

유도전동기의 위치제어를 위한 개선된 바이너리 외란관측기

한윤석, 김영석, 김상욱*

인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부, 인하공업전문대학 전기과*

The Improved Binary Disturbance Observer for the Position Control of Induction Motors

Yoon-seok Han, Young-seok Kim, Sang-uk Kim*

Inha Univ., Inha junior College*

Abstract

A control approach for the robust position control of induction motors based on the improved binary disturbance observer is described. The conventional binary disturbance observer is used to remove the chattering problem of a sliding mode disturbance observer. However, the steady state error may be existed in the conventional binary disturbance observer because it estimates external disturbance with a constant boundary layer. In order to overcome this problem, a new binary disturbance observer with an integral augmented switching hyperplane is improved. The robustness is achieved, and the continuous control is realised by employing the improved observer without the chattering problem and the steady state error. The effectiveness of the improved observer is confirmed by the comparative experimental results.

1. 서 론

최근 고성능 산업 응용분야에 서보운전용으로 유도전동기가 널리 응용되고 있다. 이러한 유도전동기의 구동에 있어서 요구되는 것은 파라미터 변동과 부하 토크 외란에 견실하면서도 빠른 응답속도를 가지는 제어기이다. 이러한 제어 목적 달성을 위해 가변 구조계의 이론을 이용한 슬라이딩모드 제어가 널리 쓰이고 있다. 슬라이딩모드 제어는 불연속적인 제어입력을 사용하여 상태 공간상에 설정한 슬라이딩면에 시스템의 상태를 구속시킴으로써 견실한 제어성능을 얻을

수 있고, 설계가 용이하고 구현이 간단하다는 장점을 가지고 있다^{[1]~[2]}.

슬라이딩모드 제어의 이러한 장점은 전동기 제어기뿐만 아니라 관측기^{[3]~[4]}에도 널리 적용되고 있다. 그러나 많은 장점에도 불구하고 연산에 의한 제어 지연, 스위칭속도의 한계 등으로 인하여 실제 시스템에서는 원하지 않는 떨림현상이 발생한다. 이러한 슬라이딩모드 제어의 단점을 제거하기 위해 바이너리 제어가 적용된다.

바이너리 제어는 상태 공간상에 초평면을 중심으로 원점으로 수렴하는 두 개의 직선에 의해 일정 영역을 설정하고 이 영역 내에서 연속적으로 시스템의 구조를 전환함으로써 파라미터 변동에 견실하면서 연속적인 제어입력을 생성하여 떨림을 저감시킬 수 있다. 그러나 바이너리 제어를 이용한 바이너리 위치제어기^{[5]~[6]}는 영역내에서 이득이 작기 때문에 외부 외란등에 대한 견실성은 약해진다. 그러므로 이러한 견실성의 희생분은 외란관측기를 사용하여 제어입력을 앞먹임(feed forward)함으로써 보상한다. 적용하는 외란관측기로는 여러 가지를 고려해 볼 수 있으나, 견실성과 설계 구현의 용이성 면에서 슬라이딩모드 외란관측기^[7]가 최근 많이 적용되고 있다. 그러나 슬라이딩모드 외란관측기는 제어기와 마찬가지로 추정 알고리즘에 불연속 항을 포함함으로써 추정의 외란에 떨림이 존재하게 된다. 그리고 이 떨림은 바로 속도 및 위치의 떨림으로 직결되게 된다. 이러한 관측기의 문제점을 제거하기 위하여 제어기와 유사하게 바이너리 외란관측기를 적용한다.

기존의 바이너리 외란관측기^[8]는 슬라이딩모드

외란관측기에 비해 추정외란의 떨림을 제거하였다. 그러나 바이너리 제어기에서와 달리 기존의 바이너리 외란관측기에서는 연속적인 제어입력을 얻기위해 설정된 영역이 원점으로 수렴하지 못하므로 추정에 대한 정상상태 오차가 남을 수 있게된다.

따라서 본 논문에서는 영역을 원점으로 수렴하여 추정치에 대한 떨림을 저감하면서 정상상태 오차가 남지 않도록 하는 개선된 바이너리 외란관측기를 제안한다. 제안하는 바이너리 외란관측기를 사용한 바이너리 위치제어기는 외부외란에 견실하면서도 떨림이 없는 고정도 위치제어를 가능하게 할 수 있다.

