

바이너리 외란관측기를 이용한 유도전동기의 위치제어

한운석*, 김영석*, 김현중**, 유원식***
 인하대학교*, 유한전문대학**, 특허청***

The position control of IM using the binary disturbance observer

Yoon-seok Han*, Young-seok Kim*, Hyun-joong Kim**, Wan-sik You***
 Inha Univ.*, Ynhan Junior College**, KIPO***

Abstract - A control approach for the robust position control of IM based on the binary disturbance observer is described. The conventional binary observer is used to remove the chattering problem of variable structure system. However the steady state error may be existed, because the conventional binary observer estimates external disturbance with constant boundary layers. Thus in order to overcome this problem, the improved binary observer is proposed. By employing the proposed observer, the robustness is achieved and the continuous control is realized without the chattering problem and the steady state error. The effectiveness of the proposed observer is confirmed by the computer simulation.

1. 서 론

종래에는 공작기계나 로봇 팔들과 같은 고정도 속도제어가 요구되는 산업용 기기의 구동을 위한 서보운전용으로 제어 가 용이한 직류전동기가 널리 사용되어 왔다. 그러나 직류전동기는 정류자와 브러시가 정교한 기계적 접점을 구성하고 있어 구조가 복잡하고 정류자 편간의 전압 제약으로 인하여 출력의 한계를 갖는 등의 문제점을 갖는다. 이러한 이유로 최근에는 서보운전용으로 견고하면서도 내환경이 뛰어난 유도전동기에 대한 관심이 집중되고 있는데, 유도전동기 파라미터 변동과 부하 토크 외란에 견실하면서도 빠른 응답속도를 가지는 제어를 요구하고 있다.

이러한 제어 목적 달성을 위해 가변 구조계의 이론을 이용한 슬라이딩모드 제어가 널리 쓰이고 있으며, 슬라이딩모드 제어는 불연속적인 제어입력을 사용하여 상태 공간상에 설정한 슬라이딩면에 시스템의 상태를 구속시킴으로써 견실한 제어성을 얻을 수 있고, 설계가 용이하고 구현이 간단하다는 장점을 가지고 있다^{[1]-[3]}. 이러한 슬라이딩모드 제어의 특성 때문에 전동기 제어기 뿐만 아니라 관측기에도 널리 적용되고 있다. 그러나 많은 장점에도 불구하고 연산에 의한 제어 지연, 스위칭 속도의 한계 등으로 인하여 실제 시스템에서는 원하지 않는 떨림현상이 발생한다. 이러한 떨림현상은 전동기의 제어성을 저하시킬 뿐만 아니라 전기·기계적인 요소에 손상을 주는 단점이 있다.

이러한 슬라이딩모드 제어의 단점을 해결하기 위한 방법으로 바이너리 제어 이론을 이용한 제어기를 구성하였다. 바이너리 제어는 상태 공간상에 초평면을 중심으로 원점으로 수렴하는 두 개의 직선에 의해 일정 영역을 설정하고 이 영역 내에서 연속적으로 시스템의 구조를 절환함으로써 연속적인 제어입력을 생성하여 떨림을 저감시킬 수 있다^[7]. 그러나 바이너리 제어기는 영역내에서 이득이 작기 때문에 외부 외란 등에 대한 견실성이 약해지므로 이러한 견실성의 희생분은 외란관측기를 사용하여 제어입력을 앞먹임(Feed forward)함으로써 보상한다. 적용하는 외란관측기는 여러 가지 고려해 볼 수 있으나 견실성과 설계 구현의 용이성 면에서 슬라이딩모드 외란관측기^{[8][9]}

가 최근 많이 적용되고 있다. 그러나 슬라이딩모드 외란관측기는 추정 알고리즘에 불연속 항을 포함함으로써 추정의란에 떨림이 존재하게 된다. 그리고 이 떨림은 곧 바로 속도 및 위치의 떨림으로 직결되게 된다. 이러한 문제점을 제거하기 위하여 연속적인 제어알고리즘을 갖는 바이너리 제어 이론을 적용한 바이너리 외란관측기를 적용한다.

기존의 바이너리 외란관측기^[5]는 설정된 영역이 원점으로 수렴하지 않으므로 추정치에 대한 정상상태 오차가 남을 수 있고 이는 위치오차에 직결된다. 따라서 제안하는 바이너리 관측기는 영역을 원점으로 수렴하여 추정치에 대한 떨림의 저감하면서 정상상태 오차가 남지 않도록 한다. 그러므로 제안하는 바이너리 외란관측기를 사용한 바이너리 위치제어기는 견실하면서도 떨림이 없는 고정도 위치제어가 가능하게 한다.

