바이너리 외란관측기를 이용한 유도전동기의 견실한 위치제어

論 文
48B-4-9

The Robust Position Control of Induction Motors using a Binary Disturbance Observer

韓潤錫* · 崔正秀** · 金榮石***
(Yoon-Seok Han · Jung-Soo Choi · Young-Seok Kim)

Abstract - A control approach for the robust position control of induction motors based on the 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 exist in the conventional binary disturbance observer because it estimates external disturbance with a constant boundary layer. In order to overcome this problem, new binary disturbance observer with an integral augmented switching hyperplane is proposed. The robustness is achieved, and the continuous control is realized by employing the proposed observer without the chattering problem and the steady state error. The effectiveness of the proposed observer is confirmed by the comparative experimental results.

Key Words : Binary control, Binary observer, Disturbance observer, Position control, Induction Motor

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 제어지연, 스위칭속도의 한계 등으로 인하여 실제 시스템에서는 원하지 않는 떨림현상이 발생한다. 이러한 떨림현상은 전동기의 제어성능을 저하시킬 뿐만 아니라 전기·기계적인 요소에 손상을 주는 단점이 있다.

슬라이딩모드 제어의 떨림을 저감시키기 위한 방법으로 바이너리 제어 이론을 적용한다. 바이너리 제어는 상태 공간상에 초평면을 중심으로 원점으로 수렴하는 두 개의 직선에 의해 일정 영역을 설정하고 이 영역 내에서 연속적으로 시스템의 구조를 절환함으로써 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 견실성이 약해진다. 그러므로 이러한 견실성의 회생분은 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 추정외란에 떨림이 존재하게 된다. 그리고 이 떨림은 곧 바로 속도 및 위치의 떨림으로 직결되게 된다. 이러한 관측기의 문제점을 제거하기 위하여 바이너리 제어 이론을 적용한 바이너리 외란관측기를 적용한다.

기존의 바이너리 외란관측기[8]는 슬라이딩모드 외란관측기에 비해 추정외란의 떨림을 제거하였다. 그러나 바이너리 제어기에서와 달리 기존의 바이너리 외란관측기에서는 연속적인 제어입력을 얻기 위해 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 바이너리 외란관측기를 제안하고, 이를 바이너리 위치제어기에 적용한다. 제안하는 바이너리 외란관측기를 사용한 바이너리 위치제어기는 외란에 견실하면서도 떨림이 없는 고정도 위치제어를 가능하게 할 수 있다.

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

* 正 會 員 : 仁荷大 工大 電氣工學科 博士課程
** 正 會 員 : 仁荷大 工大 電氣工學科 博士課程
*** 正 會 員 : 仁荷大 工大 電氣工學科 敎授 · 工博
接受日字 : 1998년 4월 11일
最終完了 : 1999년 3월 5일

2. 바이너리 제어기

2.1 연속관성형 외부루프를 갖는 바이너리 위치 제어기

제어대상인 유도전동기의 상태 방정식을 표현한다.
위치제어를 위한 오차식을

$$x(t) = \theta_{ref} - \theta(t) \quad (\theta_{ref} : \text{지령위치},\ \theta(t) : \text{현재위치}) \tag{1}$$

$$\dot{x}(t) = -\omega_r(t) \quad (\omega_r(t) : \text{현재속도}) \tag{2}$$

라고 하면 식 (1), (2)로부터 위치제어 시스템의 상태 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a(t) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b(t) \end{bmatrix} u \tag{3}$$

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

$D(t)$: 점성마찰계수, $J(t)$: 관성계수

K_t : 토크상수, i_q^* : 토오크 지령전류

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

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

$$a_{\min} \le a(t) \le a_{\max}\ ,\ b_{\min} \le b(t) \le b_{\max} \tag{4}$$

식(3)에서 외란에 대한 항은 3장의 외란관측기에서 고려하고, 이장에서는 고려하지 않는다.

바이너리 제어에서는 슬라이딩모드 제어의 슬라이딩면과 유사한 초평면을 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma_c(t) = -c\dot{x}(t) - x(t) \tag{5}$$

또한, 초평면을 중심으로 영역 $\overline{G_\delta}$를 다음과 같이 설정한다.

$$\overline{G_\delta} = \{\boldsymbol{x} : |\sigma_c(t)| \le \delta\boldsymbol{\beta}|\boldsymbol{x}(t)|\} \tag{6}$$

여기서, $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2]$인 행벡터이고 $0 < \beta_i \le 1$,
$i = 1, 2$, δ는 양의 상수

윗식에서 $\delta\boldsymbol{\beta}$는 설계파라미터로서 $\delta\boldsymbol{\beta}$의 값이 아주 작은 값이 되면 영역 $\overline{G_\delta}$는 좁아지게 되고 이는 슬라이딩면과 같은 특성을 갖게된다.

