

적분보상형 가변구조제어기법을 이용한 유도 전동기 위치제어

Induction Motor Position Control
Using Integral-Compensating Variable Structure Control Algorithm

강 문 호* 정 경 민 박 윤 창
선문대학교 공과대학 기계 및 제어공학부

336-840 충남 아산시 탕정면 갈산리 100
(tel 0418-530-2339, 019-471-8236, fax 0418-541-7426)

ABSTRACT

This paper proposes a variable structure position controller for an induction motor(IM) which uses a reaching law and an integral compensating nonlinear switching function. With the reaching law, reaching mode can be established quantitatively during transient state so that dynamic control performance is improved. With the integral compensating nonlinear switching function, both very low overshoot and high steady state control accuracy can be obtained by compensating the states chattering problem due to the unmodelled dynamics of inverter and feedback sensors. For experiment a digital servo driver which consists of a DSP and an IPM inverter was developed. With the various experimental results, IM position control performance was verified.

1. 서 론

회전자축의 견고한 구조와 높은 경제성 등으로 인해 산업기계의 구동기로서 폭넓게 사용되고 있는 유도 전동기는 고정자와 회전자 사이의 결합효과, 토크발생 비선형성등을 갖기 때문에 정밀 위치제어용으로의 사용이 어려웠다. 특히, 운전조건에 따른 심한 특성변화와 측정이

어려운 다양한 외란 성분들에 대해서는 종래 선형 제어방식으로는 넓은 동작영역에서의 보상이 어렵기 때문에 유도기의 정밀 서보제어를 위해서는 이러한 불확실성을 처리하기 위한 강인한 제어기법이 요구된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 가변구조제어기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데,^{[1]-[4]} 종래의 가변구조 제어방식은 상태들의 고주파 진동현상을 발생시켜 실시간 적용시 문제점이 야기되고, 스위칭평면에 다다르기까지의 과도기간인 리칭모드시에는 가변구조의 견실성을 보장받지 못하는 단점들을 지닌다. 본 연구에서 제안되는 가변구조 제어방식에서는 유도기의 위치, 속도추종을 위해 새로운 방식의 적분 보상형 슬라이딩 모드 상태 제어를 설계한다. 상태오차의 크기에 따라 스위칭 함수의 구조가 가변되어 선택적으로 적분보상항을 포함하는 비선형 스위칭함수를 사용하여 정상상태시 상태진동을 억제하고 적분기로 인해 기인하는 오버슈트 증가를 방지한다. 한편, 상태오차 크기에 따라 스위칭이득이 가변되는 리칭법칙^[5]을 이용함으로써 리칭모드시 동특성을 부여하여 리칭모드를 정량적으로 결정한다.

본 연구에서 사용되는 전체 제어 알고리즘은 많은 양의 복잡한 계산을 실시간 처리해야 하기 때문에 고속의 프로세서를 요구한다. 따라서 고속연산에 있어서 최적의 프로세서인 TMS 320C31^[6]을 하드웨어 시스템의 연산 및 제어기로

사용하였고, 전력 변환부의 고집적화를 통한 인버터의 신뢰성 향상을 실현하기 위해 IPM^[7]을 이용하여 전력 변환부를 구성하였다.

2. 유도기 위치제어계 설계

본 장에서는 적분보상형 유도전동기 가변구조 위치제어기 설계에 관하여, 적분보상항을 갖는 비선형 스위칭 함수 선정, Reaching Law 선정 및 특성분석, 가변구조 회전자 자속관측기 등의 순서로 설명한다.

2.1 비선형 스위칭함수 선정

유도기의 위치제어시 토크를 입력으로 하는 기계적 동특성은 위치오차에 대한 적분보상항을 포함하는 경우 다음과 같은 가제어(Controllable) 상태오차 방정식에 의해 결정된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} f + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{d}_{\omega_m} \quad (1)$$

$$b = -\frac{1}{J}, \quad g = \frac{1}{J}$$

여기서 $x_1 = d_\theta - \theta$ 이고, d_θ , d_{ω_m} 은 각각 기준위치와 기준속도를, u, f 은 각각 토크(T_e)와 외란(T_L)을 나타내며, z 는 위치계적 오차에 대한 적분 보상성분이다.

