브러시 없는 직류전동기를 위한 연속관성형 외부루프를 갖는 바이너리제어기의 구현

論 文
45~1~9

Implementation of Binary Position Controller with Continuous Inertial External Loop for BLDC Motor

金 永 祖* · 金 榮 石**
(Young-Jo Kim · Young-Seok Kim)

Abstract - Brushless DC(BLDC) motor have been increasingly used in machine tools and robotics applications due to the reliability and the efficiency. In control of BLDC motor, it is important to construct the controller which is robust to parameter variations and external disturbances. Variable structure controller(VSC) has been known as a powerful tool in robust control of time varying systems. In practical systems, however, VSC has a high frequency chattering which deteriorates system performances. In this paper, a binary controller(BC) which takes the form of VSC and MRAC combined is presented to solve this problem. BC consists of the primary loop controller and the external loop controller to change the gain of primary loop controller smoothly. So it can generate the continuous control input and is insensitive to parameter variations in the given domain. To confirm the validity, various investigations of control characteristics for various design parameters in a position control system of BLDC motor are carried out.

Key Words : BC(Binary Control), BLDC Motor, Position Control, Chattering, Sliding Mode Control

1. 서 론

파라미터 변동이나 외란에 대해 강인한 제어성능을 얻기 위해 가변구조제어(VSC)가 널리 사용되고 있다. VSC는 시스템의 상태를 슬라이딩면(Sliding Surface) 상에 구속시켜 원점으로 향하게 함으로써 슬라이딩모드(Sliding Mode)에서는 강인한 특성을 가지게 된다. 그러나 실제의 시스템에 적용된 VSC는 제어지연, 히스테리시스 등으로 인하여 떨리는 현상이 발생하게 되고, 떨림(Chattering)은 시스템의 소자에 손상을 주거나 예기치 않은 불안정을 초래할 수도 있다.[1]-[3]

최근 VSC의 떨림현상을 저감하기 위한 많은 연구가 행하여지고 있는데,[4]-[9] 김 영석 등[9]은 떨림을 저감시키기 위해 바이너리제어(Binary Control) 기법을 도입한 새로운 가변구조제어기를 제안하고 이에 대한 이론적 고찰과 실험을 행하여 가능성을 보이고 있다.

본 연구에서는 떨림을 저감시키고, 기존의 바이너리제어기[9]가 갖는 단점을 보완하기 위해 외부루프제어기의 알고리즘이 개선된 바이너리 위치제어기를 설계한다. 바이너리제어 이론[10]은 슬라이딩모드제어와 기준모델 적응제어를 조합한 형태의 제어이론으로 일반적인 제어기가 가지는 주루프제어기 외에 외부루프제어기가 추가되어 있다. 외부루프제어기는 정해진 영역 내에서 시스템의 구조를 유연하게 절환하게 함으로써 기존의 VSC가 가지는 장점을 그대로 가지면서 떨림을 저감시키는 특징을 가지고 있다.

본 논문에서는 먼저 브러시 없는 직류전동기(Brushless DC Motor)의 모델링과 바이너리제어기의 구성, 그리고 연속관성형 외부루프를 갖는 바이너리제어기의 설계방법에 대하여 설명하였다. 다음으로 설계한 제어기의 타당성을 확인하기 위해 브러시 없는 직류전동기의 위치제어에 대한 컴퓨터 모의실험 및 실험을 행하고, 설계 파라미터들의 변화에 따른 제어기의 특성에 대하여 다양하게 조사하였다.

2. 바이너리제어기

2.1 브러시 없는 직류전동기의 모델링

위치제어를 위한 브러시 없는 직류전동기의 상태방정식을 다음과 같이 설정한다.

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

여기서, $x = \theta_{ref} - \theta$, $\quad \dot{x} = -\omega$

$a(t) = D(t)/J(t)$, $\quad b(t) = K_T / J(t)$, $\quad u = i_q$

D : 점성마찰계수, $\quad J$: 관성, $\quad K_T$: 토크상수,

i_q : 토크분 전류

$X(t) = [x(t),\ \dot{x}(t)\ ]^T \in R_x^2$: 상태벡터

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

---

*正 會 員 : 柳韓專門大 制御計測科 助教授
**正 會 員 : 仁荷大 工大 電氣工學科 副教授・工博
接受日字 : 1995年 6月 29日
1次 修正 : 1995年 9月 12日
2次 修正 : 1995年 11月 13日
3次 修正 : 1995年 11月 22日

$$a_{\min} \le a(t) \le a_{\max}$$

$$b_{\min} \le b(t) \le b_{\max} \qquad (2)$$

2.2 바이너리제어기의 구성

그림 1과 같이 바이너리제어기는 제어대상을 직접 제어하는 주루프제어기(Primary Loop Controller) C_u와 주루프제어기의 파라미터를 조정하는 외부루프제어기(External Loop Controller) C_μ로 구성된다.

그리고, 바이너리제어에서는 외부루프 오차 $\sigma(t) = \sigma(X(t))$를 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma(t) = -c\,\dot{x}(t) - x(t) \qquad (3)$$

또, 그림 2에서 나타낸 바와 같이 영역 G_δ를 다음과 같이 설정한다.

