

파라미터 추정방법을 이용한 선형추진브러시리스 직류전동기의 속도-위치제어기 설계

박성수, 최중경, 변지섭, 윤성은, 류정오
 창원대학교 전자공학과
 전화 : 055-283-6353 / 핸드폰 : 019-553-0446

The Design of a Speed-position Controller using a Parameter Estimation Method for the Linear Brushless DC Motor

Seong-Su Park, Jung-Keying Choi, Ji-Seob Byeon, Seong-Eun Yun, Jeong-Oh Ryu
 Dept. of Electronic Engineering, Changwon National University
 E-mail : sskonan@orgio.net

Abstract

Servomotors, especially linear brushless servomotors have numerous advantages over ball screws, timing belts, rack/pinion drives and friction drives compared with rotary servomotors.

This paper proposes an linear regression method as the estimation of unknown parameters from the linear brushless DC motor. The estimated parameters are used to tune the gain of controller.

In order to agree with this purpose, Digital Signal Processor (TMS320F240), developed for implementation of the motor control, is adopted in this study. The processor playing an important role in controller has A/D converters, PWM generators, riched I/O ports internally.

1. 서 론

현대의 산업사회에서 기계와 전자가 밀접한 상호연관성을 지닐에 따라 전자공학에서 기계를 제어하는 메카트로닉스산업이 중심적 테마가 되어 가고 있으며 공작기계, 크레인, 자동문, 컴퓨터의 주변기기에 이르기까지 다양한 전자적 제어의 액츄에이터로서 선형전동기가 사용되고 있다.[1]

선형전동기는 회전형 전동기와 유사한 원리 및 구조를 갖고 있으며 선형 유도전동기(LIM - Linear Induction Motor), 선형 직류전동기(LDM - Linear DC Motor), 선형 펄스전동기(LPM - Linear Pulse Motor), 선형 동기전동기(LSM - Linear Synchronous Motor), 선형 하이브리드전동기(LHM - Linear Hybrid Motor) 등으로 크게 나눌 수 있는데, 본 논문에서 사용된 전동기는 정현파의 역기전력 파형을 갖는 영구자석 브러시리스 직류전동기(BLDC - Brushless DC)이다.

본 논문에서는 이러한 브러시리스 직류전동기를 제어하기 위해 증분형 이산치 PI 제어기를 도입하고 미

지의 계통파라미터를 추정하기 위해 Linear regression 알고리즘을 적용한다. 이 방법을 통하여 얻어진 추정값을 동특성방정식에 적용하여 시스템을 안정하도록 제어기의 이득을 조정하도록 설계하여 그 위치제어 특성을 보인다. 제어기의 마이크로프로세서는 모터제어전용으로 개발된 고정소숫점연산 DSP 인 TMS320F240 을 이용하였다.

2. 선형 BLDC 전동기의 속도제어기

선형 BLDC 전동기의 경우 회전자의 관성모멘트가 없는 직선운동을 하므로 동특성방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.[3]

$$x = \omega \tag{2.1}$$

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

x : 위치
 ω : 속도
 M : 캐리어의 중량
 B : 마찰계수
 K_f : 추력상수
 F_L : 부하추력

여기서, 추력 $F = K_f \cdot i$ 의 관계를 가진다.

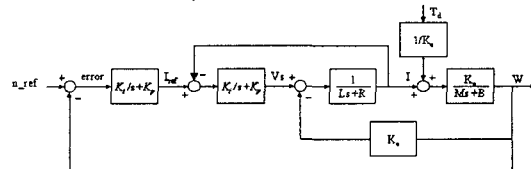


그림 2.1 선형 BLDC 전동기의 블록선도

2.1 전동기의 파라미터 추정

식 2.1의 동특성 방정식에서 파라미터 추정을 위해 부하를 Zero로 두면 다음과 같이 간략한 식이 된다.

