

# 새로운 Auto-Tuning PI 제어 방법을 이용한 선형 추진 브러시리스 직류 전동기에 대한 위치 제어기 설계

최중경\*, 박승엽\*, 전인호

\*창원대학교 공과대학 전자공학과, 마산대학 전자제어과  
\*cjk@sarim.changwon.ac.kr,\*psy@sarim.changwon.ac.kr

## The Design of a Position Controller for the Linear Brushless D.C. Motor Using New Auto-tuning PI control Method

Jung Keyng Choi\*, Seung Yub Park\*, In Hyo Jun

\*Dept. of Electronic Eng. Changwon National University, Dept. of Electronic control Masan College

\*cjk@sarim.changwon.ac.kr,\*psy@sarim.changwon.ac.kr

### Abstract

Linear motor is able to produce line movement without rotary-to-line converter at the system required line moving. Thus Linear motor has no gear, screw, belt for line movement. Therefore it has some advantage which decrease friction loss, noise, vibration, maintenance effort and prevent decay of control performance due to backlash.

This paper proposes the estimation method of unknown parameters from the BLDC Linear motor and determine the PI controller gain through this estimation. Each control movement that is current, speed, position control, and PWM wave generation is performed on processor, which is DSP(Digital Signal Processor), having high speed performance.

PI theory is adopted to each controller for control behavior. More fast convergence to command position is accomplished by applying the new velocity locus which derived from position error.

### I. 서론

산업의 여러 분야에서 활용되고 있는 회전형 모터를 응용하는 직선 추진계에서는 변환 장치로 인한 추가적인 기구부의 요구와 이들의 마찰, 소음, 유지 보수 등이 문제점으로 고려되고 있다. 선형 모터는 이러한 장치의 대폭적인 감소로 보다 더 정밀한 위치제어와 빠른 속동

성을 얻을 수 있다. 그리고 동력의 변환 장치를 줄일 수 있어서 에너지 전달 효율이 높고, 빠른 속도와 높은 위치 제어 특성, 저소음 구동 특성으로 인해 교통 운송 수단에도 사용되고 있으며, 서보용 정밀 기기에 있어서 회전형을 대체해 가고 있다.

본 논문에서 사용된 선형 브러시리스 직류 모터는 정현 파형의 역기전력 파형을 갖는 모터이다. 기본적으로 선형 모터도 역시 회전형의 모터와 같은 원리 및 구조를 갖는다.

본 논문에서는 선형브러시리스 직류 모터에 대한 PI 위치 제어기를 설계하기 위해 미지의 계통 파라미터를 갖고 있는 이 시스템에 계통 파라미터 추정 알고리즘의 한 종류인 자동 동조(Auto-tuning) 알고리즘을 적용하며, 이 방법을 통해 얻어진 계통의 동특성 방정식을 통해 얻어진 PI 위치 제어 입력을 계통에 인가하여 그 위치 제어 특성을 보인다. 그리고 DSP를 이용하여 초기 위치 정보로부터 sine table을 형성해서 제어 입력을 가한다.

### II. 선형 브러시리스 직류 모터의 구동 원리

본 논문에서 사용된 선형모터는 3상 델타 결선 브러시리스 직류 모터와 구동 원리가 같으며, 코일의 결선은 120°의 위상차가 있고, 동작을 지속시키기 위해 계속적인 상전류 스위칭과 정류(commutation)를 해야한다.

각 3상의 입력 단자(U, V, W)에 서로 120° 위상차가 있는 전류를 회전형 모터의 회전자에 해당하는 가동자의 위치에 맞게 인가하면 가동자에 힘이 가해져서 추력이 발생한다.

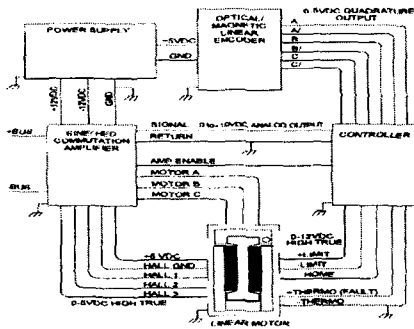


그림 1 Sinusoidal 구동형식과 Trapezoidal 구동형식의 조합 블럭도

가동자의 코일부에 HED가 있고, 가동자의 구동선에 걸쳐 광학식의 선형 스케일러가 측면에 부착되어있다. 이동 슬릿과 고정 슬릿을 평행으로 배치해서, 슬릿이 이동함에 따라 투과되는 광량의 변화를 감지하여 검출한다.<sup>[3]</sup> 선형 스케일러로 위치의 변화량을 알게되고, 이것으로 계속적인 90° 위상차가 있는 전기각을 가동자에 인가 할 수 있다. 이 두 가지 장치로 Trapezoidal 형과 Sinusoidal 형의 구동을 조합한 정류동작을 구성하여, 초기에는 HED에 의한 구동을 하고, 스위칭은 Sinusoidal 형으로 하여서, 시스템 초기 구동시의 상 추적이 Sinusoidal 형에 비해 개선되고, Trapezoidal 형 보다 더 부드럽고 코깅 현상이 없는 구동이 가능하며, 초기 구동 시부터 제어 상태에 있게된다.