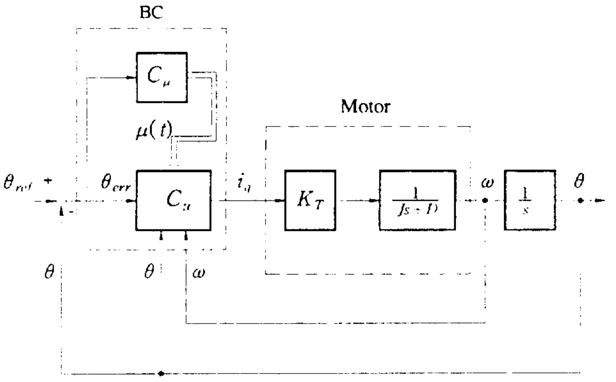


그림 1 바이너리제어기의 블럭도

Fig. 1 A Block diagram of binary controller

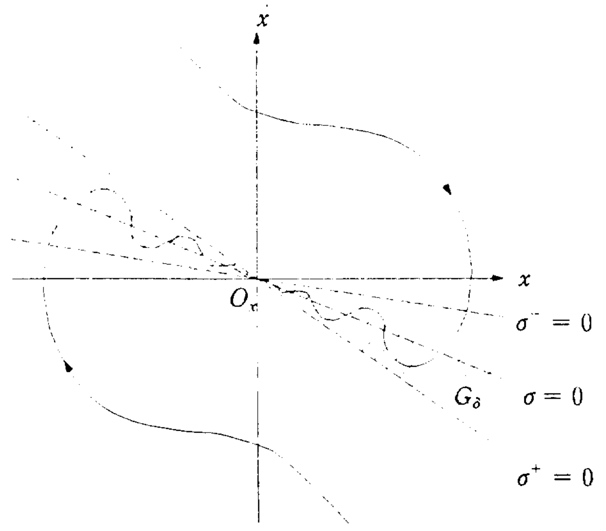


그림 2 바이너리제어의 영역 G_δ

Fig. 2 Domain G_δ of BC

$$G_\delta = x : \sigma^+(t)\,\sigma^-(t) \le 0$$

$$\sigma^+(t) = \sigma(t) - \delta|x(t)| \qquad \delta : const. \qquad (4)$$

$$\sigma^-(t) = \sigma(t) + \delta|x(t)| \qquad 0 \le \delta < 1$$

여기서, δ는 임의의 양의 상수이고, 식 (4)로부터 δ를 매우 작게 하면 영역의 경계가 슬라이딩면과 일치하게 됨을 알 수 있다.

2.3 바이너리 위치제어기의 설계

외부루프에 적분형 제어알고리즘을 사용한 경우[9]는 $|\mu(t)| \le 1$을 유지하기 위해 제어알고리즘을 절환해야 하는 번거로움이 있고, 또 시그넘(*signum*) 함수를 사용함으로써 $|\mu(t)| = 1$인 곳에서 즉, 영역의 경계에서 슬라이딩모드가 발생하여 외부루프제어기의 출력이 불연속적일 수 있다. 따라서, 이러한 점을 개선하기 위해 시그넘 함수와 적분기를 각각 포화(*saturation*) 함수와 지수함수로 대체한 연속관성형 제어알고리즘을 이용한 위치제어기를 설계한다.

그림 3에 연속관성형 외부루프를 갖는 바이너리제어기의 블럭도를 나타내었고, 제어알고리즘을 식 (5)와 (6)에 표시하였다.

$$C_u : u(t,x) = k(t)\,x(t)$$
$$k(t) = k^0\, b(t)\,\mu(t)\; sgn\, x(t) \qquad (5)$$

$$C_\mu : \dot{\mu}(t) = -\alpha\{\,\mu(t) + sat\,\lambda(t)\,\}, \quad t \ge t_0 \qquad (6)$$

여기서, $\lambda(t) = \sigma(t) / \delta|x(t)|$

k^0, α : 제어이득, t_0 : 초기시간

식 (5)에서 주루프제어기의 파라미터 $k(t)$는 외부루프제어기의 출력 $\mu(t)$에 의해 연속적으로 조정되고, $sgn\,x(t)$는 오차의 부호가 변화하여도 외부루프가 음(negative)의 부호를 유지하도록 하는 역할을 한다. 그리고 식 (6)은 $\mu(t)$가 지수함수의 형태를 하고 있고 $\lambda(t) = \sigma(t)/\delta|x(t)|$로 정의되는 함수에 의

