

# AFLC 제어기에 의한 유도전동기 드라이브의 고성능 제어

## High Performance Control of Induction Motor Drive with AFLC Controller

고재섭\*, 최정식\*, 이정호\*, 김종관\*\*, 박기태\*\*, 박병상\*\*, 정동화\*\*\*

Jae Sub Ko, Jung Sik Choi, Jung Ho Lee, Jong Kwan Kim, Ki Tae Park, Byung Sang Park, Dong-Hwa Chung

**Abstract** - The paper is proposed high performance control of induction motor drive with adaptive fuzzy logic controller(AFLC). Also, this paper is proposed speed control of induction motor using AFLC and estimation of speed using artificial neural network(ANN) controller. 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. The proposed control algorithm is applied to induction motor drive system controlled AFLC and ANN controller. And this paper is proposed the results to verify the effectiveness of the AFLC and ANN controller..

**Key Words** :Induction Motor Drive, AFLC, ANN, BPA, Speed Estimation

### 1. 서 론

최근, 간접 벡터제어는 유도전동기의 고성능을 위한 드라이브 시스템에 광범위하게 적용되고 있다. 일반적으로 고성능으로 제어되는 전동기 드라이브는 양호한 동적 속도추정, 우수한 부하 응답, 드라이브와 부하 파라미터의 변동에 대한 강인성을 필요로 한다. 이러한 조건을 충족시키기 위하여 동작조건 및 드라이브 파라미터의 적응성을 사용할 수 있다.

산업 프로세서의 적용에는 부하 외란, 파라미터 변화 및 어떤 모델의 불확실성 등에 대하여 고성능과 강인성을 발휘할 수 있는 기법이 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 파라미터 변동을 고려한 퍼지제어[1] 및 새로운 퍼지제어[2] 등의 연구가 되었다. 이러한 연구들은 간접벡터에 의해 전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 양호한 성능을 얻을 수 있었다. 그러나 이러한 기법들은 속도 및 부하 토크 등 파라미터의 변동에 대하여 더욱 우수한 결과를 얻을 수는 없었다.

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 문제점을 해결하기 위하여 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[3]-[4]

본 논문에서는 AFLC(Adaptive Fuzzy Logic Controller)에 의해 유도전동기 드라이브를 고성능 속도를 제어하고 ANN(Artificial Neural Network)에 의해 유도전동기의 속도를 추정한다. 먼저, DFCL(Direct Fuzzy Logic Controller) 제어기에서 나타나는 문제점을 해결하기 위하여 기준모델을 적용한 AFLC를 설계한다. 다음은 ANN을 이용하여 유도전동기 드라이브의 속도 추정기법을 제시한다. 2층 구조를 가진 신경

회로망에 BPA(Back Propagation Algorithm)를 적용하여 유도전동기 드라이브의 속도를 추정한다. 본 논문에서 제시한 AFLC과 ANN 제어기의 제어특성과 추정성능을 분석하고 그 결과를 제시한다.

### 2. 시스템 구성 및 모델링

본 논문에서는 공간벡터 PWM 인버터에 의해 구동되는 고성능 유도전동기의 벡터제어 시스템을 고려한다. 이러한 시스템 구성은 로봇, 항공기 및 전기자동차 등의 드라이브와 같은 고성능 제어 시스템에 응용된다.

그림 1은 공간벡터 PWM 인버터에 의하여 구동되는 일반적인 IPMSM 드라이브의 벡터제어 시스템을 나타낸다.

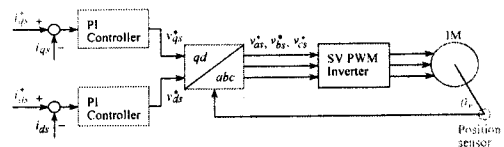


그림 1 유도전동기의 벡터제어 시스템

동작특성을 분석하기 위한 유도전동기의 미분 방정식은 다음과 같다.[13]

$$P \begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\phi}_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_r}{\sigma L_r} + \frac{1-\sigma R_r}{\sigma L_r}\right) \omega_r & \frac{L_m R_r}{\sigma L_r L_s} & \frac{L_m}{\sigma L_r} \omega_r \\ \omega_r & -\left(\frac{R_r}{\sigma L_r} + \frac{1-\sigma R_r}{\sigma L_r}\right) \omega_r & \frac{L_m R_r}{\sigma L_r L_s} \\ \frac{L_m R_r}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \phi_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 발생토크는 다음 식으로 표현된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (2)$$

저자 소개

- \* 順天大學 電氣工學科 碩士課程
- \*\* 順天大學 電氣工學科 博士課程
- \*\*\* 順天大學 電氣工學科 博士課程 正教授 · 工博

### 3. AFLC 제어기의 설계

AFLC에 의한 유도전동기의 ANN 센서리스 제어의 드 라이브 시스템은 그림 2와 같다.

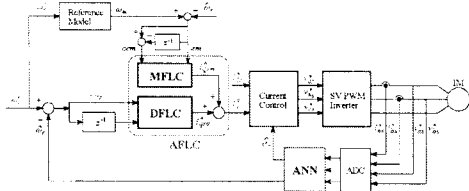


그림 2 AFLC에 의한 유도전동기의 ANN 센서리스 제어기

그림 3은 기준모델에 의한 MFLC(Model Fuzzy Logic Controller)를 나타낸다.

