direct Thrust Control Simulation of a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor using the Equivalent Circuit Method

* Kim Duk-Jin*, Woo kyung-Il*, Kwon Byung-Il*, Park Seung-Chan**
 Dept. of Electrical Eng., Graduate School of Hanyang Univ.*, RIET**

Abstract-A simulation method for the direct thrust control of a permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM) using the equivalent circuit is presented. The motor self inductance, the initial flux linkage by the permanent magnet is calculated in advance by the finite element analysis, and then the the direct control simulation is carried out. As a result, thrust, flux and speed responses to the commands are examined and the presented simulation method is proved to be very useful.

2. 직접 추력 제어

2.1 직접 추력 제어의 원리

그림 1은 PMLSM의 속도제어시의 직접추력제어의 기본적인 원리를 나타낸다. 기준 추력 F^* 와 기준 고정자 자속 쇄교수 ψ^* 가 피드백되어지는 추력 F 와 고정자 자속 쇄교수 ψ 와 비교되어지며 이때의 오차값이 히스테리시스 제어기의 입력이 된다.

히스테리시스 제어기에서 밴드폭은 스위칭 주파수를 낮추어, 스위칭 손실을 감소시킨다. 이 제어기의 출력은 고정자 자속 쇄교수의 위치정보인 θ 와 함께 스위칭 테이블의 입력이 되어 각 상태에 따라 최적의 스위칭 벡터가 선택되어지고, 이 스위칭 벡터정보에 의하여 인버터는 진동기에 최적의 전압벡터를 공급한다.

2.2 최적의 전압벡터의 선택(1)

최적의 전압벡터란 진동기가 동작중에 있을 때 기준추력과 기준 고정자 자속 쇄교수의 기준값에 의하여 설정된 히스테리시스 밴드내에 실제 추력과 실제 고정자 쇄교 자속수가 항상 존재하도록 각 샘플링 시간에서 선택되어지는 전압벡터를 말한다. 이러한 전압벡터의 선택은 표 1에 나와 있는 스위칭 테이블에 의해서 선택되어지는데 스위칭 테이블의 입력은 추력오차 Γ , 고정자 쇄교 자속수의 오차 ϕ 와 위치정보 θ 이다. 스위칭 테이블에서 선택된 최적의 전압벡터는 고정자 자속 쇄교수가 항상 회전하게 하여, 원하는 기준값으로 제

1. 서 론

영구 자석형 선형동기전동기는 고속, 고추력 운전에 적합하여 반송시스템을 포함한 공작기계 및 리니어 엘리베이터등의 응용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 용도의 선형 전동기의 제어에 있어서 고속의 추력 응답을 얻기 위해서는 일반 회전기에서 적용되는 직접 토오크제어 방식[1-4]을 채택할 필요가 있다. 선형 전동기에 직접 추력제어법을 적용하므로써, 벡터제어방식에서보다 우수한 추력응답특성을 얻을수 있다는 것이 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 통하여 입증된바 있다 [5]. 그러나, [5],[6]에서와 같이 유한요소법을 이용한 추력 제어 시뮬레이션은 단부효과를 완전히 고려한 해석이 가능한 장점이 있지만, 계산 시간과 이동 mesh에 대한 특별한 기법을 필요로 하는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 등가회로 정수를 사용하여 PMLSM의 직접 추력제어시 특성을 간단히 시뮬레이션 할 수 있는 방법을 제시한다. 초기 위치에서 영구자석에 의한 쇄교 자속을 미리 계산한 후, 등가회로법을 이용한 직접 추력 제어 특성 시뮬레이션을 수행하게 된다. 시뮬레이션 결과로서는 속도 제어시의 추력 및 자속의 응답특성을 보인다.

표 1 최적의 스위칭 테이블

ϕ	Γ	θ					
		$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	$\theta(4)$	$\theta(5)$	$\theta(6)$
$\phi=1$	$\Gamma=1$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$
	$\Gamma=0$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$
$\phi=0$	$\Gamma=1$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$
	$\Gamma=0$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$

