

바이너리제어를 이용한 동력설비용 브러시리스 직류전동기의 위치제어

(A Position Control of Brushless DC Motor for Power Installation with Binary Control)

劉完植* · 曹圭珉** · 金榮石***
(Wan-Sik You · Kyu-Min Cho · Young-Seok Kim)

요 약

가변구조제어는 승강기의 속도 및 위치제어와 같은 안정성과 강인성이 요구되어지는 동력설비의 제어에 사용되어 질 수 있다. 가변구조제어는 슬라이딩 면을 중심으로 시스템의 구조를 절환하여 시스템의 상태가 상태공간의 원점으로 향하게 하므로 오버슈트가 없고, 일단 슬라이딩모드에 들어가게 되면 시스템의 파라미터나 외란에 거의 영향을 받지 않는다는 장점을 가지게 된다. 그러나 실제의 시스템에서는 연산에 의한 지연 등에 의해 고주파의 채터링이 발생하여 승강기의 경우 승차감 저하와 같은 시스템에 좋지않은 영향을 미친다.

본 연구에서는 채터링 저감을 위해 고속연산이 가능한 DSP를 이용하여 관성형 외부루프를 갖는 바이너리제어기를 구현하고 브러시리스 직류전동기의 위치제어에 적용한다. 바이너리제어기는 주루프의 이득을 유연하게 가변함으로써 연속적인 제어입력을 생성할 수 있도록 외부루프를 추가한 구조를 가지고 있으며, 가변구조제어가 가지는 장점을 가지면서 채터링을 저감시키는 특징이 있다.

Abstract

Variable structure control(VSC) can be used for the control of power plants required stability and robustness such as elevator control. It has no overshoot and is insensitive to parameter variations and disturbances in the sliding mode where the system structure is changed with the sliding surface in the center. But in the real system, VSC has a high frequency chattering which has a bad influence upon the control system performances.

In this paper, to alleviate the high frequency chattering, a binary controller(BC) with inertial type external

*正會員：仁荷大 大學院 電氣工學科 博士課程
**正會員：柳韓專門大 情報通信科 專任講師, 工博

***正會員：仁荷大 工大 電氣工學科 副教授, 工博
接受日字：1995年 3月 16日

loop is implemented by DSP and applied to position control of brushless DC motor. Binary controller has external loop to generate the continuous control input with the flexible variation of primary loop gain. Thus it has the property of chattering alleviation in addition to advantages of the conventional variable structure control.

1. 서론

가변구조제어(VSC)는 서보모터의 위치제어나 로보틱스 분야, 또는 승강기와 같은 동력설비의 속도 및 위치제어에 쉽게 적용이 가능한 제어법이다. VSC는 슬라이딩 면을 중심으로 시스템의 구조를 전환하여 시스템의 상태가 상태공간의 원점으로 향하게 하므로 오버슈트가 없고, 일단 슬라이딩모드에 들어가게 되면 시스템의 파라미터나 외란에 거의 영향을 받지 않는다는 장점을 가지게 된다. 그러나 실제의 시스템에서는 연산에 의한 제어지연, 스위칭속도의 한계, 검출기의 한계 등으로 이상적인 슬라이딩모드는 발생할 수 없고, 고주파의 채터링이 포함된 소위 실제 슬라이딩모드가 발생하게 된다. 그리고 이 채터링은 시스템의 모델링과정에서 무시된 고주파 특성을 여기시킬 수 있고, 또 소자에 손상을 주는 등의 문제점을 야기시킨다.^{1)~4)} 또, 승강기 등의 제어에 적용될 경우는 승차감을 저하시킬 수 있다. 따라서 VSC에 있어서 가장 중요한 관건은 채터링저감 문제라고 할 수 있다. 이러한 채터링을 저감하기 위한 연구가 최근들어 활발히 진행되어왔고 다수의 논문이 발표되었다.^{5)~9)} 그러나 지금까지 제안된 방법들은 채터링저감의 대가로 강인성이 희생되거나 제어기의 구현이 복잡해지는 단점을 가지게 되고, 특히 과도상태의 채터링저감 효과는 아직 미비한 상태이다.

