2008년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2008. 7. 16 - 18

고차신경망을 이용한 유도전동기 강인 적응 속도 제어

박기광*, 황영호*, 이은욱**, 양해원*
한양대학교*, 충청대학교**

Robust Adaptive Speed Controller for Induction Motors Using High Order Neural Network

Ki-Kwang Park*, Young-Ho Hwang*, Eun-Wook Lee**, Hai-Won Yang*
Hanyang University*, Chung Cheong College**

Abstract - In this paper, we propose a direct robust adaptive backstepping speed controller for induction motors system. A robust adaptive backstepping controller is designed using high order neural networks(HONN), which avoids the singularity problem in adaptive nonlinear control. The stability of the resulting adaptive system with proposed adaptive controller is guaranteed by suitable choosing the design parameter and initial conditions. HONN are used to approximate most of uncertainties which are derived from unknown motor parameters, load torque disturbances and unknown nonlinearities. The applicability of the proposed scheme is tested simulation.

1. 서 론

유도전동기는 신뢰성이 높을 뿐만 아니라 견고하여 보수할 필요가 거의 없으며, 가격도 상대적으로 저렴하기 때문에 산업적으로 가장 많이 응용되고 있는 전동기이다. 그러나 여러 상태변수들이 복잡하게 결합되어 있는 다변수의 비선형 시스템이고 회전자의 전기적 변수들을 측정하기가 곤란할 뿐만 아니라 동작조건에 따라 전동기 파라미터들이 변할 수 있어 제어하기가 매우 어렵다. 따라서 유도전동기의 전기 및 기계적 특성을 모두 포함하는 등가 2상의 5차 모델에 기초하여 미지의 회전자 저항과 부하토크를 추정하는 비선형 적응 제어기로서, 비선형 상태궤환을 통해 속도와 자속을 완전히 분리시킬 수 있는 입출력 선형화 제어기법과 외란 및 전동기 파라미터의 변동에 강인한 특성을 갖는 슬라이딩 모드 제어기법이 사용되었다. 이들 제어기의 단점은 자속을 포함하는 모든 상태들에 대한 정보를 알고 있어야 한다. 비선형 분야에 새로이 적용되고 있는 백스테핑 제어기법[2]의 기본 개념은 가상제어입력을 사용하여 복잡한 비선형 제어의 설계문제를 단순화 문제들로 체계적으로 분해하고 여러 단계들로 나눠 각 단계에 대한 기준을 제공함으로써 제어기를 반복적으로 설계하는 것이다. 그러나 개루프 자속관측기를 사용하고 기준자속에 대한 2차미분이 요구된다. 본 논문에서는 불확실성을 갖는 유도전동기에 대해 최소한의 정보만으로도 정밀한 속도제어가 가능하도록 미지의 비선형성 및 전동기 파라미터, 부하토크 외란 등에 기인하는 대부분의 유도전동기 불확실성을 고차신경망[1]으로 추정하여 적응 백스테핑 제어기에 이용하였다.

2. 고차신경망을 이용한 강인 적응 백스테핑 속도 제어

2.1 유도전동기 모델

고정된 고정자 기준좌표계(a,b)로부터 자속벡터(ψ_a,ψ_b)를 따라 회전하는 계자 기준좌표계(d,q)로의 상태변환을 수행하는 벡터제어기법은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{\omega}&=\mu\psi_d i_q - T_L/J - B\omega/J\\ \dot{i}_q&=-\gamma i_q - n_p\beta\omega\,\psi_d - n_p\omega i_d - \alpha M i_q i_d/\psi_d + 1/\sigma u_q\\ \dot{\psi}_d&=-\alpha\psi_d+\alpha M i_d\\ \dot{i}_d&=-\gamma i_d+\alpha\beta\psi_d+n_p\omega i_q+\alpha M i_q^2/\psi_d+1/\sigma u_d\\ \dot{\rho}&=n_p\omega+\alpha M i_q/\psi_d\end{aligned} \tag{1}$$

여기서, ω, i, ψ, u는 유도전동기의 회전속도, 전류, 자속, 고정자 전압을 나타내고, 계수는 $\sigma=L_s\left(1-M^2/L_sL_r\right)$, $\mu=n_pM/JL_r$, $\alpha=R_r/L_r$, $\beta=M/\sigma L_r$, $\gamma=\left(M^2R_r+{L_r}^2R_s\right)/\sigma L_s{L_r}^2$이다. 모터상수 n_p는 극쌍(pole pair)의 수이고, R_s, R_r는 저항, L_s, L_r는 자기 인덕턴스, M는 상호 인덕턴스, J는 회전자의 관성모멘트, T_L는 부하토크, B는 마찰계수를 나타낸다. 간접벡터 제어기법은 먼저 슬립속도 w_s를 식 (1)으로부터 다음과 같이 구한다.

$$w_s=\alpha M i_q/\psi_d \doteq \alpha i_{qref}/i_{dref} \tag{2}$$

회전자계 속도 w_e는 회전자 전기속도w_r과 슬립속도로부터 다음과 같이 구하여 진다.

