

# HAI 제어기에 의한 유도전동기 드라이브의 고성능 제어

## High Performance of Induction Motor Drive with HAI Controller

남수명\*, 최정식\*, 고재섭\*, 정동화\*\*

Su-Myeong Nam\*, Jung-Sik Choi\*, Jae-Sub Ko\*, Dong-Hwa Chung\*\*

**Abstract** - This paper is proposed adaptive hybrid artificial intelligent(HAI) controller for high performance of induction motor drive. The design of this algorithm based on fuzzy-neural network(FNN) controller that is implemented using fuzzy control and neural network. This controller uses fuzzy rule as training patterns of a neural network. Also, this controller uses the back-propagation method to adjust the weights between the neurons of neural network in order to minimize the error between the command output and actual output. A model reference adaptive scheme is proposed in which the adaptation mechanism is executed by fuzzy logic based on the error and change of error measured between the motor speed and output of a reference model. The control performance of the adaptive FNN controller is evaluated by analysis for various operating conditions. The results of experiment prove that the proposed control system has strong high performance and robustness to parameter variation, and steady-state accuracy and transient response.

**Key Words** : induction motor drive, fuzzy control, neural network, HAI, adaptive FNN controller

### 1. 서 론

간접 벡터제어는 유도전동기의 고성능을 위한 드라이브 시스템에 광범위하게 적용되고 있다. 드라이브의 양호한 성능을 얻기 위하여 적응제어가 연구되었으며 적응제어는 종래의 PI 제어기에 비해 매우 양호한 성능을 얻을 수 있었다.[1] 이러한 적응제어 기법은 수학적인 모델링에 기초를 두고 있으며 다량의 알고리즘 때문에 매우 복잡한 문제점을 해결하기 위하여 직접 퍼지제어기가 개발되었으나 다양한 부하변동과 관성변화에 대하여 강인성의 응답특성을 기대하기가 어려우며 만족할만한 성능을 얻을 수 없다.[2] 신경회로망은 일반적인 벡터제어 방법과 비교하여 적응제어의 능력이 우수하였다.[3] 그러나 퍼지제어에서 나타나는 특성인 고성능 및 강인성 제어에서는 취약한 문제점이 나타난다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 감안하여 유도전동기 드라이브의 고성능 제어를 위하여 퍼지제어와 신경회로망을 혼합 구성한 HAI 제어기를 제시한다. 더욱 성능 향상을 위하여 기준모델에 기초한 적응 메카니즘의 기법을 적용한다.[4] 본 제어기를 유도전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하고 본 제어기의 타당성을 입증한다.

### 3. HAI 제어기

유도전동기 드라이브의 속도를 추종 및 제어를 위하여 PI, PID 및 적응제어 기법이 많이 사용되었다. 그러나 이 기법들은  $d-q$ 축 파라미터를 구하는데 복잡하고 파라미터의 변동 및 부하변화에 매우 민감하였다. 유도전동기의 속도를 제어하기 위하여 적응 퍼지제어기 및 신경회로망이 개발되었다. 이러한 기법들은 파라미터 변동, 부하변화 및 시스템 외란 등에 강인한 특성을 발휘하였다. 그러나 이 제어기들의 특징에서 각각의 문제점이 내포되어 있으므로 더욱 더 새로운 방법의 기법들을 개발하기 위하여 새로운 방법들이 시도되고 있다. 적응, 퍼지제어, 신경회로망 및 유전자 알고리즘을 상호 혼합하여 각 제어기의 장점을 공유하는 혼합제어가 유력한 기법으로 평가받을 것으로 예측된다.

그림 1은 HAI 제어기의 연구에 대하여 도식적으로 표현을 해 보았다. 각 제어기들은 화살표 방향으로 상호 공유하여 혼합제어를 형성할 수 있다.

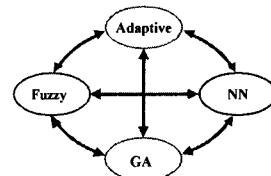


그림 1 HAI 제어기의 연구

본 논문에서는 적응제어, 퍼지제어와 신경회로망을 혼합한 형태의 이용하여 HAI 제어기를 구성하였다. 이를 이용하여 유도전동기의 고성능 제어를 하게 된다.

저자 소개

\*順天大學 電氣工學科 碩士課程

\*\*順天大學 電氣工學科 教授 · 工博

### 3. FNN 제어기의 설계

FNN 제어기는 퍼지제어와 신경회로망을 혼합 구성하며 강력한 표현의 유연성과 수치 처리능력을 가지고 있다[5]. 그림 2는 FNN의 구성을 나타내며 여기서 두 개의 입력변수는 오차  $e$ 와 오차의 변화분  $ce$ 이고 출력변수는 제어변수  $u^*$ 이다.

