

신경 회로망을 이용한 유도전동기의 위치 제어에 관한 연구

김형구, 양 오
 청주대학교 이공대학 전자과

On a Study An Induction Motor Position Control Using Neural Networks

Hyung Gu Kim, Oh Yang
 Dept. of Electronic Engineering, Chong Ju University

Abstract

The position control of an induction motor using Feedforward Neural Networks(FNNs) was studied in this paper. A teaching signal was obtained from sliding surface without a particular signal. And the FNNs learn through the back propagation algorithm so as to reduce the error between the real position of the motor and the reference value.

The structure of a controller was designed simply, for the fast calculating response which is certainly necessary for induction motor position control. And to show the superiority of this controller, 3-phase vector control induction motor whose power capacity is 2.2kw was modeled, and it was simulated.

1. 서 론

산업용 구동 장치로는 직류 전동기, AC 서보 전동기 및 유도 전동기 등이 널리 사용되고 있다. 유도 전동기는 기계적인 구조가 간단하며 견고하고, 유지보수가 용이할 뿐만 아니라 출력에 비해 가격이 저렴하고 소형인 장점 등을 가지고있기 때문에 서보 운전용으로 직류전동기를 대체 할만한 특성을 보이고 있다. 최근 들어 전력용 반도체의 비약적인 발전과 초고속 연산 프로세서인 DSP 등의 출현으로 유도 전동기의 디지털 제어에 많은 연구가 진행되고 있다. 또한, 신경 회로망은 제어 분야에서 광범위하게 응용되고 있다. 이와 같은 신경 회로망은 식별과 제어 문제에서 탁월한 특성을 나타내고있으며 특히, 비선형의 제어 문제를 다룰 때 매우 우수한 제어 특성을 보이고 있음을 많은 논문에서 입증되었다[1].

따라서, 본 논문에서는 전향 신경 회로망(FNNs)을 이용한 유도 전동기의 위치 제어를 다루고자한다. 특별한 교사 신호 없이 슬라이딩 평면으로부터 교사신호를 구하였으며, 원하는 유도 전동기의 위치와 제어하고자하는 실제 유도 전동기 사이의 위치 오차가 적어지도록 전향 신경 회로망이 역전파(Back-propagation) 학습 알고리즘을 통해 학습된다.

아울러 본 논문에서는 유도 전동기의 디지털 제어에서 특별히 요구되는 계산상의 속응성을 만족하기 위해 제어기의 구조를 간단히 구성하였다. 마지막으로 본 논문에서 제안된 제어기의 우수성을 보이기 위해 2.2KW의 Vector전용 3상 유도 전동기를 모델링한 후 이를 시뮬레이션 하여 제안된 제어기의 타당성을 보이고자한다.

2. 본 론

2.1 유도전동기의 Vector 제어

유도전동기의 vector 제어를 위해서 좌표변환에 사용되는 d-q축 이론과 d-q축에 대한 회전 좌표인 $d^e - q^e$ 축에 대한 개념들이 사용된다. 이러한 좌표변환에 의해

시간에 대한 변화율을 가지는 전동기에 대한 제어변수들이 일정한 직류량과 각도만을 갖는 벡터 형식으로 표현되므로 보다 쉽게 그 특성을 해석할 수 있다[2]. 또한 시변 계수가 제거된 형태의 유도전동기 상태특성을 얻을 수 있는데 다음의 5차 미분방정식으로 표현할 수 있다. 방정식은 자속과 각속도 ω_r 에 관한 식으로 다음과 같이 나타낸다[3].

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_{ds} &= -R_s I_{ds} + \omega_e \psi_{qs} + v_{ds} \\ \dot{\psi}_{qs} &= -R_s I_{qs} - \omega_e \psi_{ds} + v_{qs} \\ \dot{\psi}_{dr} &= -R_r I_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr} \\ \dot{\psi}_{qr} &= -R_r I_{qr} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \\ \dot{\omega}_r &= -\frac{B}{J} \omega_r + \frac{1}{J} (T_e - T_l) \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)에서 R_s, R_r, B, J 는 각각 고정자 저항, 회전자 저항, 마찰계수, 전동기의 관성 모멘트를 나타내며 T_l, T_e 는 각각 부하 토크와 전자기 토크를 나타낸다.

위의 수식은 상태 벡터 $X = [\psi_{ds} \ \psi_{qs} \ \psi_{dr} \ \psi_{qr} \ \omega_r]^T$ 와 입력 $U = [v_{ds} \ v_{qs} \ \omega_e]^T$ 로 구성된 상태 방정식이며 $\dot{X} = F(X, U)$ 로 간략히 표시할 수 있다. 이상과 같이 전동기를 모델링 한 후 제어기를 설계한다.

