

AFNN 제어기에 의한 IPMSM 드라이브의 고성능 속도제어

박기태* · 고재섭 · 최정식 · 박병상 · 정동화
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

High Performance Speed Control of IPMSM Drive by AFNN Controller

Ki-Tae Park · Jae-Sub Ko · Jung-Sik Choi · Byung-Sang Park · Dong-Hwa Chung
 School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ.

Abstract - This paper is proposed high performance speed control using AFNN controller. The design of the speed controller based on adaptive fuzzy-neural networks(AFNN) controller that is implemented using fuzzy control and neural networks. The control performance of the AFNN controller is evaluated by analysis for various operating conditions. Analysis results are presented to show the validity of the proposed algorithm

$$T_e = \frac{3}{2} P [\phi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \tag{4}$$

3. FNN 제어기의 설계

FNN은 신경회로망과 퍼지제어를 혼합 구성하며 강력한 표현의 유연성과 수치 처리능력을 가지고 있다. FNN은 퍼지룰의 조건부와 결론부를 클러스터링 방법과 다층 신경회로망으로 구성한다.

그림 1은 FNN의 구성을 나타내며 여기서 두 개의 입력변수는 오차 e 와 오차의 변화분 ce 이고 출력변수는 제어변수 u' 이다.

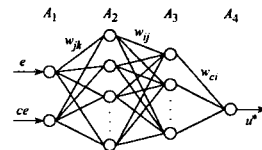


그림 1 FNN 제어기의 구성

3.1 제어기의 조건부의 구현

그림 3에서 4층에서 3층 사이에 신경회로망은 퍼지룰의 조건부의 구현을 나타낸다. 조건부의 멤버십 함수를 효과적으로 설계하기 위하여 신경회로망의 구조를 간단하게 하고 수렴속도를 개선하기 위하여 클러스터링 방법을 적용한다. 표 1은 퍼지제어룰의 집합을 나타낸다.

표 1 퍼지룰 표

	e	ce	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PL
PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PL	PL
PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PL	PL	PL

4층에서 각 신경세포의 출력은 각 부분 공간에서 퍼지룰의 진리값이다. 퍼지 클러스터링과 학습을 실현하기 위하여 이전 49룰과 같은 효과를 얻는 FNN 제어기는 오차의 함수가 필요하다.

오차함수를 정의한 후, 오차를 최소화하기 위하여 다음 단계는 오차 역전파 알고리즘에 의해 4층과 3층 사이에 가중치 W_{jk} 와 W_{kj} 를 조절한다.

$$W_{jk}(t+1) = W_{jk}(t) + \Delta W_{jk} + \alpha[W_{jk}(t) - W_{jk}(t-1)] \tag{5}$$

1. 서 론

산업현장에서는 일반적으로 PI 제어기를 많이 사용하고 있다. 그러나 PI 제어기는 IPMSM의 비선형 때문에 고성능 제어에서 많은 문제점이 나타나고 있다. 특히 외란, 속도 및 부하 등의 파라미터가 변동할 경우 고성능 및 강인성 제어를 실현하기 어렵다.

최근, 인공 신경회로망의 진가가 인정되어 많은 관심을 가지게 되었으며 함수를 근사화하기 위하여 다양하게 연구되고 있다.[1]-[5] 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) 제어를 이용한 IPMSM 드라이브의 제어를 제시한다. 먼저, PI 제어기에서 나타나는 문제점을 해결하기 위하여 신경회로망과 퍼지제어를 혼합 적용한 FNN(Fuzzy Neural Network)을 설계한다. 신경회로망의 고도의 적응제어와 퍼지제어의 강인성 제어의 장점들을 접목한다. 더욱 성능을 개선하기 위하여 퍼지제어는 적응 퍼지제어를 사용하여 신경회로망과 혼합제어를 구현하며 이를 AFNN(Adaptive-FNN)라고 한다. 본 연구에서 제시한 AFNN 제어기의 제어특성을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2. IPMSM의 모델링

동작특성을 분석하기 위한 IPMSM의 미분 방정식은 다음과 같다.

$$p i_d = (v_d - R i_d + \omega_r L_q i_q) / L_d \tag{1}$$

$$p i_q = (v_q - R i_q - \omega_r L_d i_d - \omega_r \phi_f) / L_q \tag{2}$$

$$p \omega_r = (T_e - T_L - B \omega_r) / J \tag{3}$$

여기서, 발생토크는 다음 식으로 표현된다.