슬라이딩모드 외란관측과 기존의 바이너리 외란관측기, 그리고 제안한 바이너리 외란관측기의 관측기의 특성을 실험을 통하여 비교하고 제안된 관측기의 타당성을 확인하였다

2. 바이너리 제어기

위치제어를 위한 유도전동기의 오차방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b(t) \end{bmatrix} u \quad (1)$$

여기서,

$$x = \theta_{ref} - \theta \quad (\theta_{ref} : \text{지령위치}, \theta : \text{현재위치})$$

$$\dot{x} = -\omega_r \quad (\omega_r : \text{현재속도})$$

$$a(t) = D(t)/J(t), \quad b(t) = K_t/J(t), \quad u = i_q^*$$

$D(t)$: 점성마찰계수, $J(t)$: 관성계수

K_t : 토크상수, i_q^* : 토오크 지령전류

$$\mathbf{x}(t) = [x(t), \dot{x}(t)]^T \in R_x^2 : \text{상태 벡터}$$

이때 시스템 파라미터 $a(t)$ 와 $b(t)$ 는 다음과 같은 범위내에서 변동하는 것으로 가정한다.

$$a_{\min} \leq a(t) \leq a_{\max}, \quad b_{\min} \leq b(t) \leq b_{\max} \quad (2)$$

식(1)에서 외부 외란은 3장의 외란관측기에서 고려하고, 이장에서는 고려하지 않는다.

위치 및 속도 되먹임을 갖는 연속관성형 보조루프의 바이너리 제어기에서 주루프 제어기 C_u 와 외부루프 제어기 C_μ 는 각각 다음과 같은 알고리즘을 갖는다.

$$C_u : \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = k_1(t)|x(t)| + k_2(t)|\dot{x}(t)| \quad (3)$$

$$k_i(t) = k_i^0 \mu_c(t) \quad i = 1, 2$$

$$C_\mu : \dot{\mu}_c(t) = -\alpha_c \{ \mu_c + \text{sat} \lambda_c \} \quad (4)$$

여기서, $\sigma_c = -c\dot{x} - x$, $\lambda_c = \sigma_c / (\delta \beta |x|)$,

$$\sigma_c^-(t) = \sigma_c(t) - \delta \beta |x(t)|,$$

$$\sigma_c^+(t) = \sigma_c(t) + \delta \beta |x(t)| : \text{영역의 경계}$$

$$0 < \delta < 1, \quad \beta = [\beta_1, \beta_2], \quad 0 < \beta_i \leq 1, \quad i = 1, 2$$

한편, 주루프 제어기의 이득 k_i 와 외부루프 제어기의 이득 α_c 는 영역 내에 들어온 시스템의 상태가 영역 밖으로 벗어나지 않도록 하는 역할을 한다. 그러므로 주루프 제어기의 이득 k_i 는 영역의 경계에서 즉, $\sigma_c^+ = 0$ 또는 $\sigma_c^- = 0$ 에서 $\sigma_c \cdot \dot{\sigma}_c < 0$ 를 만족하도록 설정하고, 외부루프 제어기의 이득 α_c 는 $\mu_c(t)$ 가 영역의 경계에서 $|\mu_c| \geq 1 - h$ 의 크기를 만족하도록 설정한다.

제어기의 이득들은 다음과 같은 결과를 얻는다. 주루프 제어기 이득 :

$$k_1^0 > 0 \quad (3)$$

$$k_2^0 > \frac{|1 - ca|}{cb(1 - h)} \quad (4)$$

보조루프 제어기 이득 :

$$\alpha_c \geq 2 \times \max \frac{|\tilde{c}b|}{\delta \beta_i} (k_i^0 + \overline{k_i^0}) \ln \frac{4}{2h - 1} \quad (5)$$

여기서,

$$\tilde{\mathbf{c}} = \mathbf{c} + \lambda_c \delta \beta \mathbf{S}^x, \quad \mathbf{S}^x = \begin{bmatrix} \text{sgn}x(t) & 0 \\ 0 & \text{sgn}\dot{x}(t) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{a} = [a^1 \ a^2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = [0 \ b(t)]^T,$$

$$\overline{k_i^0} = \max \sup | \tilde{\mathbf{c}} \mathbf{a}^i(t) | / | \tilde{\mathbf{c}} \mathbf{b}(t) |, \quad i = 1, 2$$

$$\mathbf{c} = [1, c], \quad c > 0, \quad \frac{1}{2} \leq h < 1$$

제어기의 이득들이 식(3)~(5)를 만족하면, 영역 내에 들어온 시스템은 파라미터 변동에 관계없이 영역내에 머무르며 원점으로 수렴하게 된다.

