

自己同調法에 의한 BLDC전동기의 정밀 위치제어

정석권*, 전봉환*, 유휴룡*
김효석*, 김상봉*, 이판목**

* 부산수산대학교, ** 한국기계연구원

Abstract

A high precision position control technique of Brushless DC(BLDC) motor system with time varying parameters is expressed using the self tuning control method. The time varying parameters is estimated on real time by detecting voltage references from controller and mechanical motor speeds from tacho-generator. The effectiveness of the method is evaluated through the positon control experimental results of a BLDC motor system for reference change and arbitrary disturbance.

1. 서 론

서보시스템은 임의의 파라미터 변동이나 외란(Disturbance)에 대해서 주어진 목표치를 자동적으로 추종하는 강인한 능력을 가져야만 한다. 일반적으로 서보계는 대상 시스템에 외란의 모델을 포함한 서보보상기를 결합하여 구성된 확대계를 안정화 시키는 피드백 제어계로 그 목적을 달성한다. 그러나, 시스템의 파라미터가 시변(Time varying)특성을 가질 경우, 고정 파라미터로 간주하여 설계한 제어기가 소정의 역할을 수행할 수 없게 될 뿐만 아니라, 오히려 시스템을 불안정 상태로 가져가는 요인이 되기도 한다. 실제적인 시스템에 있어서, 시스템의 파라미터를 정확히 파악한다는 것은 대단히 어려우며, 또한 앞서 기술한 바와 같이 운전중 시변특성을 갖는 파라미터도 존재한다. 적용제어는 이와 같은 플랜트의 동특성이 미지 또는 불확실성이 있다고 하더라도 바람직한 성능을 항상 유지할 수 있는 제어방식으로 알려져 있다. 대표적인 적용제어 방식으로서는 모델 규범형 제어 방식(MRAC)과 자기 동조 제어방식을 들 수 있다.

한편, 산업분야에서 자동화가 급속히 진전되는 가운데 로보트, NC(Numerical Control)기기 등의 공작

기계를 포함한 산업용 가변속 구동장치에 사용하는 서보모터의 중요성이 한층 중대되고 있다. 종래 이와 같은 서보모터로서는 주로 직류전동기가 이용되어져 왔으나 현재는 보수의 필요성이 없고, 내환경성, 중량대비 고파워의 장점을 갖는 교류전동기가 주류를 차지하고 있다. 그 가운데서도 특히 BLDC전동기는 제어가 간편할 뿐만아니라 운전중 2차측의 온도상승으로 인한 냉각문제를 고려할 필요가 거의 없다는 점, 축관성이 작기 때문에 순간 기동력이 크다는 점등의 잇점이 있어서 소용량의 가변속 구동장치에 널리 사용되고 있다.

본 논문에서는 시스템의 파라미터가 운전중 시변 특성을 갖는 경우를 상정하고, 파라미터 변동에 대해 강인한 정밀 위치 서보계 구축을 위해, 자기동조법을 이용한 새로운 위치제어 방안을 제안한다. 제안방식은 서보모터를 전동기의 전자기적 토크에 상응한 전압지령을 입력으로 하고, 위치를 출력으로 하는 미캐니컬 방정식으로 간결히 표현하고, 전압지령치 및 전동기의 속도정보 단을 검출하여 시변특성의 파라미터를 실시간 추정함으로써 정밀한 위치제어를 실현한다. 본 설계법의 유효성을 입증하기 위해, 디지털화된 실기실험 시스템을 구축, BLDC전동기의 스텝상의 목표치 변경 및 외란에 대한 강인성의 효

과를 실험을 통하여 검증하였다. 또한, 파라미터 추정에 영향을 미치는 인자들에 대해서도 정성적인 검토를 행하였다.