$$W_y(t+1) = W_y(t) + \Delta W_y + \alpha[W_y(t) - W_y(t-1)] \quad (6)$$

3.2 제어기의 결론부의 구현

그림 3에서 A_3 층과 A_4 층 사이의 신경회로망은 퍼지들의 결론부의 구현을 나타낸다. 오차합수를 정의한 후, 오차를 최소화하기 위하여 다음 단계는 오차 역전파 알고리즘에 의해 A_3 층과 A_4 층 사이에 가중치 W_{α} 를 조절한다.

$$W_{\alpha}(t+1) = W_{\alpha}(t) + \Delta W_{\alpha} + \alpha[W_{\alpha}(t) - W_{\alpha}(t-1)] \quad (7)$$

4. AFNN 제어기의 설계

IPMSM 드라이브는 과도 특성에서 다양한 속도 추정 능력, 부하 및 관성 등 파라미터의 변동에도 고성능 및 강인성이 요구된다. AFNN 제어기는 FNN 제어기에 기준 모델을 설계하여 퍼지추론으로 구현할 수 있는 적응 메카니즘으로 구성한다.

그림 2는 FNN 제어기를 설계하고, 적응 퍼지제어기인 AFC(Adaptive Fuzzy Controller)를 병렬로 연결한다. FNN에서 나타나는 오차를 보상하기 위하여 AFC를 사용하며 AFC는 기준 모델을 고려한 적응 메카니즘을 나타낸다.

FNN 알고리즘에 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 3에서 전동기의 출력 $\omega_m(k)$ 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.

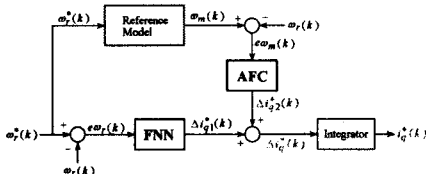


그림 2 제시한 AFNN 제어기의 알고리즘

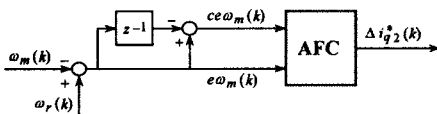


그림 3. 기준모델에 의한 AFC

AFC의 입력은 기준모델의 출력과 실제속도의 오차 ($e\omega_m(k)$)와 오차의 변화분 ($ce\omega_m(k)$)을 사용한다. 오차와 오차의 변화분은 다음과 같다.

$$e\omega_m(k) = \omega_m(k) - \omega_r(k) \quad (8)$$

$$ce\omega_m(k) = e\omega_m(k) - e\omega_m(k-1) \quad (9)$$

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.

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

$$i_q^*(k) = i_q^*(k-1) + [\Delta i_{q1}^*(k) + \Delta i_{q2}^*(k)] \quad (10)$$

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

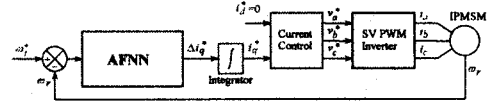


그림 4 IPMSM의 드라이브 시스템의 구성도

5. 시스템의 성능결과

그림 5는 PI, FNN 및 AFNN제어기의 속도와 q 축 전류를 비교한 결과이다. 0.2(sec)에서 스텝 지령속도를 1800(rpm)으로 운전하다가 0.6(sec)에서 0.8(sec)까지 부하토크를 3(N·m)인가하였을 경우의 응답특성이다. 그림 5(a)는 종래의 PI, FNN 제어기 및 AFNN 제어기의 속도를 나타내고, 그림 5(b)는 q 축 전류를 나타낸다.

그림 6은 그림 5를 명확하게 분석하기 위하여 확대한 그림이다. 그림 6(a)는 스텝 지령속도를 상승시킬 때 AFNN 제어기에서 속도는 종래의 PI 및 FNN 제어기의 속도에 비해 고속으로 추종하며 오버슈트가 매우 작게 나타난다. 그림 6(b)는 부하토크 변화에 대한 속도의 추종도 AFNN 제어기가 속도 변화도 작고 정상상태에 고속으로 추종하고 있다.

