

# 직접 구동용 BLDC 전동기의 정밀 Robust 위치제어 및 적응형 외란 관측기 연구

高宗宣, 尹星九

## A Study of Adaptive Load Torque Observer and Robust Precision Position Control of BLDD Motor

Jong-Sun Ko and Sung-Koo Youn

### 요 약

본 논문에서는 직접 구동용 브러쉬 없는 직류 전동기(BLDD)에 있어서 외란에 강인한 위치 제어를 하기 위한 새로운 제어 방법으로 적응 제어형 외란 관측기를 제시하였다. 정밀 위치 제어를 위해서 Field-orientation 방법을 통해 선형화 하였다. BLDD 전동기는 뒤튐(backlash)이 없는 반면에 높은 가격과 비선형 특성에 의한 복잡한 제어가 필요하다는 단점이 있다. 또한 외부 외란은 전동기의 축에 직접 영향을 미치고 있다. 이 외란의 영향을 줄이기 위해서 Lyapunov 안정성 이론을 이용하였다. 이 이론을 바탕으로 제안된 시스템의 안정성을 증명하였으며, 관측기에서 취한 값을 순간적으로 등가 전류로 계산하여 정제환(feedforward)하여 보상하였다.

### ABSTRACT

A new control method for the precision robust position control of a brushless DC(BLDC) motor for direct drive motor(BLDDM) system using the asymptotically stable adaptive load torque observer is presented. A precision position control is obtained for the BLDD motor system approximately linearized using the field-orientation method. Many of these motor systems have BLDD motor to obtain no backlashes. On the other hand, it has disadvantages such as the high cost and more complex controller caused by the nonlinear characteristics. And the load torque disturbance is directly affected to a motor shaft. To reject this problem, stability analysis is carried out using Lyapunov stability theorem. Using this results, the stability is proved and load disturbance detected by the asymptotically stable adaptive observer is compensated by feedforwarding the equivalent current having the fast response.

**Key Words:** Precision position control, Load torque observer, BLDD, Adaptive torque observer

### 1. 서 론

일반적으로 BLDD(Brushless Direct-Drive) 전동기는 많은 자극을 가지고 있어 상대적으로 반경이 크고 저속 구동이 가능하며 정적 토오크가 매우 크다. 그러나 수학적으로는 BLDC (Brushless Direct Current) 전동기와 같은

구조를 가지고 있으며 파라미터가 다르다. 최근 산업용 응용 분야에서 작고 강력한 구동기의 필요에 의해 DC 전동기는 BLDC 전동기로 대체 되어가고 있다. BLDC 전동기는 PM(Permanent Magnet) 직류 전동기와 비슷한 속도-토크 특성을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 같은 출력을 갖는 PM 직류 전동기와 비교하여 낮은 관성능률, 적은 잡음과 크기

가 작아진다는 장점을 가지고 있다.<sup>[2]</sup> 반면 비선형 특성에 의해 복잡한 제어가 필요하고, 가격이 비싸다는 단점을 가지고 있다.<sup>[3]</sup> 제어방식에서 구현이 간단한 PI 제어가 일반적으로 많이 사용되고 있으나, 추적 제어(tracking controller) 문제에서 고성능을 얻기가 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 출력 오차를 사용한 상태 변수를 추가 변환함으로써 추적 제어를 구현함이 잘 알려져 있다.<sup>[4]</sup> 이 방법은 PI 제어기에서 trial-and-error 방법을 사용하는 것보다 최적 제어 이론(optimal control theory)를 사용하여 이득을 구하므로 더 효과적이다. 한편 실제 값을 알 수 없고, 찾아내기 어려운 입력에 대해서 관측기가 연구되어졌다.<sup>[5]</sup> 외란 관측기와 퍼지 논리 제어기 또한 고정 이득을 사용한 제어기에서 사용된다.<sup>[1,8]</sup> 그러나 좀더 정밀한 위치제어를 위하여서는 자속이 관련된 파라미터는 문제를 발생시킨다. 따라서 본 논문에서는 모델 추종형 적응 관측기를 사용하여, 실제 값을 알 수 없는 파라미터와 외란 때문에 생기는 미소한 오차를 줄였다.

