

## AI 알고리즘을 이용한 유도전동기의 센서리스 제어

정병진, 고재섭, 최정식, 김도연, 박기태, 최정훈, 정동화  
순천대학교 공과대학 정보통신공학부

## Sensorless Control of Induction Motor with AI Algorithm

Byung-Jin Jung, Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Do-Yeon Kim, Ki-Tae Park, Jung-Hoon Choi, Dong-Hwa Chung  
School of Information & Communication Engineering, Sunchon National Univ.

**Abstract** - The paper is proposed artificial neural network(ANN) sensorless control of induction motor drive with fuzzy learning control-fuzzy neural network(FLC-FNN) controller. The hybrid combination of neural network and fuzzy control will produce a powerful representation flexibility and numerical processing capability. Also, this paper is proposed speed control of induction motor using FLC-FNN and estimation of speed using ANN controller. This paper is proposed the analysis results to verify the effectiveness of the FLC-FNN and ANN controller.

## 1. 서 론

산업 프로세서의 적용에는 부하 외란, 파라미터 변화 및 어떤 모델의 불확실성 등에 대하여 고성능과 강인성을 발휘할 수 있는 기법이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 적용 퍼지제어[1], 파라미터 변동을 고려한 퍼지제어[2], 새로운 퍼지제어[3] 및 적용 FNN(Fuzzy-Neural Network)[5] 등의 연구가 되었다. 이러한 연구들은 간접的办法에 의해 전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 양호한 성능을 얻을 수 있었다. 그러나 속도 및 부하 토크 등 파라미터의 변동에 대하여 종래의 방식 보다 더욱 우수한 결과를 얻을 수는 방식이 필요하다.

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 경밀도에 영향을 주는 온도, 습도 및 먼지 등 환경적인 요인에 민감하며 시스템의 강인성을 약화시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[6]-[8]

본 논문에서는 AI(Artificial Intelligent)에 의해 유도전동기 드라이브를 고성능 속도를 제어하고 ANN(Artificial Neural Network)에 의해 유도전동기의 속도를 추정한다. 본 논문에서 제시한 AI와 ANN 제어기의 제어특성과 추정성능을 분석하고 그 결과를 제시한다.

## 2. 시스템 구성 및 모델링

동작특성을 분석하기 위한 유도전동기의 미분 방정식은 다음과 같다.[9]

$$P \begin{bmatrix} i_{d*} \\ i_{q*} \\ \phi_{q*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{R_s}{\sigma L_r} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{R_r}{L_r} \right) & \omega_r & \frac{L_m R_r}{\sigma L_r L_r^2} & \frac{L_m}{\sigma L_r L_r} \omega_r \\ \omega_r & \left( \frac{R_s}{\sigma L_r} + \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{R_r}{L_r} \right) & -\frac{L_m}{\sigma L_r L_r} \omega_r & \frac{L_m R_r}{\sigma L_r L_r^2} \\ \frac{L_m R_r}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & (\omega_r - \omega_s) \\ 0 & \frac{L_m R_r}{L_r} & -(\omega_r - \omega_s) & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \phi_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{d*} \\ v_{q*} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 발생토크는 다음 식으로 표현된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\phi_{d*} i_{q*} - \phi_{q*} i_{d*}) \quad (2)$$

## 3. AI 제어기

AI에 의한 유도전동기의 드라이브 시스템은 그림 1과 같다. AI는 학습 메카니즘을 이용한 퍼지와 신경회로망으로 구성하여 FNN 제어기라고 한다. FNN 제어기는 드라이브 시스템의 동작을 관측하고 요구되는 지령치로 실제 성능을 비교한다. 학습 메카니즘은 요구되는 시스템 동작으로 거의 일치시키기 위하여 FNN 제어기를 수정한다. FNN의 입력은 속도오차  $e$  및 속도오차의 변화분  $ce$ 이다. FNN의 출력  $\Delta i_{q*}^*$ 는 중심 비퍼지화 방법에 의해 계산한다. 이전 출력  $i_{q*}^{*(k-1)}$ 에 출력  $\Delta i_{q*}^*(k)$ 를 합하여 최종  $i_{q*}^*(k)$ 를 얻고 이를 전동기의 입력으로 한다.