그림 7은 샘플링 주기를 $T_s = 2(\text{msec})$ 로 하고 1500(rpm)으로 운전 중 0.6(sec)에서 부하토크를 3(N·m) 인가한 상태에서 0.7(sec)에서 스텝 지령속도를 1000(rpm)으로 변화하였을 때의 응답특성을 비교한다. 그림 7(a)는 실제속도 및 (b)는 추종속도 및 (c)는 q 축 전류를 비교한 결과이다. 부하토크를 인가하였을 경우에도 AFNN 제어기의 출력이 속도 변화가 적고 정상상태에 빠르게 도달하며 부하를 인가한 상태에서 지령 속도를 변화시켰을 경우 응답특성이 매우 향상되고 있다.

그림 8은 그림 7과 같은 조건에서 샘플링 주기를 $T_s = 0.5(\text{msec})$ 로 변화시켰을 때 FNN 및 AFNN 제어기의 응답특성이다. 샘플링 주기를 길게 하였을 경우 속도변화가 크게 나타나고 정상상태에 늦게 도달한다. 샘플링 주기를 크게 할 경우 AFNN 제어기의 응답특성이 더욱 양호하게 나타나는 결과를 확인할 수 있다.

그림 9는 스텝 지령속도를 500(rpm)과 -500(rpm)으로 반복해서 변화시켰을 경우의 FNN 제어기의 응답특성을 나타낸다. 그림 9(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내고, 그림 9(b)는 지령속도와 추종속도를 나타낸다. 그림 9(c)는 q 축 전류를 나타내고, 그림 9(d)는 실제 회전각과 추종 회전각을 나타낸다. 스텝 지령속도 변화에 실제 속도와 추종속도는 지령속도에 양호하게 추종하며 실제 회전각과 추종 회전각이 거의 유사하게 나타난다.

그림 10은 그림 9와 같은 조건에서 AFNN 제어기의 응답특성을 나타낸다. AFNN 제어기는 FNN 제어기에 비해 지령속도에 변화에 빠르게 추종하므로 응답특성이 향상되었고 센서리스 벡터제어도 양호하게 수행되고 있다.

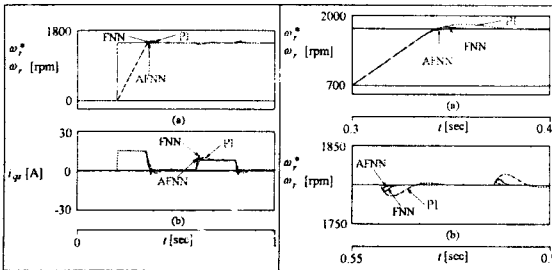


그림 5 PI, FNN 및 AFNN 제어기의 응답특성의 비교

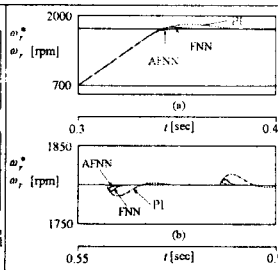


그림 6 PI, FNN 및 AFNN 제어기의 응답특성의 비교

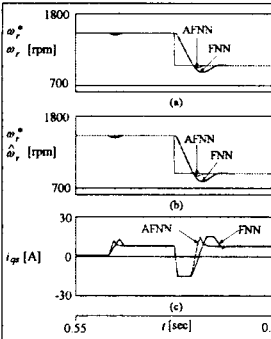


그림 7 부하토크와 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답 비교 ($T_s = 2[\text{msec}]$)

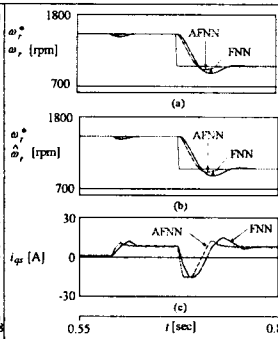


그림 8 부하토크와 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답 비교 ($T_s = 5[\text{msec}]$)

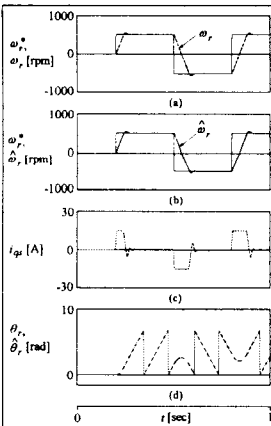


그림 9 스텝 지령속도의 변화에 대한 FNN 제어기의 응답특성 (500[rpm]→500[rpm])