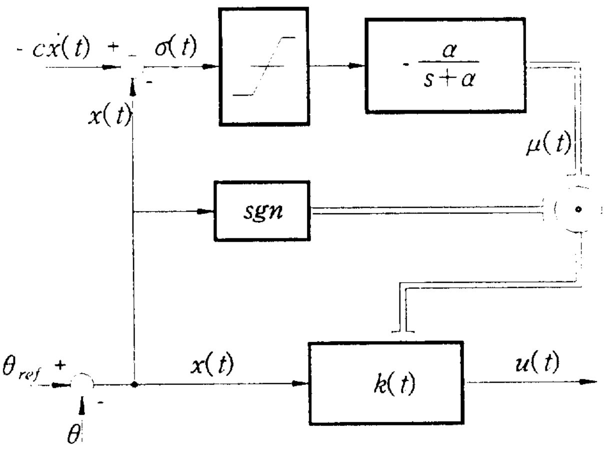


그림 3 연속관성형 외부루프의 블럭도

Fig. 3 A block diagram of CI external loop

해 연속화 된다는 점에서 연속관성형이라 불린다. 외부루프를 포함한 바이너리제어시스템 방정식은 식 (7)과 같은 미분방정식으로 표현할 수 있다.

$$\ddot{x}(t) + a(t)\dot{x}(t) = -k^0 b(t)\,\mu(t)\,|x(t)| \tag{7}$$

바이너리제어기의 주루프제어 이득 k^0와 외부루프제어 이득 α는 G_δ 불변조건(Invariant Condition)으로부터 구할 수 있다. 여기서, G_δ 불변조건이란 시스템의 상태 $\mathbf{x}(t)$가 일단 영역 G_δ 내에 들어가면 그 후로 계속 G_δ 영역을 벗어나지 않고 영역 내에 머물러 있을 조건을 말한다. 이 조건은 가변구조제어의 슬라이딩모드 존재조건과 같은 개념이다. 따라서 식 (7)의 바이너리제어 시스템이 불변이기 위해서는 영역 G_δ의 경계에서 즉, 그림 4의 $t = t'$에서 다음 조건을 만족하면 된다.

$$\sigma(t) \cdot \dot{\sigma}(t) < 0 \tag{8}$$

G_δ의 경계에서 $\sigma(t)$의 변화율은 식 (3), (4) 그리고 (7)을 이용하면 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{\sigma}_{\sigma^+=0} = c\left[\left(\frac{1+\delta\, sgn x(t)}{c}\right)^2 - a(t)\,\frac{1+\delta\, sgn x(t)}{c}\right]x(t) + c\,k^0\, b(t)\,\mu(t)\,|x(t)| \tag{9}$$

식 (8)과 (9) 그리고 영역의 경계에서 $|\mu(t)| \ge 1-h$의 조건하에서 주루프제어 이득 k^0는 다음과 같이 얻어진다.

$$k^0(1-h) > \sup_{t \ge t_0}\left|\frac{1}{b(t)}\left(\left(\frac{1+\delta sgn x(t)}{c}\right)^2 - a(t)\,\frac{1+\delta sgn x(t)}{c}\right)\right| \tag{10}$$

G_δ의 경계에서 $\mu(t)$가 $|\mu(t)| \ge 1-h$의 관계를 만족시키기 위한 외부루프제어 이득 α는 식 (6)과 함수 $\lambda(t)$를 이용하면 다음과 같이 구해진다..

$$\alpha \ge \frac{2c}{\delta}\,(k^0 + \overline{k^0})\,\ln\frac{4}{2h-1} \tag{11}$$

여기서, $\frac{1}{2} < h < 1$: 상수

$$\overline{k^0} = \max_{|\lambda|\le 1}\ \sup_{t \ge t_0}\left|\frac{1}{b(t)}\left(\left(\frac{1+\delta\lambda(t) sgn x(t)}{c}\right)^2 - a(t)\,\frac{1+\delta\lambda(t) sgn x(t)}{c}\right)\right|$$

한편, 바이너리제어의 불변조건이 성립하기 위해서는 G_δ 영역 밖에 존재하는 시스템의 상태가 유한한 시간 내에 영역 G_δ에 도달할 조건이 만족해야 한다. 이 조건은 가변구조시스템의 도달조건(Reaching Condition)과 같은 의미이다. 도달조건은 다음과 같이 주어지고[11], 여기서 파라미터 c를 구할 수 있다.

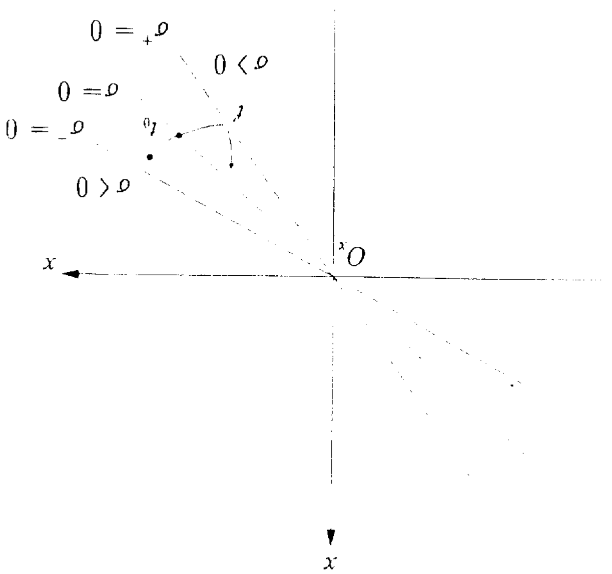


그림 4 G_δ 영역 내에서 시스템의 상태변화

Fig. 4 Variation of system state in the domain G_δ

$$\inf_{t \ge t_0} c\,a(t) > 1, \quad c > 0 \tag{12}$$

식 (10), (11) 그리고 (12)가 모두 만족되면 모든 시스템의 상태는 유한한 시간 내에 영역 G_δ 내에 들어가게 되고, 그 후로는 시스템의 특성이 다음 식들에 의해 지배되므로 파라미터 변동에 무관한 특성을 갖는다.