2. BLDC전동기의 위치제어계

2.1 제어계의 모델

본 논문에서는 BLDC전동기 시스템을 사용하여 부하의 변동이나 외란하에서도 그 위치가 자유롭게 제어될 수 있는 시스템을 제어대상으로 하고 있다. BLDC전동기의 미캐니컬 방정식은 일반적인 직류전동기의 식과 동가이므로 다음과 같은 토크 요소에 기초한 식으로 나타낼 수 있다.

$$J_m \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B_m \frac{d\theta(t)}{dt} = K_T i_T - \tau_L \quad (1)$$

여기서,

i_T : 전류의 토크 성분

J_m : 회전체의 관성 모멘트

K_T : 동가 토크 상수

B_m : 회전체의 점성마찰 계수

τ_L : 부하 토크

θ : 전동기의 기계각도

(1)식의 차분방정식을 디지털 제어계에서의 실현을 상정하여 $\omega(k)$ 에 대해서 표현하면 다음과 같다.

$$\omega(k+1) = a\omega(k) + b_1 i_T(k) + b_2 \tau_L(k) \quad (2)$$

여기서, $a = e^{-(B_m/J_m)T}$

$$b_1 = \frac{K_T}{J_m} \int_0^T e^{-(B_m/J_m)t} dt$$

$$b_2 = \frac{1}{J_m} \int_0^T e^{-(B_m/J_m)t} dt$$

ω 는 전동기의 기계적인 회전각속도, T 는 샘플링 시간이다. 또한, BLDC전동기에서는 i_T 를 전압지령으로 실현하게 된다. 한편 웃식에서의 계수값 a , b_1 , b_2 는 전동기 축의 관성모멘트에 의존하는 값들이다. 축의 관성모멘트는 PID제어계 설계시 고정값으로 간주되어 보상기의 계인들이 설정되는 것이 일반적이다. 그러나 제어대상에 따라서는 이 값이 시변특성

을 가지는 경우가 있다. 이와 같이 시스템의 파라미터가 변동하는 상황하에서 정밀 위치제어를 실현하기 위해서는 변동하는 파라미터들을 실시간 추정할 필요성이 있다.

본 논문에서, 제어의 목적은 시변특성의 파라미터를 갖는 서보계에 대해 외란 토크인 τ_L 의 영향을 최소화 하면서 바람직한 위치응답을 얻는 것이다.

2.2 속도제어계 설계

서보모터로써 위치제어를 행할 경우, 속도제어 루프 및 전류제어 루프를 마이너 루프로 한 쟈漯(Cascade)구성의 제어계가 보통 이용된다. 이와 같은 쟈漯접속의 제어계를 구성하면, 마이너 루프의 응답을 외측의 루프 응답보다도 충분히 높게 되도록 설계함으로서, 외측의 루프 응답성 및 시스템의 안정성이 향상되는 이점이 있다.

식 (2)의 시스템을 제어대상으로 하여 미지 파라미터인 a , b_1 을 실시간으로 추정하면서 주어진 속도 목표치에 추종 가능한 제어계를 설계하는 것을 목적으로 한다.

자기동조법에 의한 속도 제어계 설계법^[7]을 이용하여 제어입력 $u_v(k)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$u_v(k) = \frac{1}{b_1} \{ \omega_r(k+1) + k_d e(k) + k_i e(k-1) + a\omega(k) \} \quad (3)$$

단, $\omega_r(k)$ 는 속도 목표치이며, $e(k)$ 는 속도지령치와 실제 응답치와의 편차를 의미하고, k_d 와 k_i 는 다음의 다항식이 안정한 다항식이 되도록 주어지는 임의의 상수값들이다.

$$e(k+1) + k_d e(k) + k_i e(k-1) = 0 \quad (4)$$

2.3 위치제어계의 설계

속도 제어계가 동작하여 정상 상태에 도달하였을 때, 속도 ω 와 그 목표치 ω_r 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\omega(k) = z^{-1} \omega_r(k+1) \quad (5)$$

한편, 위치를 $\theta(k)$ 라고 하면, 속도와 위치사이에는 적분의 관계가 성립하므로 다음식이 얻어진다.

$$\theta(z) = \frac{T(1 + z^{-1})}{2(1 - z^{-1})} Q(z) \quad (6)$$

$$\theta(k) = \frac{T}{2} \{ \omega_r(k) + \omega_r(k-1) \} + \theta(k-1) \quad (7)$$