## 2. BLDC 전동기의 수학적 모델

일반적으로, 위치 제어에서 소마력 BLDC 전동기는 PM 동기 전동기와 같이 해석하고 있다. 고정자는 중성점(neutral point)이 없는 3상 Y-결선으로 이루어지고, 회전자는 영구자석으로 만들어 졌다. Field-oriented control에 의해서  $i_m$ 를 0으로 만들 수 있고,<sup>[3]</sup> BLDC 전동기의 시스템 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\omega}_r = \frac{3}{2} \frac{1}{J} \left( \frac{P}{2} \right)^2 \lambda_m i_{qs} - \frac{B}{J} \omega_r - \frac{P}{2J} T_L \quad (1)$$

$P$  : pole 수

$J$  : 관성

$B$  : 점성마찰계수

$k_t$  : 토오크 상수

$\lambda_m$  : 자속

$\omega_r$  : 회전자 각속도

$i_{qs}$  : q-상 고정자 전류

$T_e$  : 전동기 토오크(motor torque)

$T_L$  : load torque

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_m i_{qs} \quad (2)$$

$$= k_t i_{qs} \quad (3)$$

위치 제어에서 전류 제어를 하기 때문에 속도 방정식을 (1)과 같이 표현할 수 있고, 회전자 위치 방정식은 다음과 같다.

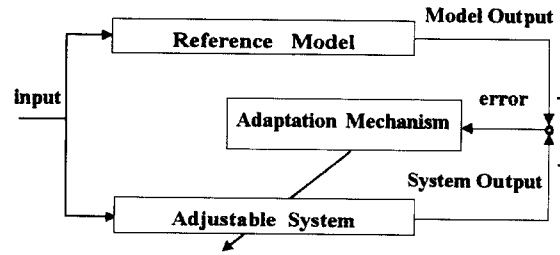


그림 1 모델 추종형 적응 제어의 기본 구성도

Fig. 1 Basic configuration of the MRAC(Model Referencing Adaptive Control)

$$\dot{y} = \omega_r \quad (4)$$

Field-orientation를 수행하기 위해서 각 3상 전류는 독립적으로 만들어져야 한다. 이 전류 명령은 회전자 기준의 제어 전류 명령치를 고정자 기준으로 바꿔 구할 수 있다.

## 3. 제어 알고리즘

추적 제어에서 목표값은 계단 함수이다. 시스템 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax(t) + bu(t) \quad (5)$$

$$\dot{y} = cx(t) \quad (6)$$

여기서 행렬  $A, b, c$ 는  $n \times n, n \times 1, 1 \times n$ 행렬이다. 일반적으로 최적제어는 상태 변수를 변환해서 레귤레이터 문제를 푸는데 사용되어진다. 새로운 상태를  $z = y - y_r$ 로 정의하고, 추가된 상태변수를 포함하여 최적제어를 구현하면 이것은 추적 제어가 된다. 여기서  $y_r$ 은 회전자 위치 목표값이다.<sup>[6]</sup>

또 제어 입력  $u = -kx - k_1 z$ 이다. 여기서 상태 변환의 제어기 이득  $Q, R$ 을 최적 제어 법칙에서 구한다. 외란에 의한 오차를 빨리 줄이는데 큰 변환 이득이 필요하게 되는데, 이것은 아주 큰 전류를 만들게 된다. 만일 부하 토오크  $T_L$ 을 알게 되면  $T_L = k_t i_{qs}$ 에 의하여 등가 전류  $i_{qs}$ 를 구할 수 있다. 그림 2와 같이 외란의 영향을 등가의 q-상 전류로 정제환(feed-forward) 함으로써 보상하였다. 일반적으로 시스템의 모든 입력을 알면 상태의 추정(estimation)을 할 수 있다. 그러나 실제 시스템에서 많은 경우에 약간의 입력은 정확한 값을 알 수 없거나 찾아내기 힘든 경우이다. 그래서 0-관측기를 사용한다.  $T_L$ 을 알 수 없다고 생각하고, 상수라고 가정하면 관측기의 방정식은 다음과 같다.