영역 $\overline{G_\delta}$의 경계면은 다음과 같이 설정한다.

$$\partial\overline{G_\delta} = \{\boldsymbol{x} : [\sigma_c^+(t) = \sigma_c(t) - \delta\boldsymbol{\beta}|\boldsymbol{x}(t)|] \cup [\sigma_c^-(t) = \sigma_c(t) + \delta\boldsymbol{\beta}|\boldsymbol{x}(t)|]\} \tag{7}$$

위치 및 속도 되먹임을 갖는 연속관성형 외부루프의 바이너리 제어기에서 주루프 제어기 C_u와 외부루프 제어기 C_μ는 각각 다음과 같은 알고리즘을 갖는다.

$$C_u : u(\boldsymbol{x}, t) = k_1(t)|x(t)| + k_2(t)|\dot{x}(t)| \tag{8}$$

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

$$C_\mu : \dot{\mu}_c(t) = -\alpha_c\{\mu_c(t) + sat\lambda_c(t)\} \tag{9}$$

여기서, $\lambda_c(t) = \sigma_c(t) / (\delta\boldsymbol{\beta}|\boldsymbol{x}(t)|)$

위 식에서 $\lambda_c(t)$는 초평면에서부터의 상대적인 거리를 나타낸다. 즉, 경계면에 있으면 $|\lambda_c(t)|$는 1이 되고 초평면에 머무르면 0의 값을 나타낸다.

한편, 외부루프 제어기의 이득 α_c를 다음과 같이 설정한다.

$$\alpha_c \ge 2 \times \max \frac{|\tilde{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{b}|}{\delta\beta_i}\left(k_i^0 + \overline{\overline{k_i^0}}\right)\ln\frac{4}{2h-1} \tag{10}$$

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

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

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

$$\boldsymbol{c} = [1,\ c],\ c > 0,\ \frac{1}{2} \le h < 1$$

그리고 식 (5), (6)으로부터 바이너리 제어기의 오차 시스템식을 다음에 나타낸다.

$$\ddot{x}(t) + a(t)\dot{x}(t) = -k_1^0 b(t)\mu_c(t)|x(t)| - k_2^0 b(t)\mu_c(t)|\dot{x}(t)| \tag{11}$$

그림 1에 제어기의 블록도를 나타낸다.

2.2 제어기 이득 설정

이득 k_i는 영역 내에 들어온 시스템의 상태가 영역 밖으로 벗어나지 않도록 하는 역할을 하므로, 영역의 경계에서 즉, $\sigma_c^+ = 0$ 또는 $\sigma_c^- = 0$에서 $\sigma_c \cdot \dot{\sigma}_c < 0$를 만족하도록 구하면 된다. σ_c^+에서의 변화율를 구해보면

$$\dot{\sigma}_c|_{\sigma_c^+ = 0} = -(1-h)ck_1^0 b|x| - ((1-ca)sgn\dot{x} + (1-h)ck_2^0 b)|\dot{x}| \tag{12}$$

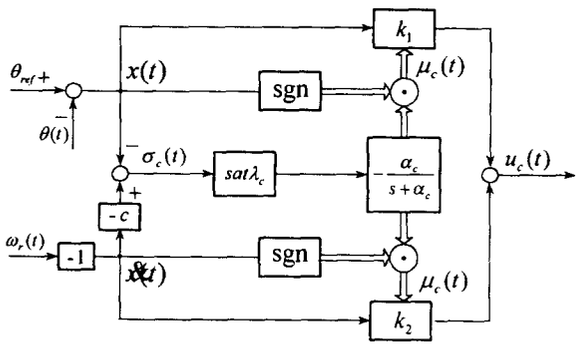


그림 1 바이너리 제어기의 블록도
Fig. 1 A block diagram of the Binary control

경계에서는 $\sigma_c > 0$이므로 경계에서 벗어나지 않기 위해서는 $\dot{\sigma_c} < 0$이 되도록 하여야 한다. 따라서 식 (12)로부터 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$k_1^0 > 0 \tag{13}$$

$$k_2^0 > \frac{|1-cd|}{cb(1-h)} \tag{14}$$

$\sigma_c^- = 0$의 경우에 대해서도 같은 방법으로 정리하면 위와 같은 결과를 얻는다.