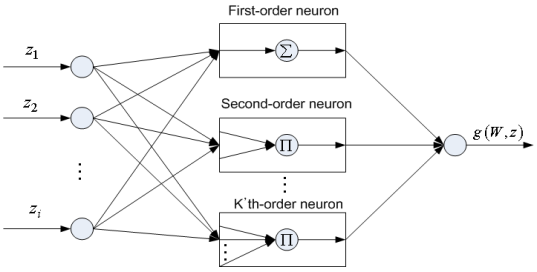
$$w_e=d\rho/dt=w_r+w_s \tag{3}$$

d축전류 PI 제어기는 다음과 같다. k_{dp}는 비례이득, k_{di}는 적분이득이다.

$$u_d=k_{dp}(i_d-i_{dref})+k_{di}\int_0^t(i_d-i_{dref})dt \tag{4}$$

2.2 고차신경망 구조

그림 1은 고차신경망의 구조를 나태내고 있다.



<그림 1> 고차신경망의 구조

여기서 $g(W,z)$는 고차신경망의 출력벡터이고, Z는 입력벡터이다.

$$\begin{aligned}g(W,z)&=W^TS(z),\quad W,\ S(z)\in R^l\\ S(z)&=\left[s_1(z),s_2(z),\cdots,s_l(z)\right]^T\end{aligned} \tag{5}$$

여기서 양의 정수 l은 신경망의 노드 수(은닉층 뉴런 개수)이며, $\{I_1,I_2,....I_L,\}$은 $\{1,2,...,n+2\}$의 l개의 non-ordered subsets의 모음이다.

$$s_i(z)=\prod_{j\in I_i}\left[s(z_j)\right]^{d_j(i)},\ i=1,2,\cdots,l$$

$$z=\left[z_1,z_2,\cdots,z_{n+2},\right]\in\Omega_z\subset R^{n+2}$$

$d_j(k)$는 음의 값이 아닌 정수, W는 가중치 벡터이며 $s(z_j)$는 아래와 같은 하이퍼볼릭 탄젠트 함수이다.

$$s(z_j)=\frac{e^{z_j}-e^{-z_j}}{e^{z_j}+e^{-z_j}}$$

일반적으로 신경망의 가중치 W^*는 모르기 때문에 제어기를 설계할 때 추정된다. 다음 장에서는 과도성능 개선을 목적으로 구성된 강인 적응 백스테핑 속도 제어기를 제시한다.

2.3 강인 적응 백스테핑 속도 제어기

여러가지 불확실성 하에서도 유도전동기가 기준속도를 정확히 추종할 수 있도록 불확실성을 보상하기 위한 적응칙을 유도하고 직접 제어입력을 구하는 적응 백스테핑 속도제어기를 다음과 같이 설계한다. 먼저, field oriented 모델식 (1)의 속도와 관련된 처음 두식에서 유도전동기의 미지의 전동기 파라미터, 부하토크 외란, 미지의 비선형성 등을 포함하는 미지의 비선형 함수를 식 (6)와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}f_1(w)&=-T_L/J-B\omega/J\\ f_2(w,i_q,\psi_d,i_d)&=-\gamma i_q-n_p\beta w\psi_d-n_p w i_d-\alpha M i_d i_q/\psi_d\\ g_1(\psi_d)&=\mu\psi_d\ ,\ g_2=1/\sigma\end{aligned} \tag{6}$$

비선형 함수를 사용하여 식 (1)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{w}&=f_1(w)+g_1(\psi_d)i_q\\ \dot{i}_q&=f_2(w,i_q,\psi_d,i_d)+g_2u_q\end{aligned} \tag{7}$$

여기서, smooth 함수 $g_i(\cdot)$에 대해 다음과 같이 가정한다.

[단계 1] 속도제어
속도 추종오차를 다음과 같이 정의하면

$$e_1 = \omega - \omega_{ref} \tag{8}$$

식 (8)의 도함수는 다음과 같다.

$$\dot{e_1} = f_1(w) + g_1(\psi_d) i_q - \dot{\omega_r} \tag{9}$$

가상 제어입력을 $\alpha_1^* \doteq i_q$ 로 선택하고 Lyapunov 함수 후보를 다음과 같이 선택한다.

$$V_{z1} = 1/2 e_1^2 \tag{10}$$

도함수는 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{V}_{z1} = e_1 \dot{e}_1 = e_1 [f_1(w) + g_1(\psi_d) \alpha_1^* - \dot{\omega}_r] \tag{11}$$