위치 $\theta(k)$ 를 위치 목표치 $\theta_r(k)$ 에 추종시키도록 하기 위해서는 속도 제어계에 있어서 속도 목표치 $\omega_r(k)$ 를 적절히 제어함으로써 실현 가능하다. 속도 목표치 $\omega_r(k+1)$ 을 위치 제어계의 입력 $u_p(k)$ 로 하여 제어를 행하는 경우를 생각한다. (6)식의 관계를 이용하면 (7)식은 다음과 같이 표현된다.

$$\theta(k) = \frac{T}{2} \{ u_p(k-1) + u_p(k-2) \} + \theta(k-1) \quad (8)$$

이 식으로부터 $k+1$ 의 시점에서의 위치지령을 속도지령 $v_r(k)$ 로써 실현하는 것을 생각하면, 새로운 속도지령은 다음과 같이 얻어진다.

$$v_r(k) = \frac{T}{2} \{ u_p(k) + u_p(k-1) \} + \theta(k) \quad (9)$$

이때, (8)식 및 (9)식으로부터

$$\theta_r(k+1) = v_r(k) \quad (10)$$

가 성립되어, 시스템의 출력 목표치인 위치는 (9)식의 제어 입력을 가함으로써 임의로 조절 가능하게 된다. 그러나 임의의 외란이나 계측 잡음은 피할 수 없으므로 이에 의한 영향을 저감시키기 위해 속도지령 $v_r(k)$ 에 대해 속도제어계에서 보인 것과 같은 보상기를 설계하도록 한다. $v_r(k)$ 에 대해 정리하면,

$$v_r(k) = \theta_r(k-1) + m_d \{ \theta_r(k) - \theta(k) \} + m_i \{ \theta_r(k-1) - \theta(k-1) \} \quad (11)$$

와 같고, 여기서 m_d 와 m_i 는 임의의 정수이며, 오차 $e_p(k) = \theta_r(k) - \theta(k)$ 에 대해 (12)식이 안정한 다항식이 되도록 주어지는 임의의 계수값들이다.

$$e_p(k+1) + m_d e_p(k) + m_i e_p(k-1) = 0 \quad (12)$$

결과적으로 제어 입력 $u_p(k)$ 는 (9)식과 (11)식의 관계에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$u_p(k) = \frac{2}{T} \{ \theta_r(k-1) + m_d e_p(k) + m_i e_p(k-1) - \theta(k) - u_p(k-1) \} \quad (13)$$

그림1은 이상의 자기동조법에 의한 위치제어계 블록선도를 나타낸다.

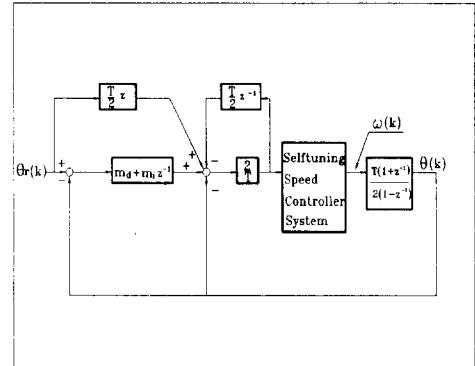


그림 1 자기동조 위치제어계의 구조
Fig.1 Structure of selftuning position control system

그림에서 알 수 있듯이 자기동조 속도 제어계의 주위에 간단한 루프를 부가함으로써 위치 제어계의 구성이 가능하다. 또한, 위치 제어계에서 제어 입력으로 이용되는 파라미터는 제어 대상의 파라미터에 의존하고 있지 않으므로, 위치 제어계의 루프는 고정 계인으로 주어지게 된다.

2.4 파라미터 추정

파라미터 추정은 BLDC전동기 시스템의 연속계 표현인 미분방정식 (1)을 이산화된 차분방정식 (2)로 표현하고 소정의 전류치에 등가한 전압지령을 제어 입력으로, 속도를 출력으로 하여 이를값을 검출하여 계수 파라미터들을 실시간 추정하도록 한다. 데이터를 이용하여 미지계수를 구하는 방법으로서는 최소 자승법에 의한 계수 결정법이 잘 알려져 있으며 특히, 추정 대상의 파라미터가 시변특성을 갖는 점을 고려하여 반복적인 파라미터 추정법을 이용하도록 한다.