또한, α_c는 $\mu_c(t)$가 영역의 경계에서 $|\mu_c| \geq 1-h$의 크기를 만족하도록 하는 외부루프 제어이득으로 함수 $\lambda_c = \sigma_c(t) / \delta\beta|x(t)|$를 이용하여 구한다. 먼저 시스템의 상태가 $\sigma_c = 0$을 통과하는 시간을 t_1, $\sigma_c > 0$에서 영역의 경계에 도달하는 시간을 t_2라 놓고 식 (9)를 시간에 대해 정리하면

$$t_2 - t_1 < \frac{1}{\alpha_c} \ln \frac{4}{2h-1} \tag{15}$$

t_1에서부터 t_2까지 $\lambda_c(t)$를 조사하면

$$\lambda_c(t_2) = \lambda_c(t_1) + \int_{t_1}^{t_2} \frac{\dot{\sigma_c}(\tau) - \lambda_c(\tau)\delta\beta|x(\tau)|'}{\delta\beta|x(\tau)|} d\tau$$

$$\leq \frac{1}{2} + \max \frac{|\tilde{c}b|}{\delta\beta_i} \left(k_i^0 + \overline{\overline{k_i^0}}\right)(t_2 - t_1) \tag{16}$$

식 (16)에 식 (15)를 넣고 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda_c(t) \leq \frac{1}{2} + \max \frac{|\tilde{c}b|}{\delta\beta_i} \left(k_i^0 + \overline{\overline{k_i^0}}\right)\left(\frac{1}{\alpha_c} \ln \frac{4}{2h-1}\right) \tag{17}$$

식 (10)을 식 (17)에 대입하면 λ_c의 크기는 μ_c와 $(1-h)$의 값에 따라 달라진다. 그런데 $\lambda_c(t)$의 정의에 의하면 영역의 경계 즉, t_2에서 $\lambda_c(t_2) = 1$이 되어야 하는데 $|\mu_c(t_2)| < 1-h$이면 $\lambda_c(t_2) < 1$이 되어 모순이 되므로 α_c가 식 (10)을 만족하도록 설정되면 $|\mu_c(t_2)| \geq 1-h$의 관계가 항상 성립하게 된다.

따라서 제어기의 이득들이 식(10), (13), (14)를 만족하면, 영역내에 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.

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

$$y = [\,1 \quad 0\,] \begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ T_l \end{bmatrix} \tag{18}$$

파라미터들은 식 (4)와 (19)의 범위 내에서 변동하는 것으로 가정한다.

$$T_{lmin} \leq T_l \leq T_{lmax} \tag{19}$$

식 (18)의 시스템은 가관측이므로 관측기 이론에 근거하여 다음과 같은 바이너리 외란관측기(Binay Disturbance Observer:BDO)를 구성할 수 있다. BDO의 구성에 있어서는 위치제어기와 마차가지로 연속 관성형 외부루프를 갖는 이원제어 알고리즘을 이용하였다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & d \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \upsilon \\ -L\upsilon \end{bmatrix} \tag{20}$$

그리고, 연속 관성형 바이너리 관측기의 주루프와 외부루프는 다음과 같다.

$$\upsilon = K_o \mu_o |\omega - \hat{\omega}| \tag{21}$$

$$\dot{\mu}_o = -\alpha_o \{\mu_o + sat\lambda_o\} \tag{22}$$

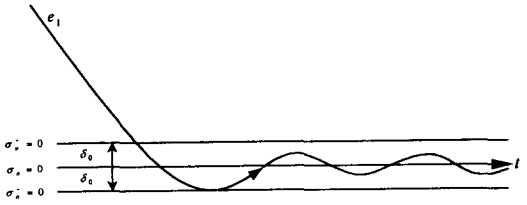


그림 2 기존 BDO의 오차궤적

Fig. 2. Error trajectory of conventionary BDO

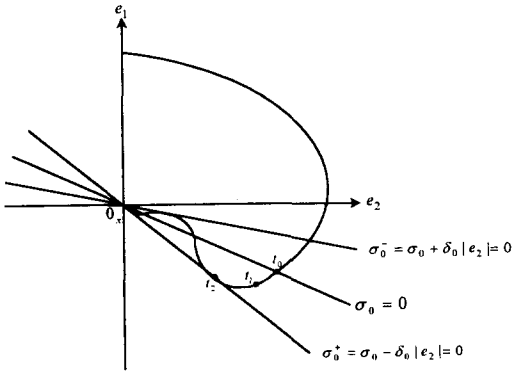


그림 3 제안한 BDO의 오차궤적

Fig. 3. Error trajectory of the proposed BDO

슬라이딩모드 외란관측기(Sliding Mode Disturbance Observer:SDO)와 달리 바이너리 외란관측기는 식 (21), (22)의 추정알고리즘을 가지므로 추정값은 연속적인 특성을 갖는다.

관측기의 오차는 식 (23)으로 나타낸다. 또한, 오차를 적분한 값을 식 (24)로 나타낸다.

$$e_1 = \omega - \hat{\omega} \tag{20}$$

$$e_2 = \int e_1(\tau)\, d\tau \tag{21}$$

식 (20)과 (21)식을 이용하여 관측기의 초평면을 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_o = -ze_1 - e_2,\ z>0 \tag{22}$$

여기서, $\sigma_o^+ = \sigma_o - \delta_o|e_2| = 0$, $\sigma_o^- = \sigma_o + \delta_o|e_2| = 0$,

그리고 $\lambda_o = \dfrac{\sigma_o}{\delta_o|e_2|}$

위에서 K_o와 α_o는 설계 파라미터이다.

