

## 바이너리제어를 이용한 외란관측기

유완식\*, 김용철\*, 김영조\*\*, 김영석\*

\* 인하대학교 전기공학과 \*\* 유한전문대 제어제측과

### Disturbance Observer with Binary Control

Wan-sik You, Yeung-cheol Kim, Young-jo Kim, Young-seok Kim

\* Inha University, \*\* Yuhan Junior College

#### Abstract

In this paper, a disturbance observer with binary control is proposed to suppress the chattering of sliding mode observer in estimation of the external disturbance. Binary control has the property of chattering alleviation in addition to advantages of the conventional sliding mode control. As a simulation result, it is confirmed that the robust and high precision position control is possible by the proposed binary observer.

#### 1. 서론

슬라이딩모드제어는 시스템의 상태를 슬라이딩면에 구속시켜 상태공간의 원점으로 향하게 함으로써 강인한 특성을 가진다. 그리고 이러한 특성을 이용하여 전동기의 위치 및 속도제어 뿐만 아니라[1-2], 최근에는 속도관측기나 외란관측기에도 널리 적용되고 있다[3-4]. 그러나 슬라이딩모드제어는 제어기의 유한한 샘플링주파수로 인하여 떨림(Chattering)이 발생하고, 떨림은 시스템의 성능을 저하시킨다. 특히, 강인성을 확보하기 위해 외란관측기를 이용하여 외란을 추정하고 추정외란에 해당하는 제어입력을 피드포워드(Feedforward) 보상할 때 슬라이딩모드 외란관측기를 적용하면 추정외란에 많은 리플(Ripple)이 포함되고, 이것은 곧 전동기의 떨림으로 직결되게 된다.

본 논문에서는 슬라이딩모드 외란관측기의 떨림을 저감시키기 위해 바이너리제어[5-6]를 이용한 외란관측기를 제안하고 브러시리스 직류전동기의 위치제어에 적용하여 타당성을 확인한다. 바이너리제어는 슬라이딩모드제어의 일반화 형태로 슬라이딩모드제어의 특징을 가짐과 동시에 떨림을 저감시키는 장점을 가진다. 시뮬레이션 결과 제안한 관측기에 의해 추정된 외란은 리플을 거의 포함하지 않게 되므로 외란이 인가되었을 때도 떨림이 저감된 고정도의 위치제어가 가능함을 확인할 수 있었다.

#### 2. 바이너리 외란관측기의 설계

슬라이딩모드 관측기는 검출된 실제속도와 추정속도의 오차를 슬라이딩면에 구속시켜 0으로 가도록 하면서 그때의 외란을 추정하는 방식으로 불연속적인 우측항을 가짐으로써 추정외란이 적분된다고 할지라도 이득이 크면 추정외란에 떨림이 발생하게 된다. 따라서 강인하면서 또 떨림이 없는 바이너리 외란관측기를 제안한다. 브러시

리스 직류전동기의 위치제어에 있어서 제어기의 샘플링 주파수가 외란의 변화에 비하여 충분히 빠르다는 가정 하에서 외란을 상태변수로 추가하여 다음과 같은 방정식을 세울 수 있다.[3-4]

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

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

$$\text{단, } a = a(t) = D(t)/J(t), \quad b = b(t) = K_T/J(t), \\ d = d(t) = 1/J(t), \quad u = i_a$$

그리고 위의 시스템은 가관측이므로 다음과 같은 바이너리 외란관측기를 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & d \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} u - \begin{bmatrix} v \\ Lv \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$v = k_o \mu_o |\omega - \hat{\omega}| \quad (3)$$

$$\dot{\mu}_o = -\beta \{\mu_o + \text{sgn} \sigma\} \quad (4)$$

$$\sigma_o = \omega - \hat{\omega} \quad (5)$$

여기서,  $k_o$ ,  $\beta$  그리고  $L$ 은 설계 파라미터이고,  $\wedge$ 는 추정값을 나타낸다. 그림 1에 바이너리 외란관측기의 블록도를 나타내었다.