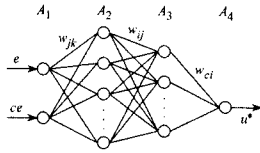


그림 2 FNN의 구성

#### 3.1 제어기의 조건부의 구현

그림 2에서  $A_1$ 층에서  $A_3$ 층 사이에 신경회로망은 퍼지룰의 조건부의 구현을 나타낸다. 표 1은 퍼지제어룰의 집합을 나타낸다.

표 1 퍼지룰 표

	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PM	PB	PM	PM	PM
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

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

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

#### 3.2 제어기의 결론부의 구현

그림 2에서  $A_3$ 층과  $A_4$ 층 사이의 신경회로망은 퍼지룰의 후반부의 구현을 나타낸다. 학습 동안 가중치  $W_{ci}$ 는 다음 오차 함수를 최소화하기 위하여 조절한다.

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

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

### 4. HAI 제어기의 설계

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

그림 3은 FNN 제어기를 설계하고 적응 퍼지제어기인 AFC(Adaptive Fuzzy Controller)[4]를 병렬로 연결하여 HAI 제어기를 구성한다. FNN에서 나타나는 오차를 보상하기 위하여 AFC를 사용하며 AFC는 기준 모델을 고려한 적응 메카니즘을 나타낸다.

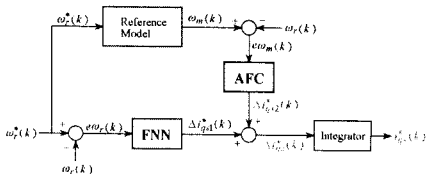


그림 3 제시한 HAI 제어기의 알고리즘

AFC는 기준모델을 사용하여 그림 3에서 전동기의 출력  $\omega_r(k)$ 는 기준모델의 출력  $\omega_m(k)$ 과 비교하여 오차  $e\omega_m(k)$ 는 AFC에 의해 수행된다. 기준모델은 안정화 시간 및 오버슈트의 같은 설계 기준을 만족하는 요구성능을 충족시키기 위하여 사용하며 1차 시스템을 사용한다. 그림 4는 기준모델에 의한 AFC를 나타낸다. AFC의 루프는 FNN 루프와 병렬로 연결한다.

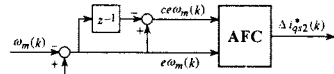


그림 4 기준모델에 의한 AFC

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

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

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

FNN의 출력에서  $\Delta i_{qs2}^*(k)$ 을 얻어 AFC에서  $\Delta i_{qs2}^*(k)$ 와 합하면 퍼지제어기의 지령  $q$ 축 전류를 얻을 수 있다.

$$i_{qs}^*(k) = i_{qs}^*(k-1) + [\Delta i_{qs1}^*(k) + \Delta i_{qs2}^*(k)] \quad (7)$$

HAI 제어기에 의해 제어되는 유도전동기의 드라이브 시스템은 그림 5와 같이 인버터는 공간벡터 PWM 방식을 사용한다.

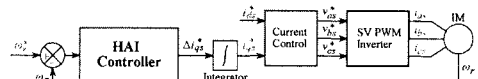


그림 5 유도전동기의 드라이브 시스템의 구성도

### 5. 시스템의 성능결과

그림 6은 본 논문에서 실험을 위해 제작된 유도전동기 구동 시스템을 나타낸다.

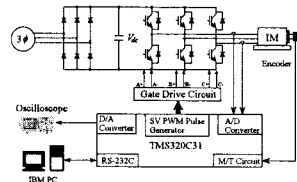


그림 6 시스템 구성도

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

그림 7과 8은 무부하 상태에서 스텝 지령속도를 정적인 1720[rpm]으로 운전시켰을 경우의 FNN 제어기와 HAI 제어기의 응답특성 결과이다. 그림 (a)는 지령속도와 실제속도, 그림 (b)는  $q$ 축 전류를 나타내고 그림 (c)는 발생토크를 나타낸다. 스텝 지령속도에 대한 실험결과는 HAI 제어기의 속

도가 FNN 제어기에 비해 오버슈트가 크게 감소하고, 상승 시간이 빠르며, 정상상태에 빠르게 도달한다.

그림 9과 10은 무부하 상태에서 1000[rpm]으로 운전 중, 부하토크를 10[N·m]인가 한 경우의 FNN 제어기와 HAI 제어기의 응답특성을 나타낸다. 일정한 속도로 운전 중, 부하토크를 인가한 경우 HAI 제어기의 응답특성은 FNN 제어기보다 속도 변화가 감소하고 빠르게 지령속도에 도달한다.

