

적응 FNN에 의한 유도전동기의 센서리스 제어

이영실, 이정철, 이흥균, 남수명, 정동화  
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Sensorless Control of Induction Motor using Adaptive FNN Controller

Young-Sil Lee, Jung-Chul Lee, Hong-Gyun Lee, Su-Myeong Nam, Dong-Hwa Chung  
 School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ.

**Abstract** - This paper is proposed an adaptive fuzzy-neural network(A-FNN) controller 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 speed estimation of induction motor using A closed-loop state observer. The rotor position is calculated through the stator flux position and an estimated flux value of rotation reference frame. A closed-loop state observer is implemented to compute the speed feedback signal. The results of analysis prove that the proposed control system has strong robustness to rotor parameter variation, and has good steady-state accuracy and transitory response.

자속을 이용하여 위치를 추정한다. 자속관측기를 통해 위치로부터 회전자 속도를 추정한다.

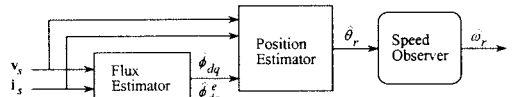


그림 1. 위치와 속도 추정의 알고리즘 블록도

2.1 회전자의 위치추정

위치 추정 기법은 전압과 전류 신호를 이용하여 자속을 추정하고 추정된 자속으로 위치각을 구한다. 그림 2는 고정 및 회전 좌표계의 자속 벡터를 나타낸다. ds - qs 축은 고정 좌표계를 나타내고 ds\* - qs\* 축은 회전 좌표계를 나타낸다.

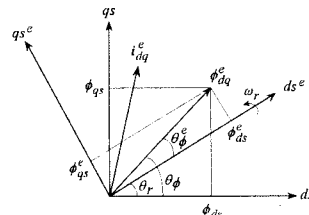


그림 2. 유도전동기의 자속 벡터도

회전 좌표계의 추정자속은 다음과 같다.

$$\hat{\phi}_{ds}^* = \frac{L_r}{L_m} (\phi_{ds} - \sigma L_s i_{ds}) \tag{1}$$

$$\hat{\phi}_{qs}^* = \frac{L_r}{L_m} (\phi_{qs} - \sigma L_s i_{qs}) \tag{2}$$

식(1)과 (2)에서 회전자의 추정 자속각은 다음과 같다.

$$\hat{\theta}_\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{\phi}_{qs}^*}{\hat{\phi}_{ds}^*} \right) \tag{3}$$

고정 좌표계 d-q 축의 고정자 자속은 고정자 전압을 적분하여 구한다.

$$\hat{\phi}_{ds} = \int (v_{ds} - R_s i_{ds}) dt \tag{4}$$

$$\hat{\phi}_{qs} = \int (v_{qs} - R_s i_{qs}) dt \tag{5}$$

고정자의 추정 자속각  $\hat{\theta}_\phi$ 은 식(4)와 (5)를 이용하여 구한다.

$$\hat{\theta}_\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{\phi}_{qs}}{\hat{\phi}_{ds}} \right) \tag{6}$$

1. 서 론

기계적인 센서를 사용하지 않고 추정속도를 피드백에 사용하는 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다.[1]-[2] 그러나 이러한 종래의 연구도 다양한 문제점이 도출되었다.[3]

최근 퍼지제어, 신경회로망[4] 및 유전자 알고리즘 등을 이용한 인공지능 제어는 전력전자 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 중요한 기법으로 인식되고 있다. 이러한 기법들은 적응제어 기법과 상호 혼합하여 적응-인공지능 제어기를 개발하고 있다. 이러한 기법간의 상호 혼합한 방식은 적응성 및 강인성이 요구되는 유도전동기 드라이브에서 진가를 유감없이 발휘할 전망이다.

본 논문에서는 적응 FNN(Fuzzy-Neural Network)에 의해 고성능으로 제어되는 유도전동기 드라이브 시스템의 센서리스 제어를 제시한다. 이 제어기는 자속을 추정하고 추정된 자속으로 위치를 추정한다. 속도관측기를 설계하여 추정된 위치를 이용하여 속도를 추정한다. 적응 FNN 제어기는 퍼지제어에서 나타나는 장점인 고성능 및 강인성 제어를 얻을 수 있으며 신경회로망에서 나타나는 장점인 고도의 적응제어의 능력을 얻을 수 있다.

