

바이너리 제어기를 이용한 유도전동기의 위치제어

한 윤석*, 유 완식, 최 정수*, 김 영석*
인하대학교, 인하대학교 산기연**

Position Control of Induction Motors using Binary Control

Yoon-Seok Han*, Wan-Sik You**, Jung-Soo Choi,* Young-Seok Kim*
INHA University*, I. S. T. of INHA University **

Abstract - This paper is concerned with a position control of induction motors using binary control. Due to the robustness and fast response, variable structure control is widely used for motor control field. However, the chattering phenomenon which is a drawback of VSC deteriorates the control performance and damages system components. In this paper, using binary control which has the characteristics of chattering alleviation and robust property solves this problem. The principle of binary control with inertial external loop and the design method of binary position controller are described. Also the control performance of proposed controller is confirmed by experiments.

1. 서 론

공작기계나 로보트 팔들과 같은 정밀한 속응제어가 요구되는 산업용기기의 구동을 위한 서보운전용으로 종래에는 직류기가 널리 사용되어 왔다. 그러나 직류전동기는 정류자와 브리시의 마모에 따른 보수점검이 필요하고, 정류자의 정류한계상 고속, 고압, 대용량화에 한계가 있다. 또한 정류불꽃등으로 설치장소에도 제약을 받는다. 이러한 이유로 최근에는 유도전동기에 대한 서보운전이 요구되고 있는데, 유도전동기 서보운전시 중요하게 요구되는 것으로 파라미터 변동에 대한 견실성, 속응성 및 정밀성 등을 들 수 있다.

이러한 요구를 만족하기 위해 가변구조제어(Variable Structure Control, 이하 VSC)가 널리 쓰이고 있는데, VSC는 불연속적인 제어입력을 사용하여 시스템의 상태를 슬라이딩면에 구속시킴으로써 파라미터 변동이나 외란에 대해 강인한 제어성능을 얻을 수 있다. 또한 제어기 구조가 간단하고 구현이 쉬운 장점을 가지고 있다^[1]. 그러나 이러한 VSC의 장점은 무한하게 빠른 주파수의 스위칭이 가능하고 제어이득이 클 때만 얻어질 수 있고, 실제로 유한한 스위칭 주파수 및 제어이득 하에서는 원하지 않는 멀림현상(Chattering)이 발생한다. 멀림현상은 유도전동기의 정밀한 위치제어에 있어서 적용을 꾸준하게 하며 전기·기계적인 소자에 손상을 주는 단점이 있다.

멀림현상을 해결하기 위해서 많은 연구가 진행되어 왔는데^{[2]-[3]}, [2]는 슬라이딩 영역을 사용하여 멀림의 주파수는 줄었으나 멀림폭이 커지고, [3]은 슬라이딩면 주위 영역에서 제어입력을 연속으로 하여 멀림을 줄였지만 정상상태 오차가 계속 남는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 바이너리 제어이론을 이용한 유도전동기의 위치제어기를 설계함으로

써 멀림의 폭과 주파수를 동시에 줄일 수 있는 연구를 행한다^{[4]-[5]}.

논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 유도전동기의 모델링과 바이너리 제어기의 설계와 시스템의 구성 및 실험을 통하여 설계한 바이너리 위치제어기의 타당성을 확인하였다.

2. 바이너리 제어기의 설계

위치제어를 위한 유도전동기의 오차 방정식은 다음과 같다.

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

여기서, $x(t) = \theta_{ref} - \theta$, $\dot{x}(t) = -\omega$

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

D : 점성마찰계수, J : 관성계수

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

바이너리 제어에서는 오차방정식에 대한 초평면(hyperplane) $\sigma(t) = \sigma(x(t))$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma(t) = -c\dot{x}(t) - \dot{x}(t) \quad (2)$$

그리고, 그림 1에서 나타낸 것처럼 영역 G_δ 는 다음과 같다.

$$G_\delta = x : \sigma^+(t) \cdot \sigma^-(t) \leq 0 \quad (3)$$

$$\sigma^+(t) = \sigma(t) - \delta|x(t)|$$

$$\sigma^-(t) = \sigma(t) + \delta|x(t)|$$

여기서 δ 는 $0 < \delta < 1$ 를 만족하는 상수이다.

영역 G_δ 안에서는 $|\sigma(t)| \leq \delta|x|$ 의 관계를 만족하게 되고, 영역의 범위는 설계 파라미터 δ 에 의해 결정된다. 또한, 그림 2의 블럭도에 나타낸 바이너리 제어기의 외부루프제어기 C_u 와 주루프제어기 C_b 는 각각 다음과 같은 알고리즘을 갖는다.

$$C_u : u(x, t) = k(t)x(t) \quad (4)$$

$$k(t) = k^0 \mu(t)$$

$$C_\mu : \dot{\mu}(t) = -\alpha(\mu(t) + \operatorname{sgn}\sigma(t)), t \geq t_0 \quad (5)$$

식 (4)의 주루프제어기의 파라미터 $\lambda(t)$ 는 보조루프 제어기의 출력 $\mu(t)$ 에 의해 연속적으로 제어된다. 외부루프를 포함한 바이너리 제어시스템의 방정식은 식 (6)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\dot{x}(t) + a(t)\dot{x}(t) = -k^0\mu(t)|x(t)| \quad (6)$$

