

Z축 운전구조를 갖는 선형 영구자석형 동기 전동기 운전제어에 관한 연구

이진하*, 최철**, 박한웅***, 김철우*

*부산대학교 전기공학과, **OTIS-LG, ***해군사관학교

A study of control system on Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with Z-axis operation structure

C.H. Lee, C. Choi, H.W. Park, and C.U. Kim

*Pusan National Univisity, **OTIS-LG, ***Korea Naval Academy

ABSTRACT

In this study a control system with variable gain schedule using real speed and moving direction is proposed to control a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM) with Z-axis operation structure.

The implementation of the controller is designed on the DSP TMS320C32 board. PMLSM is operated by using 4-point absolute positions profile with each velocity, acceleration and deceleration. The direction of the initial angle action for starting is set from the lower limit point to the upper limit point on PMLSM operation stroke. The effectiveness of a control system with variable gain schedule is demonstrated by some experimental results.

1. 서 론

최근 산업체에서는 반도체 장비를 중심으로 선형 영구자석 동기 전동기(PMLSM)의 수요가 점차 증가하는 추세이고 수평축 시스템뿐만 아니라 다축 시스템 등에 다양하게 사용되고 있다. 특히 Z축(수직형) 시스템에 선형 영구자석 동기 전동기(PMLSM)가 사용될 경우 초기 전원 공급에 따른 운전 시작위치는 선형 영구자석형 동기 전동기의 운전 stroke를 기준으로 하한에 위치하고 무버(Mover) 및 취부 된 부하의 이너셔(Inertia)가 클수록 상승 운전과 하강운전의 물리적 특성 차이는 커지게 된다.

본 논문에서는 이와 같은 구조를 고려한 초기 기동시 상승운전 방향의 초기각을 설정할 수 있는 알고리즘을 도입하였고, 상승 운전과 하강 운전의 물리적 특성 차이를 운전 속도에 따라 가변처리 하기위한 실제 속도와 운전 방향을 입력 변수로한 가변 Gain 구조를 적용하였으며 상승과 하강의 반전 점에서의 연속성 운전 특성을 갖춘 알고리즘을 도입하였다.

2. 본 론

2.1 PMLSM의 수학적 모델링^[1]

Sinewave형 선형 영구자석 동기 전동기의 경우 회전형 동기 전동기(PMSM)와 기본적인 제어 이론 및 모델링은 동일하며 그림 1과 같이 d-q 동기 좌표계에서 등가화 할 수 있다. 또한 전압 방식은 동기 각속도에 관한 식 (1)~(2)로 나타낼 수 있다. 식(3)~(4)는 각각 동기 좌표계 d-q축에 유기되는 자속을 나타내고 있다.

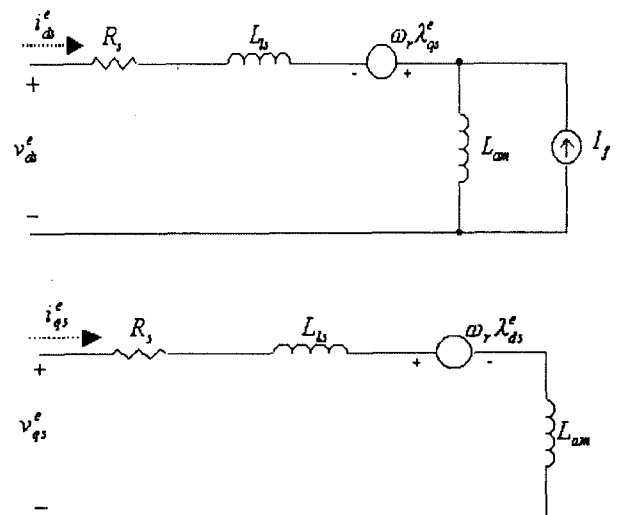


그림 1. 동기 각속도로 표현된 동기좌표계상에서의 PMLSM 등가회로

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + p \lambda_{ds}^e - \omega_r \lambda_{qs}^e \quad (1)$$

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + p \lambda_{qs}^e + \omega_r \lambda_{ds}^e \quad (2)$$

$$\lambda_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + \lambda_{PM} \quad (3)$$

$$\lambda_{qs}^e = L_s i_{qs}^e \quad (4)$$

여기서 ω_r : 동기 각속도, R_s : 1차측 저항, $L_s (= L_{ls} + L_{am})$: 1차측 인덕턴스, $\lambda_{PM} (= L_{am} I_f)$: 영구자석분 쇄교 자속, I_f : 영구자석의 등가 전류원이다.