2.2 전향경로 신경 회로망을 이용한 유도전동기의 위치제어

신경회로망을 이용한 유도전동기의 위치제어에 대한 전체 구성도를 그림1에 나타내었다.

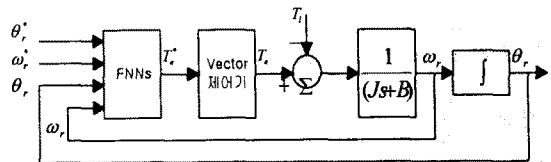


그림 1. 신경회로망을 이용한 유도전동기의 위치제어

그림 1에서 FNNs 블록을 제외한 나머지 부분은 일반적인 전류제어형 제어기의 블록 다이어그램과 비슷하다. 유도전동기의 속도와 슬립 각속도의 연산으로 좌표변환에 필요한 θ_e 를 발생시키고 자속을 제어하기 위한 i_{ds}^* 는 일정하며 i_{qs}^* 는 θ_e 와 ω_r 의 변화에 따라 기준토크를 발생시킨다. 이때의 토크를 제어하기 위해 신경회로망 이론을 도입하였다. 폐환신호 θ_r, ω_r 와 기준신호 θ_r^*, ω_r^* 를 입력으로 하는 FNNs 블록을 통해 기준토크 T_e^* 가 발생하며, 이때 안정한 시스템의 출력과 간단한 시스템의 구현을 위해 슬라이딩 모드 제어이론을 적용하였다

[4]. 그림 1에서 FNNs의 내부구성은 그림 2와 같다.

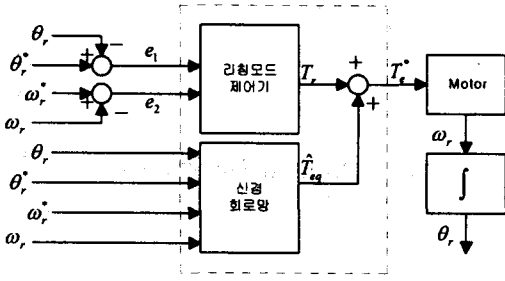


그림 2. FNNs의 내부 구성도

그림 2에 나타난 것처럼 위치오차 e_1 은 $\theta_r^* - \theta_r$ 이고 속도오차 e_2 는 $\omega_r^* - \omega_r$ 이다. 이를 미분방정식으로 표현하면 식(2)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \omega_r^* - \omega_r \\ \dot{e}_2 &= \dot{\omega}_r^* - \dot{\omega}_r = \ddot{\omega}_r^* + \frac{B}{J} \omega_r - \frac{T_e}{J} \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서 J는 관성 모멘트이고 B는 마찰계수이다. 이를 식(3)과 같이 슬라이딩 모드제어의 스위칭 평면으로 표현하였고 이로부터 스위칭 입력은 식(5)와 같이 구해진다.

$$S = [c_1 \ 1] \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = c_1 e_1 + e_2 \quad (3)$$

$$\dot{S} = \ddot{\theta}_r^* + \frac{B}{J} \omega_r - \frac{1}{J} T_e + \bar{c}^T e = -Q \text{sat}(s) \quad (4)$$

$$T_e = J \ddot{\theta}_r^* + \frac{B}{J} \omega_r + \bar{c}^T e + Q \text{sat}(s) \quad (5)$$

식(4)에서 스위칭함수 $\text{sgn}(s)$ 를 채터링을 감소하기 위해 선형영역으로 변형된 함수 $\text{sat}(s)$ 로 대체했고, Q는 리칭 시간을 결정하는 양의 상수이며 \bar{c} 는 $[0, c_1, c_2, \dots, c_{n-1}]$ 을 나타내는 슬라이딩 평면의 기울기에 대한 벡터표현이다.

$\dot{S} = 0$ 으로 놓음으로써 각각의 상태변수들이 스위칭 평면, 즉 $S=0$ 인 평면 위에 존재하게 하는 등가입력을 구할 수 있다. 식(4)에서 $Q \text{sat}(s)$ 는 0이 되므로 식(6)과 식(7)을 얻을 수 있다.

$$T_{eq} = J \ddot{\theta}_r^* + \frac{B}{J} \omega_r + \bar{c}^T e \quad (6)$$

$$T_e = T_{eq} + JQ \text{sat}(s) \quad (7)$$

이와 같은 등가입력 T_{eq} 는 전동기의 이상적인 슬라이딩 동작을 유도하고 스위칭 평면상에서의 시스템방정식을 저차화 시킨다[5]. 본 논문에서는 이러한 등가입력을 특별한 외부 교차신호 없이 슬라이딩 평면으로부터 구하였다. 또한 전향신경 회로망의 가중치들은 비선형 함수 근사특성을 이용하여 학습하였다[6].