본 논문에서는 종래 3차계통의 스위칭함수에 대하여 식(2)와 같이 x_1 의 크기에 따라 가변되는 구조를 갖는 비선형 스위칭 함수를 제안한다.

식(2)의 비선형 스위칭 함수를 사용할 경우 위치오차의 크기가 l 보다 작은 경우에만 제어계통에 적분보상항이 첨가되어 오버슈트 증가 없이 견실한 제어 특성을 얻을 수 있다. 이때 δ 는 스위칭 함수의 급변에 의한 상태응답의 급변을 방지하기 위한 값으로 l 보다 작은 양수값이다.

$$s(x) = c_0' z + c_1 x_1 + x_2 \quad (2.a)$$

$$c_0' = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{|x_1| - l}{|x_1| - l + \delta} \right) c_0, \quad l > \delta > 0 \quad (2.b)$$

2.2 Reaching Law에 의한 제어입력 결정

본 논문에서 제안되는 가변구조 제어방식에서는 Powering Reaching Law(PRL)을 이용하여 제어입력을 결정한다. 식(3)과 같은 형태의 Reaching Law, 즉 PRL을 이용할 경우에는 스위칭 함수의 비선형항도 상태벡터의 크기에 비례하는 가변 이득을 가짐으로써, 과도시 계통의 속응성과 채터링 저감효과를 높일 수 있다.

$$\dot{s}(x) = -q|s(x)|^\alpha \operatorname{sgn}(s(x)) - ks(x) \quad (3)$$

$$q > 0, \quad k > 0, \quad 0 < \alpha < 1$$

식(3)으로부터 상태벡터가 스위칭 평면에 도달하기까지의 시간(t)은 다음과 같이 계산된다.

$$t = \frac{1}{k(1-\alpha)} \ln \frac{k|s(x)_0|^{1-\alpha} + q}{q} \quad (4)$$

식(4)로부터 k, q, α 를 적절히 선정하여 $s(x) = 0$ 이 되는 시간(t)을 결정하면 Reaching Mode의 동특성을 결정할 수 있다. 식(4)로부터 k, q, α 값들이 증가함에 따라 과도시 스위칭 함수의 궤적이 더욱 빠른 속도로 정상상태에 진입함을 알 수 있다.^[10]

식(2), (3)으로부터 식(5)를 얻을 수 있고, 이식에 식(1)을 대입하면 제어입력은 식(6)으로 유도된다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(x) &= \frac{d(c_0' z + c_1 x_1 + x_2)}{dt} \\ &= \frac{dc_0'}{dt} z + c_0' \frac{dz}{dt} + c_1 \frac{dx_1}{dt} + \frac{dx_2}{dt} \\ &= \left(\frac{dc_0'}{dx_1} \frac{dx_1}{dt} \right) z + c_0' x_1 + c_1 \frac{dx_1}{dt} + \frac{dx_2}{dt} \\ &= -q|s(x)|^\alpha \operatorname{sgn}(s(x)) - ks(x) \quad (5) \end{aligned}$$

$$u = \frac{I}{\left(\frac{dc_0'}{dx_1} z + c_1\right)} \left\{ \left(-\frac{dc_0'}{dx} + c_1\right) \left(\frac{\overline{T_L}}{J} + \dot{d}_{\omega_m}\right) + c_0' x_1 + c_1 x_2 + d|s(x)|^\alpha \operatorname{sgn}(s(x)) + ks(x) \right\} \quad (6)$$

여기서 $\overline{T_L}$ 는 T_L 에 대한 관측값으로 본 논문에서는 감소차수 부하관측기^[8]를 통해 구한다.