일반적으로 선형 영구자석 동기 전동기의 전압 방정식은 실제 무버의 속도에 관한 식으로 표현되며, 또한 약계자제어 수행을 제외하면 자속분 전류가 필요 없으므로 d축 전류를 0으로 제어한다($i_{ds}^e = 0$). 따라서 식 (1)~(3)은 식 (5)~(7)으로 표현되며 추력은 전기적인 입출력 관계를 나타내는 식 (8)과 식 (7)에 의해서 식 (9)로 표현되고 무버의 Dynamic 방정식은 식 (10)으로 표현할 수 있다.

$$v_{ds}^e = -\frac{\pi}{\tau} u \lambda_{qs}^e \quad (5)$$

$$v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + L_s p i_{qs}^e + \frac{\pi}{\tau} u \lambda_{PM} \quad (6)$$

$$\lambda_{ds}^e = \lambda_{PM} \quad (7)$$

$$P = Fu = \omega_{rm} T = \frac{3}{2} \omega_r \lambda_{ds}^e i_{qs}^e \quad (8)$$

$$F = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_{PM} \times i_{qs}^e \quad (9)$$

$$F = M \frac{d}{dt} u + Bu + D \quad (10)$$

여기서 $u[\text{mm/s}] (= \tau \omega_r / \pi)$: 무버의 속도, τ [mm]: pole pitch, $\omega_r = \omega_{rm}$ [rad/s], M: 무버부의 총질량, B: viscos friction, D: 외란이다.

2.2 제안된 Z축 구조를 갖는 PMLSM 제어시스템^[2]

그림 2에는 가변 Gain Schedule을 갖는 PI control system의 Block도를 나타내었다.

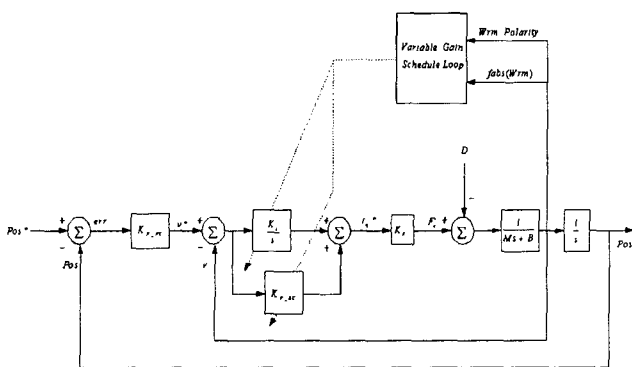


그림 2. 가변 Gain Schedule을 갖는 PI control system

그림 2에서 PMLSM 제어를 위한 초기각 설정에 대한 Block도는 생략을 하였으며, Kp_pc는 위치 제어기의 P Gain, Ki는 속도 제어기의 I Gain, Kp_sc는 속도 제어기의 P Gain, Kr는 추력상수를 나타낸다. Variable Gain Schedule Loop Block에 Wrm_Polarity와 Wrm의 절대

치인 fabs(Wrm)이 입력되어 가변 Gain이 설정되고 있음을 알 수 있다.

2.2.1 Z축 구조를 갖는 초기각 설정 제어

무빙 코일형 선형 영구자석 동기 전동기의 초기각 설정을 위해 코일에 동기 좌표계상의 d축으로 일정량의 전류를 인가하면 pole pair pitch 영역 내에서 인가한 전류와 반대되는 극성을 갖는 위치로 무버가 이동하게 되고 이동된 위치로부터 토오크 제어 전류의 손실이 없는 운전 제어가 가능하게 된다.

