선형 추진 BLDC 모터에 대한 파라미터 추정기법을 이용하는 오토 튜닝(Auto Tuning) PI 제어기 설계

차영범* · 송도호** · 구본민*** · 박무열*** · 김진애*** · 최중경***

The Design of an Auto Tuning PI Controller using a Parameter Estimation Method for the Linear BLDC Motor

Young-bum Cha* · Do-ho Song** · Bon-min Koo*** · Moo-yurl Park*** · Jin-ae Kim*** · Jung-keyng Choi***

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

요 약

서보 모터는 컴퓨터와 센서로부터 오는 지령에 대해 정밀한 모션제어 즉, 정확한 속도조절과 위치 잡기를 수행함으로써 자동화 시스템에서 중요한 부분으로 사용된다. 특히, 선형추진 BLDC모터는 볼스크류, 타이밍 벨트, 랙/피니온과 같은 마찰 유도 전달 메카니즘들과 연결을 갖는 회전식 서보모터들에 비해 다양한 장점들을 갖는다. 본 논문은 정현파 구동형 선형추진 BLDC모터의 동특성과 출력들로부터 얻어지는 정보를 이용하여 미지의 전동기 계통 파라미터들을 추정하는 방식을 제안한다. 추정된 파라미터들은 제어기와 외란 관측기의 이득을 조절하는데 사용될 수 있다. 이러한 목적을 이루기 위해 고성능의 디지털신호처리프로세서로 계자기준제어(FOC) 기법을 구현하기 위해 설계된 TMS320F240을 선형 BLDC 서보 전동기의 제어기로서 사용한다. 이 서보전동기 응용 전용의 DSP는 A/D Converter 와 PWM 발생부, 다수의 IO Port를 내장하고 있어 서보모터 제어기에 중요한 역할을 담당하게 된다.

이 선형 BLDC 서보 전동기 시스템은 또한 IPM 구동기와 홀센서 타입의 전류센서모듈 그리고 게이트 구동 신호와 고장 신호들의 전기적 절연을 위한 광결합 모듈을 포함한다.

ABSTRACT

Servo-motors are used as key components of automated system by performing precise motion control as accurate positioning and accurate speed regulation in response to the commands from computers and sensors. Especially, the linear brushless servo-motors have numerous advantages over the rotary servo motors which have connection with the friction induced transfer mechanism such as ball screws, timing belts, rack/pinion. This paper proposes an estimation method of unknown motor system parameters using the informations from the sinusoidal driving type linear brushless DC motor dynamics and outputs. The estimated parameters can be used to tune the controller gain and a disturbance observer. In order to meet this purpose high performance Digital Signal Processor, TMS320F240, designed originally for implementation of a Field Oriented Control(FOC) technology is adopted as a controller of the liner BLDC servo motor. Having A/D converters, PWM generators, rich I/O port internally, this servo motor application specific DSP play an important role in servo motor controller .

This linear BLDC servo motor system also contains IPM(Intelligent Power Module) driver and hall sensor type current sensor module, photocoupler module for isolation of gate signals and fault signals.

키워드

linear brushless servomotor, estimation, FOC, DSP

* 삼성테크윈 ** KIMM ***국립창원대학교

접수일자 : 2005. 7. 27

Ⅰ. 서 론

현대의 산업사회에서 기계와 전자가 밀접한 상호 연관성을 지님에 따라 전자공학에서 기계를 제어하는 전자기계기술(electro-mechanics) 분야가 연구 및 산업의 중심적 테마가 되어 가고 있으며, 공작기계, 반도체 제조장비, 자동문, 컴퓨터의 주변기기에 이르기까지 다양한 전자적 제어의 액츄에이터로서 선형전동기가 사용되고 있다[1]. 선형전동기는 일반 회전형 전동기에 비해 직선구동력을 발생시키는 특유의 추력이 있어 기계적인 변환장치가 필요하지 않아 복잡하지 않으면서 에너지 손실이나 소음이 없는 고속 구동 등 이점이 많다. 선형전동기는 회전형 전동기와 유사한 원리 및 구조를 갖고 있으며 선형 유도전동기, 선형 직류전동기, 선형 동기전동기, 선형 하이브리드 전동기 등으로 크게 나눌 수 있는데, 본 논문에서 사용된 전동기는 정현파의 역기전력 파형을 갖는 영구자석형 브러시리스 직류전동기이다[2].