본 논문에서는 VSC가 가지는 문제점인 채터링을 저감시키기 위하여 바이너리제어 이론¹⁰⁾을 이용한 위치제어를 설계하고, 고속연산이 가능한 DSP를 이용하여 구현한다. 그리고 실험을 통하여 제어기의 타당성을 확인한다. 제어대상은 편의상 브러시리스 직류전동기의 위치제어로 하였으나 유도전동기나 동기전동기의 위치 및 속도제어로의 적용도 가능하리라 생각한다. 바이너리제어기는 일반적인 제어기가 가지는 주루프제어기 외에 외부루프제어기를 추가하여 일정 영역을 설

정하고 이 영역내에서 시스템의 구조를 전환하게 함으로써 기존의 VSC가 가지는 장점을 그대로 가지면서 채터링을 저감시키는 특징을 가지고 있다.

논문은 다음과 같이 구성하였다. 첫째로 제안하는 바이너리제어의 개요 및 제어기의 설계에 대하여 서술하였다. 둘째로 실험을 위한 시스템 구성 및 실험과 고찰을 행하였다. 그리고 마지막으로 결론을 맺었다.

2. 바이너리제어기

2.1 브러시리스 직류전동기의 모델링

위치제어를 위한 브러시리스 직류전동기의 상태방정식을 다음과 같이 설정한다.

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

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

$$a(t) = D(t)/J(t), \quad b(t) = K_r/J(t), \quad u = i_a$$

D : 점성마찰계수, J : 관성 모멘트

$$x(t) = [x(t), \dot{x}(t)]^T \in \mathbb{R}_x^2 : \text{상태벡터}$$

그리고, 브러시리스 직류전동기의 파라미터 $a(t)$ 는 다음과 같은 범위 내에서 변동하는 것으로 가정한다.

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

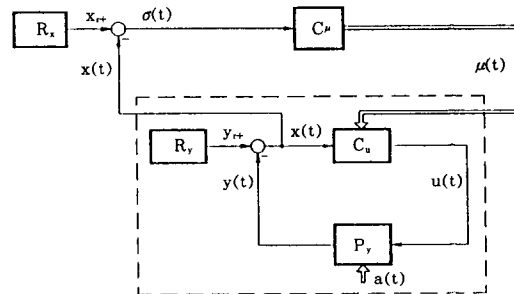


그림 1. 바이너리제어의 개략도
Fig. 1. Block diagram of binary control

2.2 바이너리제어기의 구성

그림 1과 같이 바이너리제어기는 제어대상인 플랜트(P_v)를 직접 제어하는 역할을 하는 주루프 제어기(Primary Loop Controller) C_v와 주루프 제어기의 제어이득을 조정하는 외부루프제어기(External Loop Controller) C_μ로 구성된다. 그림에서 제어신호의 표현을 두가지로 하였는데 가는 화살표(→)로 나타낸 신호는 σ(t)와 같은 일반적인 변수를 의미하고, 2중 화살표(⇒)로 나타낸 신호는 μ(t)와 같이 다른 제어기 파라미터의 변형형태를 결정하는 변수를 의미한다.

바이너리제어에서는 외부루프에러 σ(t) (= σ(x(t)))를 다음과 같이 정의한다.

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

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

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

$$\sigma^+(t) = \sigma(t) - \delta|x(t)| \quad \delta : \text{const.} \quad (4)$$

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

여기서, δ는 설계파라미터로 크기를 매우작게 하면 영역 G_δ는 슬라이딩모드제어의 초평면과 같아지는 특징이 있다.

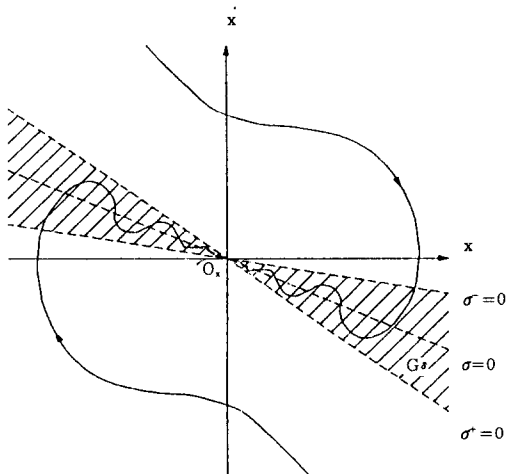


그림 2. 바이너리제어의 해 궤적
Fig. 2. Typical behavior of BC.