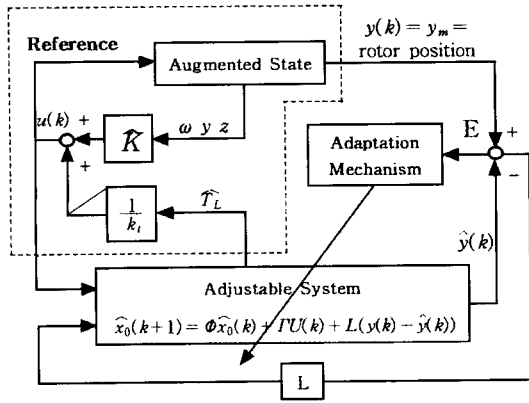


그림 2 제안한 적응형 외란 관측기의 구조  
Fig. 2 Configuration of the proposed adaptive torque observer

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{y}} \\ \dot{\hat{T}}_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{B}{J} & 0 & -\frac{P}{2J} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{y} \\ \hat{T}_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 \\ \frac{P}{2J} \\ 0 \end{pmatrix} i_{qs} + L \begin{pmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{y} \\ \hat{T}_L \end{pmatrix} \quad (7)$$

계산하는 시간을 줄이기 위해서 dead-beat 관측기로 먼저 계산하였다. Cayley-Hamilton 정리에서  $\Phi_c = \hat{\Phi} - L\hat{c}$  의  $\Phi_c^n = 0$  를 이용하였다. 궤환 이득은  $L = P(\Phi)W_0^{-1}[00\dots 1]$  의 Ackermann 공식을 이용하여 극점을 지정하여 얻었다. 관측기의 궤환 이득은 nominal parameter 값을 이용하여 얻었고, 여기에는 확실한 값과 자속과 같은 확실하지 않은 값도 포함되어 있다. 그래서 적응 제어기를 사용하게 되었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 적응 제어 방식에 의해서 기준 모델과 가변 시스템의 차를 줄이도록 했다<sup>[7]</sup>. 이 시스템에서 기준 모델을 실제 시스템으로 하고, 적응 제어형 관측기를 가변 시스템으로 해석하였다. 식 (7)은 다음과 같이 나누어서 생각할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + B_1u - B_2\hat{T}_L \quad (8)$$

$$\dot{z} = c_1x - y_r \quad (9)$$

여기서

$$u = -K_1x - k_2z + k_3\hat{T}_L$$

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{B}{J} & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad B_1 = \begin{pmatrix} k_1 \\ \frac{P}{2J} \\ 0 \end{pmatrix} \quad B_2 = \begin{pmatrix} \frac{P}{2J} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$c_1 = (0 \ 1)$ 이다.

위 식에서  $K_1, k_2, k_3$  는  $1 \times n$  벡터와 두 개의 스칼라 양이다. 같은 방식으로 식 (7)의 적응 제어 관측기도 나누어서 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \hat{B}_1u - B_2\hat{T}_L + L_1(c_1x - c_1\hat{x}) \quad (10)$$

$$\dot{\hat{T}}_L = l_3(c_1x - c_1\hat{x}) \quad (11)$$

여기서  $\hat{\cdot}$  는 추정값을 나타내고 있다. 적응 제어 구조를 알고자 Lyapunov 이론을 이용하였다. 식 (8)에서 (10)을 통해, 회전자 속도와 회전자 위치의 추정 오차는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= (A - L_1c)e_1 + (B_1 - \hat{B}_1)u - B_2(T_L - \hat{T}_L) \\ &= Ge_1 + (B_1 - \hat{B}_1)u - B_2(T_L - \hat{T}_L) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서  $e_1 = x_1 - \hat{x}_1$ ,  $G = A - L_1c$ 이다. 새로운 Lyapunov 함수 후보자  $V$ 를 다음과 정의한다.