본 논문에서는 이러한 브러시리스 직류전동기가 최대의 효율을 발생할 수 있도록 영구자석 자계와 고정자인 전기자의 자계가 90도 위상 관계를 유지하도록 하는 정류(commutation) 동작을 위해 HED(Hall Effect Device)와 선형 스케일러를 이용하는 정류회로를 설계 한다. 더불어 IPM (Intelligent Power Module)과 홀 전류센서를 사용하는 소형의 구동기를 설계하며, 이상의 센서 신호를 직접 받아들이고 디지털로 처리하여 정현파 상전류를 발생시킬 수 있는 PWM 모듈을 내장하는 고속의 DSP인 TMS320F240을 포함하는 제어기를 직접 설계한다. 전류 와 속도 그리고 위치 제어기로 증분형 이산치 PI 제어기를 도입하고 미지의 계통파라미터를 추정하기위해 Linear regression 알고리즘을 적용한다. 이 방법을 통하여 얻어진 초기 단계의 추정 값을 동특성 방정식에 적용하여 시스템 제어기의 이득을 온라인으로 조절한다.

Ⅱ. 선형 BLDC 전동기의 특성 및 원리

본 논문에서 사용한 선형 BLDC 전동기는 회전형 BLDC 전동기를 직선으로 펼쳐 놓은 형태로 코일형태의 가동자와 영구자석형 고정자의 공극을 일정하게 유지하여야하기 때문에 역률과 효율면에서는 떨어지나 동력 변환기가 필요하지 않은 큰 장점이 있다.

BLDC 전동기 정류 방법으로는 정현파형 과 구형파형 방법이 있다. 정현파형은 역기전력 파형이 정현파 형태로 발생하는 전동기를 위해 정현파 형태의 상전류를 인가하여 유연한 구동을 가능케 하는 방법이다. 이 방법은 효율이 높고 정밀한 구동이 가능하지만 정류동작을 위한 제어기 구성이 복잡하고 영구자석 자계의 초기 위치를 알고 있어야 하는 단점이 있다. 본 논문에서는 두 가지 정류방법을 모두 사용하며, 초기에는 HED에 의한 구형파 구동 방식으로 정류하였고 정확한 상을 찾은 후에는 정현파형으로 구동하였다.

본 논문에서 사용된 전동기는 최대 출력 500W의 2극 형태의 Trilogy사의 제품으로 선형 스케일러는 RSF Electronics의 MSA665 ML 570mm를 부착하고 있다. 이 스케일러는 내부에서 5체배된 8μm의 거리 해상도를 갖는 구형파 펄스를 출력하며, 본 제어기에서는 다시 이 신호를 4체배 하여 사용한다. 다음 그림들에 이 선형 전동기의 정면 모양과 제어기 및 구동기와의 연결 모양을 보인다.

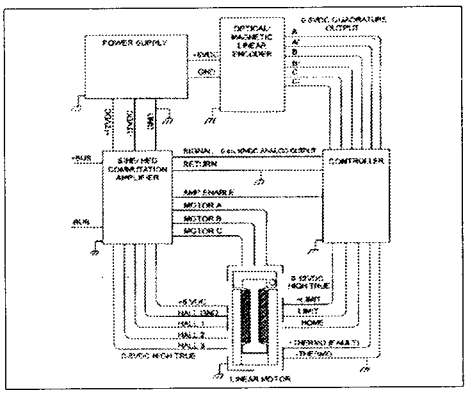


그림 1. 선형 BLDC 전동기의 신호 연결도
Fig 1. Connection diagram of linear BLDC motor

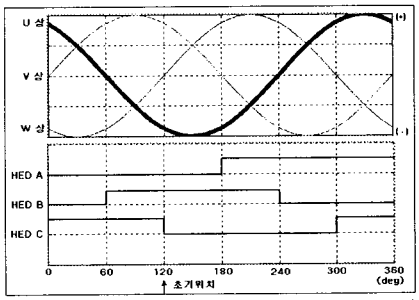


그림 2. 추력-위상 곡선(역기전력 파형 곡선)과 HED 출력 파형
Fig 2. Torque-phase curve and HED output waveforms