기존의 BDO에서는 σ_o의 차수가 낮아 원점으로 수렴하는 영역을 설정하는 것이 불가능하기 때문에 영역의 경계식을 초평면과 수평으로 설정하였다. 따라서 추정의 정상상태값에서는 오차가 원점으로 수렴하는 것을 보장할 수 없다. 그러나 제안하는 BDO는 식 (22)에서와 같이 차수가 기존의 BDO보다 높아 원점으로 수렴하는 영역을 설정할 수 있으므로 정상상태 오차가 줄어든다. 그림 2와 3에 기존의 BDO와 제안하는 BDO의 오차궤적을 나타내었다.

3.2 이득 K_o의 설정

관측기의 이득은 제어기와 유사하게 구할 수 있다. 이득 K_o는 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 $\sigma_o^+ = \sigma_o - \delta_o|e_2|$이므로 다음의 관계가 성립한다.

$$\sigma_o \cdot \dot{\sigma}_o = \sigma_o\left[\left(a\xi + \frac{1}{z}\xi^2\right)e_2 + K_o\mu_o|-\xi||e_2|\right] < 0 \tag{23}$$

여기서, $\xi = 1+\delta_o \cdot sgne_2$

식 (23)의 부등식을 만족하는 K_o는 다음과 같다.

$$K_o > sup\left|\frac{1}{(1-h)|\xi|}\left(a\xi + \frac{1}{z}\xi^2\right)\right| \tag{24}$$

식 (24)에서는 식 (19)의 μ_o의 크기가 $\mu_o \le -(1-h)$를 만족한다는 가정 하에서 얻어진 것이다. $\sigma_o^- = 0$의 경우에 대해서도 같은 방법으로 정리하면 위와 같은 결과를 얻는다.

3.3 이득 α_o의 설정

α_o는 제어기와 유사하게 영역의 경계에서 $|\mu_o| \ge 1-h$의 크기를 만족하도록 구한다. 먼저 $\sigma_o > 0$의 경우에 대해 $\mu_o \le -(1-h)$가 되도록 하는 α_o는 다음과 같이 구할 수 있다.

여기서 반증을 위해 $\mu_o(t_2) > -(1-h)$라고 가정하고, λ_o를 정리하면 다음과 같다. 시간 t_1과 t_2는 그림 3에서 관측기 영역의 원점에서부터 경계에 도달한 시간이다.

$$\lambda_o(t_2) = \int_{t_1}^{t_2}\lambda_o(t)'\, d\tau + \lambda_o(t_1)$$

$$= \int_{t_1}^{t_2}\frac{\dot{\sigma}_o - \lambda_o\delta_o|e_2|'}{\delta_o|e_2|}\, d\tau + \lambda_o(t_1)$$

윗식을 정리하면

$$\leq \frac{1}{2} + \frac{z}{\delta_o}\left[\overline{K_o} + \frac{1}{z}K_o|\zeta|\right](t_2 - t_1) \tag{25}$$

단, $\overline{K_o} = sup\left[\left|a\frac{\zeta}{z}\right| + \left(\frac{\zeta}{z}\right)^2\right]$, $\zeta = 1 + \lambda_o \delta_o sgne_2$

관측기의 외부루프 이득 α_o가 식 (26)과 같은 부등식을 만족한다고 하자.

$$\alpha_o \geq \frac{2z}{\delta_o}\left(\overline{K_o} + \frac{1}{z}K_o|\zeta|\right)\ln\frac{4}{2h-1} \tag{26}$$

식 (11)을 이용하여 (25)식을 정리하고, 여기에 식 (26)을 대입하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\lambda_o(t_2) < 1 \tag{27}$$

역시 영역의 경계 즉, $\lambda_o(t_2)$에서는 값이 1 이어야 하는데 $\lambda_o(t_2) < 1$ 이므로 앞에서 설정한 가정 $\mu_o(t_2) > -(1-h)$은 모순이 된다. 즉 α_o가 식 (26)을 만족하도록 설정하면 $|\mu_o| \geq 1-h$이 항상 성립하게 된다.

그리고 이것은 $\sigma_o < 0$의 경우에 대해서도 같은 방법으로 얻어질 수 있다. 한편 외란관측기의 이득 L은 관측기가 안정하도록 극배치법에 의해서 적절하게 선정한다.