2.3 관성형 외부루프를 갖는 바이너리 위치제어기

그림 1의 바이너리제어 블록도에서 외부루프 제어기 C_μ와 주루프제어기 C_v가 각각 다음과 같은 알고리즘을 갖는 바이너리제어기를 관성형 외부루프를 갖는 바이너리제어기라고 한다.

$$C_v : u(x, t) = k(t)x(t) \quad (5)$$

$$k(t) = k^0 b(t) \mu(t) \text{sgn } x(t)$$

$$C_\mu : \dot{\mu}(t) = -\alpha \{ \mu(t) + \text{sgn } \sigma(t) \}, t \geq t_0 \quad (6)$$

$$k^0, \alpha : \text{제어이득}, t_0 : \text{초기시간}$$

식 (5)의 주루프제어기 파라미터 k(t)는 보조 루프제어기의 출력 μ(t)에 의해 연속적으로 제어되고, sgn x(t)는 오차의 부호가 변화하여도 외부루프에 의한 피드백이 음(negative)의 부호를 유지하도록 하는 역할을 한다. 외부루프를 포함한 바이너리제어시스템 방정식은 식 (7)과 같은 미분방정식으로 표현할 수 있고, 제어블럭도는 그림 3과 같다.

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

바이너리제어기의 제어이득 k⁰와 α는 G_δ 불변 조건으로 부터 구할 수 있다. 여기서, G_δ 불변 조건이란 RP(Representative Point) x(t)가 일단 영역 G_δ 내에 들어가면 그 후로 계속 G_δ 영역을 벗어나지 않고 영역 내에 머물러 있을 조건을 말한다. 이 관계는 기존 가변구조제어에서의 슬라이딩모드 존재조건과 같은 개념이므로 영역 G_δ의 경계에서 다음조건을 만족하면 된다.

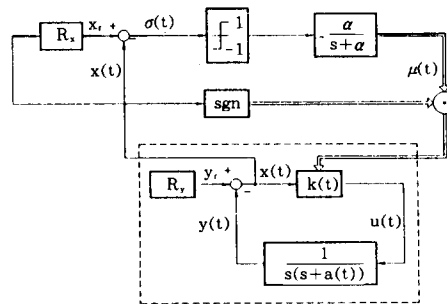


그림 3. 관성형 외부루프를 갖는 바이너리제어기
Fig. 3. A binary controller with inertial type external loop

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

먼저, 영역 G_s 의 경계에서 $\sigma(t)$ 의 변화율을 구해보면 다음과 같다.

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

식 (9)를 이용하여 식 (8)을 만족하는 주루프 제어이득 k^0 와 보조루프제어이득 α 는 다음과 같다.¹⁰⁾

$$k^0 > \bar{k}^0 / (1-h) \quad (10)$$

$$\text{단, } \bar{k}^0 = \max_{|\lambda|=1} \sup_{t \geq t_0} \left| \frac{1}{b(t)} \left(\left(\frac{(1+\delta\lambda(t) \operatorname{sgn} x(t))}{c} \right)^2 - a(t) \right) \frac{(1+\delta\lambda(t) \operatorname{sgn} x(t))}{c} \right|$$

$0 < h < 1$: 임의의 상수

식 (10)에서 분모 $(1-h)$ 는 식 (9)의 마지막 항에 있는 $\mu(t)$ 가 G_s 의 경계에서 가질 수 있는 최소값이다. 그리고 이 값을 확보하기 위해서는 외부루프 제어이득 α 가 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\alpha \geq \frac{c}{\delta} (k^0 + \bar{k}^0) \ln \frac{2}{h} \quad (11)$$

$$\text{단, } \bar{k}^0 = \max_{|\lambda|=1} \sup_{t \geq t_0} \left| \frac{1}{b(t)} \left(\left(\frac{(1+\delta\lambda(t) \operatorname{sgn} x(t))}{c} \right)^2 - a(t) \right) \frac{(1+\delta\lambda(t) \operatorname{sgn} x(t))}{c} \right|$$