그리고 컴퓨터 모의실험을 통하여 기존의 바이너리 외란관측기와 제안한 바이너리 외란관측기를 비교하여 제안된 관측기의 타당성을 확인하였다

2. 바이너리 제어기

2.1 연속관성형 외부루프를 갖는 바이너리 위치 제어기

제어대상인 유도전동기의 위치제어를 위한 상태 방정식을 표현한다.

위치제어를 위한 오차식을

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

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

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

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

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

$D(t)$: 점성마찰계수, $J(t)$: 관성계수

K_t : 토크상수, i_a^* : 토오크 지령전류

$x(t) = [x(t), \dot{x}(t)]^T \in R_2^+$: 상태 벡터

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

$$a_{min} \leq a(t) \leq a_{max}, \quad b_{min} \leq b(t) \leq b_{max} \quad (4)$$

위치 및 속도 되먹임을 갖는 연속관성형 보조루프의 바이너리 제어기에서 주루프 제어기 C_u 와 외부루프 제어기 C_m 는 각각

다음과 같은 알고리즘^[6]을 갖는다.

$$C_\mu: u(x, t) = k_1(t)|x(t)| + k_2(t)|\dot{x}(t)| \quad (5)$$

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

$$C_\mu: \dot{\mu}_c(t) = -\alpha_c(\mu_c + sat \lambda_c) \quad (6)$$

여기서, $\sigma_c = -c\dot{x} - x$, $\lambda_c = \sigma_c / (\delta\beta|x|)$, $\beta = [\beta_1, \beta_2]$

그리고 식 (3), (5), (6)으로부터의 바이너리 시스템을 다음식에 나타낸다.

$$\ddot{x}(t) + a(t)\dot{x}(t) = -k_1^0 b(t)\mu(t)|x(t)| - k_2^0 b(t)\mu(t)|\dot{x}(t)| \quad (7)$$

여기서 외부 외란항의 고려는 뒤의 외란관측기에서 보상하고 제어기에서는 고려하지 않는다. 그림 1에 제어기의 블록도를 나타낸다

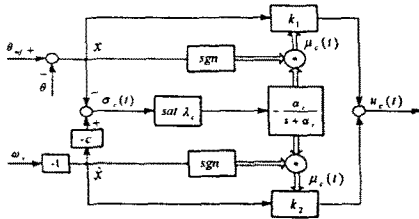


그림 1 바이너리 제어기의 블록도

Fig. 1 A block diagram of the proposed BC

2.2 제어기 이득 설정

이득 k_i 는 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 변화율을 구해보면

$$\dot{\sigma}_{c^+} = -(1-h)ck_1^0|x| - ((1-ca_2)sgn\dot{x} + (1-h)ck_2^0)|\dot{x}| \quad (8)$$

경계에서는 $\sigma > 0$ 이므로 $\dot{\sigma} < 0$ 이 되도록 한다. (8)식으로부터

$$k_1^0 > 0 \quad (9)$$

$$k_2^0 > \frac{|1-ca_2|}{c(1-h)} \quad (10)$$

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

또한, α_c 는 $\mu_c(t)$ 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_2 라 놓고 식 (6)을 시간에 대해 정리하면

$$t_2 - t_1 < \frac{1}{\alpha_c} \frac{4}{2h-1} \quad (11)$$

t_1 에서부터 t_2 까지 $\lambda_c(t)$ 를 조사하면

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

$$\leq \frac{1}{2} + \max \left[\frac{|\tilde{c}\tilde{b}}{\delta\beta_i} (k_i^0 + \overline{k_i^0})(t_2 - t_1) \right] \quad (12)$$

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

$$b = [0, 1]^T, \quad A(t) = [1, a(t)]^T, \quad i = 1, 2$$

$$\overline{k_i^0} = \max \sup |\tilde{c}A(t)| / |\tilde{c}b(t)|$$

식 (12)에 식 (11)를 넣고 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda_c(t) \leq \frac{1}{2} + \max \left[\frac{|\tilde{c}\tilde{b}}{\delta\beta_i} (k_i^0 + \overline{k_i^0}) \left(\frac{1}{\alpha} \ln \frac{4}{2h-1} \right) \right] \quad (13)$$