전동기에 가해지는 제어입력을 리칭 모드 제어입력과 신경회로망에 의한 출력값 \hat{T}_{eq} 의 합으로 다음과 같이 나타내었다.

$$T_r = Q \text{sat}(s) \quad (8)$$

$$T_e = \hat{T}_{eq} + T_r$$

평가함수는 T_{eq} 를 교차신호로 놓으면 식(9)와 같이 표현되며 이때 $(T_{eq} - \hat{T}_{eq}) \propto \text{sat}(s)$ 인 근사식을 이용하면, 오차를 최소로 만들기 위한 역전파 알고리즘을 표현한 식(10)과 식(11)을 구할 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} (T_{eq} - \hat{T}_{eq})^2 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} W_j(k+1) &= W_j(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial W_j(k)} \\ &= W_j(k) + \eta (T_{eq} - \hat{T}_{eq}) \frac{\partial \hat{T}_{eq}}{\partial W_j(k)} \\ &= W_j(k) + \eta' \text{sat}(s) \frac{\partial \hat{T}_{eq}}{\partial W_j(k)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} W_{ij}(k+1) &= W_{ij}(k) - \eta \frac{\partial E}{\partial W_{ij}(k)} \\ &= W_{ij}(k) + \eta (T_{eq} - \hat{T}_{eq}) W_j(k) \tanh'(i_j(k)) i_j(k) \\ &= W_{ij}(k) + \eta' \text{sat}(s) W_j(k) \tanh'(i_j(k)) i_j(k) \end{aligned} \quad (11)$$

식(10)과 식(11)에서의 W_j 와 W_{ij} 는 각각 은닉층과 출력층 사이의 가중치와 입력층과 은닉층 사이의 가중치를 나타내며, i_j 는 FNNs 블록의 네 개의 입력 즉 $\theta_r, \omega_r, \theta_r^*, \omega_r^*$ 이며 $i_j(k)$ 는 은닉층의 입력으로써 다음과 같다.

$$i_j(k) = \sum W_{ij} i_j(k) + \theta_j(k) \quad (12)$$

2.3 사례연구

본 연구의 시뮬레이션에 사용된 파라미터들은 다음과 같다.

유도전동기의 파라미터

f : 60 Hz	P : 4극
R_s : 0.915825 Ω	R_r : 1.11091 Ω
L_m : 0.1132335 H	L_r, L_s : 0.189705 H
J : 0.1 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	η' (학습률) : 0.005
θ_{ref} : $120\pi(1 - \cos(0.5t))$	
T_l : $0.7T_r(10 \sim 15\%)$	
Slip Constant : 9.33	

신경 회로망의 파라미터

- 입력층의 개수 : 4개
- 은닉층의 개수 : 10개
- 출력층의 개수 : 1개(선형 뉴우런을 사용)

본 사례연구에서는 부하변동에 강한 시스템의 특성을 보이기 위해 10~15초의 구간에서 $0.7 * T_l$ 의 부하토크를 사용하였고 그때의 결과 파형은 그림 3과 같다. 그림 4와 그림 6에서 알 수 있듯이, 위치의 기준준거 θ_r^* 를 $120\pi(1 - \cos(0.5t))$ 로 하였고 이를 미분한 속도

제적 w_r 는 $120\pi * 0.5 \sin t$ 로 주어진다.

그림 4와 그림 6에서는 기준위치와 실제위치, 기준속도와 실제속도를 각각 나타냈으며 그 오차를 거의 구분할 수 없기 때문에 각각 30[rad]과 15[rpm]의 offset을 주어 구분하였고 이에 대한 확대된 오차를 각각 그림 5와 그림 7에 나타내었다. 시뮬레이션 결과로부터 부하토크 구간(10~15초)동안 약간의 오차변동이 있음을 알 수 있다.