$$\dot{x}(t) = -x(t)/c - \sigma(t)/c \tag{13}$$

$$|\sigma(t)| \le \delta\,|x(t)| \tag{14}$$

그리고 $0 < \delta < 1$의 조건이 만족되면 다음의 결과를 얻을 수 있다.[10][11]

$$\lim_{t\to\infty} \|X(t)\| = 0 \tag{15}$$

식 (15)로부터 영역 G_δ 내에 존재하는 모든 시스템의 상태는 원점으로 수렴함을 알 수 있고, 이상의 모든 조건이 만족되면 바이너리제어 시스템은 G_δ영역 내에서는 점근안정하고 G_δ영역 외부를 포함한 모든 영역에 대해서는 다음 식에 나타낸 바와 같이 Lyapunov 안정하다.[10][11]

$$\|X(t)\| \le N\,\|X(t_0)\|, \qquad t \ge t_0 \tag{16}$$

N : 설계 파라미터와 시스템 파라미터에 의해 결정되는 양의 상수

3. 실험 결과 및 고찰

설계한 제어기의 타당성을 확인하기 위하여 실험과 컴퓨터 모의실험을 병행하였다. 실험은 성능의 비교·평가를 위해 떨림저감법[4]을 사용한 기존의 VSC와 BC 두 종류의 제어기에

대하여 행하였다. 실험장치의 구성도를 그림 4에 나타내었다. 그림에 나타냈듯이 마이크로프로세서는 DSP(TMS320C31)를 사용하였고 샘플링시간은 120 μsec로 하였다. 표 1은 실험에 사용된 파라미터들이다. 표에 나타낸 전동기는 정현파형 역기전력을 갖는 브러시 없는 직류전동기이다.

그림 6과 그림 7은 각각 VSC와 BC의 위치오차와 속도를 나타낸 실험 파형이고, 그림 8과 그림 9는 속도파형 만을 확대한 것이다. 지령치는 2π [rad]로 하였다. 두 제어기 모두 목표위치에 잘 도달함을 볼 수 있다. 그런데 속도파형의 경우 BC는 VSC와 다르게 과도상태에서 떨림이 거의 발생하고 있지 않음을 볼 수 있다.

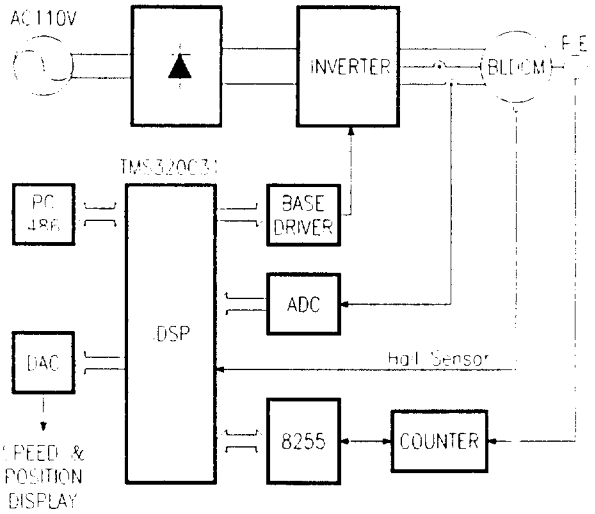


그림 5 실험장치의 구성도

Fig. 5 Hardware configuration

표 1 시스템 파라미터와 제어 이득

Table. 1 System parameters and control gains

Motor Parameters	Control Gains
100V / 500W,	$1/c = 20$
R = 3.35 [Ω]	$a = 300$
L = 0.015 [H] ,	$\delta = 0.5$
p = 4	$h = 0.05$
K_T = 1.5 [N · m/A],	$\gamma = 500$
K_E = 0.4 [N · m/A]	$k^0 = 2.0$
J = 0.00318 [N · m · s^2]	