2.3 가변구조 전류·자속 관측기

본 논문에서는 실제 제어시 노이즈의 영향을 최소화하기 위하여 전류와 자속을 동시에 관측하는 전차원 가변구조 상태 관측기를 사용한다.^{[9],[10]} 가변구조 상태관측기를 이용하여 유도기 전류제어시 건설한 자속각을 얻고, 실제 전류를 대신하여 관측기에서 추정되는 전류를 전류제어에 사용함으로써 백터제어의 건설성을 향상시키고 전류제어시 채터링을 줄인다. 가변구조 상태관측기로부터 얻어지는 관측 전류는 실전류를 대신하여 제어계통에 계환되고, 관측된 자속으로부터는 다음과 같이 유도기 백터제어시 필요한 자속각을 알아낸다.

$$\theta_e = \tan^{-1} \left(\frac{\overline{\lambda_{qr}}^s}{\overline{\lambda_{dr}}^s} \right) \quad (7)$$

여기서 $\overline{\lambda_r} = [\overline{\lambda_{dr}} \ \overline{\lambda_{qr}}]^T$ 은 고정자 d,q 축을 기준축으로 하여 좌표변환한 회전자 자속에 대한 관측값을 나타낸다.

3. 실험

3.1 하드웨어구성

본 연구에서의 구성된 하드웨어 시스템은 유도전동기의 위치제어 및 가변속도제어를 행하기 위한 서보 드라이브로, 전시스템을 완전 디지털로 구성하여 소프트웨어 서보를 실행할 수 있도록 하였다.

본 논문에서 사용되는 전체 제어 알고리즘은

많은 양의 복잡한 계산을 실시간 처리해야 하기 때문에 필수적으로 고속의 프로세서를 요구한다. 따라서 본 연구에서는 고속 및 다량 연산에 있어서 최적의 프로세서인 DSP(Digital Signal Processor) TMS 320C31을 하드웨어 시스템의 주연산 및 제어기로 사용하였고, 이와 함께 전력변환부의 고집적화를 통한 인버터의 신뢰성 향상을 실현하기 위해 IPM(Intelligent Power Module)을 이용하여 전력 변환부를 구성하였다. 특히, 본 연구에서 사용된 IPM은 모듈 내부에 자체적인 고장진단 회로와 테드-타임 설정부가 포함되어 있고, 전력 회생에 필요한 별도의 IGBT를 갖추고 있기 때문에 인버터 회로의 집적화 및 신뢰화를 극대화 할 수 있다.

전체 하드웨어 시스템은 그림 1과 같고, 블록별 세부내역은 표 1에 나타냈다.

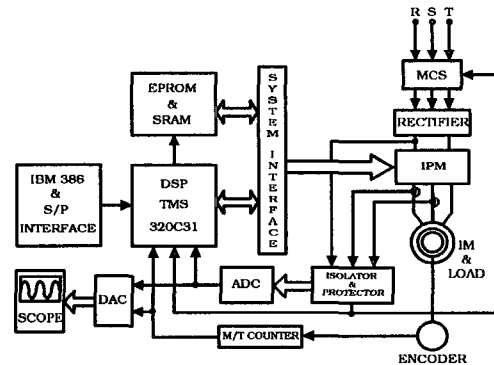


Fig. 1. Hardware system configuration.

Table 1. Details of each hardware block.

Motor	<ul style="list-style-type: none"> • 3상 4극 농형 유도 전동기 • 2000pul/rev Incremental Encoder • Load Generator and Resistor
CPU	<ul style="list-style-type: none"> • DSP320C31
INVERTER	<ul style="list-style-type: none"> • Intelligent Power Module(IPM) <ul style="list-style-type: none"> - IGBT Type (50A, 600V) - Gate Driver 내장(3μ Dead time) - 15 KHz PWM frequency - 과전류/전압, 과열등 보호회로 내장
Memory	<ul style="list-style-type: none"> • 32 K 32 bit word SRAM/EPROM
ADC/DAC	<ul style="list-style-type: none"> • AD7874/AD7247
Counter	<ul style="list-style-type: none"> • M/T speed counter
Communication Port	<ul style="list-style-type: none"> • 8bit 직렬/ 16bit 병렬 데이터 전송