본 논문에서 제시한 알고리즘을 유도전동기 드라이브 시스템에 적용하여 추정성능을 분석한다. 그리고 속도와 위치제어에서 나타나는 성능도 분석한다. 분석한 특성을 기초로 유도전동기의 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하고 본 제어기의 타당성을 입증한다.

2. 센서리스 제어

그림 1은 위치와 속도 추정을 위한 블록도를 나타낸다. 고정자 전압과 전류를 이용하여 자속을 추정하고 이

자속의 회전각  $\hat{\theta}_r$ 은 고정자의 자속각  $\hat{\theta}_s$ 과 회전자의 자속각  $\hat{\theta}_r^e$ 에서 추정한다.

$$\hat{\theta}_r = \hat{\theta}_s - \hat{\theta}_r^e \quad (7)$$

그림 3은 자속의 회전각에 의한 회전자 위치 추정을 위한 블록도를 나타낸다.

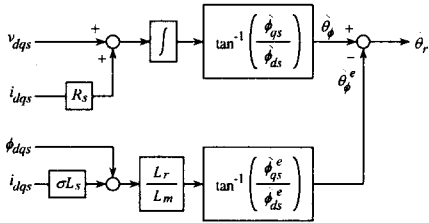


그림 3. 고정자 자속에 의한 회전자의 위치추정

## 2.2 회전자의 속도추정

그림 4는 지령토크와 측정된 위치에 의해 속도를 추정하는 시스템이며 이는 근사화한 오픈 루프 모델과 피드백 루프 시스템 모델을 포함하고 있다. 피드백 루프 시스템은 정확한 속도의 추정을 위해 필요하며 정상상태의 오차를 제거하기 위하여 적분 항을 추가한다. 이러한 속도 관측기는 정적속도 뿐 아니라 저속과 영속도까지도 정확하게 추정할 수 있다.

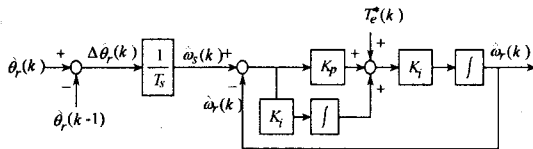


그림 4. 속도관측기의 블록도

## 3. 적응 FNN 제어기[5]

적응 FNN 제어기는 FNN 제어기에 기준 모델을 설계하여 퍼지추론으로 구현할 수 있는 적응 메카니즘으로 구성한다. 그림 5는 FNN 제어기를 설계하고, 적응 퍼지 제어기인 AFC(Adaptive Fuzzy Controller)를 병렬로 연결한다. FNN에서 나타나는 오차를 보상하기 위하여 AFC를 사용하며 AFC는 기준 모델을 고려한 적응 메카니즘을 나타낸다.

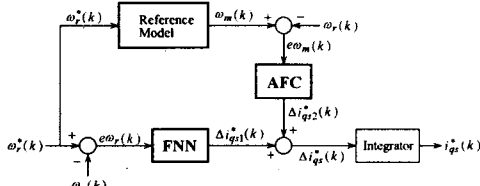


그림 5. 적응 FNN 제어기의 알고리즘

FNN 알고리즘에 의한 출력은  $\Delta i_{qs1}^*(k)$ 이며 AFC에 의한 출력은  $\Delta i_{qs2}^*(k)$ 이다.  $\Delta i_{qs1}^*(k)$ 과  $\Delta i_{qs2}^*(k)$ 를 합하여  $\Delta i_{qs}^*(k)$ 를 구하여 이를 적분기를 통해  $i_{qs}^*(k)$ 를 발생시켜 플랜트에 인가한다.

$$i_{qs}^*(k) = i_{qs}^*(k-1) + [\Delta i_{qs1}^*(k) + \Delta i_{qs2}^*(k)] \quad (8)$$

AFC의 입력은 기준모델의 출력과 실제속도의 오차

( $e\omega_m(k)$ )와 오차의 변화분( $ce\omega_m(k)$ )을 사용한다. 오차와 오차의 변화분은 다음과 같다.

$$e\omega_m(k) = \omega_m(k) - \omega_r(k) \quad (9)$$

$$ce\omega_m(k) = e\omega_m(k) - e\omega_m(k-1) \quad (10)$$

적용 FNN 제어기에 의해 제어되는 유도전동기의 드라이브 시스템은 그림 6과 같고 인버터는 공간벡터 PWM 방식을 사용한다.