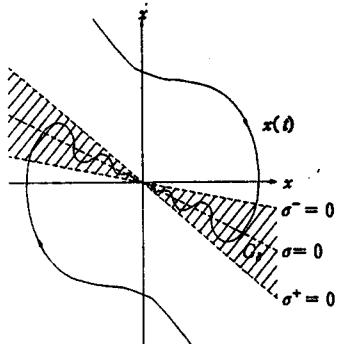


그림 1. 바이너리 해 궤적 및 영역 G_s

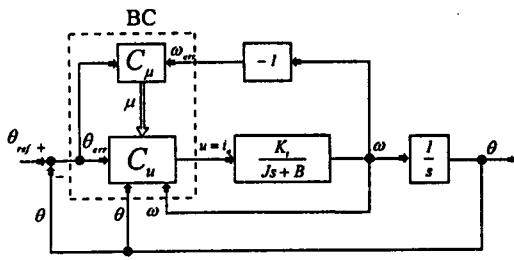


그림 2. 바이너리 위치제어 블럭도

바이너리 제어에서 시스템의 상태가 영역 G_s 를 벗어나지 않 을 필요충분조건은 영역 G_s 의 경계에서 다음의 조건을 만족 하는 것이다.

$$\sigma(t) \cdot \dot{\sigma}(t) < 0 \quad (7)$$

식 (7)의 조건을 만족하기 위한 설계 파라미터 k^0 및 α 를 구한다. 먼저, 영역 G_s 경계에서 $\sigma(t)$ 의 미분값은 다음과 같다.

$$\sigma(t) |_{\sigma=0} = c \left[\left(\frac{1+\delta\lambda(t)\operatorname{sgn}x(t)}{c} \right)^2 - \alpha(t) \left(\frac{1+\delta\lambda(t)\operatorname{sgn}x(t)}{c} \right) \right] \quad (8)$$

식 (8)를 이용하여 식 (7)을 만족하는 k^0 를 구하면 다음과 같다.

$$k^0 > \bar{k}^0 / (1-h) \quad (9)$$

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

이득 a 는 μ 가 영역의 경계에서 $|\mu| \geq 1-h$ 의 관계를 확보 하게 하는 값으로 결과만을 정리하면 다음과 같다.

$$a \geq \frac{1}{\delta} (k^0 + \bar{k}^0) \cdot \ln \frac{2}{h} \quad (10)$$

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

또한, 영역 밖에서 경계에 도달하기 위한 조건은 가변구조 제어의 도달조건(Reaching Condition)과 같이 구해진다.

$$\inf_{t \geq t_0} ca(t) > 1, c > 0 \quad (11)$$

3. 시스템구성 및 실험결과

제안하는 알고리즘을 이용한 위치제어기의 타당성을 검토하기 위하여 그림 3과 같이 시스템을 구성하였다. 사용한 3상유도전동기의 사양은 표 1과 같다.

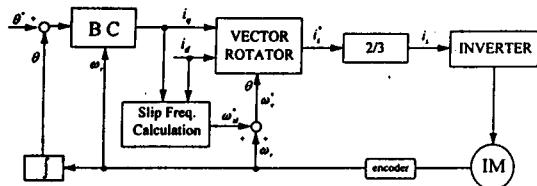


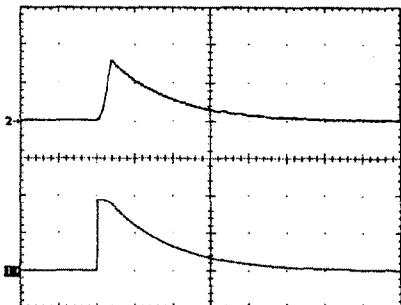
표 1. 3상유도전동기 사양 및 설계 파라미터

| | | | | | |
|------|----------|-------|-------|----------|-------|
| 정격전압 | 220/380V | R_r | 0.52Ω | K_0 | 1.8 |
| 정격전류 | 4.8/8.3A | R_s | 1Ω | α | 40 |
| 정격속도 | 1720rpm | L_s | 110mH | δ | 0.004 |
| 출력 | 2.2Kw | L_r | 103mH | c | 1/45 |
| 극수 | 4pole | M | 103mH | h | 0.35 |

하드웨어를 간략화하기 위하여 인버터를 제외한 모든 알고리즘은 소프트웨어로 구성되었으며 프로세서는 고속, 고정도의 연산을 수행하기 위하여 32비트 부동소수점 연산이 가능한 TMS320C31 DSP를 사용하였다.