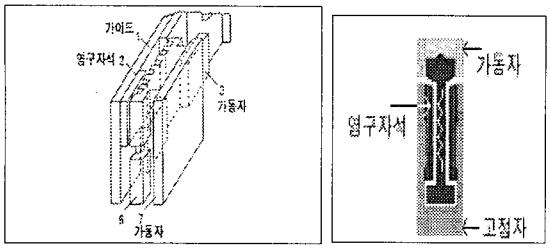


그림 3. 선형 BLDC 전동기의 가동자 와 고정자
Fig 3. Mover and stator of linear motor

Ⅲ. 선형 BLDC 전동기의 동특성 및 제어기 설계

선형 BLDC 전동기의 경우 회전자의 관성모멘트가 없는 직선운동을 하므로 계자기준 제어(FOC)에 의해 동특성방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다[3].

$$\dot{x_1} = \omega \tag{1}$$
$$\dot{\omega} = -\frac{B}{M}\omega + \frac{K_f}{M} i_q - \frac{F_L}{M}$$

$F = K_f\, i_q$ (i_q: 가동자 q축 전류성분)

x_1 : 위치 ω : 속도 M : 캐리어중량 F : 추력

B : 마찰계수 K_f : 추력상수 F_L : 부하추력

속도(x_2) 및 속도오차($e = x_2 - w_{ref}$) 상태방정식은 아래와 같다.

$$\dot{x}_2 = a_{22}x_2 + a_{23}u + fV \tag{2}$$
$$\dot{e} = a_{22}(e + w_{ref}) + a_{23}u + f\,V \tag{3}$$
$$a_{22} = -B/M,\quad a_{23} = K_f/M,$$
$$f = -1/M,\quad V = F_L,\quad u = i_q$$

속도오차 상태방정식에 대한 PI 제어기의 입력 u는 (4)식과 같다.

$$u = K_p + K_i \int e\ dt \tag{4}$$

이 식을 (3)식에 대입한 후 라플라스 변환을 취하고 속도오차 E(s)에 관한 식으로 정리하면 아래 식과 같은 형태를 얻는다. 여기서 두 극점은 PI 이득과 계통 파라미터에 의해 결정된다.

$$E(s) = \frac{Q(s)}{(s+\lambda_1)(s+\lambda_2)} \tag{5}$$

$$K_p = -\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + a_{22}}{a_{23}},$$
$$K_i = -\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{a_{23}} \tag{6}$$

안정하면서 원하는 수렴 속도를 갖는 극점을 선택한 후 식(6)에 의해 제어 이득을 선택하면 극점배치 방법에 의한 PI 이득 선택이 완료된다.

이런 제어 이득 선택 방법은 계통 파라미터의 정보를 알고 있는 경우에 가능하다. 하지만 많은 경우 계통 파라미터의 정보는 불분명하고, 그 값의 변화 가능성이 크다. 본 연구에서는 이런 PI 이득 선정 시 필요한 계통 파라미터의 정보를 얻기 위한 추정 방법을 제안한다.

Ⅳ. 동특성 방정식을 이용하는 선형추진 BLDC 전동기 파라미터 추정법

식(1)의 동특성 방정식에서 파라미터 추정을 위해 부하추력을 0으로 두면, 다음과 같이 식(7)를 얻을 수 있으며, 다시 양변을 적분하면 식(8)의 관계를 얻는다.