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{B}{M}\omega + \frac{K_f}{M}i_q \quad (2.2)$$

양변을 적분하면,

$$\omega = -\frac{B}{M} \int \omega dt + \frac{K_f}{M} \int i_q dt \quad (2.3)$$

변수를 감소시키기 위해 식 4.2의 전류입력을 스텝으로 하고, 스텝전류값 I_c 와 경과시간 t 의 곱에 대한 관계식으로 다시 쓰면,

$$\omega = -\frac{B}{M} \int \omega dt + \frac{K_f}{M} I_c t \quad (2.4)$$

$$\frac{\omega}{t} = -\frac{B}{M} \frac{\int \omega dt}{t} + \frac{K_f}{M} I_c \quad (2.5)$$

$$\frac{\omega}{\int \omega dt} = -\frac{B}{M} \frac{1}{\int \omega dt} + \frac{K_f}{M} \frac{t}{\int \omega dt} \quad (2.6)$$

와 같이 얻어진다.

그림 2.1-그림 2.3은 선형 BLDC 전동기에 스텝전류 2.5A를 인가하고, 파라미터 추정을 위해 식 2.4-식 2.6을 각각 적용했을 때의 그래프를 나타내고 있다.

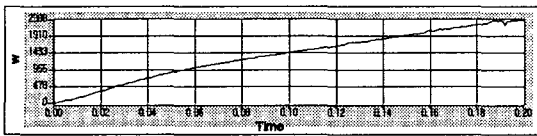


그림 2.1 스텝전류 2.5A에서의 속도(ω)와 시간(t)의 그래프

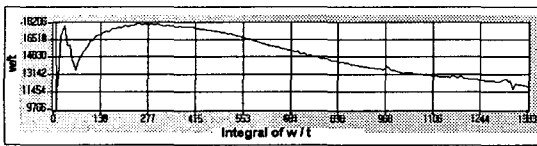


그림 2.2 스텝전류 2.5A 인가시의 그래프

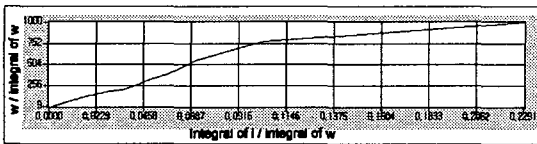


그림 2.3 스텝전류 2.5A 인가시의 그래프

2.2 극점배치방법을 이용한 이득 선택

속도 및 속도오차 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x}_2 = a_{22}x_{22} + a_{23}u + fV \quad (2.7)$$

$$\dot{e} = a_{22}(e + \omega_{ref}) + a_{23}u + fV \quad (2.8)$$

속도오차 상태방정식에 대한 PI 제어기의 입력 u 는

$$u = K_p + K_i \int e dt \quad (2.9)$$

이것을 속도오차 $E(s)$ 에 관한 식으로 정리하면,

$$E(s) = \frac{a_{23}K_i e(0) + a_{22}\omega_{ref} + fV_L}{s^2 - (a_{22} + a_{23}K_p)s - a_{23}K_i} \quad (2.10)$$

극점배치방법에 의하여,

$$E(s) = \frac{Q(s)}{(s + \lambda_1)(s + \lambda_2)} \quad (2.11)$$

여기서 $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ 으로 설정한다.

식(2.6), (2.7)으로부터, 입력 u 를 구성하는 K_p, K_i 의 조건식은

$$K_p = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + a_{22}}{a_{23}} \quad (2.12)$$

$$K_i = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{a_{23}}$$

식(2.12)에 의하여 안정한 극점 λ_1, λ_2 를 결정하고, 그에 따른 이득값을 구하였다.

3. 선형 BLDC 전동기의 위치제어기

정밀한 위치제어를 위하여 현 지점과 목표 지점간의 오차를 구하여 위치에 대한 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 P 제어기와 PI 제어기를 병행하여 실행하였고, 가속구간에는 Trapezoidal 프로파일과 S-curve 프로파일을 사용하였다. 16bit 프로세서의 경우 연산능력의 한계로 인하여 프로파일 할 수 없는 상황이 발생하므로 본 논문에서는 시간에 따른 가속시간과 감속시간을 모두 결정하여 프로파일하지 않고 가속구간만을 시간에 따라 프로파일링한 후 정속구간에서 감속구간으로의 진입은 전적으로 위치오차에 의한 제어기에 할당함으로써 목표위치에 빠르고 정확하게 수렴할 수 있도록 하였고, 시간에 따른 제약도 없었다.