추정되어야 할 파라미터는 (2)식에서 b_2 가 b_1 의 k_T 배인 점을 감안하면 (14)식과 같다. 또한 검출정보로서는 콘트롤러의 전압지령과 전동기의 기계적인 각속도로서 (15)식과 같다.

$$\theta^T = [\alpha \ b_1] \quad (14)$$

$$\phi^T(k) = [-\omega(k-1) \ u_v] \quad (15)$$

이때 반복적인 추정 알고리즘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + S(k-1)\phi(k)\{\lambda I \\ &+ \phi^T(k)S(k-1)\phi(k)\}^{-1} \\ &\times (y(k) - \phi^T(k)\hat{\theta}(k-1))\end{aligned}\quad (16)$$

$$\begin{aligned}S(k) &= \frac{1}{\lambda}(S(k-1) - S(k-1)\phi(k) \\ &\{\lambda I + \phi^T(k)S(k-1)\phi(k)\}^{-1} \\ &\phi^T(k)S(k-1))\end{aligned}\quad (17)$$

단, λ 는 망각계수(forgetting factor)로서 $0 < \lambda \leq 1$ 의 값이며, 상첨자 T 는 전치행렬을 나타낸다. 초기치는

$$\theta(0) = 0$$

$$S(0) = \alpha I$$

와 같이 주어지며, α 는 충분히 큰 정수이다.

3. 실험 및 고찰

3.1 실험장치의 구성

그림2는 BLDC전동기 위치제어 시스템을 자기동조제어법으로 실현하기 위한 하드웨어 구성을 나타낸다.

실험에 사용된 컴퓨터는 32bit 퍼스널 컴퓨터이며 제어 알고리즘에 따라 계산된 제어입력치를 아날로그 신호로 변환하는 D/A 변환기 및 전동기 시스템의 출력치인 속도 정보의 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 A/D 변환기는 PCL-812 (Advantech Comp.)를 사용하였다. 전동기의 속도검출은 BLDC전동기 구동 앤드의 속도 모니터링 신호(600rpm/V)를 이용하였다. 컴퓨터와 BLDC전동기 사이에 연결된 파워 증폭기로서, BLDC전동기 드라이브(대우중공업, Z5SPCA)를 사용하였다. 표1에 실험에서 사용된 BLDC전동기의 사양을 보인다.

또한, 실험에서 목표치와 출력속도 사이의 바람직한 수렴속도를 얻기 위해 $k_d = 0.265$, $k_i = -0.265$ 로 하였고, $m_d = -0.2$, $m_i = 0.2$ 로 하여 제어를 행하였다. 컴퓨터에서 제어의 실현은 C 언어에 의해서 이루어졌고 제어주기는 10ms로 하였다.

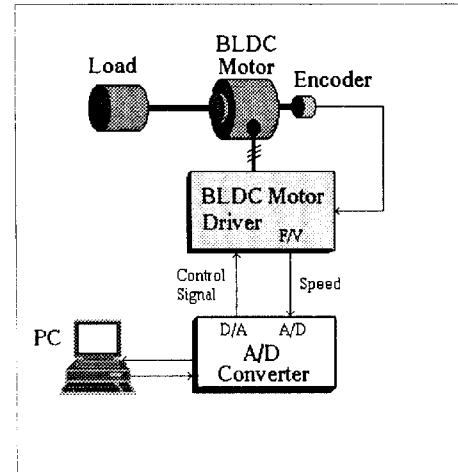


그림2 제어 시스템의 하드웨어 구성

Fig.2 Hardware configuration of control system

표1. BLDC전동기의 사양

정격 출력	50 WATT
정격 토크	0.16 Nm
연속 최대 토크	0.18 Nm
순시 최대 토크	0.47 Nm
정격 속도	3000 rpm
최대 속도	4500 rpm
회전자 관성	0.078 J(gcm ²)