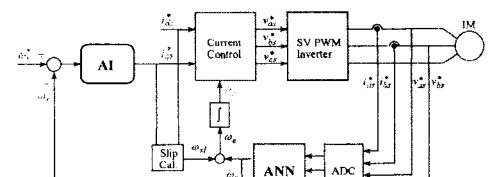


그림 1 AI에 의한 유도전동기의 ANN 센서리스 제어기  
Fig. 1 ANN sensorless controller of induction motor with AI

그림 2는 학습 메카니즘을 이용한 FNN 제어기의 구조를 나타낸다. 학습 메카니즘의 설계는 시스템 응답의 각 동적 측면이 룰 그룹에 의해 주로 영향을 받는다는 사실에 기초하여 설정한다. 바로 평가되는 설정 룰에서 후반부의 변화는 시스템의 상승시간, 오버슈트, 정상상태 및 과도상태의 오차 등에 영향을 준다. 따라서 FNN 제어기에 학습 메카니즘을 적용하여 룰 베이스의 규칙을 수정한다. 학습 메카니즘은 퍼지 역모델 및 지식베이스

수정자를 포함한다. 드라이브 시스템의 속도성능은 기준모델의 속도와 추정속도의 오차에 의해 좌우된다.

$$em(kT) = \omega_m(kT) - \hat{\omega}_r(kT) \quad (3)$$

$$cem(kT) = em(kT) - em(kT-T) \quad (4)$$

여기서 오차  $em(kT)$ 는 각 시간순서에서 얻어지는 필요한 속도성능의 측정 정도이다. 성능이 만족할 경우인  $em(kT)=0$ 에서 학습 메카니즘은 FNN 제어기에서 수정할 필요가 없다. 그렇지 않으면 학습 메카니즘은 요구되는 속도성능을 얻기 위하여 FNN 제어기의 룰 베이스를 동조시켜 수정을 해야 한다.

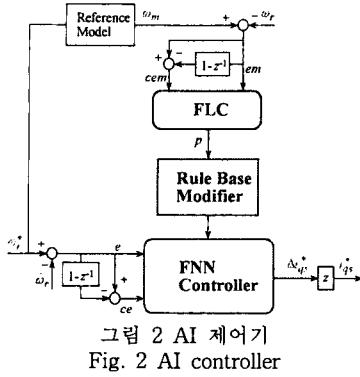


그림 2 AI 제어기  
Fig. 2 AI controller

퍼지 역모델은 오차  $em(kT)$ 를 사상하여 프로세서의 입력  $p(kT)$ 를 변화시키며  $em(kT)$ 를 영이 되도록 강제화 시킨다. 역모델의 입력은 식(3) 및 식(4)와 같이 오차와 오차 변화분으로 정의한다. 퍼지의 수행과정은 FNN 제어기에서 사용한 방법과 유사하게 사용한다. 프로세서에서 변화  $p(kT)$ 는 입력오차  $em(kT)$ 에 기초하여 퍼지 역모델에 의해서 발생한다.

지식베이스의 수정자는  $p(kT)$ 에 따라서 FNN 제어기의 지식베이스를 변화시킨다. 이 변화는 FNN 제어기에서 출력의 멤버쉽 함수의 중앙을 수정하여 구현한다.

$$C_i(kT) = C_i(kT-T) + p(kT) \quad (5)$$

여기서 첨자  $i$ 는 역모델에 의해 동작하는  $i$ 번째 멤버쉽 함수를 나타낸다. 여기서 각 부분 변화는 각 시간에서 이루어진다. 이 방법에서 FNN 제어기는 요구되는  $\dot{\omega}_r(kT)$ 를 발생하기 위하여 강제화 시킨다. 이는 기준모델과 같이 동작시키기 위하여 전동기를 강제화 시킨다.