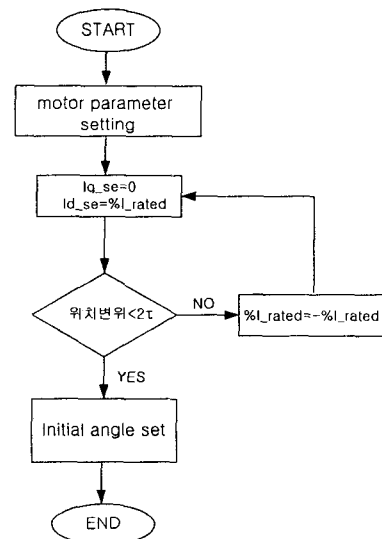


그림 3. 초기각 설정 Flow Chart

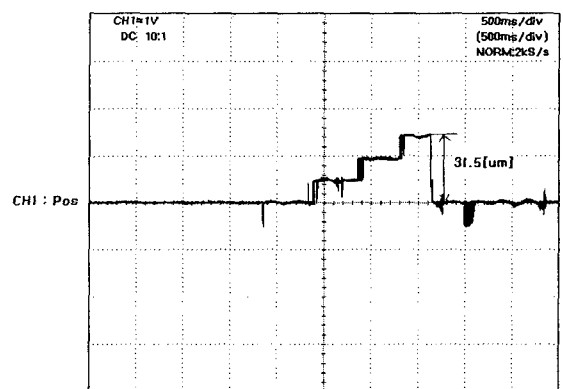


그림 4 초기각 설정 시 무버의 변위량

Z축 구동형인 경우 초기각 제어 전원이 공급되기 전의 무버 초기 위치는 운전 스트로크(Stroke)를 기준으로 보면 이동 구간의 하한 위치에 놓인다. 따라서 초기각 설정은 운전 스트로크 기준으로 하한위치에서 상한위치의 방향으로 구동되어야 한다. 그림4는 초기각 설정 시 무버의 변위량에서 초기각 설정을 위한 임의의 d축 전류

를 인가하는 상태에서 무버의 변위량을 나타내고 있다. 실험에서는 그림 3의 초기각 설정 Flow Chart에 나와있는 것과 같이 일정전류 인가 후에 위치 변위량을 측정하여 2τ (pole pair pitch)보다 작으면 이동 된 위치를 초기각으로 인식하고 측정된 변위량이 2τ 보다 크면 처음 인가한 전류와 극성이 반대인 전류를 인가하여 앞서 수행한 작업을 반복하게 된다. 이러한 과정을 통해서 하한 위치에서 상한 위치로 초기각을 설정하기 위한 인가 전류의 극성이 결정되게 된다. 그림4에 나타나 있는 것과 같이 무버의 변위량은 $1.5[V] * 42[mm] / 2000 = 31.5[\mu m]$ 으로 매우 작은 변위량이었고 변위량이 양의 값이므로 하한 위치에서 상한 위치로 초기각을 설정하고 있음을 알 수 있다. 파형의 끝지점은 초기각이 설정된 위치이며 위치 data를 "0"으로 리셋을 하여, 초기 기동이 가능하게 된다.

2.2.2 가변 Gain 제어 시스템

실험에 적용한 전체적인 가변 Gain 제어 시스템은 그림 5 Gain Schedule Flow Chart와 같다. 그림 5에서 입력 변수는 속도의 절대치 값($fabs(Wrm)$)과 운전방향 (run direction)이고 각 입력에 대한 좌,우측 Flow Chart 수행 후의 두 개의 출력 값이 결합하여 최종적인 Gain 값이 설정된다. 첫 번째 입력변수 인 속도의 절대치 값은 Gain값을 선형적으로 가변 시키기 위한 비율 값으로 사용된다. 가변이 되어지는 구간은 파라미터 상에서 Low/High speed로 각각 설정하도록 하였고 Low speed 측의 Gain값 및 High speed의 Gain 값 또한 파라미터 상에서 설정 된다. 파라미터 상에서 설정된 속도 범위 내에서는 선형적으로 Gain 값이 Profile 되어지고 Low speed 이하에서는 Low speed측의 Gain값으로 High speed 이상 구간에서는 High speed측의 Gain값이 설정 된다.