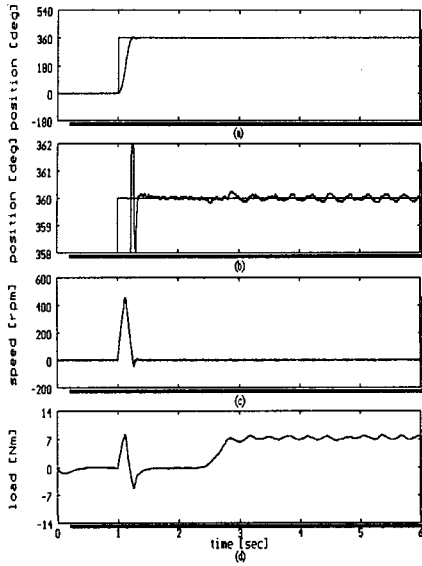


Fig. 4. VSC using nonlinear switching function(load1:7Nm) : (a)position response (b)position response (c)speed (d)observed load.

5. 결 론

본 연구에서는 유도기의 위치오차의 크기에 따라 스위칭 함수의 구조가 가변되어 선택적으로 적분보상항을 포함하는 비선형 스위칭함수를 사용하여 정상상태시 상태진동을 억제하고 적분기에 의해 발생하는 오버슈트 증가를 방지하였다. 또한, 상태오차 크기에 따라 스위칭이득이 가변되는 리칭법칙을 이용함으로써 리칭모드시 동특성을 부여하여 리칭모드를 정상적으로 결정한다. 제안된 방식의 유효성을 고찰하기 위해 DSP와 IPM을 이용하여 제작된 유도전동기 위치서보 드라이브에 적용하여 실험을 행한 결과, 제안된 제어기법이 유도기 가변속도제어시 과도상태와 정상상태 성능향상에 매우 효과적임을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] B. K. Bose, "Sliding Mode Control of Induction Motor", IEEE IAS, pp. 479-486, (1985)

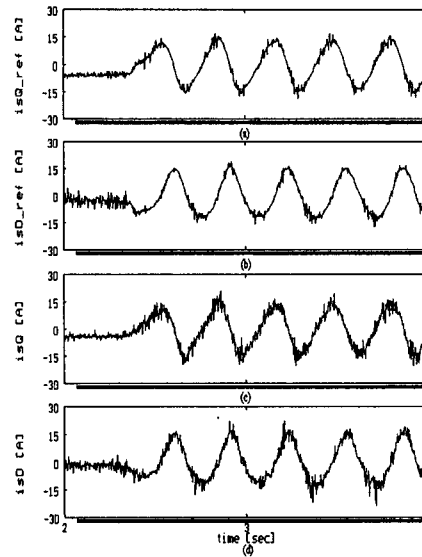


Fig. 5. Characteristics of current control for the case of fig.4 : (a)stationary q axis current reference (b)stationary d axis current reference (c)stationary q axis current response (d)stationary d axis current response.

[2] Park M. H. et. al., "Chattering Reduction in the Position Control of Induction Motor Using Sliding Mode", IEEE Trans. Pow. Elect., vol.6, no.3, pp. 317-327, (1991)

[3] J. Zhang and T. H. Barton, "Robust Control of an Induction Machine Drive with Optimal Sliding Mode Approach", IEEE IECON, pp.49-59, (1992)

[4] V. I. Utkin, "Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives," IEEE Trans. Ind. Elect., vol.40, no.1, pp.22-35, (1993)

[5] W. Gao and J. C. Hung, "Variable Structure Control of Nonlinear System: A New Approach," IEEE Trans. Ind. Elect., Vol.40, no.1, pp.45-55, (1993)

[6] Texas Instrument, TMS32030 C Compiler Reference Guide

[7] E. R. Motto et. al., "A New Generation of Intelligent Power Device for Motor Drive Applications", IEEE IPEC, pp.1332-1338, (1993)

- [8] M. H. Kang et. al., "Variable Structure Approach for Induction Motor Control -Practical Implementation of DSP", IEEE IECON, pp.50-55, 1994.
- [9] S. Sangwangwanich et. al., "Design of Sliding Observer for Estimation of Rotor Flux of Induction Motors", IEE Japan Trans., vol.110-C, no.4, pp.279-288, (1993)
- [10] M. H. Kang, "A Study on the Improvement of the Position and Speed Control Performance for an Induction Motor Vector Control System Using New Integral Compensated Variable Structure Control", Ph.D Thesis, pp67-73, (1995)