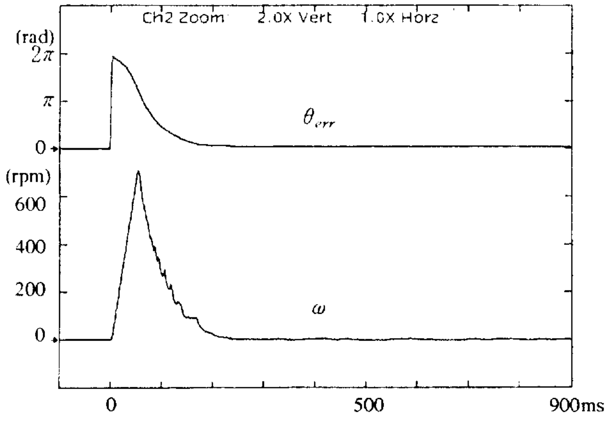


그림 6 VSC의 위치오차와 속도파형

Fig. 6 Waveforms of position error and speed for VSC

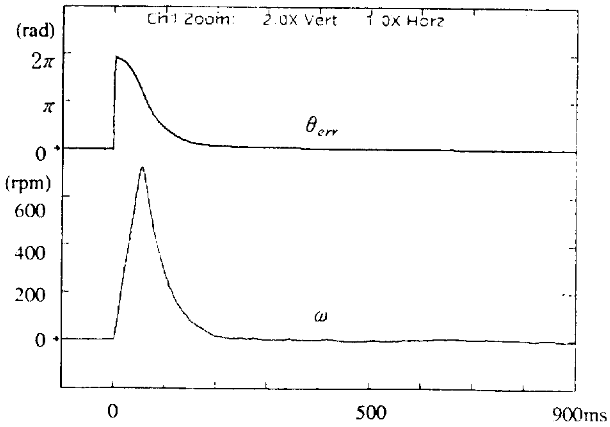


그림 7 BC의 위치오차와 속도파형

Fig. 7 Waveforms of position error and speed for BC

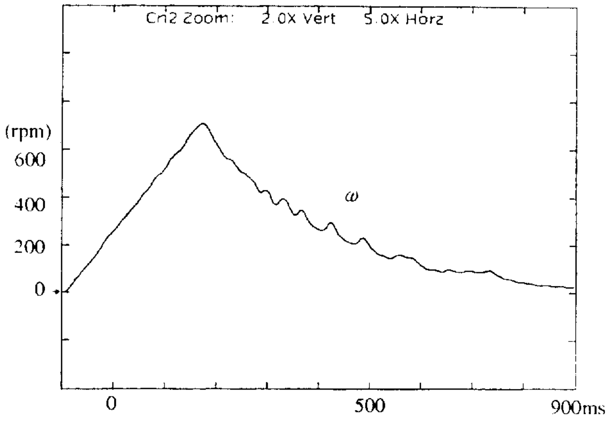


그림 8 VSC의 속도 확대파형

Fig. 8 Enlarged waveform of speed for VSC

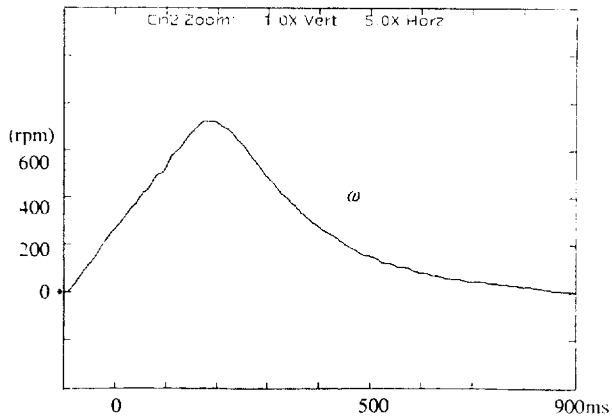


그림 9 BC의 속도 확대파형

Fig. 9 Enlarged waveform of speed for BC

그림 10과 그림 11은 위상평면 상에서의 상태궤적을 나타낸 실험 파형이다. 그림에서 VSC의 경우는 그림 8의 속도파형에서와 같이 슬라이딩면을 중심으로 시스템의 구조를 절환함으로써 상대적으로 높은 주파수의 떨림이 발생하고 있는데 비해 BC의 경우는 연속적인 제어입력에 의해 원점 근방에서만 약간의 떨림이 발생할 뿐 거의 떨림이 보이지 않고 있다.

그림 12는 두 제어기의 토크분 지령전류를 비교한 실험 파형이다. 속도파형에서와 마찬가지로 VSC의 지령전류는 불연속적인 반면 BC의 경우는 연속적인 제어입력을 생성함으로써 지령전류의 떨림이 거의 나타나지 않고 있다.

다음 몇 개의 파형들은 설계 파라미터 α, δ 그리고 k^0의 크기에 따른 BC의 특성을 시뮬레이션을 통하여 조사한 것이다. 먼저 그림 13은 α를 변화시키면서 나타낸 상태궤적 시뮬레이션 파형이다. α가 너무 작은 경우는 식 (11)의 불변조건을 만족시키지 못하므로 불변성이 유지되지 않아 오버슈트가 발생하고 있다. α가 큰 경우는 궤적이 슬라이딩면($\sigma = 0$)에 근접함을 알 수 있지만 너무 크면 $\sigma = 0$의 선상에서 떨림이 발생할 수 있으므로 적절하게 선택되어야 한다.