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{B}{M}w + \frac{K_f}{M} i_q \tag{7}$$

$$w = -\frac{B}{M}\int w\ dt + \frac{K_f}{M}\int i_q dt \tag{8}$$

변수를 줄이기 위해 식(8)의 전류입력을 스텝으로 하고, 스텝 전류 값 IC와 경과시간 t의 곱에 대한 관계식을 다시 쓰면 다음 (9)식과 같으며, 이 식 양변을 시간 t 또는 속도의 적분 값으로 나누면 아래 (10), (11)의 관계식을 얻는다.

$$w = -\frac{B}{M}\int w\,dt + \frac{K_f}{M} I_c t \tag{9}$$

$$\frac{w}{t} = -\frac{B}{M}\frac{\int w\,dt}{t} + \frac{K_f}{M} I_c \tag{10}$$

$$\frac{w}{\int w\,dt} = -\frac{B}{M} + \frac{K_f}{M}\frac{\int i_q\,dt}{\int w\,dt} \tag{11}$$

이 전동기 동특성방정식에서 얻어진 수식(10), (11)은 계통 파라미터를 확정적으로 알고 있을 때 다음과 같은 선형 식으로 표현될 수 있다.

$$y_i = a_0' + a_1' x_i \tag{12}$$

여기서 y_i는 속도와 관계되는 변수이고 x_i는 입력 전류와 속도의 합성 변수라고 가정하면 된다. 그리고 a_0', a_1'는 계통 파라미터임을 알 수 있다. 이러한 변수간의 선형 특성도 파라미터에 불확실성이 포함되면 유추할 수 없는데, 최적제어에서는 최소자승추정 방법을 이용하여 불확실성에도 불구하고 모델을 확정(fitting)하는 방법이 제시되 있다. 이 방법은 다음 식 (13)과 같이 선형 모델을 가정하고, 모델의 추정 값 $\hat{y}_i$와 그에 대응하는 측정 값 y_i사이의 오차 제곱에 대한 합을 최소화시키는 모델 파라미터 a_0, a_1를 구하는 방법이다.

$$\hat{y}_i = a_0 + a_1 x_i \tag{13}$$

$$e_i = y_i - \hat{y}_i = y_i - a_0 - a_1 x_i \tag{14}$$

$$\min_{a_0, a_1} \varepsilon = \sum_{i=1}^{5} e_i^2 = (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \tag{15}$$

여기서 y_i와 x_i는 알고 있는 값이므로, a_0와 a_1의 추정치는 a_0와 a_1에 의한 오차자승의 합 ε의 미분이 0이 되도록 설정하면 얻을 수 있다.

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0 \rightarrow \quad \hat{a_0} = \frac{S_{xx}S_y - S_{xy}S_x}{rS_{xx} - (S_x)^2}, \quad \hat{a_1} = \frac{rS_{xy} - S_xS_y}{rS_{xx} - (S_x)^2} \tag{16}$$

$$S_x = \sum_{i=1}^{r} x_i, \quad S_{xx} = \sum_{i=1}^{r} x_i^2, \quad S_y = \sum_{i=1}^{r} y_i, \quad S_{xy} = \sum_{i=1}^{r} x_i y_i \tag{17}$$

이러한 Linear regression 접근방법은 보다 일반적인 모델로도 확장될 수 있다.

본 논문에서는 식(16), (17)을 이용하여 초기 모터 속도의 상승 구간에서 마찰계수 및 추력상수와 관계된 선형 BLDC 전동기의 파라미터를 추정한다. 그러나 이 방법은 (속도/속도적분치)와 입력변수 관계가 선형이라는 가정하에서 출발한다. 우선 전동기 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 사용자가 설정한 모델의 파라미터를 식(16)을 이용하여 추정한 후 시뮬레이션 상에서 비교 분석하는 과정을 통해 추정될 파라미터의 신뢰성을 향상시킨다. 그 다음 시뮬레이션에서의 신뢰성이 확보되면, 같은 방법으로 여기서 설정된 적절한 이득을 실제 선형 BLDC 전동기의 이득으로 설정하고 속도 스텝지령을 인가하여 식(16)에 의한 파라미터 추정기법을 시스템에 적용한다.