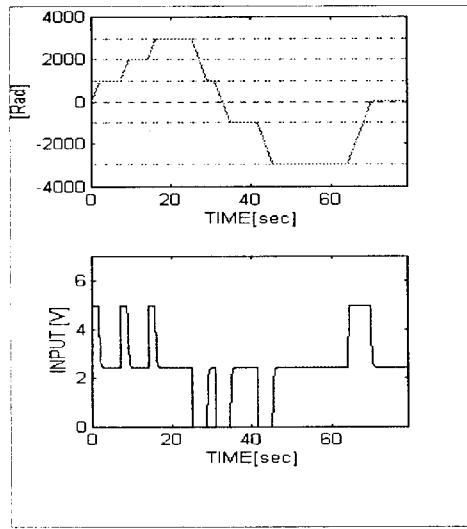
3.2 실험결과

그림3은 본 논문에서 제안한 제어칙에 의해 수행된 실험결과로서 1000rad 간격으로 스텝지령을 주었을 경우의 위치용답 및 그때의 전압지령치 또한, (b)에서는 추정된 파라미터값을 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 목표치 변경에 대해서 정밀한 위치제어가 행해지고 있음을 알 수 있다.

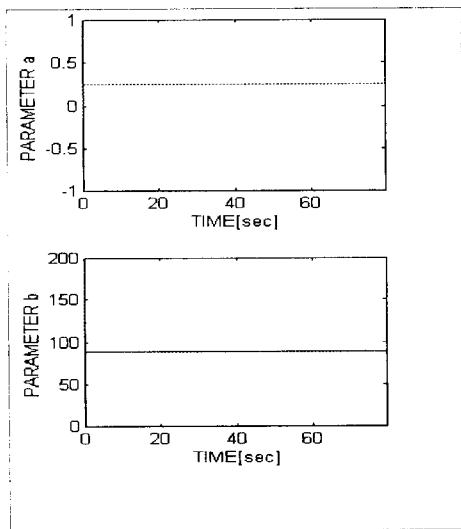
그림4 및 그림5는 반복적인 파라미터 추정 알고리즘에 사용되는 초기값 a 및 망각계수 λ 의 영향을 나타내고 있다. 망각계수 λ 는 작을수록 추정파라미터 a , b 가 안정화되는 경향을 보이고 있으며 반면, a 는 그 값이 클수록 a , b 의 값을 추정해 가는 수렴속도가 빠르게 되어 양호한 위치용답 특성을 보여 주고 있다.

또한, 외란에 대한 강인성의 평가결과 정량적인

외란 인가가 어려운 실험장치의 문제로 인하여 실험 데이터는 재제하지 않았으나 임의의 외란 인가시에 정밀한 위치제어가 실현됨을 확인하였다.



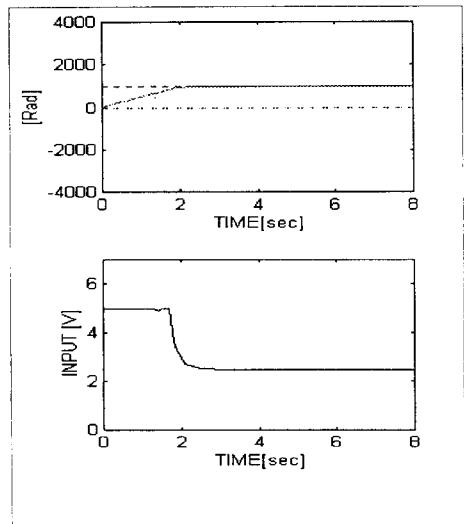
(a) 위치응답과 제어입력
(a) position response and control input