4. Linear regression

스텝응답으로부터 시스템의 다이내믹을 유도하기 위해 최적제어에서 적용되는 기법을 파라미터 추정방법

파라미터 추정방법을 이용한 선형추진브러시리스 직류전동기의 속도-위치제어기 설계

에 적용할 수 있다.[7] 이러한 방법은 출력된 데이터(Data)와 모델간의 오차를 최소화한다. 본 논문에서는 최적제어 이론을 응용한 최소자승 추정방법을 이용하여 모델의 파라미터를 예측한다.

$$\begin{aligned} \hat{y}_i &= a_0 + a_1 x_i \\ e_i &= y_i - \hat{y}_i = y_i - a_0 - a_1 x_i \\ \min_{a_0, a_1} \varepsilon &= \sum_{i=1}^n e_i^2 = (y_i - a_0 - a_1 x_i)^2 \\ \frac{d\varepsilon}{dt} = 0 &\rightarrow \hat{a}_0 = \frac{S_{xx}S_y - S_x S_{xy}}{rS_{xx} - (S_x)^2} \\ \hat{a}_1 &= \frac{rS_{xy} - S_x S_y}{rS_{xx} - (S_x)^2} \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$S_x = \sum_{i=1}^n x_i \quad S_{xx} = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad S_y = \sum_{i=1}^n y_i \quad S_{xy} = \sum_{i=1}^n x_i y_i$$

4.1 Linear regression 에 의한 파라미터 추정

본 논문에서는 식 4.1 을 이용하여 선형 BLDC 전동기의 파라미터를 추정한다. 그러나 이 방법은 모든 다이내믹이 선형적이라는 가정 하에서 출발하므로 Unmodeled dynamics 가 존재하며, 따라서 항상 정확한 결과를 보충해 주지는 않는다. 우선 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 User 가 설정한 가상의 파라미터를 식 4.1 을 이용하여 추정한 후 시뮬레이션 상에서 비교 분석하는 과정을 통해 추정될 파라미터의 신뢰성을 향상시킨다. 다음으로 시뮬레이션에서의 신뢰성이 확보되면, 같은 방법으로 여기서 설정된 적절한 이득(Gain)을 실제 선형 BLDC 전동기의 이득으로 설정하고 속도 스텝지령을 인가하여 식 4.1 에 의한 파라미터 추정기법을 시스템에 적용하였다.

그림 4.7~그림 4.8 은 이러한 방법으로 추정한 파라미터를 다시 시뮬레이션의 모델로 재설정하고 스텝속도 500mm/sec 와 1000mm/sec 를 주었을 때 나타나는 속도응답곡선을 보여주고 있다.

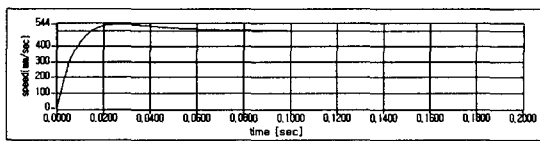


그림 4.7 스텝속도 500mm/sec 시의 속도파형(시뮬레이션)

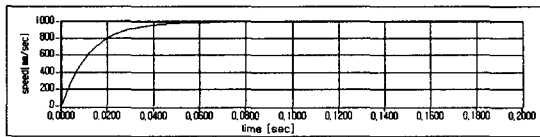


그림 4.8 스텝속도 1000mm/sec 시의 속도파형(시뮬레이션)

그림 4.9~그림 4.10 는 추정된 파라미터로 실제 선형 BLDC 전동기의 이득을 결정하고 시뮬레이션과 동일한 조건하에서 스텝 속도 500mm/sec 와 1000mm/sec 를 인가했을 때의 출력결과를 보여주고 있다.