그림4, 그림5 는 시뮬레이션을 통해 추정한 파라미터를 다시 시뮬레이션의 모델로 재설정하고 스텝속도를 주었을 때 나타나는 속도응답곡선을 보여주고 있다.

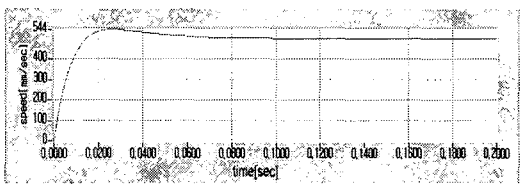


그림 4. 스텝속도 500mm/sec 시의 속도 파형(시뮬레이션)

Fig 4. Speed simulation waveform at 500mm/sec step speed command

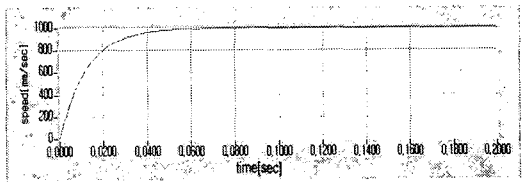


그림5. 스텝속도 1000mm/sec 시의 속도 파형(시뮬레이션)

Fig 5. Speed simulation waveform at 1000mm/sec step speed command

그림6, 그림7 은 추정된 파라미터로 실제 선형 BLDC 전동기의 이득을 결정하고 시뮬레이션과 동일한 조건하에서 스텝 속도 500mm/sec와 1000mm/sec를 인가했을 때의 출력 결과를 보여주고 있다.

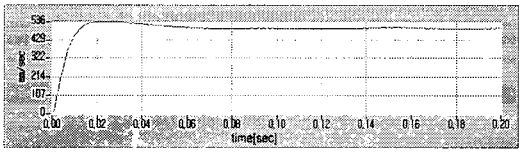


그림 6. 스텝속도 500mm/sec 시의 속도 파형(선형 BLDC)
Fig 6. Speed waveform at 500mm/sec step speed command

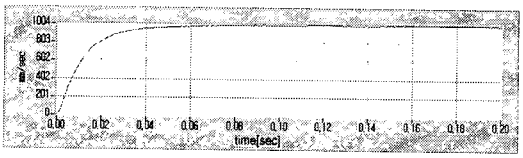


그림 7. 스텝속도 1000mm/sec 시의 속도 파형(선형 BLDC)
Fig 7. Speed waveform at 1000mm/sec step speed command

Linear regression 방법에 의해 추정된 파라미터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= w \\ \dot{w} &= -17.5w + 11200i_q + 0 \end{aligned}$$

여기서, $F_L = 0$, 단위는 ω[mm/sec], i_q[A]이다.

V. 속도 및 위치제어를 위한 프로파일 기법과 전체 시스템 구성

정밀한 위치제어를 위하여 현 지점과 목표지점간의 오차를 구하여 위치를 추종하기 위한 속도를 프로파일링 하였다. 이론상으로는 속도에 대한 적분 값을 이용하여 위치를 구할 수 있으나, 마찰, 부하 등의 외란으로 인하여 오차가 발생하므로 초기에는 속도 프로파일을 추종하며 목표지점과 현 지점의 오차가 일정 거리이내에 들면 P제어기와 PI 제어기를 병행하여 실행하였고, 가속구간에는 Trapezoidal 프로파일과 S-curve 프로파일을 사용하였다. 16bit 프로세서의 경우 연산능력의 한계로 인하여 프로파일 할 수 없는 상황이 발생하므로 본 논문에서 시간에 따른 가속시간과 감속시간을 모두 결정하여 프로파일하지 않고 가속구간만을 시간에 따라 프로파일링한 후 정속 구간에서 감속구간으로의 진입은 전적으로 위치오차에 의한 제어기에 할당함으로써 목표위치에 빠르고 정확하게 수렴할 수 있도록 하였고, 시간에 따른 제약도 없앴다.