한편, 외부루프 제어이득 α_c 를 다음과 같이 가정한다.

$$\alpha_c \geq 2 \max \left[\frac{|\tilde{c}\tilde{b}}{\delta\beta_i} (k_i^0 + \overline{k_i^0}) \ln \frac{4}{2h-1} \right], \quad i = 1, 2 \quad (14)$$

식 (13)에 식 (14)를 대입하면 λ_c 의 크기는 μ_c 와 $(1-h)$ 의 값에 따라 달라진다. 그런데 정의에 의하면 영역의 경계 즉, t_2 에서 $\lambda_c(t_2) = 1$ 이 되어야 하는데 $|\mu_c(t_2)| < 1-h$ 이면 $\lambda_c(t_2) < 1$ 이 되어 모순이 되므로 α_c 가 식 (14)를 만족하도록 설정되면 $|\mu_c(t_2)| \geq 1-h$ 의 관계가 항상 성립하게 된다.

3. 바이너리 외란관측기

3.1 바이너리 외란관측기

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

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

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ T_I \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\text{단, } d = d(t) = -1/f(t)$$

파라미터들은 식 (4)와 다음의 식 (16)의 범위 내에서 변동하는 것으로 가정한다.

$$T_{min} \leq T_I \leq T_{max} \quad (16)$$

식 (15)의 시스템은 가관측이므로 관측기 이론에 근거하여 다음과 같은 BDO를 구성할 수 있다. BDO의 구성에 있어서는 위치제어기와 마찬가지로 연속 관성형 보조루프를 갖는 이원 제어 알고리즘을 이용하였다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & d \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \nu \\ -L\nu \end{bmatrix} \quad (17)$$

그리고, 관측기의 주루프와 보조루프는 다음과 같다.

$$\nu = K_o \mu_o |\omega - \hat{\omega}| \quad (18)$$

$$\dot{\mu}_o = -\alpha_o (\mu_o + sat \lambda_o) \quad (19)$$

여기서, $e_1 = \omega - \hat{\omega}$, $e_2 = \int e_1(\tau) d\tau$, $\sigma_o = -ze_1 - e_2$

$$\sigma_o^+ = \sigma_o - \delta|e_2| = 0, \quad \sigma_o^- = \sigma_o + \delta|e_2| = 0, \quad \lambda_o = \frac{\sigma_o}{\delta|e_2|}$$

그리고, K_o 와 α_o 는 설계 파라미터이다. 그림 5.1에 BDO의

블럭도를 나타내었다.

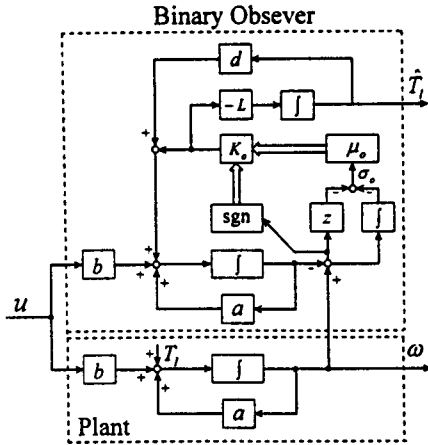


그림 2 제안한 바이너리 외란 관측기의 블럭도
Fig. 2 A block diagram of the proposed BDO

한편, 기존의 BDO에서는 σ_o 의 차수가 낮기 때문에 원점으로 수렴하는 영역을 설정하는 것이 불가능하기 때문에 경계식을 초평면과 수평으로 설정하였고 이로인하여 정상상태 오차가 남을 수 있다. 하지만 제안하는 BDO는 차수가 기존의 BDO보다 높아 원점으로 수렴하는 영역을 설정할 수 있으므로 정상상태 오차가 줄어든다.

3.2 이득 K_o 의 설정

이득 K_o 는 제어기와 마찬가지로 영역 내에 들어온 시스템의 상태가 영역 밖으로 벗어나지 않도록 하는 역할을 하므로, 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 $\dot{\sigma}_o^+ = \sigma_o - \delta |e_2|$ 이므로 다음의 관계가 성립한다.

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

여기서, $\xi = 1 + \delta \cdot \text{sgne}_2$

식 (23)을 만족하는 K_o 는 다음과 같다.