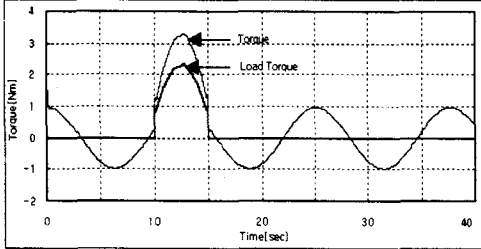


그림 3. 유도전동기의 토크곡선

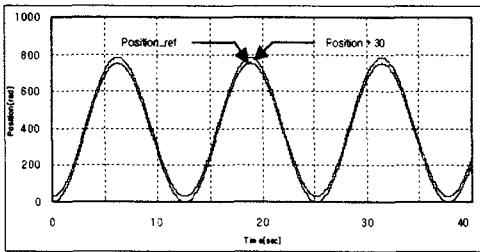


그림 4. 기준위치와 위치곡선

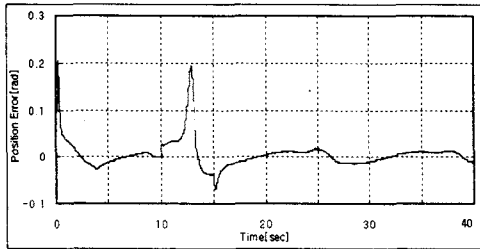


그림 5. 기준위치와 위치의 오차곡선

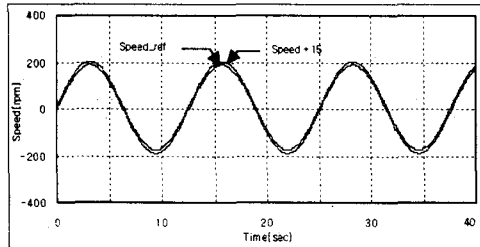


그림 6. 기준속도와 속도곡선

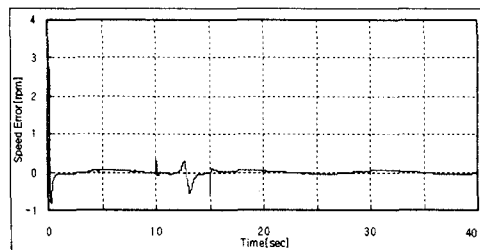


그림 7. 기준속도와 속도의 오차곡선

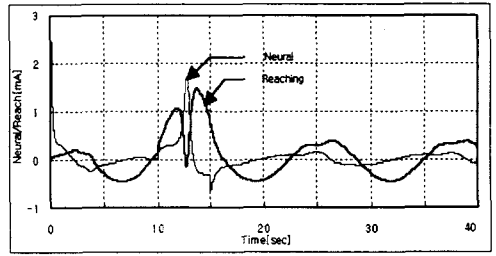


그림 8. 신경망 제어신호와 리칭 제어신호 곡선

그림 8에서는 식(8)의 T_e 를 T_r 과 \widehat{T}_{eq} 로 구분하여 이에 대한 제어입력을 나타냈다. 그림에서 나타내는 바와 같이 리칭모드 제어신호는 초기 시간에서는 높은 신호를 발생시키지만 시간이 흐름에 따라 신경망에 의한 신호가 학습에 따른 적절한 신호를 발생시킴으로써 점차로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 부하가 존재하는 구간을 살펴보면 부하의 갑작스런 변화에 따른 반응에는 리칭모드 제어신호가 먼저 반응하지만 결국 신경망에 의한 신호가 안정된 후 리칭모드 제어신호는 작아지고 신경회로망이 주 제어기가 됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 신경 회로망을 이용한 유도전동기의 위치 제어 시스템을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 유도전동기의 제어시스템에 슬라이딩 모드 제어 기법과 신경 회로망 이론을 적용함으로써 환경변화에 안정하고 위치오차가 출력의 0.25 퍼센트 미만의 정밀한 시뮬레이션 결과를 얻었다.

둘째, 간단한 구조의 신경회로망(FNNs)을 이용하여 위치 및 속도제어에 대한 우수성을 확인하였다.

앞으로 시뮬레이션에서 얻어진 결과를 바탕으로 초고속 프로세서인 DSP를 이용한 벡터시스템을 구현하여 본 논문의 유용성을 보이고자 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] K.S. Narendra and K. Parthasarathy, "Identification and Control of Dynamical System Using Neural Networks," IEEE Trans. Neural Networks, vol.1, no. 1, pp. 4-27, Mar, 1990.
- [2] P.C. Krause and C.H. Thomas, "Simulation of Symmetrical Induction Machinery," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-84, no. 11, pp.1038-1053, 1980.
- [3] Mohamed Chtourout, Nabil Derbelt and Mohamed Ben Ali Kamount, "Control of a loaded induction machine using a feedforward neural network" International Journal of Systems Science, vol.27, no. 12, pp 1287-1295, 1996.
- [4] 양 오, 양해원, "신경 회로망을 이용한 가변구조 제어시스템의 구현" 대한 전자공학회 논문지, vol.33-B, no.8, pp.124-133, 1996.
- [5] L. Hsu and R. R. Costa, "Variable structure model reference adaptive control only using input and output measurements :Part I," Int.J. contr., vol.49, no.2,pp.399-416, 1989.
- [6] K. J. Hunt and P. J. Gawthrop, "Neural Networks for control Systems-A Survey," IEEE Press, pp.171-200, 1994.