본 논문의 전체 제어 블럭도는 그림8과 같다. 전동기의 초기위치 판별부분과 위치제어기, 속도제어기, 전류제어기, 공간벡터변조를 위한 좌표변환, 인버터를 통한 출력 등으로 구성되어 있다.

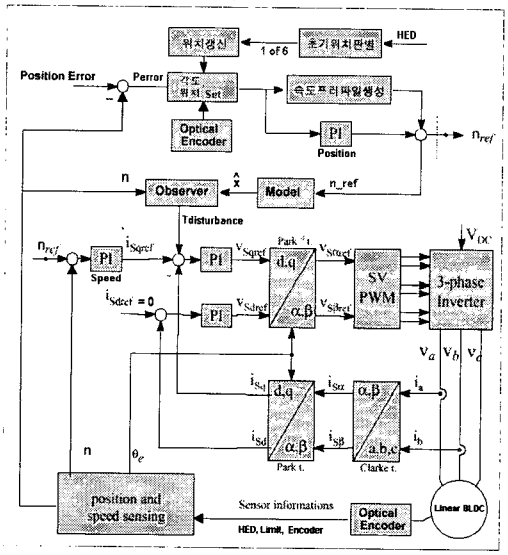


그림 8. 선형 BLDC 전동기의 전체 제어블록도
Fig 8. Overall control block diagram of linear BLDC motor

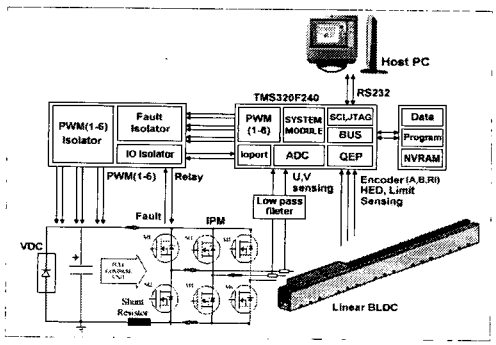


그림 9. 선형 BLDC 전동기의 제어기, 구동기, 모니터링 PC와의 연결도
Fig 9. Interface scheme of linear BLDC motor driving and control system

VI. 실험결과

본 장에서는 선형 BLDC 전동기의 파라미터를 추정한 후 속도제어기의 이득을 결정하고, 가동자의 전류와 고정자의 전류를 독립적으로 제어하는 벡터제어를 적용한 실험 결과를 도시한다.

그림10은 지령속도를 1000mm/sec로 설정하고, Trapezoidal 속도 프로파일 및 PI 위치제어를 적용하였을 경우의 지령속도 그래프이다. 그림11은 선형 BLDC 전동기가 이 지령속도 프로파일을 추종하는 모습을 나타낸다.

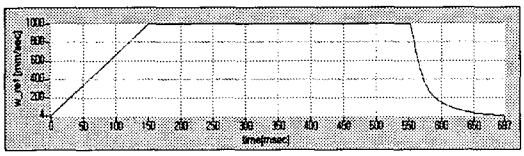


그림 10. 최고지령속도 1000mm/sec 일 때 특정 위치 제어를 위한 속도 프로파일

Fig 10. Speed profile for fixed position control at 1000mm/sec maximum speed command

