

AFNN 제어기에 의한 유도전동기 드라이브의 ANN 센서리스 제어

고재섭, 남수명, 최정식, 박병상, 정동화
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

ANN Sensorless Control of Induction Motor Drive with AFNN

Jae-Sub Ko, Su-Myeong Nam, Jung-Sik Choi, Bung-Sang Park, Dong-Hwa Chung
 School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ.

Abstract - This paper is proposed adaptive fuzzy neural network(AFNN) and artificial neural network(ANN) based on the vector controlled induction motor drive system. The hybrid combination of fuzzy control and neural network will produce a powerful representation flexibility and numerical processing capability. Also, this paper is proposed control and estimation of speed of induction motor using fuzzy and neural network. The back propagation neural network technique is used to provide a real time adaptive estimation of the motor speed. The error between the desired state variable and the actual one is back-propagated to adjust the rotor speed, so that the actual state variable will coincide with the desired one. This paper is proposed the experimental results to verify the effectiveness of the new method.

오차 e 와 오차의 변화분 ce 이고 출력변수는 제어변수 u^* 이다.

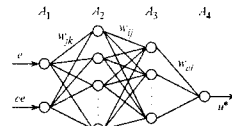


그림 1 FNN의 구성

2.1 제어기의 조건부의 구현

그림 1에서 4층에서 3층 사이에 신경회로망은 퍼지룰의 조건부의 구현을 나타낸다. 표 1은 퍼지제어룰의 집합을 나타낸다.

표 1 퍼지룰 표

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | PB | PM | PS | ZR | NS | NM | NB |
| PB | PB | PM | PS | ZR | NS | NM | NB |
| PM | PB | PM | PS | PM | PM | PM | PS |
| PS | PM | PS | PS | PS | ZR | NS | NM |
| ZR | PB | PM | PS | ZR | NS | NM | NB |
| NS | PM | PS | ZR | NS | NS | NS | NM |
| NM | NS | NM | NM | NM | NS | NM | NB |
| NB | NM | NM | NM | NB | NM | NB | NB |

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \Delta W_{ij} + \alpha[W_{ij}(t) - W_{ij}(t-1)] \quad (1)$$

$$W_{jk}(t+1) = W_{jk}(t) + \Delta W_{jk} + \alpha[W_{jk}(t) - W_{jk}(t-1)] \quad (2)$$

2.2 제어기의 결론부의 구현

$$\Delta W_{ci} = -\eta \frac{\partial E^*}{\partial W_{ci}} = -\eta \delta_i \delta_o \quad (3)$$

$$W_{ci}(t+1) = W_{ci}(t) + \Delta W_{ci} + \alpha[W_{ci}(t) - W_{ci}(t-1)] \quad (4)$$

3. AFNN 제어기의 설계

유도전동기 드라이브는 과도 특성에서 다양한 속도 추정능력, 부하 및 관성 등 파라미터의 변동에도 고성능 및 강인성이 요구된다. AFNN 제어기는 퍼지-뉴로 제어기에 기준 모델을 설계하여 퍼지추론으로 구현할 수 있는 적응 메카니즘으로 구성한다.

그림 2은 FNN 제어기를 설계하고, 적응 퍼지제어기인 AFC(Adaptive Fuzzy Controller)를 병렬로 연결하여 AFNN 제어기를 구성한다. 퍼지-뉴로 제어기에서 나타나는 오차를 보상하기 위하여 AFC를 사용하며 AFC는 기준 모델을 고려한 적응 메카니즘을 나타낸다.