그림 14는 δ를 변화시켰을 때의 상태궤적 시뮬레이션 파형

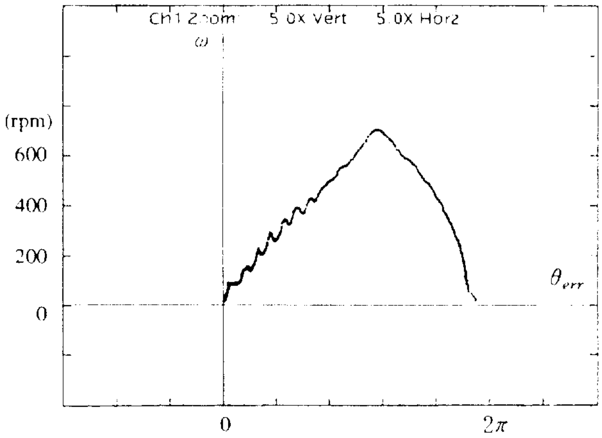


그림 10 VSC의 위상궤적파형

Fig. 10 Phase trajectory of VSC

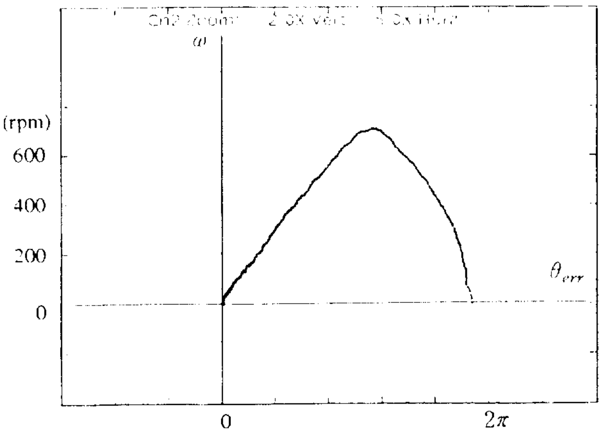


그림 11 BC의 위상궤적파형

Fig. 11 Phase trajectory of BC

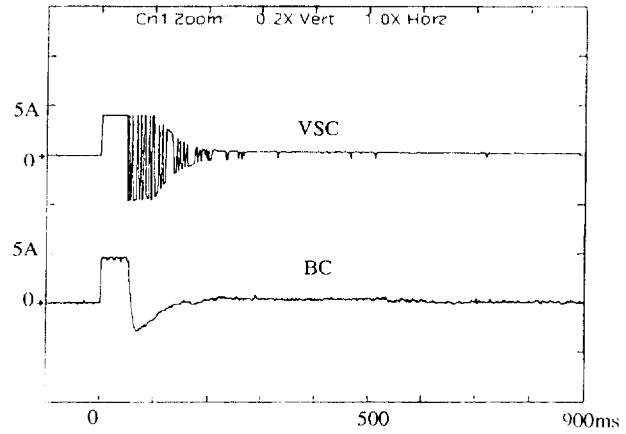


그림 12 두 제어기의 지령전류파형

Fig. 12 Waveforms of Reference current for both controllers

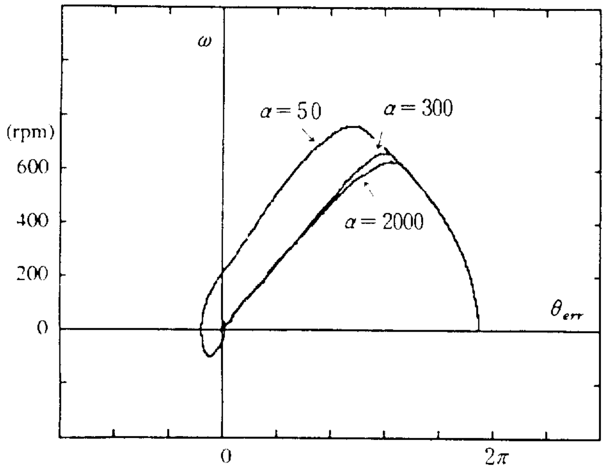


그림 13 α의 변화에 따른 위상궤적파형

Fig. 13 Phase trajectory for the variation of α

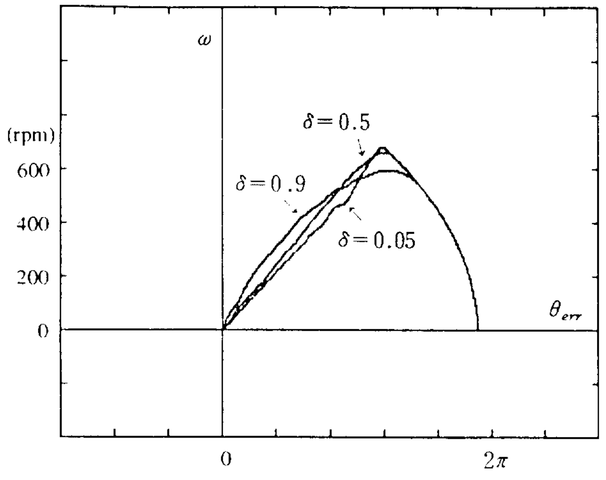


그림 14 δ의 변화에 따른 위상궤적파형

Fig. 14 Phase trajectory for the variation of δ

이다. 식 (11)에서 알 수 있듯이 δ는 α와 반비례관계가 있으므로 그림 13과는 대조되는 특성을 보이고 있다. δ가 크면

G_δ영역이 넓어지므로 제어입력이 넓은 영역에서 연속화되고 영역 내에서는 제어입력이 작아지므로 도달시간이 길어지게 된다. 반면 δ가 작으면 G_δ영역은 점차 좁아져서 VSC와 유사한 특성을 나타낸다. 그림 15는 δ를 작게 하고 α를 크게 하였을 때의 실험파형이다. BC가 VSC와 거의 같은 특성을 보이고 있다.