Z축 구조를 갖는 PMLSM의 경우 상승 운전과 하강 운전의 방향에 따라 상이한 Gain 설정 구조를 적용하였다. 여기서 두 번째 입력 변수인 운전 방향은 상승 운전과 하강 운전의 물리적 특성 차이를 완화시키기 위한 판별 변수로 사용하였다. 상승과 하강 운전을 비교해 볼 때, 상승 운전의 경우 높은 P Gain이 필요하고 하강 운전의 경우 높은 I Gain이 필요하게 된다. 그림5의 Flow Chart에서 $Wrm > 0$ 인 경우는 상승 운전일 경우를 나타낸다. 그리고 calculate % loop1은 상승 시 Gain에 대한 percentage를 설정하는 loop이고 반대로 calculate % loop2는 하강 시 Gain에 대한 percentage를 설정하는 loop이다. 가변 Gain 설정 방법은 모든 속도 영역에서 Gain 값이 설정된 변수에 의한 선형적인 변화를 갖도록 하며 시스템의 안정성을 확보하였다. 속도에 따른 Gain 값 변화 관계를 그림 6 속도에 따른 PI Gain 값에 보였다.

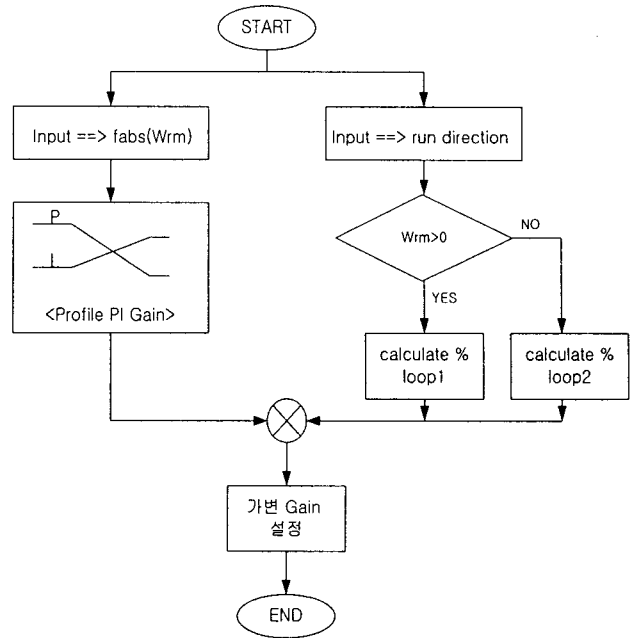
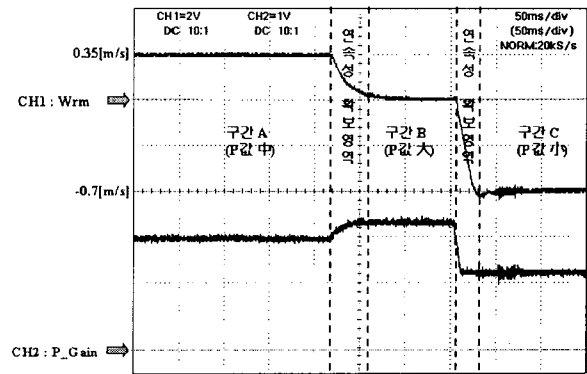
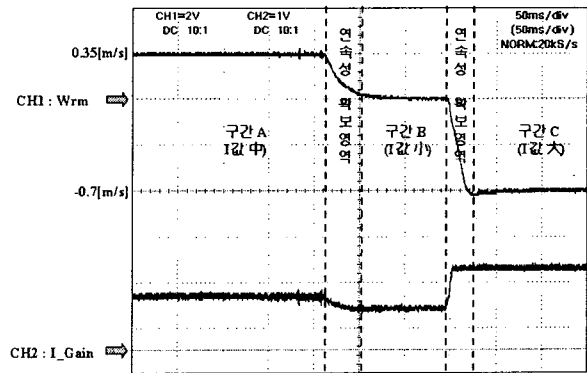