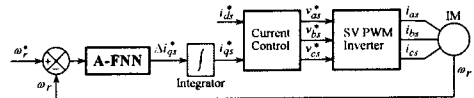


그림 6. 유도전동기의 드라이브 시스템의 구성도

## 4. 속도 및 위치 제어

### 4.1 속도제어

속도 센서리스 제어를 위한 블록도는 그림 7과 같다.

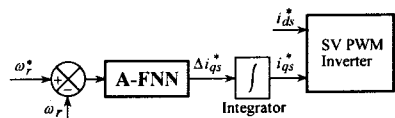


그림 7. 센서리스 속도제어의 블록도

속도는 추정된 위치로부터 추정하며 지령속도와 추정속도를 비교한다. 이 오차를 적응 FNN 제어기에 의하여 지령  $q$ 축 전류를 구한다.

### 4.2 위치제어

그림 8은 위치제어를 위한 블록도이다. 지령 위치와 추정위치를 비교하여 지령 속도를 구하고 지령 속도를 추정속도와 비교하여 제어한다. 위치 및 속도 제어기는 적응 FNN 제어기를 사용한다.

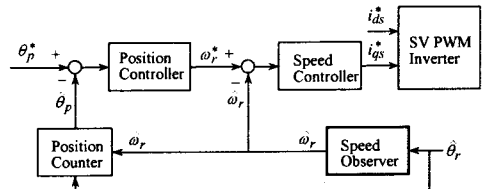


그림 8. 센서리스 위치제어의 블록도

## 5. 시스템의 성능결과

그림 9는 PI, FNN 및 적응 FNN(A-FNN) 제어기의 속도와  $q$ 축 전류를 비교한 결과이다. 0.2[sec]에서 스텝 지령속도를 1800[rpm]으로 운전중 0.6[sec]에서 0.8[sec]까지 부하토크를 3[N·m]인가하였을 경우의 응답특성을 나타낸다. 그림 9(a)는 종래의 PI, FNN 제어기 및 적응 FNN 제어기의 속도를 나타내고, 그림 9(b)는  $q$ 축 전류를 나타낸다. 그림 9(a)에서 스텝 지령속도를 상승시킬 때 적응 FNN 제어기에서 속도는 종래의 PI 및 FNN 제어기의 속도에 비해 빠르게 추종하며 오버슈트가 매우 작게 나타난다. 그림 9(b)에서 부하토크 변화에 대한 속도의 추종도 적응 FNN 제어기가 속도 변화도 작고 정상상태에 빠르게 추종하고 있다.

그림 10은 1000[rpm]으로 운전 중, 0.6[sec]에서 0.8[sec]까지 지령속도를 1800[rpm]으로 변화시켰을 때

FNN 및 적응 FNN 제어기의 응답특성을 비교하여 나타낸다. 그림 10(a)는 실제속도, (b)는 추종속도 및 (c)는  $q$  축 전류를 비교한 결과이다. 속도 변화에도 적응 FNN 제어기의 응답 특성이 양호하게 나타난다.

그림 11은 1800[rpm]으로 운전중 0.5[sec]에서 0.7[sec]까지 부하토크를  $3[N \cdot m]$  인가하였을 때의 응답특성을 비교한다. 부하토크를 인가하였을 경우에도 적응 FNN 제어기의 출력이 속도 변화가 적고 정상상태에 빠르게 도달하고 있다.