### III. 선형 모터의 위치 제어시스템동특성 방정식의 유도

선형 모터의 동특성 방정식은 다음과 같이 직류기와 같은 형태로 표현 될 수 있다.

$$\frac{dx}{dt} = v$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(F_e - F_L - Bv)}{M}$$

$$F_e = \frac{3}{2} K_f i = K_f i \quad (1)$$

$x$ : 위치상태,  $v$ : 속도상태,  $M$ : 캐리어의 중량,  
 $B$ : 마찰계수,  $F_e$ : 추력,  $F_L$ : 부하추력,

$\frac{3}{2} K_f = K_f$ : 추력상수,  $i$ : 3상 인가 전류진폭값  
 위 식을 상태 변수 표현법으로 나타내면 식2와 같다.

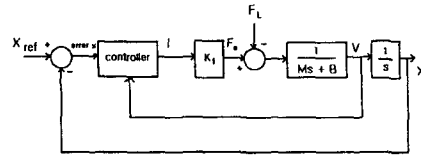


그림 2 모터 시스템과 제어기의 블록선도

$$x = v$$

$$\dot{v} = -\frac{B}{M}v + \frac{K_f}{M}i - \frac{F_L}{M} \quad (2)$$

#### 1. 동특성 방정식의 파라미터 추정 알고리즘

식2에 있는 파라미터들의 추정을 위해 다음과 같은 간단한 알고리즘을 적용한다. 먼저 무부하시를 가정하고 식2를 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$\frac{v}{t} = -\frac{B}{M} \int v dt + \frac{K_f}{M} P \quad (3)$$

여기서 파라미터  $-\frac{B}{M}$ 가  $\frac{v}{t}$  와  $\int v dt/t$ 의 좌표계에서 기울기로서 나타내어짐을 알 수 있다.

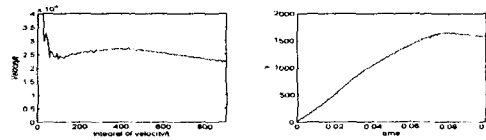


그림 3(A) 파라미터  $\frac{B}{M}$ 의 추정을 위한 그래프,  
 (B) 속도 그래프

식2를 적분해서 속도의 적분치  $\int v dt$ 로 나누면, 이번에는 파라미터  $\frac{K_f}{M}$ 가  $v/\int v dt$ 와  $\int i dt/\int v dt$ 의 좌표축에서 기울기로서 나타나는 것을 알 수 있다.

$$\frac{v}{\int v dt} = -\frac{B}{M} + \frac{K_f}{M} \frac{\int i dt}{\int v dt} \quad (4)$$

역시 선형적인 속도응답의 구간에서 한 직선의 방정식으로 표현된다.

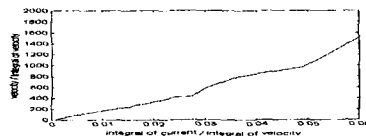


그림 4  $\frac{K_f}{M}$  추정을 위한 그래프

위의 실험 데이터를 분석하여  $\frac{K_f}{M}$ 를 구한다.

- 속도 궤적 추종을 동반한 위치 제어 알고리즘
- 속도 궤적의 추종을 위해 본 논문에서는 PI 제어를 적

용하였다. 그리고, 위치 제어를 위한 PI제어기를 시스템 응답의 관찰을 통해 적용 시간을 조절하여 적용한다.

궤적  $V_0$ 와  $V_r$ 의 시간에 대한 적분치인 이동 거리의 차이가 나게된다. 이런 위치 오차를 상쇄시키기 위해 위치 오차에 대한 제어를 실행한다면 위치의 오차는 줄일 수는 있지만 그 속도 궤적은 지령 속도 궤적과 같은 대칭적인 사다리꼴의 형태를 유지하기가 어렵고 지령 위치 도달 시간도  $t_C$ 보다 늘어나게 된다.