$$\begin{aligned} V &= e_1^T P e_1 + \frac{1}{\alpha} (B_1 - \hat{B}_1)^T (B_1 - \hat{B}_1) \\ &\quad + \frac{1}{\beta} (T_L - \hat{T}_L)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서  $P$ 는 양의 행렬이고  $\alpha$ 는 양의 상수이다. 위 식을 시간에 대해서 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_1^T \left( (A - L_1c)^T P + P(A - L_1c) \right) e_1 \\ &\quad + 2 \left( e_1^T u + \frac{1}{\alpha} \Delta B_1^T \right) \Delta B_1 - 2 \left( e^T B_2 + \frac{1}{\beta} \Delta \hat{T}_L \right) \Delta T_L \end{aligned} \quad (14)$$

이 된다. 여기서  $\Delta B_1 = B_1 - \hat{B}_1$ ,  $\Delta T_L = T_L - \hat{T}_L$ 이다. 식 (14)에서 두 번째 값은 다음과 같이 영으로 만들고,

$$\dot{\hat{B}}_1^T = -\alpha e_1^T \quad (15)$$

세 번째 값은 다음과 같이 0으로 하면 적응 제어 원리를 만족하게 된다.

$$\dot{T}_L = -\beta e_1^T B_2 = -\beta'(\omega_r - \hat{\omega}_r) \quad (16)$$

여기서  $\beta' = \frac{P}{2J} \beta > 0$  이다. 이상의 결과들로부터 다음과 같은 새로운 적응 제어형 외란 관측기를 얻을 수 있다.

$$\dot{T}_L = l_3(c_1 x_1 - c_1 \hat{x}_1) - \beta'(\omega_r - \hat{\omega}_r) \quad (17)$$

만일 최적 이론에 의해 관측기 이득 행렬  $L_1$ 을 결정하면, 식 (14)의 첫 번째 값은 음의 값으로 된다. 다음과 같은 식의 양의 행렬  $R$ 이 존재한다고 가정하면,

$$G^T P + PG = -R \quad (18)$$

Lyapunov 함수 후보자의 미분 함수는 다음과 같이 쓸 수 있을 것이다.

$$\dot{V} = -e_1^T (R) e_1 \leq 0 \quad (19)$$

이상으로  $e_1$ 은 점근 안정하다. 따라서  $e_1$ 이 영으로 수렴하도록  $L_1$ 을 정하고 추정된 부하 토크 오차가 적도록 하면 최대 위치 오차는 감소된다. ARMA 모델에 의해 전동기의 이산치 방정식은 다음과 같다.

$$y(k+1) = [y(k) \ y(k-1) \ y(k-2)]^T [A_1 \ A_2 \ A_3]^T + [u(k) \ u(k-1)]^T [B_1 \ B_2]^T \quad (20)$$

여기서  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2$ 은  $1, a_1, a_2/h, -a_1, a_2/h, b_2, a_3, b_1$ 이다<sup>19</sup>. 위 경우에서  $B_1, B_2$ 은  $\lambda_m$ 이 포함되어 있으므로 정확한 값을 얻을 수 없어서 가상 값으로 표현한다. 가상 출력을 정의함으로써 추정한 행렬의 차수를 줄일 수 있다.