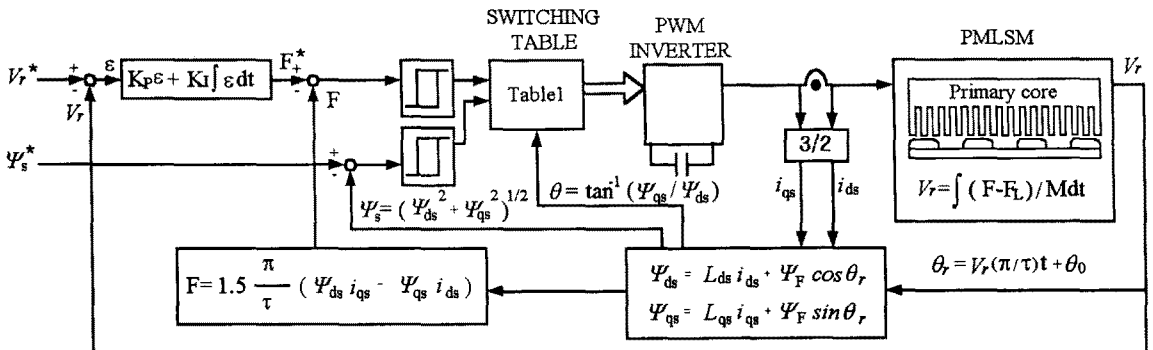


그림 1 속도제어시 직접추력제어의 기본 구성도

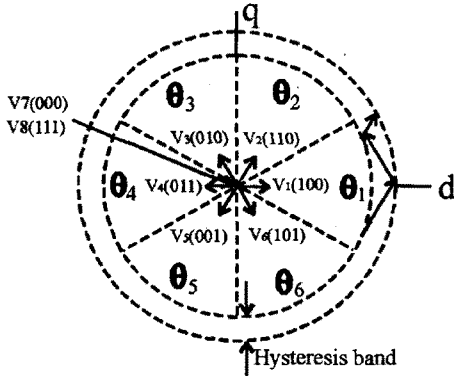


그림 2 고정자 자속 벡터의 움직임

어가 이루어 지게 한다. θ 는 d,q축 쇄교 자속으로부터 구하며, 고정자 자속 쇄교수의 크기를 제어하기 위한 전압 벡터의 선택을 위해, 전압 벡터 평면을 그림 2와 같이 6개의 평면으로 나눈다. 각 영역에서 최소의 스위칭 주파수를 발생하는 두 개의 전압벡터가 회전방향에 따라 고정자 자속 쇄교수의 크기를 제어하기 위해서 선택가능하다. 즉 회전방향이 시계 반대방향이고 고정자 자속 쇄교수가 영역 $\theta(1)$ 에 위치해 있을때는 그 크기를 히스테리시스 밴드폭내에 위치시키기 위해서 고정자 자속 쇄교수가 하한치 아래에 위치한 경우에 V_2 가 선택되어지며, 상한치 위에 위치한 경우에는 V_3 가 선택되어진다.

2.3 자속 및 인덕턴스의 계산

영구자석형 선형 전동기의 고정자 자속 쇄교수는 영구자석이 존재 하므로 전동기로 공급되어지는 전류와 위치에 따른 영구자석의 자속에 의해서 식 (1)과 같이 정의할수 있다(7).

$$\overline{\Psi}_s = L_s \overline{i}_s + \Psi_F e^{j\theta} \quad (1)$$

여기서 Ψ_s 는 고정자 자속 쇄교수이고, Ψ_F 는 영구자석에 의한 자속 쇄교수이다, θ 는 시간에 따라 변하는 자석의 위치정보로서, 식(2)와 같이 정의된다.

$$\theta_r = V_r (\pi/\tau)t + \theta_0 \quad (2)$$

여기서, V_r 는 PMLSM의 속도 [m/sec], θ_0 는 영구자석의 초기위치를 나타낸다.

식 (1)을 2상에 대한 자속 쇄교수를 얻기위해 식 (3)과 같이 풀어 정리하면 식 (4)와 식 (5)와 같이 d축과 q축 각각에 대한 자속 쇄교수를 연산할수 있다.

$$\begin{aligned} \Psi_{ds} + j\Psi_{qs} &= (L_{ds}i_{ds} + jL_{qs}i_{qs}) + \Psi_F(\cos\theta_r + jsin\theta_r) \\ &= L_{ds}i_{ds} + \Psi_F\cos\theta_r + j(L_{qs}i_{qs} + \Psi_F\sin\theta_r) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Psi_{ds} = L_{ds}i_{ds} + \Psi_F\cos\theta_r \quad (4)$$

$$\Psi_{qs} = L_{qs}i_{qs} + \Psi_F\sin\theta_r \quad (5)$$

전압벡터의 선택에 의해서 순시적으로 발생되어지는 d 축과 q축의 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} \quad (6)$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} \quad (7)$$