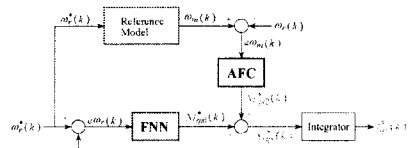


그림 2 제시한 AFNN 제어기의 알고리즘

1. 서 론

유도전동기의 드라이브 시스템에서 속도와 위치의 정보를 얻기 위하여 엔코더와 리졸버와 같은 센서를 사용한다. 그러나 이러한 센서는 실제의 적용분야에서 많은 문제점이 도출되며 시스템의 적용분야가 제한된다. 이러한 센서는 값이 비싸고 시스템의 가격을 증가시킨다. 그리고 센서의 정밀도에 영향을 주는 온도, 습도 및 먼지 등 환경적인 요인에 민감하며 시스템의 강인성을 약화시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1]

최근, 인공 신경회로망의 진가가 인정되어 많은 관심을 가지게 되었으며 학습을 근사화하기 위하여 다양하게 연구되고 있다.[2] 이러한 방법들은 일반적인 벡터제어 방법과 비교하여 우수한 성능을 얻을 수 있었다. 그러나 자속을 제어할 수 없으므로 포화의 영향이 나타나고 속도센서를 사용하고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 AFNN(Adaptive Fuzzy Neural Network)과 ANN(Artificial Neural Network) 제어기를 이용한 유도전동기의 속도 제어 및 추정을 제시한다. 적응제어, 퍼지제어 및 신경회로망을 혼합 적용한 AFNN 제어기를 설계한다. 퍼지제어기의 강인성 제어와 신경회로망의 고도의 적응제어의 장점들을 접목한다. 다음은 ANN을 이용하여 유도전동기 드라이브의 속도 추정기법을 제시한다. 추정속도의 타당성을 입증하기 위하여 시스템을 구성하여 제어특성을 분석한다. 그리고 추정된 속도를 지령속도와 비교하여 전류제어와 공간벡터 PWM을 통하여 유도전동기의 속도를 제어한다. 본 연구에서 제시한 AFNN과 ANN의 제어특성 및 추정성능을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2. FNN 제어기의 설계

FNN 제어기는 퍼지제어와 신경회로망을 혼합 구성하며 강력한 표현의 유연성과 수치 처리능력을 가지고 있다[3]. 그림 1은 FNN의 구성을 나타내며 여기서 두 개의 입력변수는

FNN에 의한 출력은 $\Delta i_{q1}^*(k)$ 이며 AFC에 의한 출력은 $\Delta i_{q2}^*(k)$ 이다. 이 두 출력을 합하여 적분기를 통해 지령 q 축 전류를 얻는다.

AFC는 기준모델을 사용하여 그림 2에서 전동기의 출력 $\omega_r(k)$ 는 기준모델의 출력 $\omega_m(k)$ 와 비교하여 오차 $e\omega_m(k)$ 는 AFC에 의해 수행된다. 기준모델은 안정화 시간 및 오버슈트와 같은 설계기준을 만족하는 요구성능을 충족시키기 위하여 사용하며 1차 시스템을 사용한다. 그림 3은 기준모델에 의한 AFC를 나타낸다. AFC의 루프는 FNN 루프와 병렬로 연결한다.

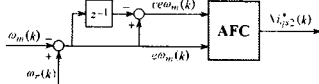


그림 3 기준모델에 의한 AFC

AFC에 의한 출력은 $\Delta i_{q2}^*(k)$ 를 발생시킨다. $\Delta i_{q1}^*(k)$ 과 $\Delta i_{q2}^*(k)$ 를 합하여 $\Delta i_{q1}^*(k)$ 를 구하여 이를 적분기를 통해 $i_{q1}^*(k)$ 를 발생시켜 플랜트에 인가한다. AFC의 입력은 기준모델의 출력과 실제 속도의 오차 ($e\omega_m(k)$)와 오차의 변화분 ($ce\omega_m(k)$)을 사용한다. 오차와 오차의 변화분은 다음과 같다.

$$e\omega_m(k) = \omega_m(k) - \omega_r(k) \quad (5)$$

$$ce\omega_m(k) = e\omega_m(k) - e\omega_m(k-1) \quad (6)$$

위의 두 입력은 적응 퍼지의 룰 베이스에 의해 지령 q 축 전류에 보상되는 $\Delta i_{q2}^*(k)$ 가 발생된다. 여기서 $\omega_m^*(k)$ 는 기준모델에 의한 지령속도이며 $\omega_r(k)$ 는 실제 회전자 속도이다.