그림 16은 주루프 이득 k^0를 변화시켰을 때의 상태궤적 시뮬레이션 파형이다. k^0가 작으면 제어입력이 작아지므로 떨림이 적은 연속적인 제어입력의 생성은 가능하나 외란에 약해지게 되고 k^0가 크면 그 반대 특성을 나타내게 된다. 따라서 k^0는 식 (10)의 범위 내에서 적절하게 선택되어야 한다.

그림 17은 적분형 외부루프를 갖는 바이너리제어기[9]와 연속관성형 외부루프를 갖는 바이너리제어기의 특성을 비교하기 위하여 각 제어기의 $\mu(t)$의 변화를 시뮬레이션한 것이다. 앞에서도 언급하였듯이 적분형의 경우는 제어알고리즘상 $|\mu(t)| = 1$에서 떨림이 발생하고 있음을 보여주고 있으나 연속관성형의 경우는 $\mu(t)$가 지수적으로 변화하므로 그러한 현상은 발생하지 않는다.

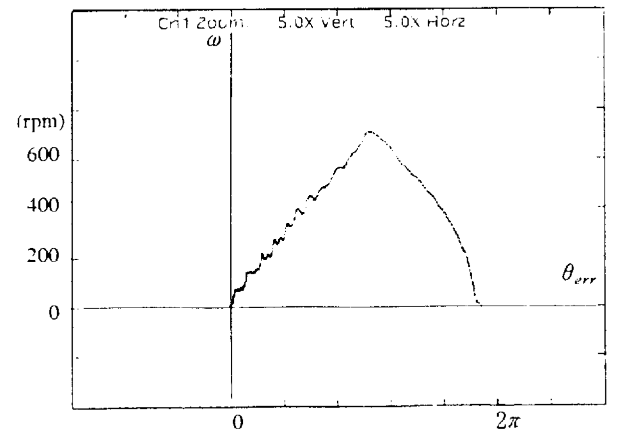


그림 15 α가 크고 δ가 작을 때의 위상궤적파형
Fig. 15 Phase trajectory for large α and small δ

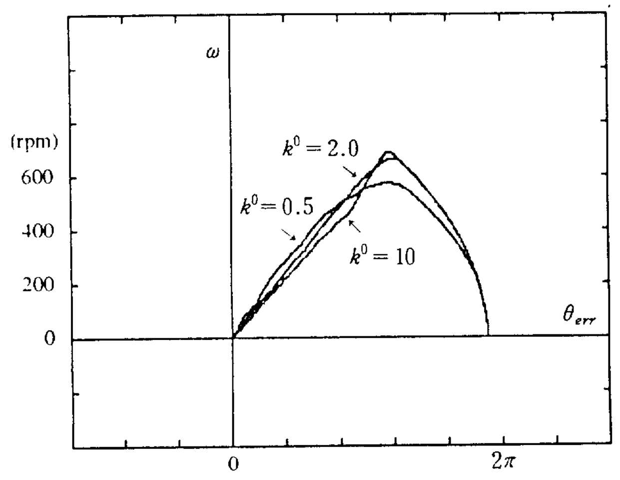


그림 16 k^0의 변화에 따른 위상궤적파형
Fig. 16 Phase trajectory for the variation of k^0

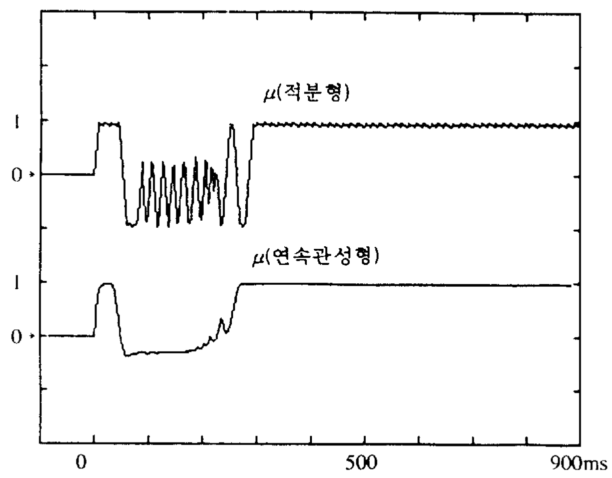


그림 17 외부루프제어기 출력 $\mu(t)$의 비교
Fig. 17 Comparison of the external loop controller outputs $\mu(t)$