그림 4에 BDO의 블럭도를 나타내었다

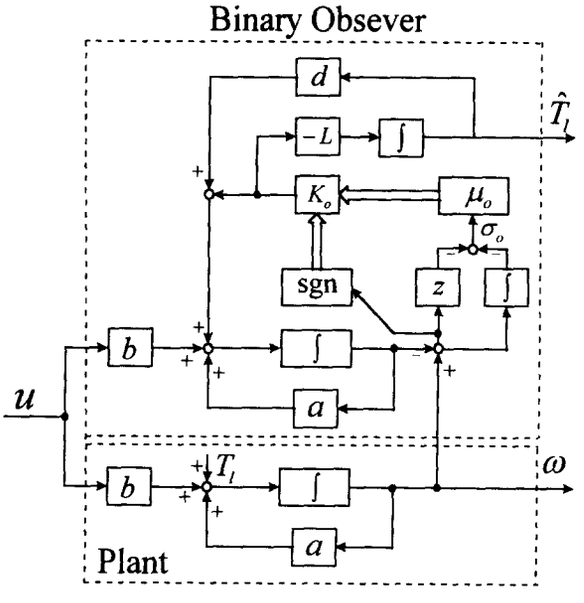


그림 4 제안한 바이너리 외란 관측기의 블럭도
Fig. 4 A block diagram of the proposed BDO

4 외란관측기를 이용한 위치제어 시스템의 구성 및 실험

4.1 시스템의 구성

바이너리 위치제어기와 결합시켜 떨림의 저감과 견실성을 동시에 확보할 수 있는 위치제어 시스템을 구성한다.

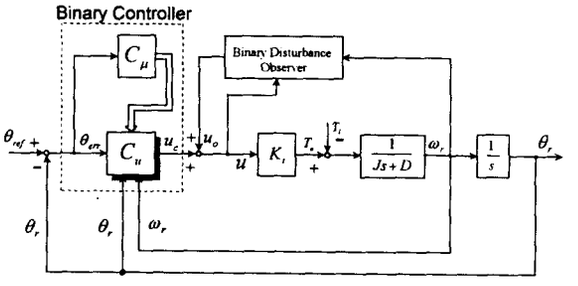


그림 5 제안된 시스템의 블록도
Fig. 5 Block diagram of the proposed control system

시스템의 블럭도를 그림 5에 나타내었다. 그림에 표시하였듯이 제어대상에 인가되는 제어입력은 위치제어기로부터 생성되는 제어입력 u_c에 외란관측기로부터 생성되는 제어입력 u_o가 앞먹임 형태로 부가된다. 즉,

$$u = u_c + u_o \tag{28}$$

식 (28)의 제어입력을 사용하면 외란이 존재하지 않을 때는 u_o가 0이 되어 바이너리 제어기의 제어입력 u_c만으로 제어하고, 외부 외란이 존재하면 u_o가 앞먹임되어 시스템의 떨림이 저감되면서 견실성을 확보할 수 있다.

4.2 실험장치 및 결과

제안하는 시스템의 타당성을 확인하기 위하여 실험을 행하였다. 실험은 성능의 비교·평가를 위해 2장에서 서술한 바이너리 제어기에 SDO와 기존의 BDO 그리고 제안한 BDO를 갖는 각각의 위치제어 시스템에 대하여 행하였다. 마이크로프로세서는 DSP(TMS320C31)를 사용하였고, 샘플링시간은

표 1 3상 유도전동기 사양
Table 1 Parameters of three phase induction motor and gains

정격전압	220/380V	Rs	1Ω
정격전류	4.8/8.3A	Rr	0.52Ω
정격속도	1720rpm	Ls	110mH
출 력	2.2Kw	Lr	103mH
극 수	4pole	M	103mH

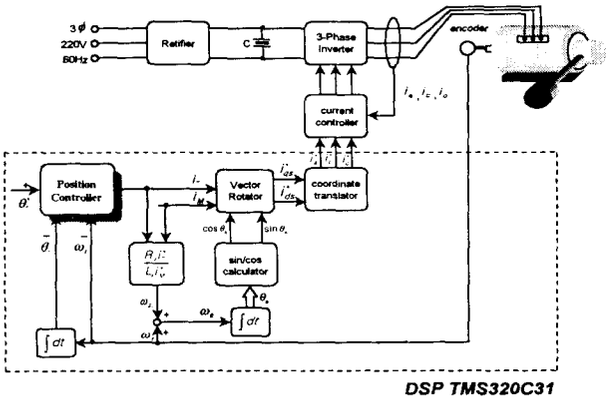
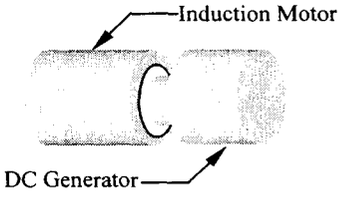
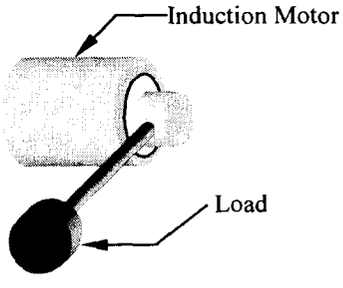