3. 바이너리 외란관측기

3.1 바이너리 외란관측기

유도전동기의 위치제어에 있어서 제어기의 샘플링 주파수가 외란의 변화에 비하여 충분히 빠르다는 가정 하에서 속도와 외란을 상태변수로 한 다음과 같은 방정식을 세울 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{T}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & d \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ T_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (6)$$

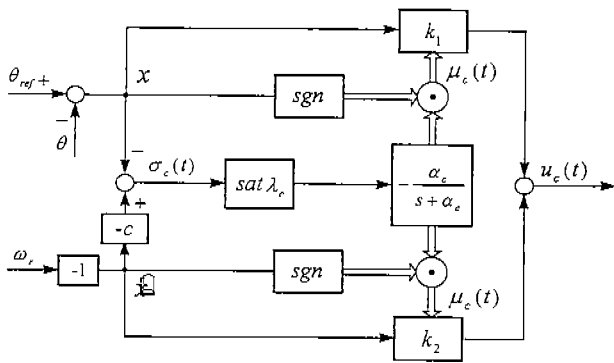


그림 1 바이너리 제어기의 블록도

Fig. 1 A block diagram of the Binary control

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ T_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

파라미터들은 식 (2)와 (8)의 범위 내에서 변동하는 것으로 가정한다.

$$T_{imin} \leq T_i \leq T_{imax} \quad (8)$$

식 (6)의 시스템은 가관측이므로 관측기 이론에 근거하여 다음과 같은 바이너리 외란관측기 (Binary Disturbance Observer:BDO)를 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{T}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & d \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} v \\ -Lv \end{bmatrix} \quad (9)$$

BDO의 구성은 위치제어기와 마찬가지로 연속 관성형 보조루프를 갖는 이원제어 알고리즘을 이용하였다.

연속 관성형 바이너리 외란관측기의 주루프와 보조루프는 다음과 같다.

$$v = K_o \mu_o |\omega - \hat{\omega}| \quad (10)$$

$$\dot{\mu}_o = -\alpha_o \{ \mu_o + sat \lambda_o \} \quad (11)$$

여기서, $\lambda_o = \frac{\sigma_o}{\delta_o |e_2|}$, $0 < \delta_o < 1$

바이너리 외란관측기는 식 (10), (11)의 추정 알고리즘을 가지므로 슬라이딩모드 외란관측기 (Sliding Mode Disturbance Observer:SDO)와 달리 불연속적인 특성이 없다. 위에서 K_o 와 α_o 는 관측기의 주루프·외부루프 이득이다.

관측기의 오차는 식 (12)로 나타낸다. 또한, 오차를 적분한 값을 식 (13)으로 나타낸다.

$$e_1 = \omega - \hat{\omega} \quad (12)$$

$$e_2 = \int e_1(\tau) d\tau \quad (13)$$

식 (12)와 (13)을 이용하여 관측기의 초평면과 영역의 경계를 다음과 같이 설정한다.

$$\sigma_o = -ze_1 - e_2, \quad z > 0 \quad (14)$$

$$\sigma_o^+ = \sigma_o - \delta_o |e_2| = 0, \quad \sigma_o^- = \sigma_o + \delta_o |e_2| = 0 \quad (15)$$

기존의 BDO에서는 관측기 초평면 σ_o 의 차수가 낮아 원점으로 수렴하는 영역을 설정하는 것이 불가능하였기 때문에 영역의 경계식을 초평면과 수평으로 설정하였다. 따라서 추정의 정상 상태값에서는 오차가 원점으로 수렴하는 것을 보장할 수 없다. 그러나 개선된 BDO는 식 (14)에서와 같이 차수가 기존의 BDO보다 높아 원점으로 수렴하는 영역을 설정할 수 있으므로 정상 상태 오차가 줄어든다. 그림 2는 개선된 BDO의 오차궤적을 나타내었다.