#### 4. ANN에 의한 속도 추정

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

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta\hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) + \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) + \frac{\eta}{T} \{ [\phi_{qr}(k) - \hat{\phi}_{qr}(k)] \hat{\phi}_{dr}(k-1) \\ &\quad - [\phi_{dr}(k) - \hat{\phi}_{dr}(k)] \hat{\phi}_{qr}(k-1) \} + \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\hat{\theta}_r(k+1) = \hat{\theta}_r(k) + T \cdot \hat{\omega}_r(k) \quad (7)$$

#### 5. 시스템의 성능결과

그림 3은 0.2[sec]에서 스텝 지령속도를 1800[rpm]으로 운전 중, 0.6[sec]에서 0.8[sec]까지 부하토크를 6[N·m]

로 인가하였을 경우의 PI, FNN 및 AI 제어기의 응답특성을 나타낸다. 그림 4는 그림 3의 응답특성을 명확하게 분석하기 위하여 과도상태 부분을 확대하여 나타낸다. 스텝 지령의 변화와 부하인가에 의한 속도추정은 AI 제어기가 PI 및 FNN 제어기 보다 양호하다. AI 제어기는 PI 및 FNN 제어기 보다 오버슈트가 작고 상승시간이 빠르며 정상상태에 빠르게 도달한다.

그림 5는 속도 지령을 1000[rpm]과 -1000[rpm]으로 정·역회전하였을 경우의 응답특성을 나타낸다. 정·역회전으로 운전할 경우에도 AI 제어기의 성능은 우수하게 나타난다.

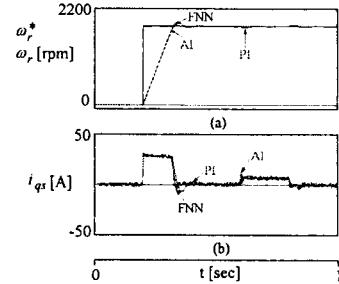


그림 3 PI, FNN 및 AI 제어기의 응답특성의 비교  
Fig. 3 The comparison of response characteristics with PI, FNN and AI controller

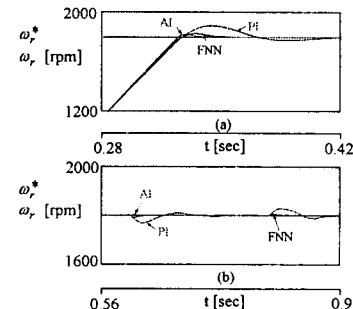


그림 4 초기상태와 부하인가에 대한 제어기의 응답특성의 비교  
Fig. 4 The comparison of response characteristics with starting state and load torque

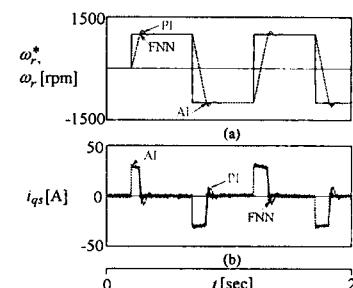


그림 5 정·역회전에 대한 응답특성의 비교  
Fig. 5 The comparison of response characteristics with forward and reverse revolution

그림 6은 4상한 운전을 하였을 경우의 응답특성을 나타낸다. 그림 6(a)는 지령속도와 실제속도, 그림 6(b)는 지령속도와 추정속도, 그림 6(c)는 9축 전류, 그림 6(d)는 지령속도와 추정속도의 오차를 나타낸다. 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하고 있으며 오차의 범위는 0.2[%]내에 존재하고 있다.

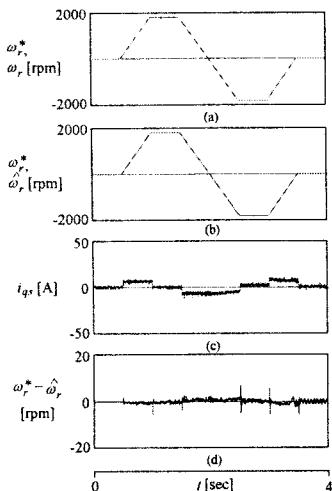


그림 6 4상한 운전에 대한 응답특성 ( $J = J_n$ )  
Fig. 6 Response characteristics with quadrant drive