퍼지-뉴로의 출력에서 $\Delta i_{q1}^*(k)$ 을 얻어 AFC에서 $\Delta i_{q2}^*(k)$ 와 합하면 퍼지제어의 지령 q 축 전류를 얻을 수 있다.

$$i_{q1}^*(k) = i_{q1}^*(k-1) + [\Delta i_{q1}^*(k) + \Delta i_{q2}^*(k)] \quad (7)$$

AFNN 제어기에 의해 제어되는 유도전동기의 드라이브 시스템은 그림 4와 같고 인버터는 공간벡터 PWM 방식을 사용한다.

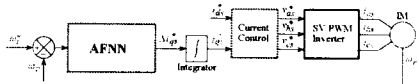


그림 4 유도전동기의 드라이브 시스템의 구성도

4. ANN에 의한 속도추정

ANN은 인간 두뇌의 간단한 모델에 의해 사고하는 구조로 된 컴퓨팅 시스템이다. ANN은 비선형 동적 시스템의 파라미터를 추정 및 제어를 하는데 사용된다.

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 최종 추정속도는 다음 식과 같다. [4]

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta \hat{\omega}_r(k) = \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T} \left\{ [i_{qm}(k) - \hat{i}_{qm}(k)] \hat{i}_{dm}(k-1) \right. \\ &\quad \left. - c [i_{dm}(k) - \hat{i}_{dm}(k)] \hat{i}_{qm}(k-1) \right\} - \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 T 는 샘플링 주기를 나타내며 η 는 학습계수이며 학습과정에서 학습율을 나타낸다. 이 계수가 크면 하중 변화가 크다. 실제 구현을 위하여 학습율은 진동이 유발되지 않는 범위에서 큰 값으로 선정한다. 계수 α 는 현재 하중에서 변동하는 과거 하중의 영향을 결정한다.

추정속도를 이용한 회전자 자극의 위치는 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_r(k+1) = \hat{\theta}_r(k) + T \cdot \hat{\omega}_r(k) \quad (9)$$

그림 5는 퍼지와 신경회로망을 이용하여 속도를 추정하고 드라이브 시스템을 제어할 수 있는 블록도를 나타낸다. 신경회로망에 의해 속도를 추정하고 추정속도와 지령속도를 비교하여 오차를 구하고 그 오차는 퍼지와 신경

회로망에 입력된다. 퍼지와 신경회로망에서 지령 q 축 전류를 구한다. 전류제어에 의하여 지령전압을 구한 다음, SV PWM 인버터를 구동시켜 유도전동기를 제어한다.

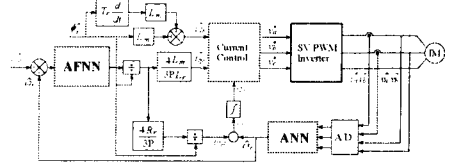


그림 5 퍼지와 신경회로망에 의한 유도전동기의 벡터제어 시스템

5. 시스템의 성능결과

다양한 운전조건에서 FNN 제어기와 본 논문에서 제시한 AFNN 제어기의 실험 결과를 비교하였다.

그림 6과 그림 7은 무부하 상태에서 스텝 지령속도를 정격인 1720(rpm)으로 운전시켰을 경우의 FNN 제어기와 AFNN 제어기의 응답특성 결과이다. 그림 (a)는 지령속도와 실제속도, 그림 (b)는 q 축 전류를 나타내고 그림 (c)는 발생 토크를 나타낸다. 스텝 지령속도에 대한 실험결과와 AFNN 제어기의 속도가 FNN 제어기에 비해 오버슈트가 크게 감소하고, 상승 시간이 빠르며, 정상상태에 빠르게 도달한다.