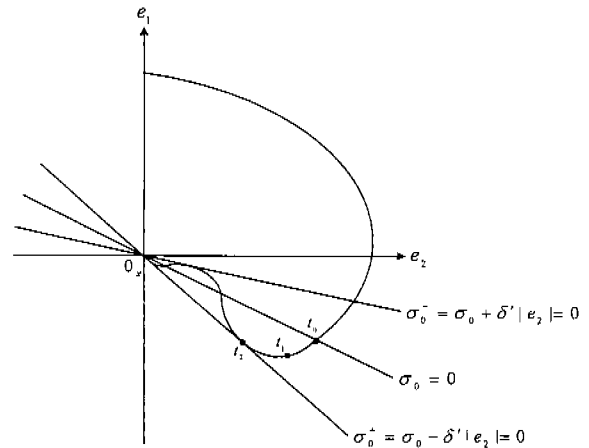


그림 2 제안한 BDO의 오차궤적

Fig. 2. Error trajectory of the proposed BDO

3.2 바이너리 외란관측기의 이득설정

관측기의 주루프 이득은 제어기와 유사하게 구할 수 있다. 이득 K_o 는 제어기와 마찬가지로 영역 내에 들어온 시스템의 상태가 영역 밖으로 벗어나지 않도록 하는 역할을 하므로, 관측기 영역의 경계 즉, $\sigma_o^+ = 0$ 또는 $\sigma_o^- = 0$ 에서 $\sigma_o \cdot \dot{\sigma}_o < 0$ 를 만족하도록 구하면 된다.

만약 $\sigma_o^+ = 0$ 의 경우라면 $\dot{\sigma}_o^+ = \sigma_o - \delta_o |e_2|$ 이므로 다음의 관계가 성립한다.

$$\sigma_o \cdot \dot{\sigma}_o =$$

$$\sigma_o \left[\left(a\xi + \frac{1}{z} \xi^2 \right) e_2 + K_o \mu_o - \xi |e_2| \right] < 0 \quad (15)$$

표 1 3상 유도전동기 사양

Table 1 Parameters of three phase induction motors

정격전압	220/380V	R_s	1Ω
정격전류	4.8/8.3A	R_r	0.52Ω
정격속도	1720rpm	L_s	110mH
출력	2.2Kw	L_r	103mH
극수	4pole	M	103mH

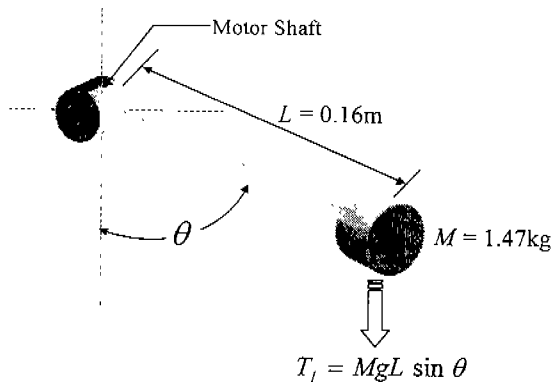


그림 4 외부외란을 인가하기 위한 기계장치
Fig. 4 Mechanical arrangement to apply the external disturbance

력을 보이고 있으나 SDO의 불연속적인 추정특성이 추정외란에 나타나고, 이는 바로 토오크분지령전류에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다

그림 6은 기존 BDO에 대한 실험결과이다. 바이너리 이론을 적용하였기 때문에 그림 7 (b), (c)와 비교했을 때 추정외란값에는 불연속적인 특성은 없으나 정상상태 오차가 발생한다. 그리고 제어입력전류 역시 정상상태 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 제어입력전류의 정상상태 오차는 위치오차를 발생케한다.

그림 7은 개선된 BDO에 대한 실험결과이다. 추정외란값에 불연속향이 없으므로 그림 5와 비교하였을 때 떨림이 없고, 그림 6과 비교하였을 때 정상상태 오차가 발생하지 않는다. 그리고 제어입력전류에도 역시 오차가 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 제안한 위치제어시스템은 외부외란에 견실하면서도 고정도의 위치제어를 할 수 있는 것을 확인할 수 있다