앞에서 정리되어진 2상에 대한 고정자 자속 쇄교수, 즉 식 (4)와 식 (5)를 식 (6)과 식 (7)에 대입하여 정리하면, 전동기에 공급되어지는 전류값이 다음과 같은 두 개의 미분방정식으로 나타내게 된다.

$$\frac{d i_{ds}}{dt} = \frac{1}{L_{ds}} (V_{ds} - R_s i_{ds} - \Psi_F \frac{d(\cos\theta_r)}{dt}) \quad (8)$$

$$\frac{d i_{qs}}{dt} = \frac{1}{L_{qs}} (V_{qs} - R_s i_{qs} - \Psi_F \frac{d(\sin\theta_r)}{dt}) \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)에 정리되어진 두 개의 미분 방정식을 Runge-Kutta 방법을 이용하면 전동기에 공급되어지는 순시 전류값을 알수 있으므로, 이를 이용하여 순시 추력과 순시 고정자 자속 쇄교수, 위치정보를 알수 있다. 여기서, 자기 인덕턴스는 유한요소법을 사용하여 영구자석을 고려하지 않고 전류만 흘려주어 다음식을 이용하여 구하였다.

$$L_{ds} = \frac{N \Psi_{ds}}{I} \quad (10)$$

여기서, N 은 상당 권선수, Ψ_{ds} 는 상당 자속 쇄교수, I 는 전류이다. 또한, 본 논문에서 Ψ_F , 즉 고정자 자속 쇄교수의 초기값은 입력 전압이 없을 때의 자계 해석을 행하여 구하였다. 표 1은 추력제어 시뮬레이션을 위한 PMLSM의 설계사양 및 파라미터를 나타낸다.

표 1 설계사양 및 파라미터값

극수	4
극간격	42 [mm]
슬롯수	30 [개]
공극 길이	2 [mm]
상당권선수	80 [turns]
자석치수	35.7 × 50 × 3 [mm]
R_s	0.9 [Ω]
L_{ds}	1.32[mH]
Ψ_F	0.033[Wb]

2.4 추력 계산

식 (1)에서 정의된 고정자 자속 쇄교수와 전동기에 입력되어지는 전류의 값으로부터 식 (11)과 같이 추력을 추정한다.

$$F = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad (11)$$

여기서 τ 는 극간격이고, 고정자 쇄교 자속수와 고정자 전류인 Ψ_s 와 i_s 는 유한요소 해석으로부터 구한 값이다.

3. 시뮬레이션의 결과

그림 1에서와 같은 직접 추력 제어를 이용한 속도제어 시에는 속도의 기준값과 실제로 발생되어 피드백 되어지는 속도값의 오차가 PI제어기를 통하여 기준추력을 발생한다. 전동기의 실제 발생추력은 연산되어진 기준추력에 추종하게 되어 속도제어가 이루어진다.

그림 3은 추력지령치를 70[N]으로 주었을때의 추력 응답파형으로 지령치에 추종함을 보여주고 있다.

그림 4는 속도의 지령치를 0.5[m/sec]로 주었을 때 실제의 속도가 지령치에 추종함을 보여주고 있다.