그림 5. Gain Schedule Flow Chart



(a) 속도에 따른 P Gain 값



(b) 속도에 따른 I Gain 값

그림 6. 속도에 따른 PI Gain 값

3. Simulation 및 실험결과

3.1 Simulation

Simulation은 0.7[m/s](상승시), -0.7[m/s](하강시)의 지

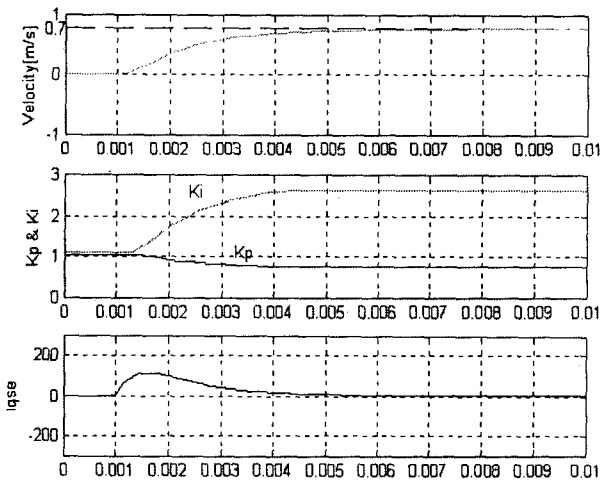
령 속도에 대해서 가변시와 비 가변시로 나누어 수행하였다.

표 1. Simulation에 사용된 PI Gain값 (상승시)

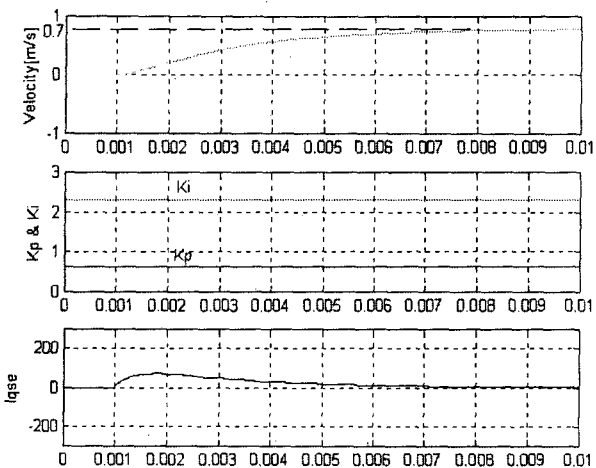
속 도	가 변 시		비 가 변 시	
	P	I	P	I
0.07[m/s]	1.0495	1.1106	0.6247	2.3138
0.35[m/s]	0.8996	1.6666		
0.7 [m/s]	0.7496	2.5915		

표 2. Simulation에 사용된 PI Gain값 (하강시)

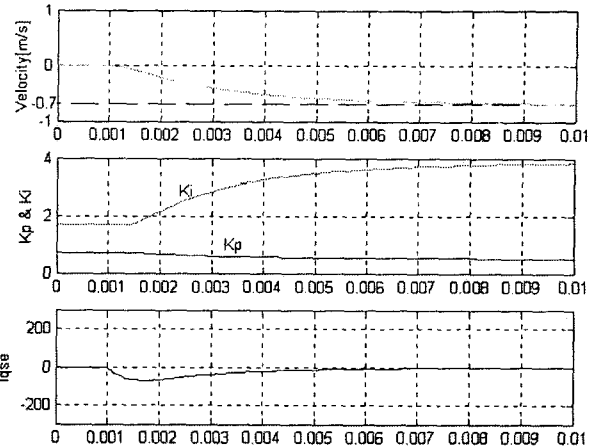
속 도	가 변 시		비 가 변 시	
	P	I	P	I
0.07[m/s]	0.6997	1.6666	0.6247	2.3138
0.35[m/s]	0.5998	2.499		
0.7 [m/s]	0.4998	3.8873		