#### 1) 이득 $k_o$ 의 설정

바이너리 관측기는 슬라이딩모드 관측기와는 달리 슬라이딩면 대신 그림 2와 같이  $\sigma = 0$ 을 기준으로 일정한 폭을 갖는 영역을 설정하고, 영역 내에서 속도오차가 0을

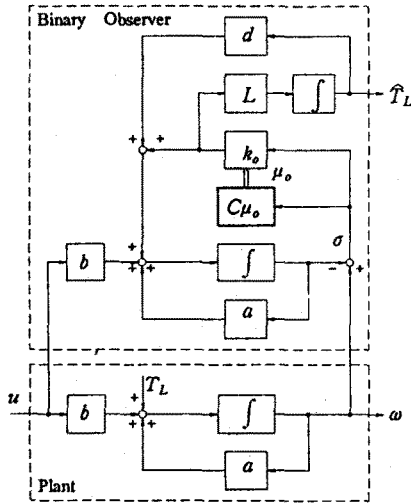


그림 1. 바이너리 외란관측기의 블록도

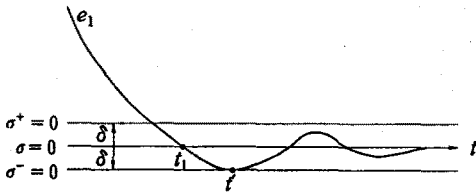


그림 2. 바이너리 관측기의 오차계적

로 가도록 연속적으로 제어함으로써 떨림을 저감할 수 있다. 여기서, 이득  $k_0$ 는 영역 내에 들어온 시스템의 상태가 영역 밖으로 벗어나지 않도록 하는 역할을 한다. 따라서, 먼저 영역의 경계 즉,  $\sigma^+ = 0$  또는  $\sigma^- = 0$ 에서 다음의 부등식을 만족하도록 하는  $k_0$ 를 구하면 된다.

$$\begin{aligned} \sigma \dot{\sigma} &= \sigma(\dot{\omega} - \hat{\omega}) \\ &= \sigma [ a(\omega - \hat{\omega}) + d(T_L - \hat{T}_L) \\ &\quad - k_0 \mu_0 |\omega - \hat{\omega}| ] < 0 \end{aligned} \quad (6)$$

$\sigma^+ = 0$ 과  $\sigma^- = 0$ 에서 각각  $\sigma = \delta$ ,  $\sigma = -\delta$  임을 이용하여 식 (6)을 만족하는  $k_0$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} k^0 &> \max \left\{ \sup \left| \frac{1}{(1-h)\delta} \{ a\delta + d(T_L - \hat{T}_L) \} \right|, \right. \\ &\quad \left. \sup \left| \frac{1}{(1-h)\delta} \{ a\delta - d(T_L - \hat{T}_L) \} \right| \right\} \\ k &: \text{임의의 양의 상수} \end{aligned} \quad (7)$$

iii) 이득  $\beta$ 의 설정

이득  $\beta$ 는  $\mu_0$ 가 영역 내에서  $|\mu_0| \geq 1-h$ 의 관계를 유지하도록 한다. 먼저,  $[t_1, t]$ 에서 식 (4)를 적분하여 시간에 대해 정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$t - t_1 < \frac{1}{\beta} \ln \frac{2}{h} \quad (8)$$

반증을 위해  $\mu_0(t') > -(1-h)$ 라고 가정하고, 다음과 같은 함수  $\lambda(t)$ 를 정의한다.

$$\lambda(t) = \frac{\sigma}{\delta} \quad (9)$$

$\lambda(t)$ 를  $[t_1, t]$ 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \int_{t_1}^t \frac{\dot{\omega} - \hat{\omega}}{\delta} dt \\ &\leq \frac{1}{\delta} [ \bar{k}_0 - k_0 \mu_0 |\omega - \hat{\omega}| ] (t - t_1) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{단, } \bar{k}_0 = \max | a(\omega - \hat{\omega}) + d(T_L - \hat{T}_L) |$$