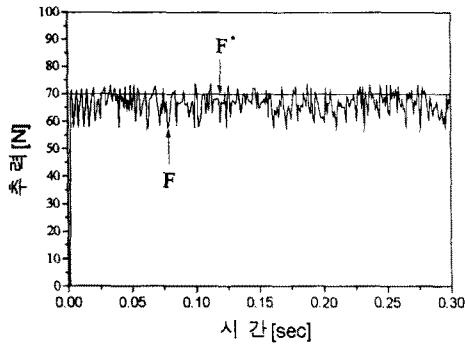


그림 3 추력제어시 추력파형

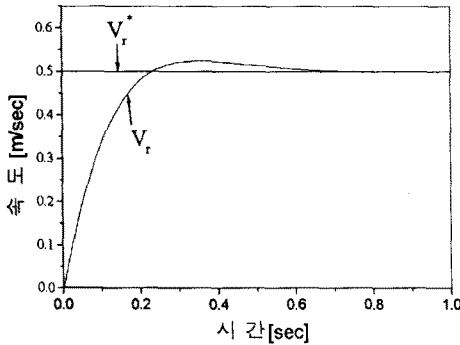


그림 4 속도 응답 특성

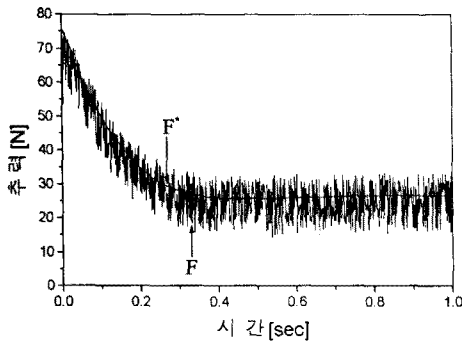


그림 5 속도 제어시 추력파형

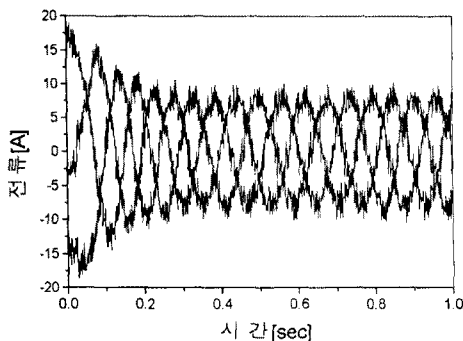


그림 6 속도제어시의 전류 파형

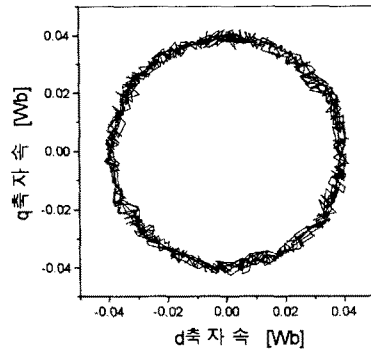


그림 7 속도제어시의 자속파형

그림 5는 속도 제어시의 추력응답으로서 추력의 히스테리시스 밴드폭의 기준값은 0.5[N]으로 설정하였으나 실제로는 약 10[N]의 밴드폭내에서 제어가 되고 있음을 볼 수 있다. 이것은 후술하는 자속제어에서의 오차와 sampling time의 한계에 의한 것이라 사료된다.

그림 6은 속도 제어시의 전류파형인데 기동시의 속도 오차에 의한 기준추력의 값이 크게 설정되므로 기동시의 전류가 정상상태의 전류보다 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 7은 속도 제어시의 고정자 쇄교 자속수에 의한 파형이다. 고정자 쇄교 자속수의 히스테리시스 밴드폭의 기준값은 0.002[Wb]로 설정하였으나, 결과에서는 약 0.004[Wb]로서 기준값보다는 크지만, 거의 일정 밴드폭내에서 제어가 됨을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 등가회로를 이용하여 영구자석형 선형전동기의 직접 추력 제어 특성을 간단히 시뮬레이션 할수 있는 방법을 제시하였다. 등가 회로 해석에 필요한 자기 인덕턴스와 영구자석에 의한 자속쇄교수는 유한요소법을 이용하여 구하였다.

[참 고 문 헌]

- [1]L.Zhong, M. F. Rahman, W. Y. Hu, K. W. Lim, "Analysis of Direct Torque Control in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 12, No. 3, pp. 528-535, May, 1997
- [2]M. R. Zolghadri, D. Diallo, D. Roze, "Direct Torque Control System for Synchronous Machine", EPE'97, Trondheim, pp.3.694-3.699, 1997.
- [3]M. F. Rahman, L. Zhong, W. Y. Hu, K. W. Lim, M. A. Rahman, "An Investigation of Direct and Indirect Torque Controllers for PM Synchronous Motor Drives", IEEE, pp. 519-523, 1997.
- [4]J. Luukko, J. Kaukonen, M. Niemela, O. Pyrhonen, J. Pyrhonen, "Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Based on Direct Flux Linkage Control", EPE'97, Trondheim, 3.683-3.688, 1997.
- [5]우경일, 권병일, 류세현, 박승찬, "영구자석형 선형 동기전동기의 직접 추력제어", 대한전기학회 전기기기연구회 하계학술대회 논문집, pp.316-318, 1998.
- [6]Kwon Byung-II, Woo Kyung-II, Rhyu Se-Hyun, Park Seung-Chan, "Analysis of Direct Thrust Control in Permanent Magnet Type Linear Synchronous Motor by FEM", Proc. of LDIA '98 Tokyo, JAPAN, pp. 130-133, 1998.
- [7]Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control" OXFORD, 1998