그림 8과 그림 9는 무부하 상태에서 1000(rpm)으로 운전 중, 부하토크를 $10[N \cdot m]$ 인가 한 경우의 FNN 제어기와 AFNN 제어기의 응답특성을 나타낸다. 일정한 속도로 운전 중, 부하토크를 인가한 경우 AFNN 제어기의 응답특성은 FNN 제어기 보다 속도 변화가 감소하고 빠르게 지령속도에 도달한다.

그림 10와 그림 11에서 스텝 지령속도를 -1200(rpm)과 1200(rpm)으로 정·역회전 시켰을 경우의 FNN 제어기와 AFNN 제어기의 응답특성을 나타낸다. AFNN 제어기의 속도는 FNN 제어기의 속도에 비하여 오버슈트가 감소하며 정상상태에 빠르게 도달한다.

AFNN 제어기의 속도는 FNN 제어에 비교하여 스텝 지령속도 변화와 부하 인가시 속도 변화, 정·역회전 운전 등에 오버슈트가 감소하고 상승시간이 빠르며 정상상태에 빠르게 도달하였다. 그리고 정속도 운전에서 부하를 인가한 경우에 속도변화의 폭이 감소하고 빠르게 지령속도에 추종하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 AFNN 제어기가 지령속도의 변화, 부하변화 등의 광범위한 운전조건에서 FNN 제어기보다 응답특성이 매우 향상되므로 AFNN 제어기의 타당성을 입증할 수 있었다.