다음과 같은 부등식을 만족하는  $\beta$ 가 있다고 하자.

$$\beta \geq \frac{1}{\delta} (\bar{k}_0 + k^0 \delta) \ln \frac{2}{h} \quad (11)$$

그러면 식 (8)과 식 (11)로부터 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\lambda(t) < 1 \quad (12)$$

그런데 정의에 의하면 영역의 경계 즉,  $t = t'$ 에서  $\lambda(t') = 1$  이어야 하는데  $\lambda(t) < 1$  이므로 앞에서 설정한 가정  $\mu_0(t') > -(1-h)$ 은 모순이 된다. 즉  $\beta$ 가 식 (11)을 만족하면  $|\mu_0| \leq 1-h$ 이 성립함을 알 수 있고, 이것은  $\sigma < 0$ 의 경우에 대해서도 동일하다.

한편 이득  $L$ 은 관측기가 안정하도록 극배치법에 의해서 적절하게 선정하면 된다.

### 3. 시뮬레이션 결과

제한한 관측기의 타당성을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 성능의 비교·평가를 위해 기존의 슬라이딩모드 외란관측기(Sliding Mode Disturbance Observer: SDO)와 바이너리 외란관측기(Binary Disturbance Observer: BDO) 두 종류에 대하여 행하였다.

그림 3과 그림 4는 각각 느린 주파수를 가지고 정현적으로 변화하는 외란을 인가하였을 때의 슬라이딩모드 관측기와 바이너리 관측기의 외란과 추정외란 그리고 추정오차를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 슬라이딩모드 관측기는 불연속적인 우측항에 의해 추정외란에 떨림이 발생하고 있으나 바이너리 관측기는 떨림이 거의 나타나지 않고 있다.

그림 5와 그림 6은 계단적으로 변화하는 외란을 인가하였을 때의 각 관측기의 외란과 추정외란 그리고 추정오차를 나타낸 것이다. 슬라이딩모드 관측기의 경우는 과도상태에서 오버슈트와 큰 폭의 떨림이 발생하고 정상상

태에서도 그림 3에서와 같이 계속적으로 떨림이 발생하고 있다. 반면 바이너리 관측기는 과도상태에서 약간의 오버슈트가 발생할 뿐 정상상태에서는 떨림이 전혀 없이 정확한 추정이 가능함을 보여주고 있다.

그림 7과 그림 8은 관측기에서 추정된 외란을 피드포워드(Feedforward) 보상하였을 때의 위치오차와 속도파형을 보여주고 있다. 두 그림을 비교해 보면 슬라이딩모드 관측기를 적용하였을 경우보다 바이너리 관측기를 적용하였을 때가 더 양호한 제어가 행해지고 있음을 볼 수 있다. 이것은 관측기로부터 발생하는 떨림이 곧바로 속도 변화에 영향을 미칠 수 있음과 이에 대한 대책으로 떨림이 적은 바이너리 관측기가 더 우수한 성능을 가짐을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 슬라이딩모드 외란관측기가 가지는 떨림현상을 제거하기 위해 바이너리제어이론을 적용한 외란관측기를 제안하고 브러시리스 직류전동기의 위치제어에 적용하였다.

연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

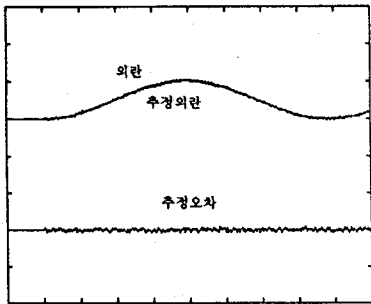
1) 바이너리제어를 위치 또는 속도제어 뿐만 아니라 관측기로의 적용을 확장하였다.

2) 바이너리 외란관측기가 슬라이딩 외란관측기에 비하여 동등한 강인성을 가지면서도 추정외란에서 발생하는 떨림을 효과적으로 제거가 가능하였다.