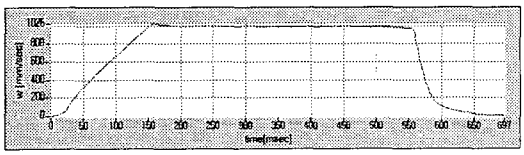


그림 11. 속도 프로파일을 추종하는 실험결과

Fig 11. Experimental result tracking speed profile

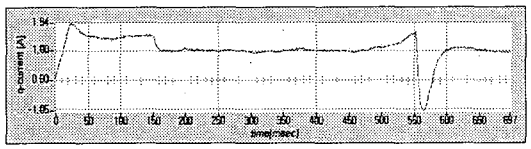


그림 12. 속도 프로파일을 추종할 때의 q축 전류

Fig 12. q-axis current waveform when tracks speed profile

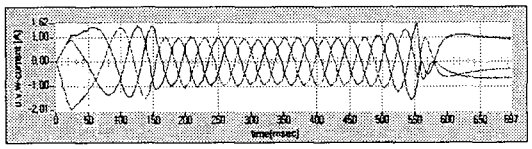


그림 13. 속도 프로파일을 추종할 때의 3상 전류

Fig 13. 3-phase current waveform when tracks speed profile

그림14. 15는 연속적으로 이동할 위치를 기준 0 위치에 비해 각각 500mm(A), 150mm(B), 300mm(C)로 설정하고 최고지령속도를 1000mm/sec로 하였을 경우의 지령 속도 프로파일과 추종 결과를 보여주고 있다. 이 때 가속 궤적은 S-curve 를 이용하여 구현하였다.

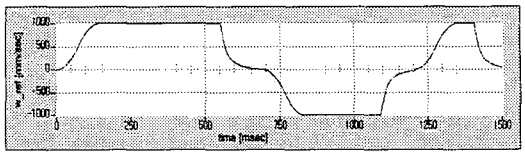


그림 14. 연속위치지령을 인가하였을 경우의 속도 프로파일

Fig 14. Speed profiles in case of continuous position control

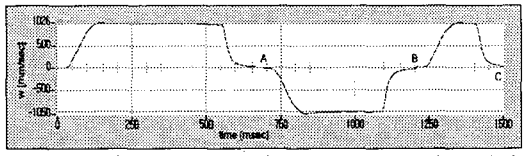


그림 15. 다단 속도 프로파일을 추종하는 실험 결과

Fig 15. Experimental result tracking multi-step speed profile

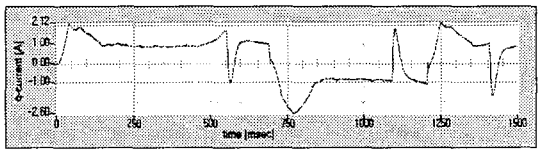


그림16. 다단 속도 프로파일을 추종할 때의 q축 전류

Fig 16. q-axis current waveform when tracks multi-step speed profile

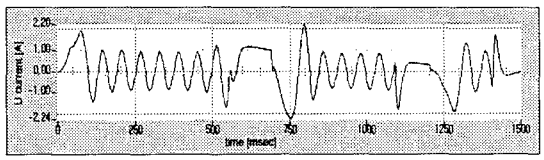


그림 17. 다단 속도 프로파일을 추종할 때의 U상 전류

Fig 17. U phase current waveform when tracks multi-step speed profile

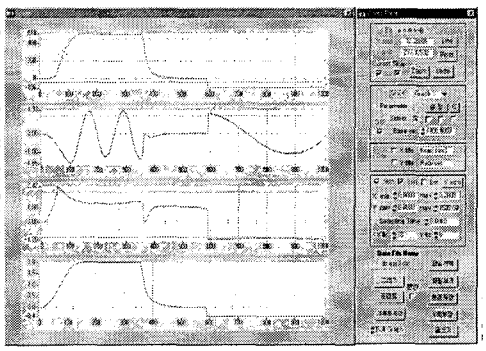


그림 18. CVI로 작성된 실험 결과 그래프 분석 도구

Fig 18. Experimental result analysis tool composed by CVI

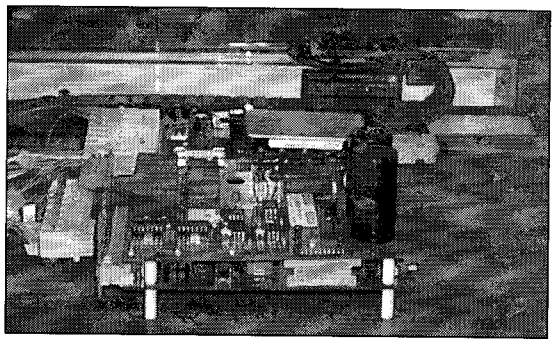


그림19. 선형 BLDC 전동기, 제어기보드, 구동기 보드가 연결된 사진
Fig 19. Captured picture of linear BLDC motor driving and control system