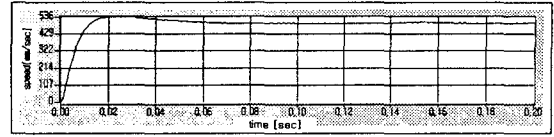


그림 4.9 스텝속도 500mm/sec 시의 속도파형(선형 BLDC)

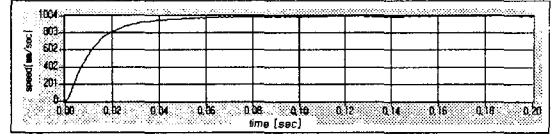


그림 4.10 스텝속도 1000mm/sec 시의 속도파형(선형 BLDC)

Linear regression 방법 에 의해 추정된 파라미터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x &= \omega \\ \omega &= -17.5\omega + 11200i_a + 0 \end{aligned} \quad (4.13)$$

여기서, $T_L=0$, 단위는 ω [mm/sec], i_a [A]로 하였다.

표 2.1 본 논문에서 사용된 선형 BLDC 전동기 사양

| | |
|---------------------------|----------------------------------|
| 제조사명 | |
| Model | LMS120-27.6-2NC, WD3 (=LMI 10-2) |
| Encoder | RSF MSA665 ML 570mm |
| Number of poles | 2 |
| Force Constant(sine) | 19.6 [N/A] |
| Force Constant(HED) | 17.8 [N/A] |
| Coil Resistance, Ph-Ph | 7.6 [Ohms] |
| Peak Power | 500 [Watts] |
| Continuous Power(sine) | 61 [Watts] |
| Peak / Continuous Current | 7/2.5 [A] |
| Inductance | 2.0 [mH] |
| Back EMF | 0.50 [V/in/sec] |

5. 실험결과

본 논문에서 사용된 선형 BLDC 전동기의 파라미터를 추정하고 제어기의 이득을 결정하며, 가동자(회전자에 해당)의 전류와 고정자의 전류를 독립적으로 제어하는 벡터제어를 적용하였을 때의 실험결과를 나타내었다.

그림 5.1 은 지령속도를 1000mm/sec 로 설정하고, Trapezoidal 속도 프로파일 및 PI 위치제어를 적용하였을 경우의 지령속도 그래프이다. 그림 5.2 는 선형 BLDC 전동기가 이 속도 프로파일을 추종하는 모습을 나타낸다

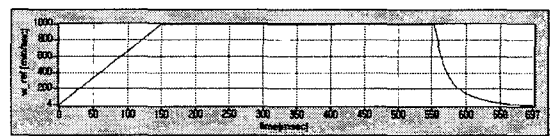


그림 5.1 지령속도 1000mm/sec 일 때의 속도 프로파일

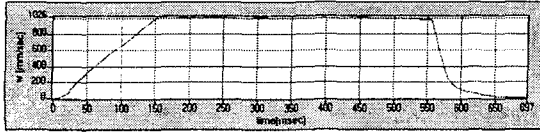


그림 5.2 선형 BLDC 전동기의 추종 그래프

그림 5.3 은 지령속도 1000mm/sec 이나 목표지점까지의 이동거리가 매우 짧아 trapezoidal 프로파일을 형성하지 못할 경우이다. 이때는 이동거리의 중간지점에서 프로파일을 추종하지 않고 위치제어를 시작하게 되며 삼각형의 속도 프로파일을 형성한다. 그림 5.4 는 이 프로파일을 추종하는 선형 BLDC 전동기의 그래프이다.