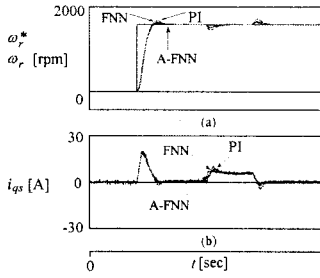


그림 9. PI, FNN 및 적응 FNN 제어기의 응답특성의 비교

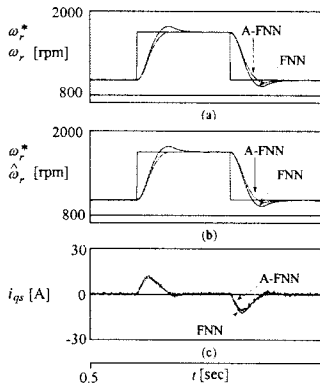


그림 10. 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답비교

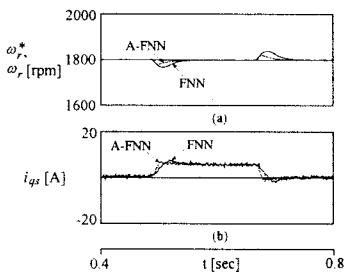


그림 11. 부하토크의 변화에 대한 응답비교

그림 12는 무부하 상태로 4상한 운전 중 0.7[sec]에서 부하토크를  $3[N \cdot m]$  인가한 상태에서 FNN 및 적응 FNN 제어기의 응답특성을 나타낸다. 그림 12(a)는 FNN 제어기의 지령속도, 실제속도 및 추종속도를 나타낸다. 그림 12(b)는 적응 FNN 제어기의 지령속도, 실제속도 및 추종속도를 나타내며 실제속도와 추종속도는 지령속도에 양호하게 추종하고 있다. 그림 12(c)는 FNN 제어기의  $q$  축 전류, 그림 12(d)는 적응 FNN 제어기의  $q$  축 전류이다. 그림 12(e)는 지령속도와 실제속도의 오차를 나타내며 적응 FNN 제어기의 속도오차가 FNN 제어기에 비해 매우 감소하고 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 적

응 FNN 제어기가 속도의 변화, 부하변화등의 파라미터 변동에서도 FNN 제어기보다 응답특성이 매우 향상된다.

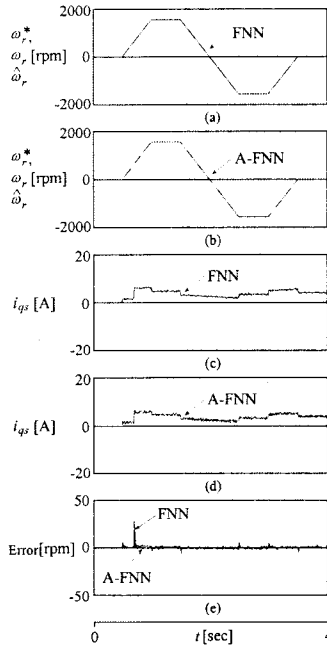


그림 12. 4상한 동작에서 FNN 제어기와 적응 FNN 제어기의 응답비교

## 6. 결 론

본 연구에서는 적응 FNN에 의해 고성능으로 제어되는 유도전동기 드라이브 시스템에 센서리스 제어를 제시하였다. 자속을 추정하고 추정된 자속으로 위치를 추정하였다. 속도관측기를 설계하여 추정된 위치를 이용하여 속도를 추정하였다. 적응 FNN 제어기와 속도관측기는 종래의 PI 및 FNN 보다 성능이 우수한 결과를 얻었으며 고성능 및 강인성 제어를 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 제시한 적응 FNN 제어기는 파라미터의 변동 및 과도상태에서 드라이브의 응답특성이 양호하게 나타났으며 속도의 추정도 양호한 추정결과를 얻을 수 있었다.

## [참 고 문 헌]

- [1] C. Schauder, "Adaptive speed identification for vector control of induction motor without rotational transducers," IEEE Trans. on IA, vol. 28, no. 5, pp. 1054-1061, 1992.
- [2] 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.
- [3] Y. Shrivastava, M. T. Nguyen and S. Sathiakumar, "Speed estimation for induction motor," Submitted to the 8th European Conference on Power Electronics and Applications, Sep. 1999.
- [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] J. C. Lee, H. G. Lee and D. H. Chung, "Design of adaptive FNN controller for speed control of IPMSM drive," Journal of KIEE, vol. 41-SC, no. 3, pp. 39-46, 2004.