그림 7은 그림 6과 같은 조건에서 관성을 2배로 했을 경우의 응답특성을 나타낸다. 그림 7(a)는 FNN 제어기의 지령속도와 추정속도, 그림 7(b)는 그림 7(a)의 속도 오차를 나타낸다. 그림 7(c)는 AI 제어기의 지령속도와 추정속도, 그림 7(d)는 그림 7(c)의 속도오차를 나타낸다. AI 제어기의 오차가 FNN제어기의 오차보다 매우 작게 나타나고 있다. 관성의 변화에서 4상한 운전을 하였을 경우에도 AI 제어기의 성능은 FNN 제어기 보다 양호한 성능을 확인하였다.

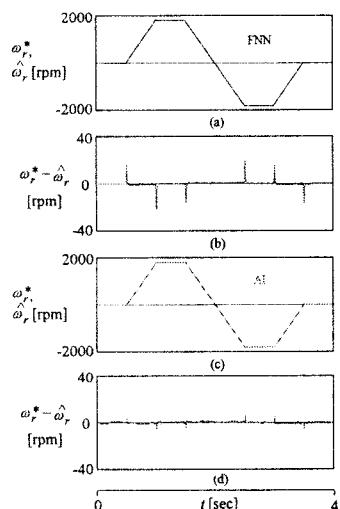


그림 7 관성 2배에 대한 4상한 운전의 응답특성 ( $J = 2J_n$ )  
Fig. 7 Response characteristics of quadrant drive with twice inertia

히, 속도, 부하토크, 관성 및 저항 등 파라미터 변동에도 양호한 응답특성을 얻을 수 있었으며 고성능 및 강인성 제어를 확인할 수 있었다. ANN을 이용하여 다양한 지령속도의 변화에 추정속도는 실제속도에 약호하게 추정하였다. 지령속도를 정·역회전 운전 및 4상한 운전시켰을 경우에도 추정속도는 실제속도에 약호하게 추정하였다. 그리고 부하토크를 인가할 경우에도 추정속도는 실제속도에 양호한 추정능을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 AI 제어기의 타당성을 입증할 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] J. C. Lee and D. H. Chung, "MRAC fuzzy control for high performance of induction motor drive," The Trans. of KIPE, vol. 7, no. 3, pp. 215-223, 2002.
- [2] H. G. Lee, J. C. Lee and D. H. Chung, "Design of fuzzy controller induction drive considering parameter change," The Trans. of KIEE, vol. 51P, no. 3, pp. 111-119, 2002.
- [3] H. G. Lee, J. C. Lee and D. H. Chung, "New fuzzy controller for high performance of induction motor drive," The journal of KIIS, vol. 17, no. 4, pp. 87-93, 2002.
- [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.
- [5] J. C. Lee, H. G. Lee and S. M. Nam, D. H. Chung, "Speed control of induction motor drive using adaptive FNN controller," International Conference ICEMS'04, Conference no. PI-5(430-M09-052), 2004. [CD no. 2]
- [6] P. L. Jansen, et al., "Observer-based direct field orientation analysis and comparison of alternative method," IEEE Trans. on IA, vol. 30, no. 4, pp. 945-953, 1994.
- [7] G. Yang and T. H. Chin, "Adaptive speed identification scheme for vector controlled speed sensorless inverter induction motor drive," IEEE Trans. on IA, vol. 29, no. 4, pp. 820-825, 1993.
- [8] G. Henneberger, et al., "Field oriented control of synchronous and asynchronous drives without mechanical sensors using a kalman filter," EPE, Firenze, pp. 3.644-671, 1991.
- [9] D. H. Chung, "Power electronics and motor control," Intervision Press, 2005.

### 6. 결 론

본 논문에서는 AI(Artificial Intelligent)에 의한 유도 전동기의 ANN 센서리스를 제시하여 고성능 속도제어 및 속도추정을 얻을 수 있었다. AI 제어기를 이용하여 유도전동기의 속도를 제어하였으며 ANN을 이용하여 속도를 추정하였다. 제시한 AI 제어기는 종래의 PI 및 FNN 제어기 보다 성능이 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 특