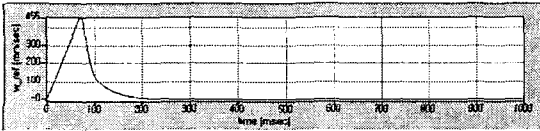


그림 5.3 이동거리가 짧을 때의 속도 프로파일

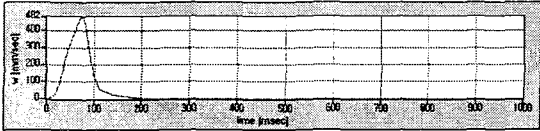


그림 5.4 선형 BLDC 전동기의 추종 그래프

그림 5.5 은 선형 BLDC 전동기에 위치지령을 연속적으로 주었을 때의 지령속도 그래프를 나타내고 있다. 지령속도는 1000mm/sec 로 하였으며 계속하여 100mm(A), 250mm(B), 450mm(C)의 위치로 이동하도록 명령을 인가하였다. 그림 5.6 은 실제 선형 BLDC 전동기의 추종속도 그래프이다.

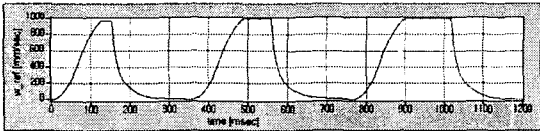


그림 5.5 연속위치지령 인가시의 속도 프로파일

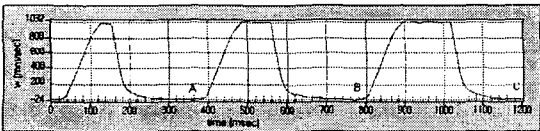


그림 5.6 선형 BLDC 전동기의 추종그래프

그림 5.7 은 연속적으로 이동할 위치를 각각 500mm(A), 150mm(B), 300mm(C)로 설정하고 지령속도를 1000mm/sec 로 하였을 경우의 지령속도 그래프이다. 그림 5.8 은 실제 선형 BLDC 전동기의 추종속도를 보여주고 있다.

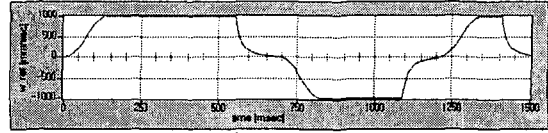


그림 5.7 연속위치지령 인가시의 속도 프로파일

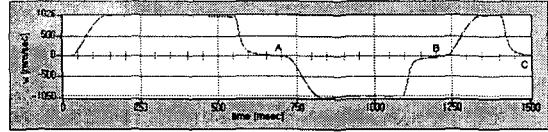


그림 5.8 선형 BLDC 전동기의 추종그래프

6. 결론

본 논문은 TMS320F240 을 이용하여 선형 브러시리스 직류전동기를 대상으로 고속성과 정밀성을 실현하고, 보다 안정된 제어시스템을 구현하기 위해 속도프로파일을 적용하였고 PI 위치제어기를 설계하였다. 또한 전동기의 외란을 상쇄시키고 보다 안정하고 견실한 제어 시스템을 설계하기 위하여 시스템의 파라미터를 동특성 상태방정식을 이용한 파라미터 추정방법과 선형화 기법의 하나인 Linear regression 을 이용하여 저차의 선형시스템으로 근사화시키고 실제 시스템에 적용하여 특성을 보다 개선시키고자 하였다.

참고문헌

- [1] I. Boldea S.A. Nasar, "Linear Motion Electromagnetic Systems", John Wiley & Sons, Inc., pp2, 1985
- [2] 최중경, "서보기기 제어특론 I", 창원대학교 대학원, 1999
- [3] 최태희, "리니어 모터의 최적설계 및 정밀 위치 제어", 1993
- [4] Phillips & Nagle, "Digital Control System Analysis and Design", Prentice Hall, 2th, 8 장
- [5] 임상덕, "새로운 PI 이득 조절 기법을 적용한 브러시리스 직류전동기의 속도제어기 설계", 1996
- [6] Texas Instruments, "Implementation of a Speed Field Oriented Control of 3-phase PMSM Motor using TMS320F240", SPRA588
- [7] W. Fred Ramirez, "Process Control and Identification", Academic Press, 7 장