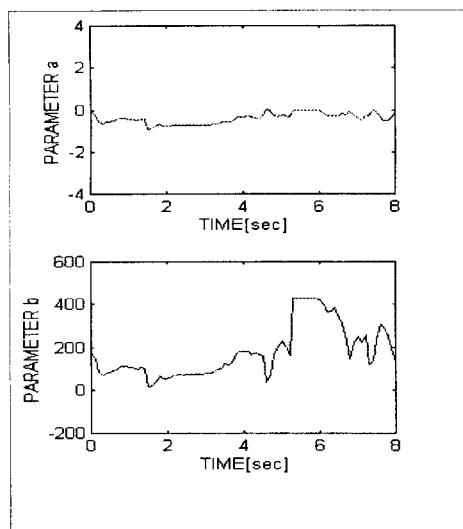
(b) 추정된 파라미터
(b) estimated parameter

그림3 목표치 변경에 대한 응답
Fig.3 Response for reference variation

$$\alpha = 100,000, \lambda = 0.01$$



(a) 위치응답과 제어입력
(a) position response and control input



(b) 추정된 파라미터
(b) estimated parameter

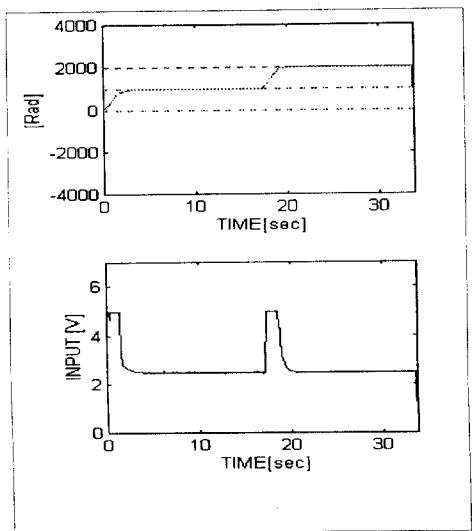
그림4 스텝지령에 대한 응답 1
Fig.4 Response for step reference 1

$$\alpha = 10, \lambda = 0.95$$

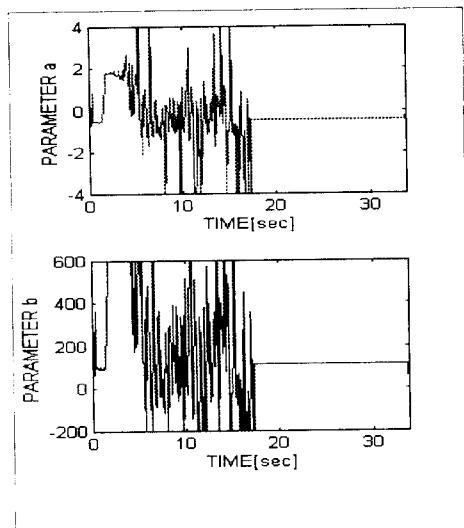
4. 결 론

본 논문에서는 시변특성의 파라미터를 갖는 서보계에 대해 자기동조제어법을 이용하여 정밀한 위치제어계를 구축하는 방법이 제안되었다. 제안방법은 시변 파라미터를 전압지령 및 속도정보만으로 간단히 실시간 추정하여, 이를 바탕으로 정밀한 위치제어가 실현됨을 보였고, 파라미터 추정 알고리즘에 사용된 각 계수들이 파라미터 추정정도에 미치는 영향도 아울러 검토하였다.

제안방식은 시스템의 모델과 속도추정 알고리즘이 극히 간결하면서도 고정도 위치제어 특성을 얻을 수 있었다. 따라서 제안방식은 시변특성의 파라미터를 갖는 정밀 위치제어계에 적용되어 파라미터 변동에 강인한 서보계 구축에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.



(a) 위치응답과 제어입력
(a) position response and control input



(b) 추정된 파라미터
(b) estimated parameter

그림5 스텝지령에 대한 응답 2
Fig.5 Response for step reference 2
 $\alpha=10$, $\lambda=0.01$

참고문헌

- [1] G.C. Goodwin and S.W. Chan, "Model Reference Adaptive Control of System Having Purely Deterministic Disturbances", IEEE Trans. AC-28(8), pp.855-858, 1983
- [2] K.S. Narendra and A.M. Annaswamy, "Robust Adaptive Control in the Presence of Bounded Disturbances", IEEE Trans. AC-31(4), PP.306-315, 1986
- [3] 藤井, 水野, "未知確定外亂を考慮した離散時間モデル規範形適應制御", 計測自動制御學會論文集, 21(2), PP.914-920, 1985
- [4] 内門, 金井, 杉山, "確定的未知外亂を含む離散時間適應制御系の設計", 計測自動制御學會論文集, 21(2), PP.131-136, 1985
- [5] F.A.Cameron & D.E.Seborg, "A Self-Tuning Controller with PID Structure", Int.J.Cont., Vol.38, No.2, pp.401-417, 1983
- [6] 中溝高好, "最小二乗法と線形回帰"コンピューターロール, Vol.23, pp.53-58, コロナ社, 1983
- [7] 김상봉, 전봉환, 정석권, "유도전동기의 강인한 속도제어계 설계", 한국정밀공학회지 제12권 제8호, pp.168-175, 1995