가상 출력  $Y$ 와 모델 출력  $Y_m$ 은 실제 출력  $y$ 와 알고 있는 값의 차에서 구할 수 있다.

$$Y(k+1) = (y(k+1) - \Phi_1 \hat{\Theta}_2) = \Phi_2 \hat{\Theta}_2 \quad (21)$$

$$Y_m(k+1) = b_2 i_{qc}(k) + a_3 b_1 i_{qc}(k-1) \quad (22)$$

$E = Y(k+1) - Y_m(k+1)$ 을 사용하여 gradient를 구할 수 있다.

$$\dot{\hat{\Theta}}_2(k+1) = \hat{\Theta}_2(k) - h \begin{pmatrix} \alpha_1 i_{qc}(k) \\ \alpha_2 a_3 i_{qc}(k-1) \end{pmatrix} E \quad (23)$$

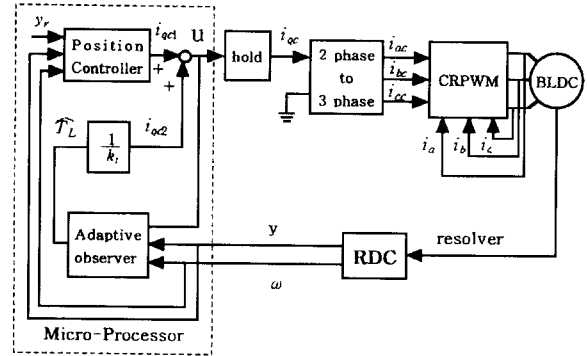


그림 3 제안한 시스템의 블록 다이어그램  
Fig. 3 Block diagram of the proposed digital position control system

여기서  $\alpha_1$ 과  $\alpha_2$ 는  $a$ 의 원소이다. 제안한 적응형 외란 관측기의 구조를 그림 2에 나타내었다. 동작하는 동안, 식 (20)의 가상 출력  $Y$ 와 모델 출력  $Y_m$ 은 계속 비교되어 진다. 이 식에서 얻어진 오차  $E$ 는 외란 관측기의 적응 알고리즘에 사용된다. 이 적응 메카니즘은 외란 관측기 출력이 목표 모델인 외란 시스템의 외란과 같도록 파라미터를 조정한다. 제안한 제어기의 블록 다이어그램은 그림 3에 나타냈다. 여기서 제어기는 두 부분으로 나누어져 있다. 위치 제어기는 추가된 (augmented) 상태 궤환으로 만들었다. 추가된 상태  $z(k+1)$ 의 이산치 형태는 평행사변형 방식을 이용하여 실현하였다. 전력 변환기는 2상-3상 변환기와 CRPWM으로 된 field-orientation 방법으로 제어한다.

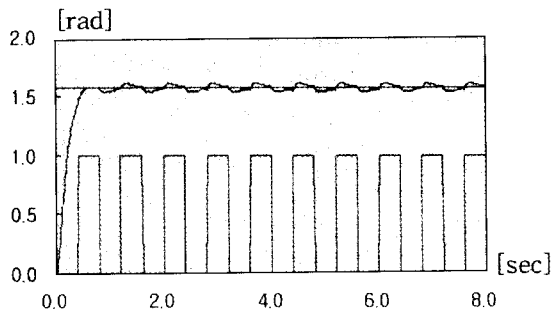
#### 4. 모의 실험 결과

모의 실험에서 사용한 BLDD 전동기의 파라미터는 다음과 같다.

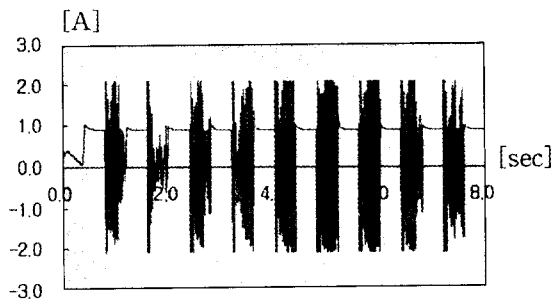
- Power : 120watt
- Rated current : 1.7A
- Inertia :  $1.56 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$
- Stator resistance : 28.4Ω
- Time constant : 7.4ms
- Rated torque : 11.00Nm