여기서, $\lambda(t)$ 는 $\lambda(t) = \sigma(t) / \delta |x(t)|$ 로 정의되는 원점 O_x 와 점 $x(t)$ 를 잇는 직선의 순시적인 기울기에 해당하는 함수이다. 따라서, $x(t) \in G_s$ 인 경우는 $\delta |x(t)| \geq \sigma(t)$ 이므로 $|\lambda(t)| \leq 1$ 이고, $x(t)$ 가 슬라이딩 영역의 경계상에 있는 경우는 $|\lambda(t)| = 1$ 이 된다. 한편, 바이너리제어의 불변조건이 성립하기 위해서는 G_s 영역 밖에 존재하는 RP가 유한한 시간 내에 여역 G_s 에 도달할 조건이 만족해야 한다. 이 조건은 가변구조시스템의 도달조건(Reaching Condition)과 같은 개념이고 다음과 같다.^{1), 10)}

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

식 (10), (11), (12)가 모두 만족되면 RP는 유

한한 시간 내에 영역 G_s 내에 들어가게 되고, G_s 내에서 시스템의 특성은 다음식에 의해 지배되므로 파라미터 변동에 무관한 강인한 특성을 얻을 수 있다.

$$x(t) = -x(t)/c - \sigma(t)/c \quad (13)$$

$$|\sigma(t)| \leq \delta |x(t)| \quad (14)$$

그리고 이 시스템은 G_s 영역 내에서는 점근안정하고 G_s 영역 외부를 포함한 모든 영역에 대해서는 다음 식에 나타낸 바와 같이 Lyapunov 안정하다.¹⁰⁾

$$\|x(t)\| \leq N \|x(t_0)\|, t \geq t_0 \quad (15)$$

N : 설계파라미터와 플랜트파라미터에 의해 결정되는 양의 상수

3. 실험 및 고찰

3.1 시스템의 구성

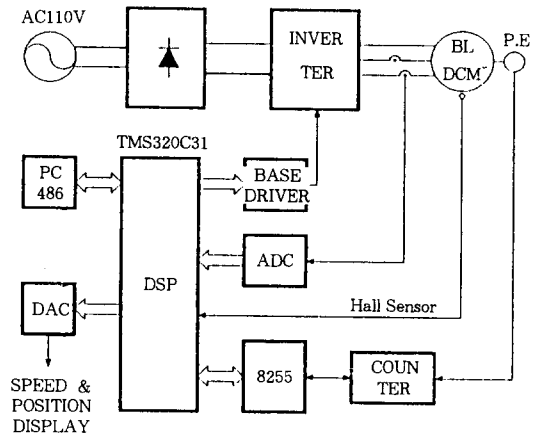


그림 4. 하드웨어 구성도
Fig. 4. Hardware Configuration

표 1. 전동기 정수 및 제어 이득

Table 1. Motor parameters and control gains

Motor Parameters	Control Gains
100V/500W,	$1/c = 20$
$R = 3.35[\Omega]$	$\alpha = 150$
$L = 0.015[H]$	$\delta = 0.005$
$p = 4$	$h = 0.5$
$K_T = 1.5[N \cdot m/A]$,	$\gamma = 500$
$K_E = 0.4[N \cdot m/A]$	$k^0 = 2.4$
$J = 0.00318[N \cdot m \cdot s^2]$	

가변구조제어는 처리속도가 빠른 시스템일수록 원하는 성능에 가까운 결과를 얻을 수 있다. 따라서 프로세서는 고속, 고정도의 연산을 수행하기 위해 부동소수점 처리가 가능한 32비트 DSP인 TMS320C31 One Board를 사용하였다. 그리고 디지털 입출력을 위해 PPI 8255를 사용하였고, 아날로그 입출력을 위해 Burr Brown사의 D/A, A/D 변환기를 사용하였다.