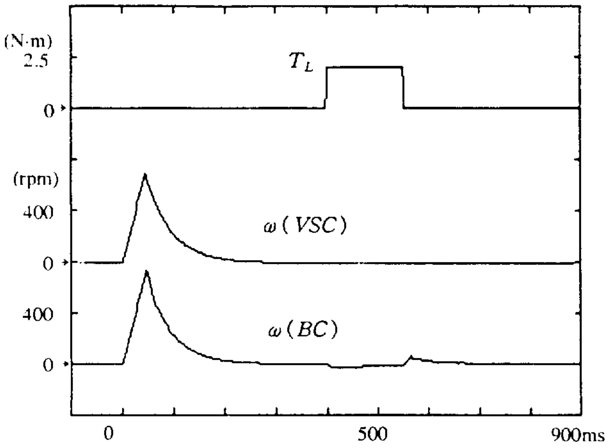


그림 18 외란 T_L을 인가하였을 때의 속도파형
Fig. 18 Speed waveform for the external disturbance T_L

그림 18은 강인성을 확인하기 위해 외란을 인가하면서 두 제어기의 속도파형을 모의실험한 것이다. 외란은 정격토크의 약 70%정도가 되도록 하였다. VSC의 경우는 정합조건(Matching Condition)이 만족하는 경우는 이와 같이 외란에 거의 영향을 받고 있지 않으나 BC의 경우는 현재 시스템 방정식에서 외란을 고려하고 있지 않으므로 VSC 정도의 강인성은 확보하지 못하고 있다. 그리고 외란에 의한 속도변동이 발생하고 있는 또 다른 이유는 BC는 슬라이딩면 대신 영역을 사용하고 영역에 대해 불변이기 때문으로도 해석된다. 이에 대한 해결책으로는 제어입력 $u(t)$의 생성에 속도오차 항을 추가하는 것과 외란옵저버를 이용한 제어입력의 보상 등을 고려해 볼 수 있다.

이상의 실험으로부터 바이너리제어기는 정상상태 뿐만 아니라 과도상태에서의 떨림도 효과적으로 억제가 가능하며 파라미터 변동에 대해 둔감함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 떨림저감을 위해 바이너리 위치제어기를 설

계, 구현하고 브러시 없는 직류전동기에 적용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 바이너리제어기의 타당성과 가능성을 확인하였다.

(2) 기존의 가변구조 제어기뿐만 아니라 적분형 외부루프를 갖는 바이너리제어기에 비하여 연속적인 제어입력의 생성이 가능하고 떨림이 거의 없는 제어기의 구현이 가능하였다.

(3) 파라미터 변동에 둔감함을 모의실험을 통하여 확인하였다.

(4) 오버슈트가 없는 안정한 제어기를 구성할 수 있었다.

(5) 제어 파라미터들의 변화에 따른 제어기의 특성을 조사함으로써 추후 설계에 있어서 이득의 선정이 용이하도록 하였다.

(6) 주루프에 보조루프를 추가함으로서 연속적인 제어입력의 생성이 가능한 반면 약간의 강인성이 희생될 수 있음을 확인하였고, 이에 대한 몇 가지 대책을 제시하였다.

본 연구는 유한전문대학 산업과학기술연구소의 연구비 지원에 의하여 조성된 것임

참 고 문 헌

[1] J. Y. Hung, "Variable Structure Control : A Survey," IEEE Trans. Ind. Elec., Vol.40, No.1, 1993.

[2] 송 기호, 송 명현, 박 귀태, 천 희영, "가변구조계의 Reaching Phase 및 Chattering 현상의 제거에 관한 연구," 전기학회논문집, 제36권 제1호, pp.52-57, 1987.

[3] V. I. Utkin, "Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol.40, No.1, pp.23-36, 1993.

[4] F. Harashima, "Brushless Servo Motor Control Using Variable Structure Approach", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 24, No.1, pp.160-170, 1988.

[5] H. Hashimoto, "Variable Structure Approach for Brushless Servo Motor Control", IECON, pp.1169-1179, 1987.

[6] J. C. Hung, "Chattering Handling for Variable Structure Control Systems", IECON, pp.1968-1971, 1993.

[7] K. shyu, "A modified variable structure controller," Automatica, Vol.28, No.6, pp.1209-1214, 1992.

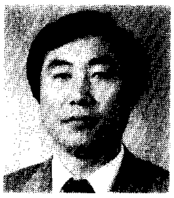
[8] A. Consoli, "A DSP sliding mode field oriented control of an interior permanent magnet motor drive," IPEC Tokyo, pp.296-303, 1990.

[9] 유 완식, 김 웅회, 김 웅철, 김 영석, "적분형 COFB를 갖는 바이너리제어," 전기학회 추계학술대회논문집, pp.147-149, 1994.

[10] S. V. Emelyanov, Binary Automatic Control Systems, Mir Publishers, Moscow, 1987.

[11] W. S. You, Y.J. Hur, Y.S. Kim "A Position Control of Brushless DC Motor using Binary Controller with Continuous Inertial COFB," IPEC Yokohama, Vol.1, pp.540-545, 1995.

저 자 소 개



김 영 조 (金 永 祖)

1950년 11월 8일생. 1972년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 단국대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 유한전문대학 제어계측과 조교수

김 영 석 (金 榮 石)

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