그림 6 전체시스템 구성도

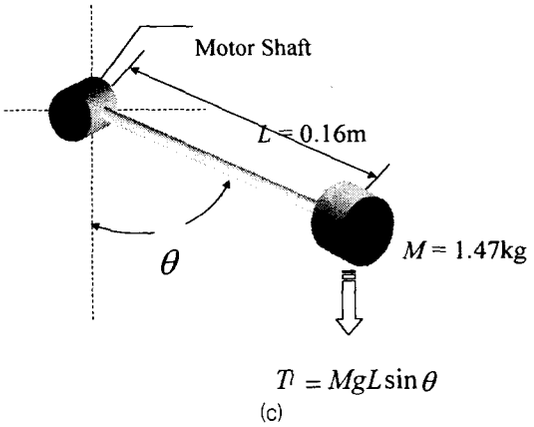
Fig. 6 Overall system configuration



(a)



(b)

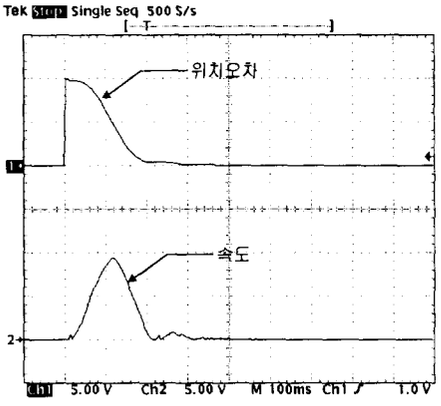


$$T = MgL\sin\theta$$

(c)

그림 7 외란을 인가하기위한 기계장치

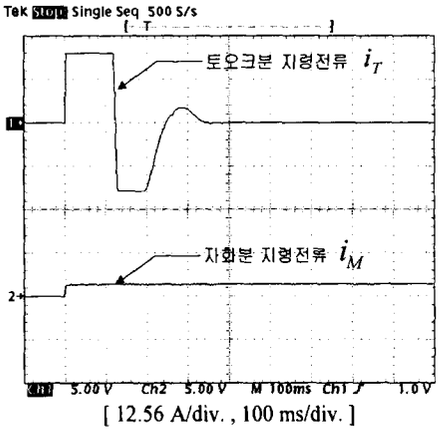
Fig. 7 Mechanical arrangement to apply the external disturbance



[1.25 π/div. , 200 rpm/div. , 100 ms/div.]

(a) 위치오차 및 속도

(a) Position error and speed



[12.56 A/div. , 100 ms/div.]

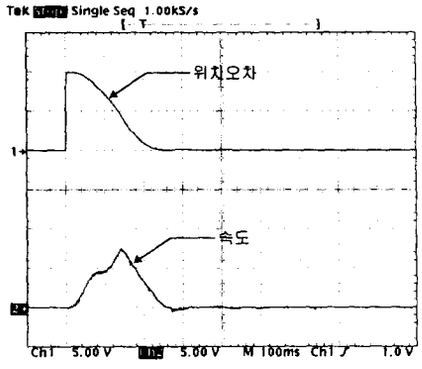
(b) 토오크분 지령전류 및 자화분 지령전류

(b) Torque-producing reference and magnetizing reference current

그림 8 제안한 바이너리 외란관측기를 갖는 바이너리 제어기의 응답파형(평형부하시)

Fig. 8 Response waveform of the binary controller with the proposed BDO(balanced load)

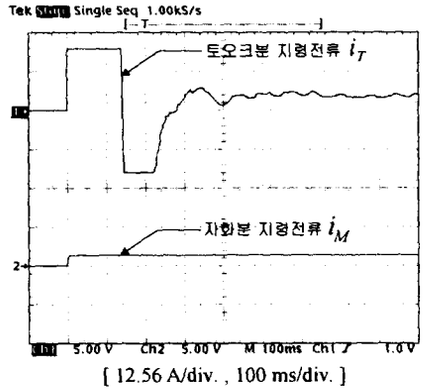
133 μsec였다. 하드웨어를 간략화하기 위하여 인버터를 제외한 모든 알고리즘은 소프트웨어로 구성되었으며, 위치측정을 위하여 전동기 측에 6000(pulse/rev)의 펄스 엔코더를 부착하여 이를 4체배하였다. 제안된 알고리즘에 의해 출력되는 2상의 고정자전류는 D/A 변환기를 통하여 DSP로부터 출력되고 3상 전압형 IGBT 인버터의 PWM 제어를 실현함으로써 유도전동기의 벡터제어 알고리즘이 실현하게 된다. 실험에 사용된 유도전동기의 사양 및 전체 시스템를 표 1과 그림 6에 나타내었다. 부하장치는 그림 7과 같으며, 그림에서 부하의 초기각은 0° 에서 정상상태에서 90° 가 되도록 지령위치를 2.5π로 설정하였다. 그림 7(a)에서 평형관성부하로는 정격 3.3 kW의 직류발전기를 사용하였으며, 발전기의 관성은 전동기 관성의 약 10배이다. 불평형관성부하로는 빔에 추(1.47kg)를 달아 전동기에 연결하여 실험하였다.



[1.25 π/div. , 200 rpm/div. , 100 ms/div.]