위치정보는 1800ppr의 인크리멘탈 펄스엔코더를 4채배하여 16비트 카운터를 통하여 입력하게 되고, 현재속도는 위치신호를 미분하여 사용하였다. 또 회전자의 절대위치는 모터내부에 부착되

어 있는 홀센서의 출력신호를 프로그램상에서 인터럽트처리를 함으로써 검출하였다.

BLDCM 구동을 위한 전력용 트랜지스터는 MP6005를 사용하였고, 전력용 소자 및 전동기의 보호를 위해 과전류 보호회로를 설치하였다.

전류제어기는 소프트웨어에 의한 히스테리시스 전류제어기를 사용하여 하드웨어를 간소화할 수 있도록하였고 스위칭주파수는 DSP 연산시간과 같은 120 μ sec로 하였다.

하드웨어 구성도를 그림 4에 나타내었다.

3.2 실험 결과 및 고찰

설계한 제어기의 타당성을 확인하기 위하여 실

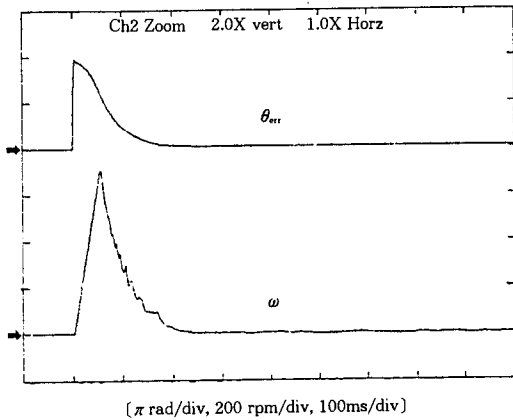


그림 5. VSC의 위치에러와 속도파형
Fig. 5. Waveforms of position error and velocity for VSC

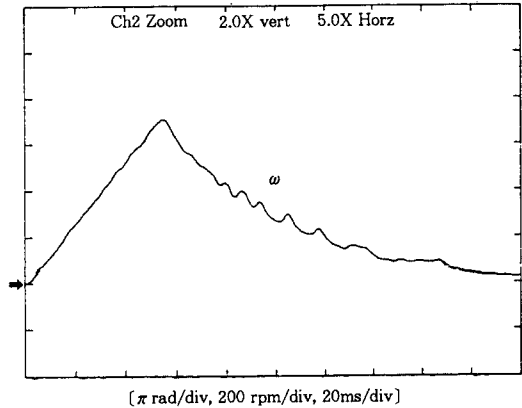


그림 7. VSC의 속도 확대파형
Fig. 7. Enlarged waveform of velocity for VSC

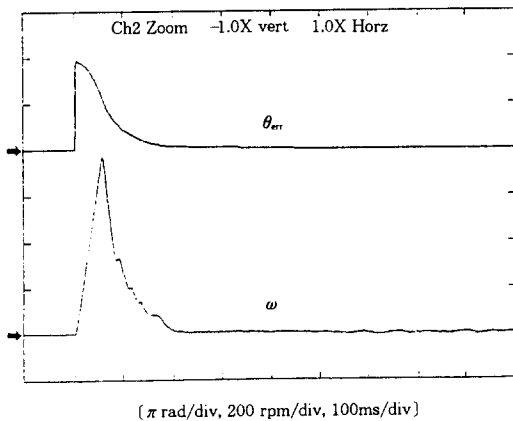


그림 6. BC의 위치에러와 속도파형
Fig. 6. Waveforms of position error and velocity for BC