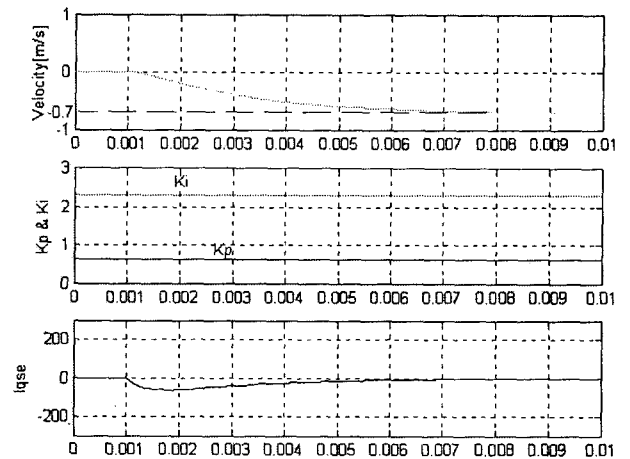
(a) 0.7[m/s]의 step 지령에 따른 가변 Gain시 파형(상승시)



(b) 0.7[m/s]의 step 지령에 따른 비 가변 Gain시 파형(상승시)



(c) -0.7[m/s]의 step 지령에 따른 가변 Gain시 파형(하강 시)



(d) -0.7[m/s]의 step 지령에 따른 비 가변 Gain시 파형(하강 시)

그림 7. Step 지령에 대한 속도응답(Simulation)

3.2 실험 장치^[3]

그림 8은 Z축 구조를 갖는 PMLSM을 구동하기 위한 실제 실험 장치의 사진을 보여주고 있다. 실험에서는 Hall Sensorless 구조로 Linear Scaler만을 사용하였다.

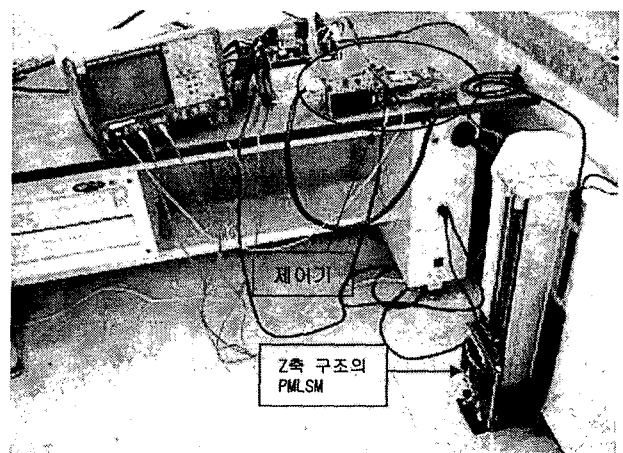
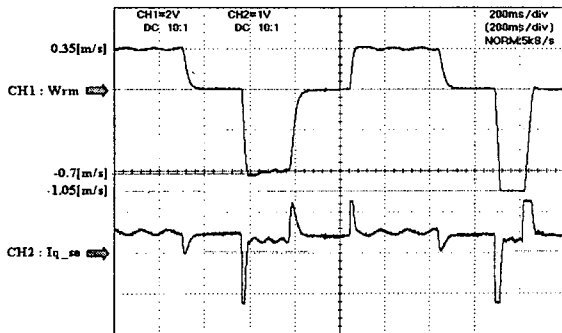