(a) 위치오차 및 속도

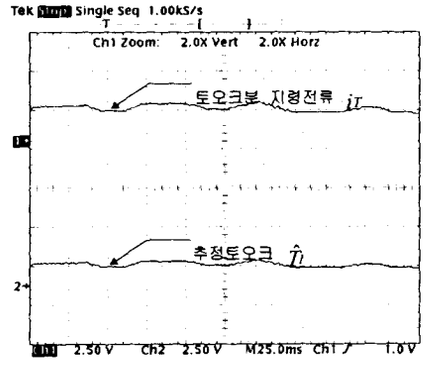
(a) Position error and speed



[12.56 A/div. , 100 ms/div.]

(b) 토오크분 지령전류 및 자화분 지령전류

(b) Torque-producing reference and magnetizing reference current



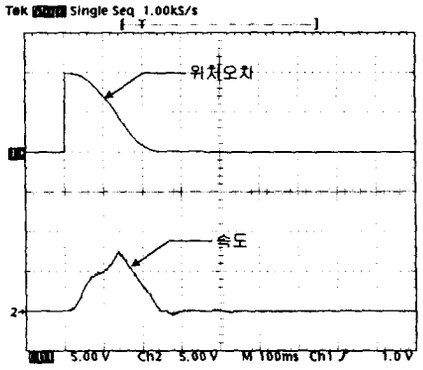
[6.28 A/div. , 6.63 N•m/div. , 25 ms/div.]

(c) 토오크분 지령전류 및 추정토오크

(c) Torque-producing reference current and estimated torque

그림 9 슬라이딩모드 외란관측기를 갖는 바이너리 제어기의 응답파형

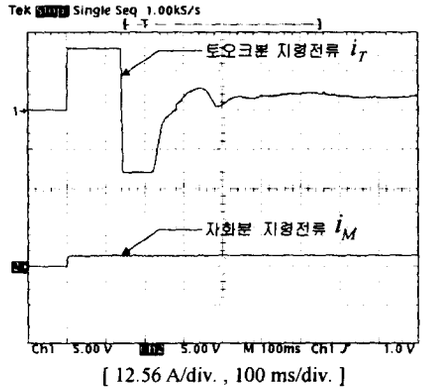
Fig. 9 Response waveform of the binary controller with SDO



[1.25 π/div. , 200 rpm/div. , 100 ms/div.]

(a) 위치오차 및 속도

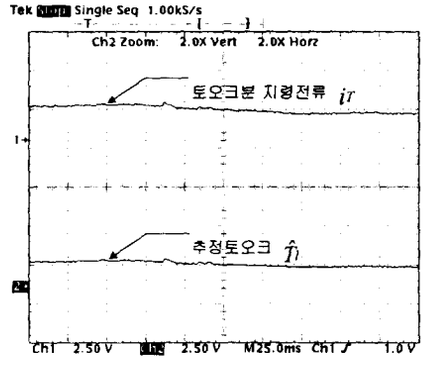
(a) Position error and speed



[12.56 A/div. , 100 ms/div.]

(b) 토오크분 지령전류 및 자화분 지령전류

(b) Torque-producing reference and magnetizing reference current



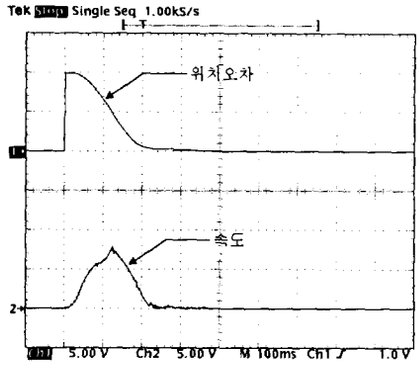
[6.28 A/div. , 6.63 N•m/div. , 25 ms/div.]

(c) 토오크분 지령전류 및 추정토오크

(c) Torque-producing reference current and estimated torque

그림 10 기존의 바이너리 외란관측기를 갖는 바이너리 제어기의 응답파형

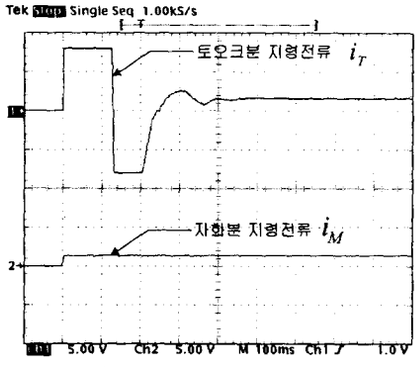
Fig. 10 Response waveform of the binary controller with the conventional BDO



[1.25 π/div. , 200 rpm/div. , 100 ms/div.]