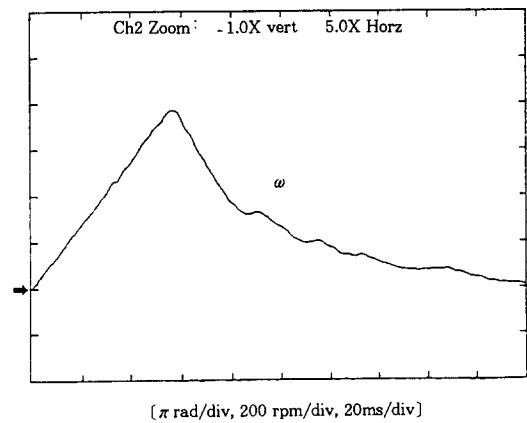
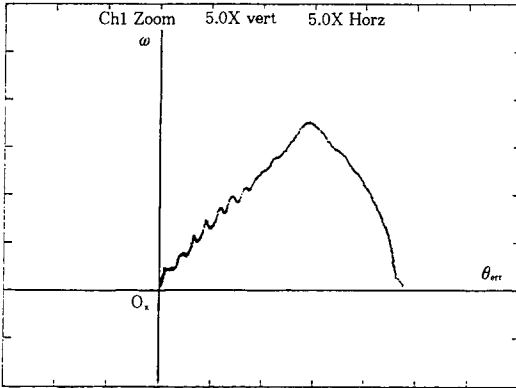


그림 8. BC의 속도 확대파형
Fig. 8. Enlarged waveform of velocity of BC

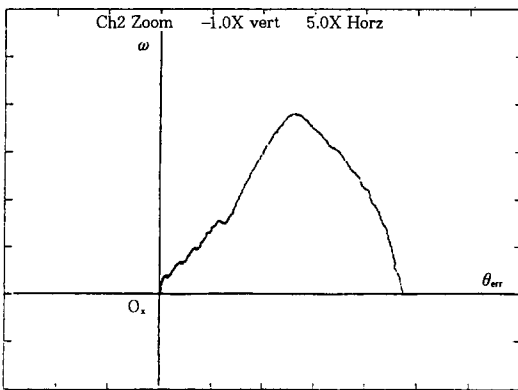
험을 실시하였다. 실험은 성능의 비교·평가를 위해 채터링저감법을 사용한 기존의 가변구조제어기(VSC)와 바이너리제어기(BC) 두 종류의 제어기에 대하여 행하였다. 표 1에 사용된 전동기의 파라미터와 제어이득을 나타내었다.

그림 5와 그림 6은 각각 VSC와 BC의 위치러와 속도파형을 나타낸 것이다. 목표위치는 2π [rad]으로 하였다. 두 제어기 모두 오버슈트없이 목표위치에 잘 도달함을 볼 수 있다. 그러나 속도파형의 경우 VSC는 슬라이딩 면을 따라 빠른 속도로 시스템의 구조를 전환함으로써 상대적으로 높은 주파수의 채터링이 발생하고 있는데 비해 BC는 VSC에 비하여 채터링의 주파수가 대폭



[π rad/div, 200 rpm/div, 20ms/div]

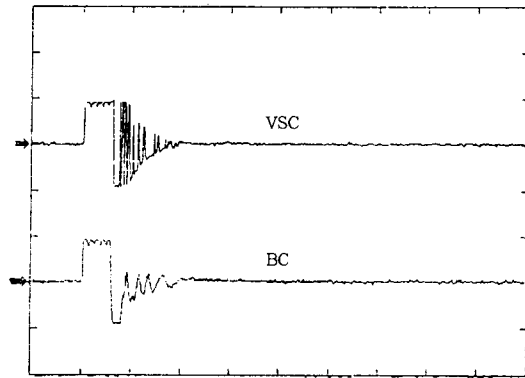
그림 9. VSC의 위상궤적파형
Fig. 9. Phase trajectory of VSC



[π rad/div, 200 rpm/div, 20ms/div]