그림 11과 12에서 스텝 지령속도를 -1200[rpm]과 1200[rpm]으로 정·역회전 시켰을 경우의 FNN 제어기와 HAI 제어기의 응답특성을 나타낸다. HAI 제어기의 속도는 FNN 제어기의 속도보다 오버슈트가 감소하며 정상상태에 빠르게 도달한다.

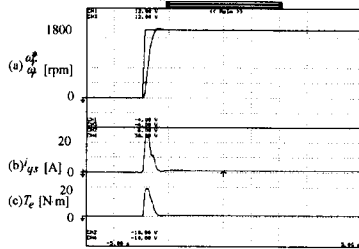


그림 7 스텝 지령속도에 대한 FNN 제어기의 응답특성

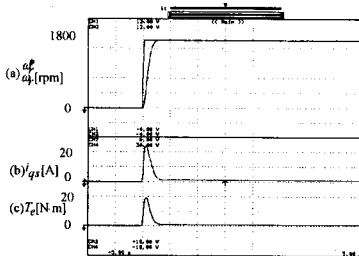


그림 8 스텝 지령속도에 대한 HAI 제어기의 응답특성

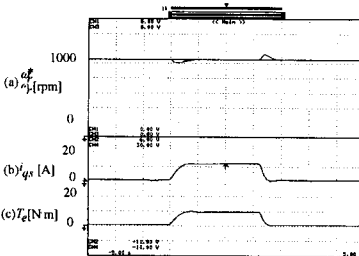


그림 9 부하토크 변화에 대한 FNN 제어기의 응답특성

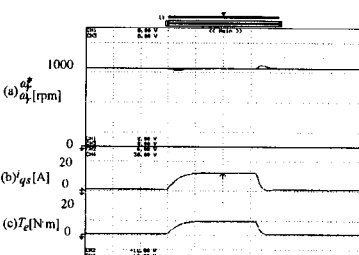


그림 10 부하토크 변화에 대한 HAI 제어기의 응답특성

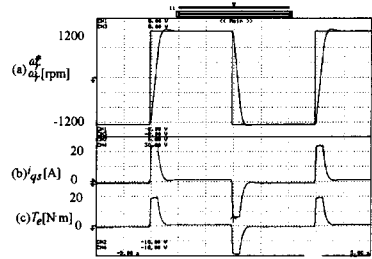


그림 11 스텝 지령속도의 변화에 대한 FNN제어기의 응답특성

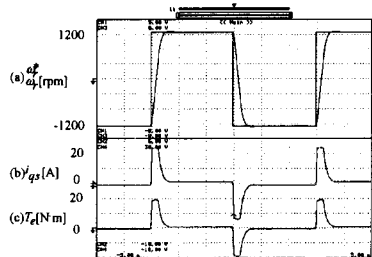


그림 12 스텝 지령속도의 변화에 대한 HAI 제어기의 응답특성

## 6. 결 론

본 연구에서는 유도전동기 드라이브의 고성능 제어를 위하여 HAI 제어기를 제시하였다. FNN 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 적응제어의 능력을 얻을 수 있다. 더욱 성능 향상을 위하여 기준모델에 기초한 적응 메카니즘의 기법을 적용해 보았다.

HAI 제어기를 유도전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하였다. 샘플링 시간, 속도, 부하토크 및 관성의 변화에도 HAI 제어기는 FNN 제어기 보다 상승시간은 빠르고 오버슈트는 작게 나타나며 고성능으로 적용 추정할 수 있었다. 그리고 전동기의 정·역회전인 4상한 운전에서도 적용 FNN의 성능은 우수하게 나타났다.

본 연구에서는 제시한 HAI 제어기는 파라미터의 변동 및 과도상태에서 드라이브의 응답특성이 양호하게 나타났으며 속도의 추정도 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "Adaptive control," Addison-Wesley, 1989.
- [2] D. H. Chung, "Fuzzy control for high performance vector control of PMSM drive system," KIEE, vol. 47, no. 12, pp. 2171-2180, 1998.
- [3] 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.
- [4] D. H. Chung, et al., "MRAC fuzzy control for high performance control of induction motor," The Trans. of KIPE, vol. 7, no. 3, pp. 215-223, 2002.
- [5] H. G. Lee, J. C. Lee and D. H. Chung, "Speed estimation and control of induction motor using fuzzy-ANN controller," KIEE Trans., vol. 53D, no. 5, pp. 545-550, 2004.