(a) 위치오차 및 속도

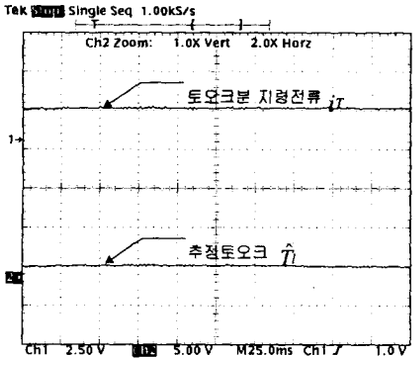
(a) Position error and speed



[12.56 A/div. , 100 ms/div.]

(b) 토오크분 지령전류 및 자화분 지령전류

(b) Torque-producing reference and magnetizing reference current



[6.28 A/div. , 6.63 N•m/div. , 25 ms/div.]

(c) 토오크분 지령전류 및 추정토오크

(c) Torque-producing reference current and estimated torque

그림 11 제안한 바이너리 외란관측기를 갖는 바이너리 제어기의 응답파형

Fig. 11 Response waveform of the binary controller with the proposed BDO

그림 8은 그림 7(a)의 평형관성부하에 대한 제안한 BDO에 대한 실험결과이다. 실험결과로부터 큰 관성의 변동 즉, 전동기의 파라미터 $a(t)$의 변동에도 강인함을 볼 수 있다.

다음의 그림 9~11은 그림 7(b), (c)의 불평형부하에 대한 실험결과들로서 그림 (a)는 위치오차 및 속도, 그림 (b)는 토오크분 지령전류 i_T 및 자화분 지령전류 i_M, 그리고 그림 (c)는 토오크분 지령전류 i_T 및 추정토오크 $\hat{T}_l$를 나타낸다.

그림 9는 SDO에 대한 실험결과이다. 실험결과로부터 SDO는 외란에 대해 빠른 추정능력을 보이고 있으나 SDO의 추정알고리즘 특성상 추정외란에 떨림이 나타나고, 이는 바로 토오크분 지령전류에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다

그림 10은 기존 BDO에 대한 실험결과이다. 바이너리 이론을 적용하였기 때문에 그림 7 (b), (c)와 비교했을 때 추정외란값 및 토오크분 지령전류에는 떨림이 없이 연속적인 특성을 나타내나, 관측기의 오차궤적이 원점으로 수렴하지 못하므로 정상상태에서 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다.

그림 11은 제안한 BDO에 대한 실험결과이다. 바이너리 이론을 적용하였기 때문에 그림 9와 비교하였을 때 추정외란값에는 떨림이 없으며, 관측기의 오차궤적을 원점으로 수렴시킴에 의해 그림 10과 비교하였을 때 정상상태 오차가 발생하지 않는다. 그리고 토오크분 지령전류에도 역시 떨림과 오차가 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 제안한 위치제어시스템은 파라미터변동 및 외란에 견실하면서도 고정도의 위치제어를 할 수 있는 것을 볼 수 있다

5. 결 론

본 연구에서는 기존 바이너리 관측기의 정상상태 오차를제거하기 위한 새로운 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 특성에 의해 떨림현상이 발생하였다. 그리고 이로 인한 토오크분 지령전류에 원하지 않는 떨림현상이 발생하였다.

2) 기존 바이너리 외란관측기를 이용한 바이너리 제어기는 슬라이딩모드 외란관측기에 비해 추정외란값 및 토오크분 지령전류의 떨림현상을 줄였으나, 추정오차가 원점으로 수렴하지 못하므로 정상상태오차가 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 바이너리 제어기를 이용한 브러시 없는 직류전동기의 위치제어," 대한전기학회 논문지, 44권, 7호, pp.875-881, 1995.
[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 Brushlesss Direct Drive Motor Using Integral Variable Structure Control with Sliding Mode Observer," IEEE IAS., pp.393-400. 1994.
[8] Y.S. Kim et. al, "Disturbance Obserber with Binary Control Theory," IEEE PESC., pp.1229-1234, 1996.
[9] H. Tan, "Integral Augmented Variable Structure Control : Design and Testing," IEEE IECON., pp.1956-1961, 1993.
[10] C. M. Liaw, F. J. Lin and Y. S. Kung, "Design and implementation of a high performance induction motor servo drive," IEE Proc.-B, Vol. 140, No, 4, pp. 241-248, 1993.
[11] S.V. Emelyanov, Binary Automatic Control System, Mir Publishers, Moscow, 1987.

저 자 소 개

한 윤 석(韓 潤 錫)

1972년 8월 5일생. 1995년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : (032) 860-7397
E-mail : g9731488@jnhavision.inha.ac.kr

최 정 수(崔 正 秀)

1965년 10월 7일생. 1992년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전공공학과 박사과정

Tel : (032) 860-7397
E-mail : JSchoi@inhavision.inha.ac.kr

김 영 석(金 榮 石)

1951년 6월 11일생. 1977년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987~1989년 한국전기연구소 선임연구원 실장. 현재 인하대 공대 전기공학과 교수

Tel : (032) 860-7397
E-mail : Youngseok.kim@inha.ac.kr