Ⅶ. 결 론

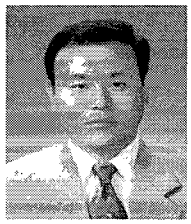
본 논문은 선형 브러시리스 직류전동기를 대상으로 하였으며 고속성과 정밀성을 실현하고 안정된 제어시스템을 구현하기 위해 유연한 속도프로파일과 디지털 PI 위치 제어기를 설계하였다. 그리고 시스템의 불확실성을 극복하기 위해 계통 파라미터를 동특성 상태방정식과 Linear regression을 이용하여 추정하였으며, 이를 이용하여 PI 제어기의 이득을 자동 조절하였다. 기존의 이득 조정 방법에 비해 초기 과도 과정에서 구간별로 이득을 조정하기 위한 파라미터 추정이 여러 번 이루어지기 때문에 과도상태와 정상상태 모두에 적합한 이득 조정이 가능하였다.

전체 제어기 하드웨어를 직접 설계 제작하였으며, 실험 및 시뮬레이션을 모니터링하고 분석할 수 있는 통합 운영 프로그램 역시 LabWindow/CVI 를 이용하여 직접 작성하였다.

참고문헌

[1] I. Boldea S.A. Nasar, "Linear Motion Electromagnetic Systems", John Wiley & Sons, Inc. , pp2, 1985
[2] 최중경, "서보기기 제어특론 I ", 1999
[3] 최태희, "리니어 모터의 최적설계 및 정밀 위치제어", 1993

저자소개

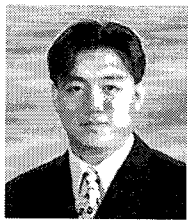


차 영 범(Young-Bum Cha)

1990년 2월 경북대학교 전자공학과 공학사
1996년 8월 충남대학교 전자공학과 공학석사
2005년 3월 창원대학교 전자공학과 공학박사수료
1990년 ~ 현재 삼성테크윈 파워시스템연구소 책임연구원
※ 관심분야 : 서보모터제어, DSP보드설계, 가스터빈엔진제어

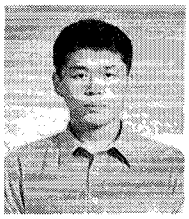
송 도 호(Do-Ho Song)

1973년 2월 광운대학교 전기공학과 공학사
2001년 2월 창원대학교 전자공학과 공학석사
2005년 3월 창원대학교 전자공 학과 공학박사수료
1979년 ~ 현재 한국기계연구원 표준실장
※ 관심분야 : 디지털회로설계, 센서응용회로



구 본 민(Bon-Min Koo)

1999년 2월 창원대학교 전자공학과 공학사
2001년 2월 창원대학교 전자공학과 공학석사
2004년 3월 창원대학교 전자공학과 공학박사수료
2002년 2월 ~ 현재 KnTech 대표
※ 관심분야 : 서보모터제어, DSP보드설계, 이동로봇제어



박 무 열(Moo-yurl Park)

2000년 2월 창원대학교 전자공학과 공학사
2002년 2월 창원대학교 전자공학과 공학석사
2004년 3월 창원대학교 전자공학과 공학박사수료
※관심분야 : 서보모터제어, DSP보드설계, 이동로봇제어

김진애(Jin-Ae Kim)

2001년 8월 창원대학교 전자공학과 공학사
2004년 2월 창원대학교 전자공학과 공학석사
2005년 3월 창원대학교 전자공학과 공학박사과정
※ 관심분야 : 디지털회로설계, DSP응용

최중경(Jung-Keyng Choi)

1986년 2월 고려대학교 전기공학과 공학사
1988년 2월 고려대학교 전기공학과 공학석사
1992년 3월 고려대학교 전기공학과 공학박사
1992년 ~ 현재 창원대학교 전자공학과 정교수
※ 관심분야 : 서보기기제어, 자동동조제어, 마이크로프로세서응용, DSP응용, 영상제어