$\dot{V}_{z1} = -k_1 g_1 e_1^2 \le 0$ 이 되도록 하는 원하는 안정화함수를 다음과 같이 선택한다.

$$\alpha_1^* = -k_1 e_1 - 1/g_1(\psi_d)[f_1(w) - \dot{w}_r] \tag{12}$$

여기서, k_1 은 양의 제어이득이다. 식 (12)의 α_1^* 에서 미지의 항에 해당하는 새로운 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$F_1(Z_1) = 1/g_1(\psi_d)[f_1(w) - \dot{w}_r] \tag{13}$$

불확실성 F_1 을 근사하기 위해 첫 번째 고차신경망을 사용하면 원하는 안정화함수 α_1^* 는 다음과 같다.

$$\alpha_1^* = -k_1 e_1 - W_1^{*T} H_1(Z_1) - \epsilon_1 \tag{14}$$

여기서, W_1^* 는 신경회로망의 이상적인 연결강도, ϵ_1 는 근사오차이다.

고차신경망의 입력 $Z_1 = [w,\ i_d,\ \dot{w}_r]^T$ 로 정의한다. 가상 제어입력은 다음과 같다.

$$\alpha_1 = -k_1 e_1 - \hat{W}_1^T H_1(Z_1) \tag{15}$$

고차신경망의 연결강도에 대한 적응칙은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{W}}_1 = \gamma_1 [H_1(Z_1) e_1 - \sigma_1 \hat{W}_1] \tag{16}$$

여기서, γ_1 은 양의 적응이득이고 σ_1 은 양의 작은 상수이다.

[단계 2] q축 전류제어

$$e_2 = i_q - \alpha_1 \tag{17}$$

오차변수 e_2 의 도함수는 다음과 같다.

$$\dot{e}_2 = f_2(w, i_q, \psi_d, i_d) + g_2 u_q - \dot{\alpha}_1 \tag{18}$$

식 (18)로부터 전체 시스템을 안정화시키기 위한 원하는 제어입력은 다음과 같다.

$$u_q^* = -e_1 - k_2 e_2 - 1/g_2 [f_2(w, i_q, \psi_d, i_d) - \dot{\alpha}_1] \tag{19}$$

여기서, k_2 은 양의 제어이득이다. 식 (15)에서 α_1 은 ω, ω_r, $\hat{W}_1$ 의 함수이므로 $\dot{\alpha}_1$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_1 &= \partial\alpha_1/\partial w\, \dot{w} + \partial\alpha_1/\partial w_r\, \dot{w}_r + \partial\alpha_1/\partial \hat{W}_1\, \dot{\hat{W}}_1 \\ &= \partial\alpha_1/\partial\omega [f_1(\omega) + g_1(\psi_d) i_q] + \phi_3 \end{aligned} \tag{20}$$

여기서 $\phi_3 = \partial\alpha_1/\partial\omega_r \dot{\omega}_r + \partial\alpha_1/\partial \hat{W}_1\ \gamma_1 H_1(Z_1) e_1$ 을 도입하였다. 식 (19)의 u_q^* 에서 미지의 항에 해당하는 새로운 함수를 다음과 같이 정의한다.

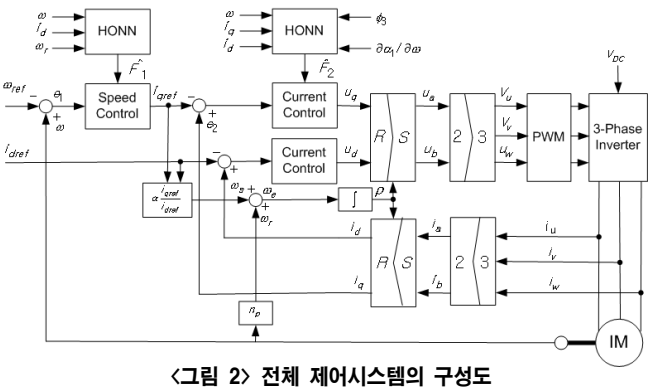
$$F_2(Z_2) = 1/g_2 [f_2(w, i_q, \psi_d, i_d) - \dot{\alpha}_1] \tag{21}$$

불확실성 F_2 을 근사하기 위해 다른 신경회로망을 사용하면 원하는 제어입력은 다음과 같다.

$$u_q^* = -e_1 - k_2 e_2 - W_2^{*T} H_2(Z_2) - \epsilon_2 \tag{22}$$

여기서, Z_1 의 경우와 마찬가지로 ψ_d 대신에 i_d 를 사용하여 신경회로망 고차신경망의 입력은 $Z_2 = [w,\ i_q,\ i_d,\ (\partial\alpha_1/\partial\omega),\ \phi_3]^T$ 로 정의한다. 추정치를 사용한 실제 제어입력은 결국 다음 식과 같다.