그림 10. BC의 위상궤적파형
Fig. 10. Phase trajectory of BC

감소되어 있음을 보여주고 있다. 그러나 정상상태에서는 두 제어기 모두 속도파형에서 약간의 채터링이 발생하고 있는데 그 이유는 하드웨어의 간편성을 도모하기 위해 본 논문에서 사용하고 있는 소프트웨어에 의한 히스테리시스 전류제어기의 스위칭주파수 한계 때문이다. 이것은 고속 스위칭이 가능한 하드웨어 전류제어기를 사용하면 이 채터링은 더욱 저감시킬 수 있지만 하드웨어가 복잡해진다는 점을 감안해야 한다. 그림 7과 그림 8은 슬라이딩 면과 영역에서의 거동을 자세히 비교하기 위해 속도파형 만을 확대한 파형이다. 그림 5와 그림 6에서 설명했듯이 BC가 효과적으로 채터링을 저감시키고 있음을 보여주고 있다. 그림 9와 그림 10은 상태공간 상에서의 위상궤적을 나타낸 것이다. 그림 9의 VSC 경우는 그림 5에서와 같이 슬라이딩 면을 중심으로 빠르게 시스템의 구조를 전환시키고 있는데 비해 그림 10의 BC는 그림 6에서와 같이 시스템의 구조를 완만한 속도로 전환시키면서 원점으로 향하고 있음을 보여주고 있다. 이것은 슬라이딩모드 제어와 바이너리제어의 차이점을 잘 나타내고 있는 것으로 바이너리제어는 이와 같이 hypercone 내에서 시스템의 구조가 완만하게 변형되므로 고주파의 채터링을 줄일 수 있다. 한편 그림 5와 그림 6의 속도파형에서는 정상상태에서 약간의 채터링이 보이고 있는데 반해 위상궤적파형의 상태공간 원점 O_s 는 근방에서는 이러한 현상이 나



[5 a/DIV, 100 ms/div]

그림 11. 두 제어기의 지령전류파형
Fig. 11. Waveforms of Reference current for both controllers

타나 있지 않다. 그 이유는 슬라이딩 면 상에서의 채터링현상을 좀 더 자세히 볼 수 있도록 위상제적과형을 확대하는 과정에서 오실로스코프의 time division에 제한이 발생하여 정상상태 부분이 무시되었기 때문이다. 그리고 위상제적은 편의상 1상만에 나타내었다. 그림 11은 두 제어기의 토크분 지령전류 i_{qREF} 를 비교해 보인 것이다. VSC의 지령전류는 과도상태에서 슬라이딩 면을 중심으로 불연속적으로 변화하고 있으나 BC는 VSC에 비하여 특히 과도상태에서 연속성이 매우 향상되었음을 보여주고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 관성형 외부루프를 갖는 바이너리제어기를 이용한 브러시리스 직류전동기의 위치제어를 행하였다.

실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 바이너리제어법을 브러시리스 직류전동기의 위치제어에 적용하여 제어법의 타당성과 가능성을 확인하였다.
- 2) 기존의 가변구조 제어기에 비하여 고주파 채터링이 저감된 연속적인 제어입력의 생성이 가능하였다.
- 3) 채터링 저감을 위한 다른 제어법보다 간단

한 제어알고리즘으로 우수한 효과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) U. Itkis, Control Systems of Variable Structure, Halsted press, 1976.
- 2) V.I. Utkin, "Variable Structure System with Sliding Modes", IEEE Trans. AC., Vol. AC-22, pp.212-222, 1977.
- 3) C. Namuduri, Paresh, sen, "A Servo-Control System Using a Self-Controlled Synchronous Motor (SCSM) with Sliding Mode Controller", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-23, No.2, pp.283-295, 1987.
- 4) F. Harashima, "MOSFET Converter-Fed Position Servo System with Sliding Mode Control", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. IE-32, No.3, pp.238-244, 1985.
- 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) A. Consoli, "A DSP sliding mode field oriented control of an interior permanent magnet motor drive," IPEC Tokyo, pp.296-303, 1990.
- 8) A. Consoli, "Experimental low-chattering sliding mode control of a PM motor drive," EPE FRIENZE, pp.1-013~1-018, 1991.
- 9) K. shyu, "A modified variable structure controller," Automatica, Vol.28, No.6, pp.1209-1214, 1992.
- 10) S.V. Emelyanov, Binary Automatic Control Systems, Mir Publishers, Moscow, 1987.

◇ 著 者 紹 介 ◇



유 완 식(劉完植)

1963년 12월 24일생. 1988년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1988~1990년 금성기전 근무. 1992년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



조 규 민(曹圭珉)

1961년 4월 22일생. 1985년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 유한공업전문대학 정보통신과 전임강사.



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.