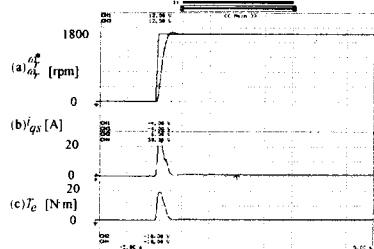


그림 6 스텝 지령속도에 대한 FNN 제어기의 응답특성

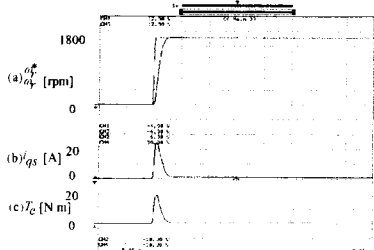


그림 7 스텝 지령속도에 대한 AFNN 제어기의 응답특성

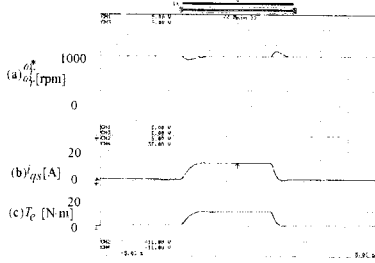


그림 8 부하토크 변화에 대한 FNN 제어기의 응답특성

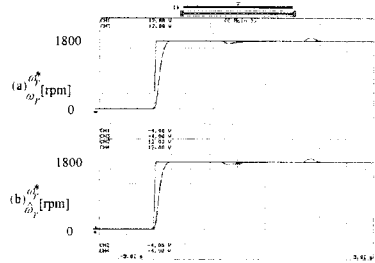


그림 12 스텝 지령속도와 부하토크의 변화에 대한 ANN의 응답특성

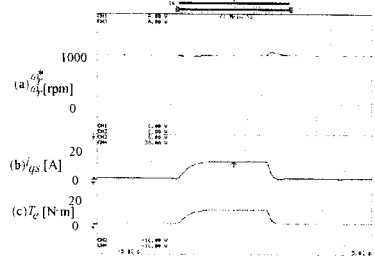


그림 9 부하토크 변화에 대한 AFNN 제어기의 응답특성

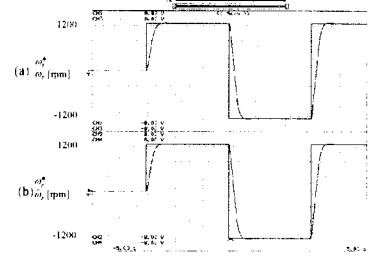


그림 13 스텝 지령속도의 변화에 대한 ANN의 응답특성

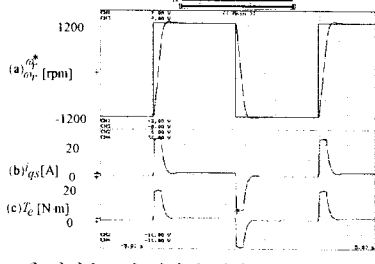


그림 10 스텝 지령속도의 변화에 대한 FNN 제어기의 응답특성

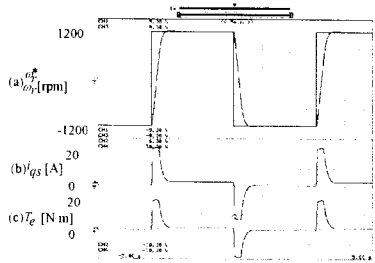


그림 11 스텝 지령속도의 변화에 대한 AFNN제어기의 응답특성

6. 결 론

본 연구에서는 AFNN 제어기를 이용한 유도전동기 드라이브의 ANN 센서리스 제어를 제시하였다. AFNN 제어기는 퍼지룰의 조건부와 결론부를 클러스터링 방법과 다층 신경회로망으로 구성하였다. 이 제어기는 퍼지제어에서 나타나는 장점인 고성능 및 강인성 제어를 얻을 수 있으며 신경회로망에서 나타나는 장점인 고도의 적응 제어의 능력을 얻을 수 있다. 더욱 성능 향상을 위하여 기준 모델에 기초한 적응 메카니즘의 기법을 적용해 보았다.

AFNN 제어기를 유도전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하였다. 샘플링 시간, 속도, 부하토크의 변화에도 AFNN 제어기는 FNN 제어기 보다 고성능으로 적응 추정할 수 있었다. 그리고 전동기의 정·역회전인 4상한 운전에서도 AFNN 제어기의 성능은 우수하게 나타났다.

ANN을 이용하여 다양한 지령속도의 변화에도 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다. 지령속도를 정·역회전 운전 운전시켰을 경우에도 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다. 그리고 부하토크를 인가할 경우에도 추정속도는 실제 속도에 양호한 추정성능을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 제시한 AFNN과 ANN은 시스템의 응답특성이 양호하게 나타났으며 속도의 추정 및 제어도 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제시한 퍼지와 신경회로망의 타당성을 입증할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] H. Kubota and K. Matsuse, "Speed sensorless field oriented control of induction motor with rotor resistance adaption," IEEE Trans. on IA, vol. 30, no. 5, pp. 1219-1224, 1994.
- [2] M. G. Simoes and B. K. Bose, "Neural network based estimation of feedback signals for a vector controlled induction motor drive," IEEE Trans. IA, vol. 31, no. 3, pp. 620-629, 1995.
- [3] H. G. Lee, J. C. Lee, S. M. Nam, J. S. Choi, J. S. Ko, D. H. Chung, "The Speed Control and Estimation of IPMSM using Adaptive FNN and ANN," ICCAS2005, 2005
- [4] J. C. Lee, H. G. Lee, Y. S. Lee, and S. M. Nam, D. H. Chung, "Speed estimation and control of induction motor drive using hybrid intelligent control," International Conference ICPE'04, no. 3, pp. 181-185, 2004

ANN에 의한 유도전동기의 속도를 추정하고 AFNN 제어기를 사용하여 속도제어를 수행하여 결과를 제시한다.

그림 12은 무부하 상태에서 지령속도를 정격속도인 1720[rpm]으로 운전 중 부하토크를 10[N·m]인가하였을 경우의 ANN에 의한 속도추정 특성을 나타낸다. 그림 (a)는 지령속도와 실제속도를 나타내고 그림 (b)는 실제 속도와 추정속도를 나타낸다. 스텝 지령속도의 변화와 부하토크 인가할 경우에 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다.

그림 13는 정지상태에서 부하토크를 10[N·m] 인가하여 지령속도를 1200[rpm]과 -1200[rpm]으로 반복적으로 변화시켰을 경우의 응답특성이다. 부하토크를 인가하여 지령속도를 정·역회전으로 반복하여도 ANN에 의한 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다.