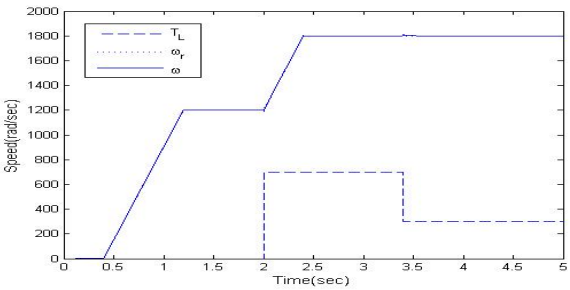
$$u_q = -e_1 - k_2 e_2 - \hat{W}_2^T H_2(Z_2) \tag{23}$$



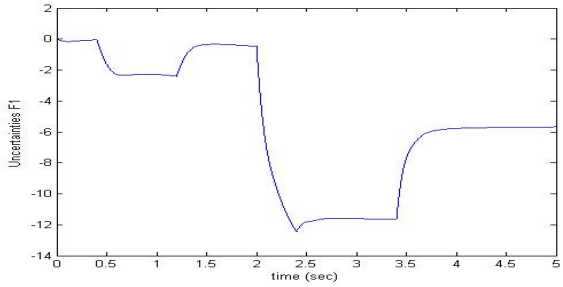
〈그림 2〉 전체 제어시스템의 구성도

3. 모의실험 결과

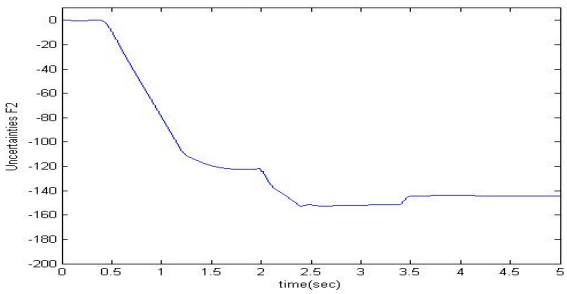
고차신경망을 이용한 적응 백스테핑 제어기의 성능을 검증하기 위해 5초동안 모의실험을 하였다. 기준속도는 0에서 시작하여 0.2초에서 1200[rpm]으로, 2.5초에서는 정격속도 이상인 1800[rpm]까지 증가시키고, d축 기준전류는 처음부터 3[A]로 시작하여 2.5초에서 기준속도가 1800[rpm]으로 증가함에 따라 약계자 제어에 의해 2[A]로 감소시켰다. 부하토크 외란은 2초에서 7[Nm], 3.3초에서 3[Nm]이다. 자속제어 PI 설계상수 $k_{dp} = 10$, $k_{di} = 100$으로 설정하였다. 그림 3의 (a)는 갑작스런 부하변동에도 약간의 추종오차를 제외하고 추종오차가 매우 적음을 알 수 있다. (b)와 (c)는 제안된 제어기의 고차신경망에 의한 적응과정으로 기계적 불확실성을 포함하는 고차신경망의 경우는 기준속도가 변화되거나 부하토크 외란이 인가되는 순간에 더욱 크게 변동됨을 알 수 있다. 이상의 모의실험 결과에서 속도 추종 성능이 우수하고 부하변동에 강인한 것을 알 수 있다.



(a) 속도추종



(b) 불확실성 F1 적응과정



(c) 불확실성 F2 적응과정

〈그림 3〉 고차신경망을 이용한 강인 적응 백스테핑 제어기의

4. 결 론

속도제어 시 문제가 되는 미지의 전동기 파라미터, 부하토크 외란, 미지의 비선형성 등에 기인하는 대부분의 불확실성을 고차신경망을 이용하여 추정함으로써 속도추종 성능 및 전동기 파라미터 및 부하 변동에 강인한 특성을 보여주었다. 또한, 적응 백스테핑 제어기에 의해 고차신경망의 적응칙을 유도하고 이로부터 직접 제어입력을 구함으로써 적응제어기가 단순화되고 백스테핑 제어기의 특이성 문제를 완전히 해결할 수 있으며 과도 상태의 성능이 개선되었다.

[참 고 문 헌]

[1] S. S. Ge and C. Wang, "Direct Adaptive NN Control of a Class of Nonlinear Systems", *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 13, pp. 214-221, 2002.

[2] M. Kristic, I. Kanellakopoulos, and P. Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design*, John Willy & Sons, 1995

[3] 이은욱, 정기철, 이승학, "신경회로망을 이용한 불확실성을 갖는 유도전동기의 적응 백스테핑 속도제어기 설계", 대한전기학회논문지, 제55D권 제11호, pp 476-482, 2006

[4] 이은욱, 양해원, " 슬라이딩모드 적응 자속관측기를 이용한 불확실성을 갖는 유도전동기의 적응 백스테핑 제어," 대한전기학회 논문지, 제 53D권 제 3호, pp. 154-160, 2004