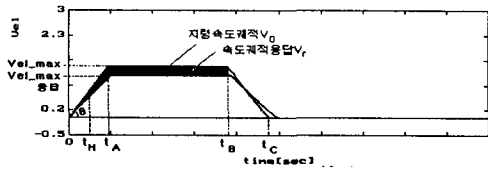


그림 5 지령 속도 궤적과 모터의 속도 궤적 응답

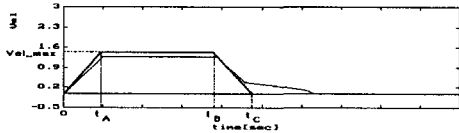


그림 6  $t_B$  시간 후에 일정속도 이하에서 위치 제어기를 동작시킨 형태

본 논문에서는 위치제어기의 동작을  $t_B$  시간 후 감속 구간에서 일정한 속도 이하 일 때 동작하도록 하였다. 정밀한 위치의 제어를 위해 속도 궤적 추종에서의 오차로 인해 도달 위치에서 차이 나게 되는 것을 보상한다. 속도 제어에서 발생한 오차에 의한 위치 오차를 보상하는 형태의 속도 궤적은 속도 제어에서의 오차가 크면 클수록 지령 속도 궤적과 차이가 나는, 대칭적이지 않는 모습을 보인다. (그림 6 참고)

본 논문에서는 지정한 지령 속도 궤적에서의 최대 속도와 가속도에 대한 시스템의 응답을 실시간 관찰하여, 그 응답을 이용해서 위치 오차가 감소된 새로운 속도 궤적을 적용한다. 사용한 속도 제어기에 대한 시스템의 응답은  $t_B$  시간까지의 정보로 알 수 있다. 실제 적용할 궤적의 형태도  $t_B$  시간까지의 응답, 즉  $t_A$  시간까지의 기울기와  $t_B$  시간에서의 속도를 기준으로, 위치 제어기가 포함되는  $t_B$  시간 이후의 궤적에 적용한다

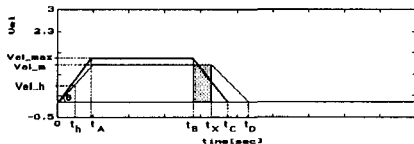


그림 7 시스템의 속도 추종 응답을 이용한 모터 속도 응답 궤적

그림 5에서  $t_B$  시간까지의 지령 속도에 대한 응답의 오차는 음영으로 표현된 영역이다. 그 부분의 속도 적분치가  $t_B$  시간까지의 지령 궤적에 대한 위치 오차이다. 이 영역의 크기를  $t_B$  시간에서 계산하여 가속 구간에서 검출된 기울기로 감속 구간에 적용했을 때, 감속 구간의 이동 거리와  $t_B$  시간에서 계산된 위치 오차의 차이를 계산하여, 그 차이만큼을 시스템이 낼 수 있는 최대 속도의 구간인 정속 구간에서 보상하여 지령 위치에 대한 더욱 빠른 수렴을 이룬다. 그림 7의 응답 궤적은 정속 구간이 늘어나 있어 위치 수렴 시간이 그림 6의 경우에 비해 짧아진다. 그림 7에서 그려진 속도 응답 궤적은  $t_B$  시간에 그 시간까지의 속도 적분치와 위치 지령치와의 오차와, 가속 구간에서 산출한 값인,  $t_X$ 에서  $t_D$  시간 사이의 예상 속도 적분치를 뺀 값을 정속 구간 속도에 대한  $Vel_{max}$ 의 응답 속도에 고려되는 면적으로 환산하여  $t_X$ 를 결정할 수 있다. 이렇게 구한  $t_X$  시간까지,  $t_B$  시간에서 정속 구간을 추가한다. 위치 오차를 최대의 지령 속도 구간인 정속 구간의 추가를 통해 보상함으로써, 빠르게 지령 위치에 도달하게 한다.

#### IV. 전체 서보 시스템의 구성

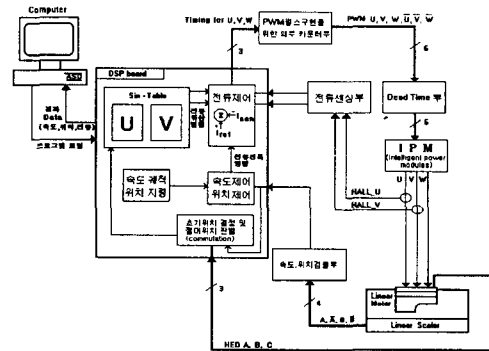


그림 8 전체 서보계의 구성

제어기 구성은 고속 부동소수점 연산 기능이 있는 TMS320C31 칩이 장착된 DSP 보드를 제어기로 이용하였고 나머지 하드웨어 부분에서는 모터의 전원부 외에 속도, 위치의 검출과 모터의 각종 출력 신호들의 인터페이스 회로, PWM 신호인가를 위한 외부 카운터 회로만을 사용하였고, 제어 알고리즘 및 PWM발생은 소프트웨어적으로 수행되도록 구성하였다.