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

식 (24)에서는 식 (5.23)의 μ_o 의 크기가 $\mu_o \leq -(1-h)$ 를 만족한다는 가정 하에서 얻어진 것이다. $\sigma_o^- = 0$ 의 경우에 대해서도 같은 방법으로 정리하면 위와 같은 결과를 얻는다.

3.3 이득 α_o 의 설정

α_o 는 식 (5.9)와 (5.10)을 유도하는데 사용되는 μ_o 는 제어기와 유사하게 영역의 경계에서 $|\mu_o| \geq 1-h$ 의 크기를 만족하도록 구한다. 먼저 $\sigma_o > 0$ 의 경우에 대해 $\mu_o \leq -(1-h)$ 가 되도록 하는 α_o 는 다음과 같이 구할 수 있다.

여기서 반증을 위해 $\mu_o(t_2) > -(1-h)$ 라고 가정하고, λ_o

를 정리하면 다음과 같다. 시간 t_1 과 t_2 는 관측기 영역의 원점에서부터 경계에 도달한 시간이다.

$$\begin{aligned} \lambda_o(t_2) &= \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t)' dr + \lambda(t_1) \\ &= \int_{t_1}^{t_2} \frac{\dot{\sigma}_o - \lambda \delta |e_2|'}{\delta |e_2|} dr + \lambda(t_1) \end{aligned}$$

윗식을 정리하면

$$\leq \frac{1}{2} + \frac{\epsilon}{\delta} \left[\overline{K}_o + \frac{1}{c} K_o \mu_o |\xi| \right] (t_2 - t_1) \quad (5.17)$$

$$\text{단, } \overline{K}_o = \sup \left[a \frac{\xi}{c} + \left(\frac{\xi}{c} \right)^2 \right] \text{sgne}_2, \quad \xi = 1 + \lambda \delta \text{sgne}_2$$

여기서 α_o 가 다음과 같은 부등식을 만족한다고 하자. 식 (11)을 이용하여 (5.17)식을 정리하면

$$\alpha_o \geq \frac{2\epsilon}{\delta} \left(\overline{K}_o + \frac{1}{c} K_o \mu_o |\xi| \right) \ln \frac{4}{2h-1} \quad (18)$$

식 (5.16)과 식 (5.18)을 식 (5.17)에 대입하면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\lambda_o(t_2) < 1 \quad (19)$$

역식 영역의 경계 즉, $\lambda_o(t_2) = 1$ 이어야 하는데 $\lambda_o(t_2) < 1$ 이므로 앞에서 설정한 가정 $\mu_o(t_2) > -(1-h)$ 은 모순이 된다. 즉 α_o 가 식 (5.18)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 L 은 관측기가 안정하도록 극배치법에 의해서 적절하게 선정하면 된다.

4 외란관측기를 이용한 위치제어 시스템의 구성

3장에서 설계한 BDO를 2장에서 설계한 위치제어기와 결합시켜 필립과 견실성을 동시에 확보할 수 있는 위치제어 시스템을 구성한다.

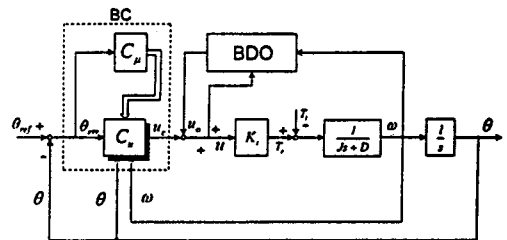


그림 3 위치제어 시스템의 전체 구성도
Fig. 3 Overall configuration of the position control system

시스템의 블럭도를 그림 5.3에 나타내었다. 그림에 표시하였듯이 제어대상에 인가되는 제어입력은 위치제어기로부터 생성되는 제어입력 u_c 에 외란관측기로부터 생성되는 제어입력 u_o 가 앞먹임 형태로 부가된다. 즉,

$$u = u_c + u_o \quad (21)$$

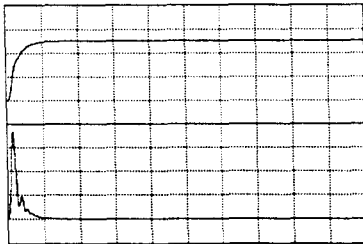
식 (5.21)의 제어입력을 사용하면 외란이 존재하지 않을 때

는 u_0 가 0이므로 바이너리 제어기만으로 제어하므로 시스템의 떨림은 저감되고, 외부 외란이 존재하면 u_0 가 앞먹입되어 견실성을 확보할 수 있다.