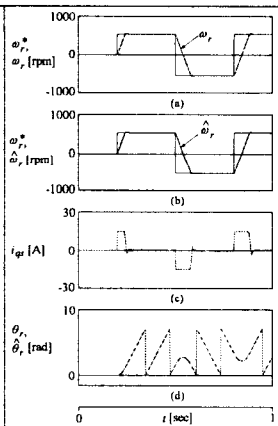


그림 10 스텝 지령속도의 변화에 대한 AFNN 제어기의 응답특성 (500[rpm]→500[rpm])

그림 11은 무부하 상태로 4상한 운전 중 0.7[sec]에서 부하토크를 3N·m 인가한 상태에서 FNN 및 AFNN 제어기의 응답특성을 나타낸다. 그림 11(a)는 FNN 제어기의 지령속도, 실제속도 및 추종속도를 나타낸다. 그림 11(b)는 AFNN 제어기의 지령속도, 실제속도 및 추종속도를 나타내며 실제속도와 추종속도는 지령속도에 양호하게 추종하고 있다. 그림(c)는 FNN 제어기의 q축 전류, (d)는 AFNN 제어기의 q축 전류이다. 그림(e)는 지령속도와 실제속도의 오차를 나타내며 AFNN 제어기의 속도오차가 FNN 제어기에 비해 매우 감소하고 있다.

그림 12는 관성을 3배 증가시키고 그림 11과 같은 조건에서 운전하였을 경우의 응답특성을 나타낸다. 관성의 증가에 따라 지령 속도변화에 대한 실제속도는 크게 변화한다. 그러나 AFNN 제어기는 FNN 제어기 보다 속도변화의 폭은 감소되고 실제속도가 지령속도에 양호하게 추종하고 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 AFNN

제어기가 속도의 변화, 부하변화 및 관성변화 등의 광범위한 운전조건에서 FNN 제어기보다 응답특성이 매우 향상된다.

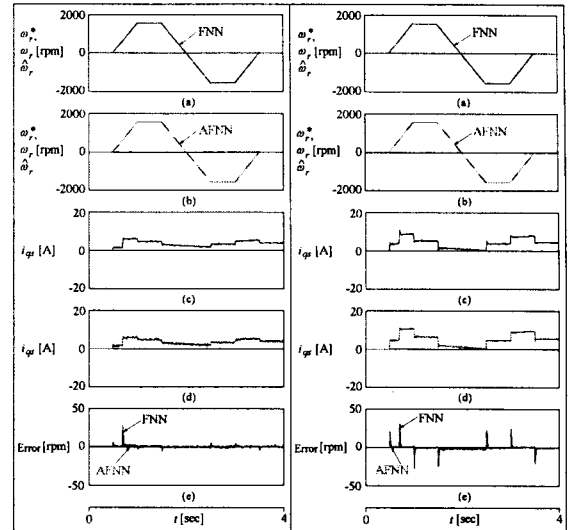


그림 11 4상한 동작에서 FNN 제어기와 AFNN 제어기의 응답비교 ($J = J_n$)

그림 12 4상한 동작에서 FNN 및 AFNN 제어기의 응답비교 ($J = 3J_n$)

6. 결 론

본 연구에서는 AFNN 제어기를 이용한 IPMSM의 속도제어를 제시하였다.

AFNN제어기는 종래의 PI 및 FNN 보다 성능이 우수한 결과를 얻었으며 고성능 및 강인성 제어를 확인할 수 있었다. 파라미터 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하였다. 속도 및 부하토크 변화에도 AFNN 제어기는 종래의 PI 및 FNN 보다 우수한 성능을 나타내었다.

본 연구에서는 제시한 AFNN제어기는 시스템의 응답특성이 양호하게 나타났으며 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제시한 AFNN제어기의 타당성을 입증할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] K. S. Narendra and K. Parthasarthy, "Identification and control of dynamical system using neural network," IEEE Trans. Neural Networks, vol. 1, no. 1, pp. 4-27, 1990.
- [2] Cybenko, "Approximations by superposition of a sigmoidal function," Mathematics of Contr., Signals and Syst., vol. 2, pp. 303-314, 1989.
- [3] A. K. Toh, E. P. Nowicki and F. Ashrafzadeh, "A flux estimator for field oriented control of an induction motor using an artificial neural network," IEEE IAS Conf. Rec. Ann. Meet., vol. 1, pp. 585-592, 1994.
- [4] 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.
- [5] M. T. Wishart and R. G. Harley, "Identification and control of induction machines using neural networks," IEE E Trans. IA, vol. 31, no. 3, pp. 612-619, 1995.