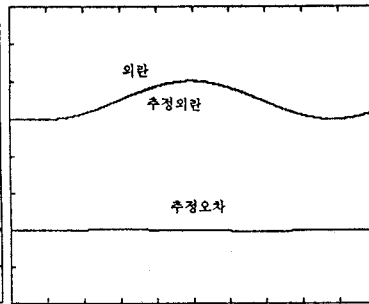
한편, 이상의 시뮬레이션에 대한 실험적 확인은 추후에 수행되어야 할 과제이다.

#### 참 고 문 헌

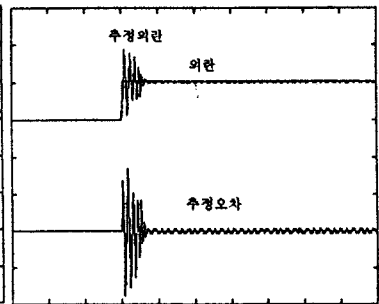
- [1] Slotine, J.-J. E., "Sliding Mode Controller Design for Non-linear System", Int. J. Control, 40, 421-434, 1984.
- [2] H. Hashimoto, "Variable Structure Approach for Brushless Servo Motor Control," IECON, pp.1169-1179, 1987.
- [3] Giuseppe S.Buja, "DISTURBANCE TORQUE ESTIMATION IN A SENSORLESS DC DRIVE," PESC'93, pp.977-982, 1993.
- [4] Se-Kyo Chung, "A Robust Speed Control of Brushless Direct Drive Motor Using Integral Variable Structure Control with Sliding Mode Observer," IAS'94, pp.393-400, 1994.
- [5] S.V. Emelyanov, Binary Automatic Control Systems, Mir Publishers, Moscow, 1987.
- [6] W. S. You, "A Position Control of Brushless DC Motor using Binary Controller with Continuous Inertial COFB," IPEC, pp.540-545, 1995.



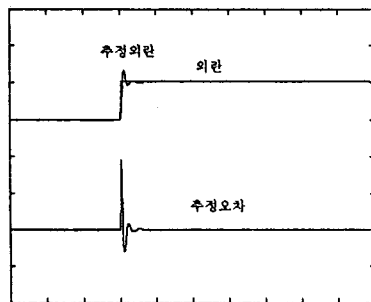
[ 3 N · m/div, 1.5 N · m/div, 100 ms/div ]  
그림 3. SDO의 추정외란과 오차  
(정현파 외란)



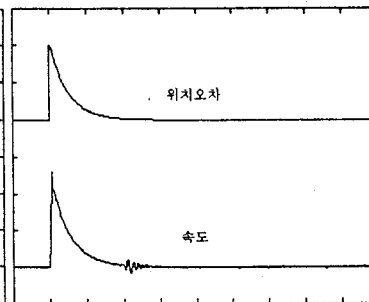
[ 3 N · m/div, 1.5 N · m/div, 100 ms/div ]  
그림 4. BDO의 추정외란과 오차  
(정현파 외란)



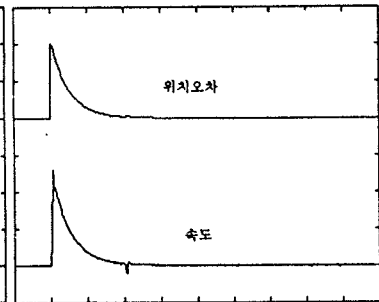
[ 3 N · m/div, 1.5 N · m/div, 100 ms/div ]  
그림 5. SDO의 추정외란과 오차  
(계단파 외란)



[ 3 N · m/div, 1.5 N · m/div, 100 ms/div ]  
그림 6. BDO의 추정외란과 오차  
(계단파 외란)



[ π rad/div, 200 rpm/div, 100 ms/div ]  
그림 7. SDO를 적용한 경우의  
위치오차와 속도파형



[ π rad/div, 200 rpm/div, 100 ms/div ]  
그림 8. BDO를 적용한 경우의  
위치오차와 속도파형