히스테리시스 대역폭은 0.05 [A]으로 선택하고, 샘플링 주기  $h$ 는 0.2 [ms]으로 결정하였다. trial and error 후의 가중 행렬  $R = 1$ 로 선택하고, 최적 이득 행렬  $k = [0.0059 \ 0.6579 \ 3.2602]$ 가 되었다.

nominal dead beat 관측기 이득  $L$ 은  $L = [595.1290$

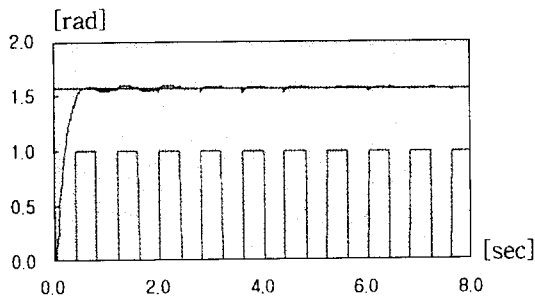


(a)

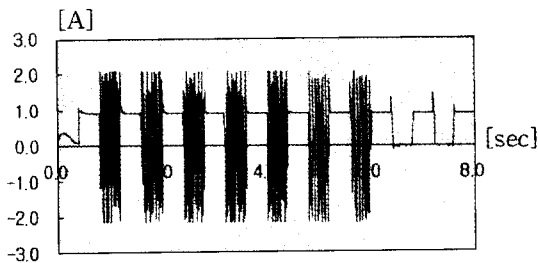


(b)

그림 4 고정 이득 관측기의 q-상 전류와 회전자 위치  
Fig. 4 Rotor position with load torque and q-phase current command of the fixed gain observer



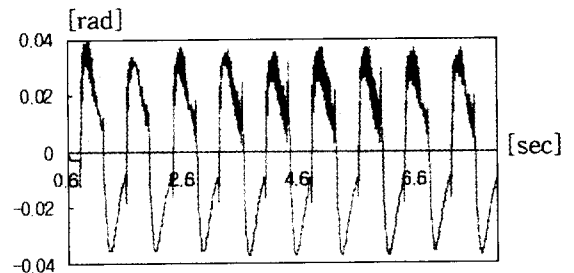
(a)



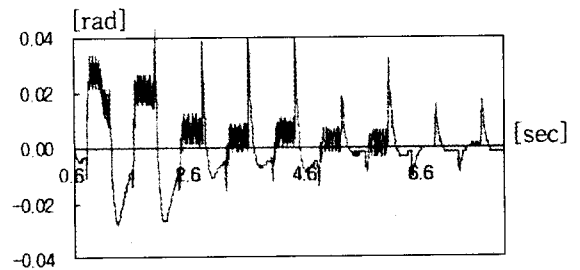
(b)

그림 5 제안한 적응 제어형 관측기의 q-상 전류와 회전자 위치  
Fig. 5 Rotor position with load torque and q-phase current command of the proposed adaptive observer

2.1623 -107.0533]이다. 적응 비율  $\alpha_1, \alpha_2, \beta$  는 0.4, 0.2, 0.14와 같이 얻었다. 고정된 이득을 사용하는 기존의 알고리즘과 제안한 알고리즘을 사용한 모의 실험 결과는 그림 4에서 그림 6에 나타내었다. 여기서 파라미터 변화량은 약 25%로 선정하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 회전자 위치의 계단 함수 응답은 부하 토크  $T_L$ 의 변화에 민감하게 반응하였다. 그림 4(a)에서 부하 토크의 변화는 0.04 [rad]의 위치 오차를 발생하는 것을 나타내 주고 있다. 이 원하지 않는 오차는 확실하지 않은 파라미터의 변화에 의해서 발생하는 것이다. 그런데 본 논문에서 제안한 시스템에서는 오차가 0.019 [rad]까지 줄은 것을 알 수 있다. 이 결과는 식 (23)의 적응 구조로 적응 제어형 외란 관측기를 feedforward 보상하여 얻은 것으로 매우 안정적이며 정밀한 위치 제어가 됨을 보인다.