5. 결 론

본 연구에서는 기존 바이너리 관측기의 정상

상태 오차를 제거하기 위한 개선된 바이너리 외란 관측기를 제안하고, 이를 이용한 유도전동기의 위치제어 시스템을 구현하였다. 제안된 제어기 및 관측기의 성능을 비교 검토하기 위하여 부하실험을 하였으며 이를 통해 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 슬라이딩모드 외란관측기를 이용한 바이너리 제어기는 관측기의 추정알고리즘의 불연속적인 특성에 의해 떨림현상이 발생하였다. 그리고 이로 인한 토오크분지령전류에 원하지 떨림현상이 발생하였다.
- 2) 기존 바이너리 외란관측기를 이용한 바이너리 제어기는 관측기의 추정알고리즘에 불연속향이 없으므로 떨림현상을 줄였으나, 추정오차가 원점으로 수렴하지 못하므로 정상상태오차가 발생하고, 이로 인한 위치오차가 발생하였다.
- 3) 제안한 바이너리 외란관측기를 이용한 바이너리 제어기는 슬라이딩모드 외란관측기에 비해 떨림현상을 줄였다. 또한 제안한 관측기는 추정오차를 원점으로 수렴시키므로 추정값의 정상상태 오차가 발생하지 않는다.
- 4) 제안한 위치제어시스템을 유도전동기 위치제어에 적용하여 견실하면서 고정도 위치제어의 타당성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Vadim I. Utkin, "Variable Structure System with Sliding Modes," IEEE Trans. Automatic control, Vol. AC-22, No. 2, April, pp. 212-222, 1977.
- [2] F. Harashima, "MOSFET Converter-Fed Position Servo System with Sliding Mode Controller," IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. IE-32, No. 3, pp. 238-244, 1985.
- [3] J.-J. E. Slotine et. al., "On sliding observers for nonlinear systems," J. Dynamic Syst., Meas., Contr., vol. 109, pp.245-252, 1987.
- [4] T. Furuhashi et. al., "A Position-and-Velocity Sensorless Control for Brushless DC Motors Using an Adaptive Sliding Mode Observer," IEEE Trans. Industrial electronics, vol. 39, no.2, pp.89-95, 1992.
- [5] 김 영석, 유 완식, "적분형 외부루프를 갖는 바이너리제어기를 이용한 브러시 없는 직류전동기의 위치제어," 대한전기학회 논문지, 44권, 7호, pp.875-881, 1995.

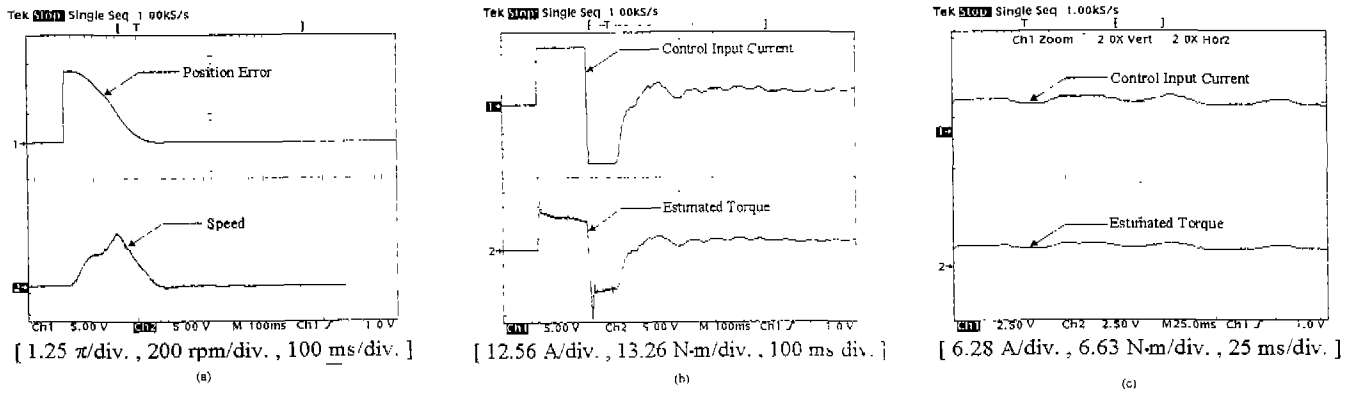


그림 5 슬라이딩 모드 외란관측기를 갖는 바이너리 제어기의 응답파형
 Fig. 5 Response waveform of the binary controller with SDO