5 시뮬레이션 결과 및 고찰

제안한 바이너리 외란관측기의 타당성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 성능의 비교·평가를 위해 SDO와 기존의 BDO 그리고 제안한 BDO 대하여 행하였다.

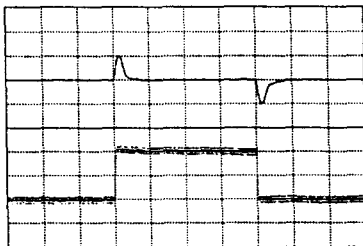
그림 4는 지령위치 2π 에 대한 외부외란이 없을 때 제안한 바이너리 시스템의 결과로 빠르고 정확한 위치응답 특성을 보여주고 있다.



[0.8π rda/div, 83 rpm/dis, 0.1s/div]

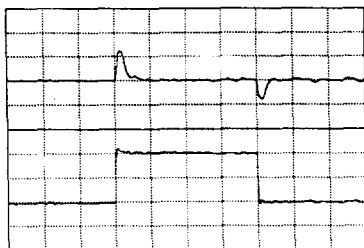
그림 4 외부외란이 없을때의 제안한 바이너리 위치제어 시스템의 위치와 속도

Fig. 4 Position and speed of the proposed BC system without external disturbance



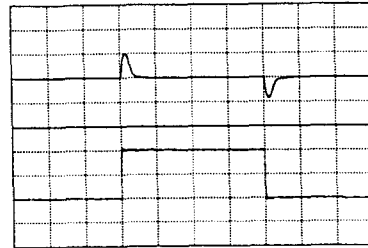
[0.08π rad/div, 2.5 N · m/dis, 0.1s/div]

그림 5 외란 인가시 SDO의 위치오차와 추정외란
Fig. 5 Estimated external disturbance of SDO and position error



[0.08π rad/div, 2.5 N · m/dis, 0.1s/div]

그림 6 외란 인가시 기존 BDO의 위치오차와 추정외란
Fig. 6 Estimated external disturbance of the conventional BDO and position error



[0.08π rda/div, 2.5 N · m/dis, 0.1s/div]

그림 6 외란 인가시 제안한 BDO의 위치오차와 추정외란
Fig. 6 Estimated external disturbance of the proposed BDO and position error

그림 5~7은 계단적으로 변화하는 외란에 대한 관측기들의 성능을 평가하기 위해 실시한 시뮬레이션 파형이다. 먼저 그림 5는 SDO의 위치오차와 추정외란을 나타내었다. 인가된 외란에 대해 빠른 추정능력을 보이고 있으나 SDO의 불연속적인 특성이 추정외란에 나타나는 것과 이로 인한 위치 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 6은 기존의 BDO의 위치오차와 추정외란을 나타내었다. 바이너리 이론을 적용하였기 때문에 추정값에 불연속적인 특성은 없으나 정상상태 오차가 발생하고 이로 인한 위치오차가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 제안한 BDO의 위치오차와 추정외란으로 추정값에 불연속성이 없고 정상상태 오차가 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한 추정값에 떨림이 없으므로 위치오차도 발생하지 않는 것을 볼 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 기존 바이너리 외란관측기의 문제점인 정상상태 오차를 해결하기 위해 새로운 바이너리 외란관측기를 제안하고 이를 유도전동기의 위치제어에 대해 적용하였으며, 이를 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 제안한 관측기는 떨림과 추정값의 정상상태 오차가 거의 없음을 확인하였다.
- 2) 제안한 관측기를 사용한 위치제어 시스템은 빠른 응답과 외부외란에 견실한 위치제어가 가능함을 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] J.-J. E. Slotine, "Sliding Mode Controller Design for Non-linear System", Int. J. Control, 40, pp.421-434, 1984.
- [3] 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., pp.393-400, 1994.
- [4] J.-J. E. Slotine, "Sliding Observer for Robot Manipulators", Automatica, Vol.27, No.5, pp. 859-400, 1991.
- [5] Y. S Kim et. al, "Disturbance Observer with Binary Control Theory", IEEE PESC., pp. 1229-1234, 1996.
- [6] S.V. Emelyanov, Binary Automatic Control System, Mir Publishers, Moscow, 1987.
- [7] 한 윤석 외 3인, "바이너리 제어기를 이용한 유도전동기의 위치제어", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 507-509, 1996. 7.