구동 소프트웨어는 C 언어로 구성되었다. PC로 작성된 프로그램은 컴파일을 한 후 부트로드 기능을 통해

DSP로 전송된다. 전체 프로그램 구성은, DSP와 외부 칩의 설정, 초기위치 판별, sine table 생성, 타이머 인터럽터, main으로 나눌 수 있다.

### V. 실험 결과

위치 제어를 위해, 안정한 동작을 보장하는 속도 제어를 추종하는 실험을 보이고, 위치 오차에 대한 위치 제어기 동작시의 결과와 제안된 알고리즘을 적용한 결과의 비교를 통해 빠른 위치 수렴을 보인다.

속도 지령 궤적은 그림 5에서 보인, 대칭적인 사다리꼴 형태로 정해진다. 이것은 시스템에 바라는 최대 이동 속도와 응답의 가속도정도에 따라 정해진다. 이런 궤적을 따라 모터를 구동하여 안정적인 동작을 얻는다.

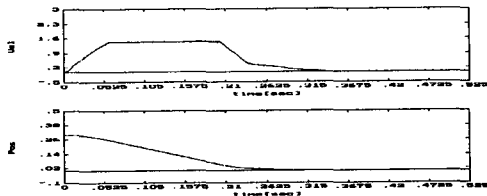


그림 9 가감속 구간을 0.05s 로 하고 감속 구간에서 속도가 0.5m/sec 이하 일 때부터 위치 제어기 동작

그림 9에서는 가감속 구간을 0.05s로 하고  $t_B$  시간 이후에 위치 제어기를 속도가 0.5m/s 이하로 떨어지는 순간에 적용하였고,  $t_B$  시간까지 발생한 속도 궤적의 오차로 인한 위치의 오차를 보상하기 위해 위치 제어기를 적용한 감속 구간에서 지령 속도 궤적이 크게 벗어나는 형태와 위치 수렴시간이 길어진 것을 보이고 있다. 여러 가지 요인으로 속도 제어에서 오차가 발생할수록 지령 궤적의 대칭적인 형태와 멀어지게 된다.

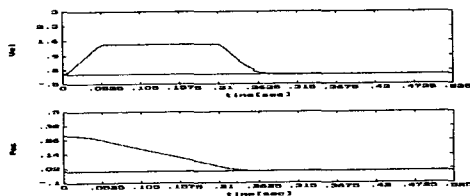


그림 10 감속 구간에서 0.5m/s이하에서 위치 제어기 적용

그림 10의 응답은 제안된 알고리즘을 적용한 것으로 지령 위치로의 보다 빠른 수렴과 지령 속도 궤적의 형태에 가까운 응답을 보인다. 그림 11은 위치 제어기의 적용한 시점 이후에 속도 궤적에서 불연속적인 형태를 위치 제어 PI 이득을 조절하여 하나의 직선 응답으로 나타내

게 하였다.

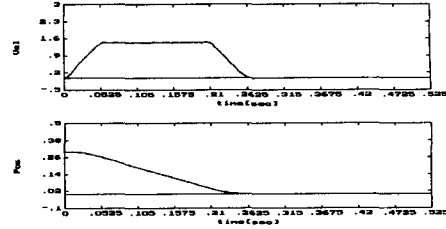


그림 11 위치 이득이 조절된 파형

### VI. 결론

본 논문은 선형 브러시리스 직류 모터의 위치 제어를 파라미터의 추정에 의한 Auto-Tuning PI를 적용하여 설계하였다. 파라미터 추정 방법으로 제어기의 이득을 구하여 제어기들의 설계에 적용하고, 각 제어기의 동작은 시스템 응답으로 얻은 데이터를 통해 적용 시간을 조절하여, 속도 궤적의 형태를 유지하면서 빠른 위치 수렴을 얻었다.

실험 장치로는 검출을 위한 부분과 모터의 전원 부분을 제외한, 속도와 전류, 위치의 제어 동작은 모두 마이크로프로세서를 통한 소프트웨어적 동작으로 수행되게 하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] I. BOLDEA, S. A. NASAR, "Linear Motion Electromagnetic Systems", A Wiley-interscience Publication, 1985.
- [2] Syed A. Nasar, "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications", Prentice-Hall, 1987.
- [3] 편집부, 리니어 모터 응용 핸드북, 세화 출판사, 1988.
- [4] M. F. Raham and Khiang-Wee Lim, "PM Synchronous Motor Control", The industrial electronics, Part 1, pp 319-330, 1997.
- [5] 최중경, 박승엽, 전인효, 전장현, "브러시리스 직류전동기 속도 제어를 위한 한계스텝 응답 특성을 이용하는 Autotuning PI제어", 1998.
- [6] J.G.Ziegler, N.B.Nichols, "Process Lags in Automatic Control Circuits", Trans. ASME.vol.64.pp 433-444,JUL,1943.