(a)



(b)

그림 6 고정 이득 관측기와 제안한 적응 제어형 관측기의 회전자 위치 오차

Fig. 6 Rotor position errors of the fixed gain observer and proposed adaptive observer

## 5. 결론

모델 추종형 적응 제어를 이용하여 외란 관측기를 사용한 시스템이 BLDD 진동기의 위치 제어에서 더 좋은 특성을 나타내는 것을 보였다. 또한 추가된 상태 변수 궤환은 이산 제어에서 최적의 이득을 구하는데 사용됐다. 고정된 이득을 사

용하는 경우와 적응 제어형 관측기를 사용한 경우의 시스템 응답의 비교는 앞에서 보였다. 이 부하 토오크 관측기는 다양한 마찰과 부하 토오크 등의 외란에 의해 발생하는 위치 오차를 정상 상태와 과도 상태에서 정제환을 이용하여 제거한다. 또 Lyapunov 안정도 판별이론에 의해서 본 시스템은 점근적 안정임을 보였고, 이를 통해 새로운 적응 제어형 토오크 관측기를 제안하였다. 모의 실험에 의해 불확실한 파라미터에 의해서 생기는 회전자의 위치 오차는 단계적으로 줄어들고 있음을 보였다. 이산 제어기의 이득은 z-domain의 전체 시스템 해석을 통하여 최적 제어를 사용하여 구했다.

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

### 참고 문헌

- [1] Jong Sun Ko, Jung Hoon Lee, Se Kyo Chung, and Myung Joong Youn, "A Robust Position Control of Brushless DC motor with Dead Beat Load Torque Observer," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 5, pp.512~520, 1993.
- [2] Kusko Alexander and Peeran Syed M., "Brushless DC Motors Using Unsymmetrical Field Magnetization," IEEE Trans. Industry Applications, Vol. IA-23, No. 2, pp.319~326, 1987.
- [3] D. W. Novotny and R.D. Lorentz "Introduction to field orientation and high performance AC drives," IAS Tutorial Course, 1986.
- [4] Karl J. str m Bj rn Wittenmark, Computer controlled system, Prentice Hall, pp.198~212, 1984.
- [5] Meditch J. S. and Hostetter G. H., "Observer for systems with unknown and inaccessible inputs," INT. J. Control, Vol. 19, No. 3, pp.473~480, 1974.
- [6] Davison Edward J., "The Output Control of

Linear Time-Invariant Multivariable Systems with Unmeasurable Arbitrary Disturbances," IEEE Trans. on Automatic Control, AC-17, No. 5, pp.621~630, 1972.

- [7] Yoan D. Landau, Adaptive control : the model reference approach, Marcel Dekker, Inc., pp.18~30, 1979.
- [8] Jong Sun Ko, and Myung Joong Youn, "Simple Robust Position Control of BLDD Motor using Integral-Proportional plus Fuzzy Speed Controller," International Journal of MECHATRONICS, Vol. 8, No. 1, 1998, Feb.
- [9] Jong Sun Ko, Jung Hoon Lee, and Myung Joong Youn, "A Robust Position Control of Brushless DC motor with Adaptive Load Torque Observer," IEE Proc. Electric Power Applications, Vol. 141, No. 2, pp.63~70, 1994, Mar.

### 〈 저 자 소 개 〉



#### 고종선(高宗宣)

1960년 3월 20일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업, 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1994년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1983~1995년 삼성 전자 생산기술센터 선임연구원. 1995~1996년 삼성그룹 삼성경영기술대 사내 교수(부장). 1996~현재 원광대학교 공과대학 전기전자공학부 교수.



#### 윤성구(尹星九)

1973년 5월 17일생. 1998년 원광대 전자공학과 졸업(공학사). 현재 원광대학교 공과대학 전기전자공학부 석사과정.