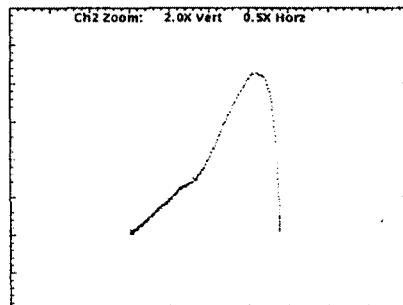
DSP에서의 고정자진류 지령치 및 CT로부터 검출된 실제 전류의 오차는 전류제어부의 히스테리시스 컴파레이터에 입력되어 3상 전압형 IGBT 인버터의 PWM 제어를 구현하므로 유도전동기의 고정자진류를 순시적으로 제어하는 백터 제어 알고리즘이 실현하게 된다. 실험에서 속도정보는 6000 (pulse/rev)의 펄스 앤코더를 4제곱하여 16비트 카운터를 통하여 입력하였고 현재위치는 속도신호를 적분하여 사용하였다.

그림 4는 가변구조 제어의 속도 및 위치응답특성으로 위치 지령치를 4π 로 인가했을 때의 과정이다. 속도 및 위치응답은 목표치에 잘 도달하고 있고, 그림 5는 그림 4의 상태궤적으로 슬라이딩면상에서 멜림이 있다. 그림 6은 토오크 지령전류 i_d 를 보인것이다. 도달구간에서는 최대값을 지령하여 빠르게 슬라이딩면에 도달한후 면상에서 불연속적으로 시스템의 구조를 절환함에 의해 멜림이 발생한다. 그림 7은 바이너리 제어의 속도 및 위치응답특성으로 역시 위치지령



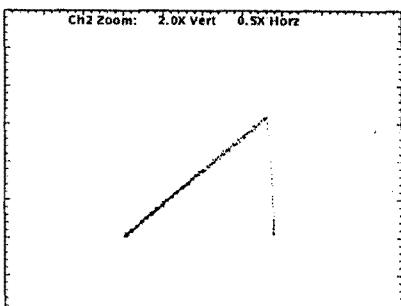
[800 rpm/div, 2.12π rad/div, 100ms/div]

그림 4. 가변구조 제어기의 속도와 위치오차



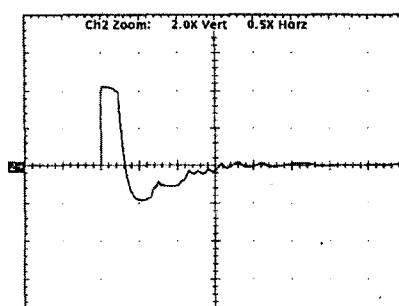
[400 rpm/div, 1.06π rad/div]

그림 8. 바이너리 제어기의 상태궤적



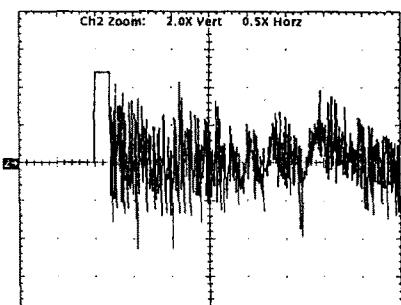
[400 rpm/div, 1.06π rad/div]

그림 5. 가변구조 제어기의 상태궤적



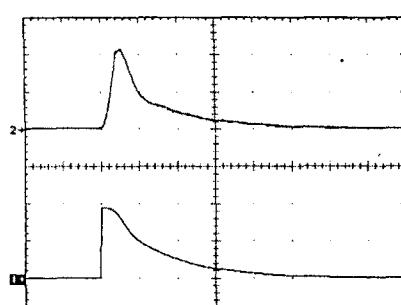
[8.33 A/div, 100ms/div]

그림 9. 바이너리 제어기의 토오크분 지령전류



[8.33 A/div, 100ms/div]

그림 6. 가변구조 제어기의 토오크분 지령전류



[800 rpm/div, 2.12π rad/div, 100ms/div]

그림 7. 바이너리 제어기의 속도와 위치오차

치는 4π 로 인가하였다. 속도 및 위치응답은 목표치에 잘 도달하고 있다. 그림 8은 그림 6의 상태궤적으로 영역안에서 연속적으로 변하면서 원점으로 수렴한다. 그림 9는 토오크 지령전류 i_q 를 보인것이다. 그림 6과 비교해서 멀림이 줄어든것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

제안한 제어법의 타당성을 확인하기 위하여 실험을 행하였다. 그리고 비교·평가를 위해 기존의 가변구조 제어기와 바이너리 제어기 두 종류의 제어기에 대하여 실험을 행하였다. 실험결과 바이너리제어기를 이용해서 구현한 알고리즘은 위치지령에 우수한 응답특성을 보였으며, 가변구조 제어기와 비교하여 멀림이 줄어든 것을 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] K. K. Shyu, Y. W. Tsai and C F. Yung, "A Modified Variable Structure Controller", Automatica, Vol. 28, No. 6, pp. 1209-1214, 1992
- [3] J. Y. Hung and R. M. Nelms, "Using a Boundary Layer Technique to Reduce Chatter in Sliding Mode Controller", Proc. 6th IEEE Applied Power Electronics Conf., pp. 195-201, 1991
- [4] 유 완식 외 1인, "바이너리제어를 이용한 동력설비용 브러시리스 직류전동기의 위치제어", 한국조명설비학회논문지, Vol. 9, No. 4, pp. 359-365, 1995
- [5] S.V. Emelyanov, Binary Automatic Control System, Mir Publishers, Moscow, 1987.