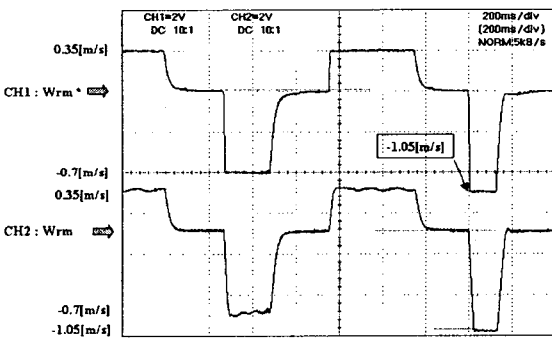
그림 8. Z축 구조를 갖는 PMLSM 실험 장치

3.3 실험 결과

실험은 무버와 같은 질량의 부하를 부착 한 상태에서 수행하였으며, 그림 9는 비 가변시 속도 및 I_{qse} 지령 값 파형이고 그림 10은 가변 적용시 속도 및 I_{qse} 지령 값 파형을 나타내고 있다. 가변 Gain은 $0.07[m/s] \sim 0.7[m/s]$ 영역에서 선형적으로 변화하도록 하였고, 상승, 하강 시 15%의 factor가 적용되었다. 그림 9에서 속도가 $-1.05[m/s]$ 일 경우를 제외하고는 속도 리플 및 토크 리플이 발생되었으나, 가변 적용시의 그림10.에서는 실험상의 전 속도영역($-1.05[m/s], -1.0[m/s], 0.35[m/s]$)에서 속도 리플 및 토크 리플이 비 가변시와 비교하여 감소하였고 Simulation에서 보였듯이 속도에 대한 응답 특성이 개선되었다.

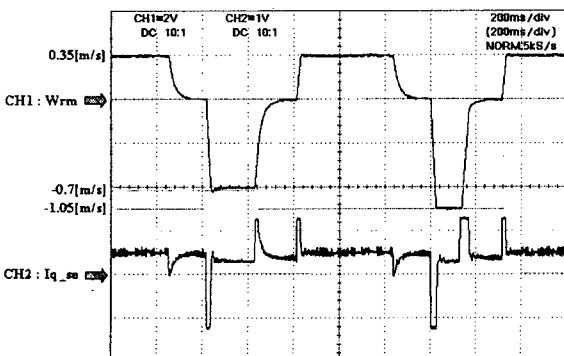


(a) 실제 속도와 I_{qse} 지령값,

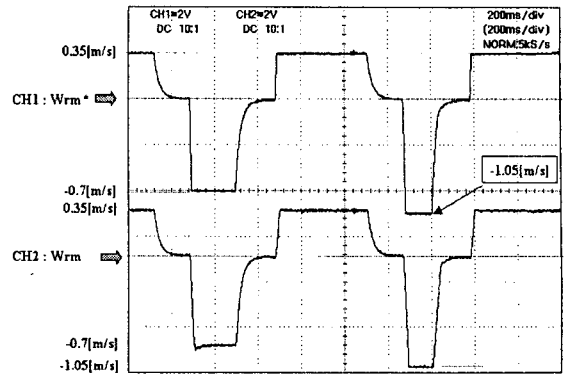


(b) 속도 지령값, 실제값

그림 9. 비 가변시 운전시험



(a) 실제 속도와 I_{qse} 지령값



(b) 속도 지령값, 실제값

그림 10. 가변 적용시 운전시험

4. 결론

앞에서 보였듯이 Z축 구조를 갖는 영구자석형 선형 전동기의 경우 전원을 인가하기 전 무버의 위치는 항상 운전 스트로크 기준으로 하한 위치이고 운전 시 상승, 하강의 물리적 특성 차이를 가지고 있다.

본 논문에서는 하한 위치에서 상승 위치로 초기각을 설정하기 위한 알고리즘을 적용하였고 상승 및 하강 운전시의 물리적인 특성 차이를 완화하기 위해서 속도변수를 이용한 가변 Gain을 적용하였다.

본 논문은 산업 자원부 중기거점 과제 지원에 의해서 수행되었음.

[부록] 모터 사양

	단위	값
정격 추력(Frate)	N	73.2
정격 전류(Irate)	Arms	1.4
추력상수(Kf)	N/Arms	52.3
역기전력 상수	V/(m/sec)	34.9
Pole Pitch	mm	21
삼 저항	Ω	7.6
상 인덕턴스	mH	2.9
Mover 질량	kg	3

참고 문헌

- [1] I. Bolder And Syed A. Nasar "Linear Electric Actuators And Generators. pp. 91-134.
- [2] 日本工業技術 센터, "리ニア모터設計應用の要占". pp. 135-189.
- [3] 전력전자학회대회 2002, "Hall Sensorless 선형 영구자석 동기 전동기의 초기각 보정에 관한 연구".
- [4] 서울대 박사학위 논문, "급가속용 선형 동기 전동기의 특성 해석 및 최적설계", 1999. 8.