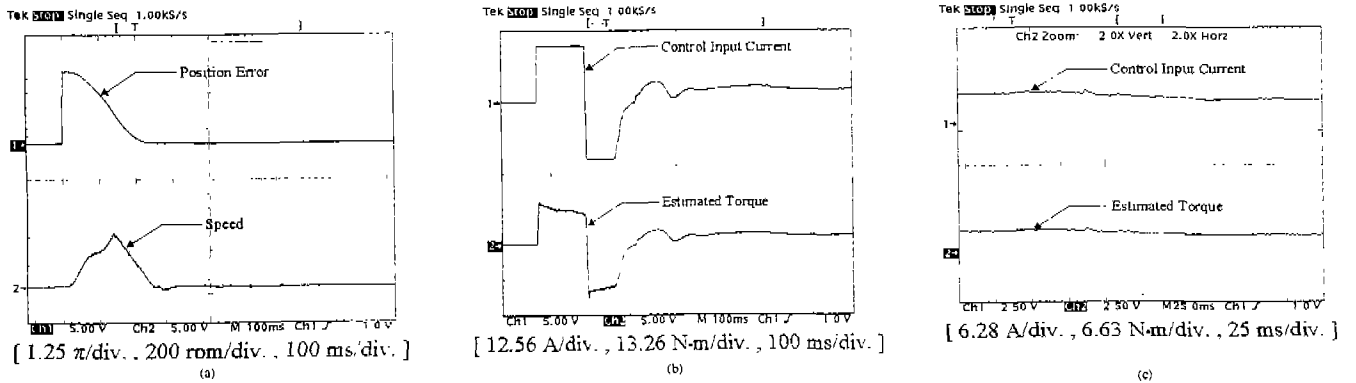


그림 6 기존의 바이너리 외란관측기를 갖는 바이너리 제어기의 응답파형
 Fig. 6 Response waveform of the binary controller with the conventional BDO

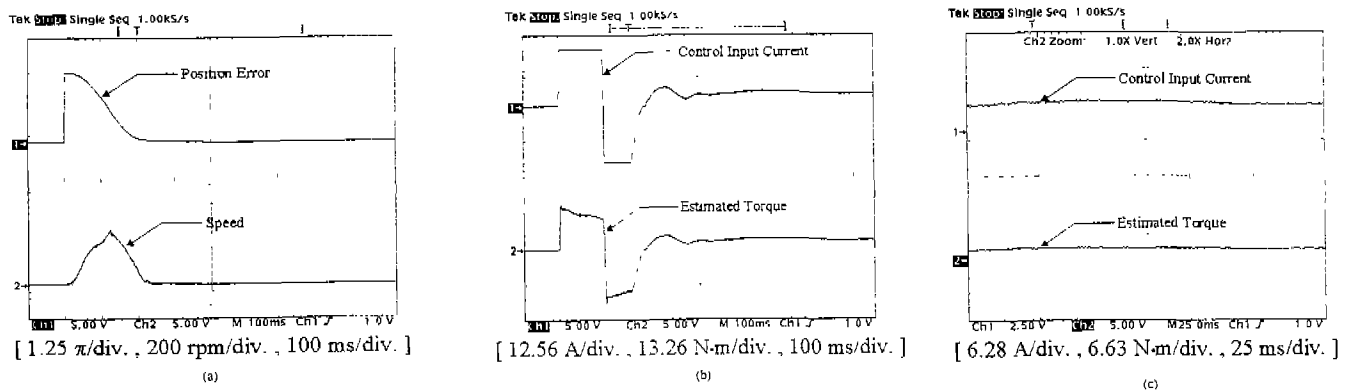


그림 7 개선된 바이너리 외란관측기를 갖는 바이너리 제어기의 응답파형
 Fig. 7 Response waveform of the binary controller with the improved BDO

[6] 한 윤석, 김 영석, 김 영봉, "개선된 바이너리 제어기를 이용한 유도전동기의 위치제어," 대한전기학회 논문지, 46권 6호, pp.881-888, 1997.

[7] Se-Kyo Chung et. al, "A Robust Speed Control of Brushless Direct Drive Motor

Using Integrall Variable Structure Control with Sliding Mode Observer," IEEE IAS.,

[8] Y.S. Kim et. al, "Disturbance Obserber with Binary Control Theory," IEEE PESC., pp.1229-1234, 1996.