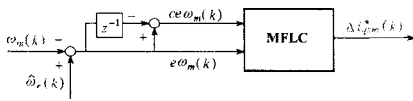


그림 3 기준모델에 의한 MFLC

그림 4는 MFLC의 기법을 나타내며 기준모델의 출력인  $\omega_m$ 와 추정속도  $\hat{\omega}_r$ 를 비교하여 오차분과 오차의 변화분을 입력으로 퍼지동작을 수행하며 출력은  $\Delta i_{qsm}^*$ 이다.

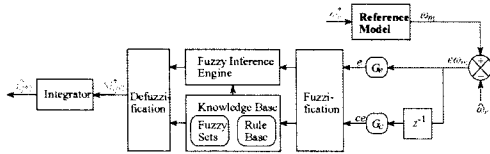


그림 4 MFLC 방식

그림 2에서 AFLC를 더욱 상세하게 나타내면 그림 5와 같다.

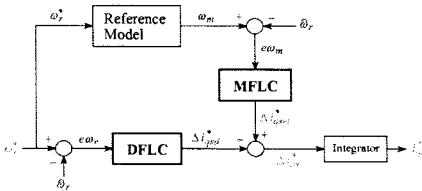


그림 5 AFLC의 구성

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

$$e\omega_m(k) = \omega_m(k) - \hat{\omega}_r(k) \quad (3)$$

$$ce\omega_m(k) = e\omega_m(k) - e\omega_m(k-1) \quad (4)$$

위의 두 입력은 MFLC의 룰 베이스에 의해 지령  $q$  축 전류에 보상되는  $\Delta i_{qsm}^*(k)$ 가 발생되고  $\Delta i_{qsd}^*(k)$ 에 추가된다. 그러므로 퍼지제어기의 지령  $q$  축 전류는 다음과 같다.

$$i_{qs}^*(k) = i_{qs}^*(k-1) + [\Delta i_{qsd}^*(k) + \Delta i_{qsm}^*(k)] \quad (5)$$

$e\omega_m, ce\omega_m$  및  $\Delta i_{qsm}^*(k)$ 의 전체집합은 각각 (-180, 180) [rad/s], (-6, 6) [rad/s] 및 (-1, 1) [A]로 설정한다.

### 4. ANN에 의한 속도 추정

ANN(Artificial Neural Network)은 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.

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

추정속도를 이용한 회전자 자극의 추정위치는 다음과 같다.

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

### 5. 실험 결과

그림 6은 무부하 상태에서 스텝 지령속도를 정격인 1720[rpm]으로 운전시켰을 경우의 DFLL의 응답특성 결과이다. 그림 6(a)는 지령속도와 추정속도, 그림 6(b)는  $q$  축 전류를 나타내고 그림 6(c)는 발생토크를 나타낸다. DFLL의 속도는 오버슈트가 크게 나타난다.

그림 7은 그림 6과 같은 조건에서 운전하였을 경우의 AFLC의 응답특성을 나타낸다. AFLC는 DFLL에 비해 오버슈트가 적고 안정화 시간이 빠르며 정상상태에 빠르게 도달한다.

그림 8은 부하토크를  $4[N \cdot m]$ 인가한 상태에서 정격속도로 운전하였을 경우의 DFLL의 응답특성을 나타내고 그림 9는 그림 8과 같은 조건에서 AFLC의 응답특성을 나타낸다. 부하를 인가한 경우에도 AFLC의 성능은 DFLL 보다 오버슈트가 적고 양호하게 나타난다.

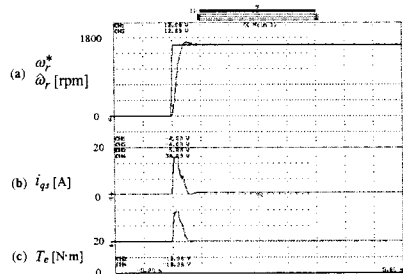


그림 6 스텝 지령속도에 대한 DFLL의 응답특성

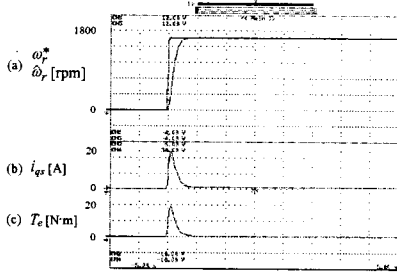


그림 7 스텝 지령속도에 대한 AFLC의 응답특성

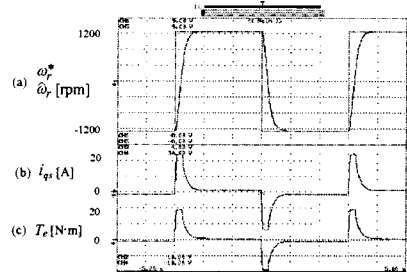


그림 11 스텝 지령속도의 변화에 대한 AFLC의 응답특성

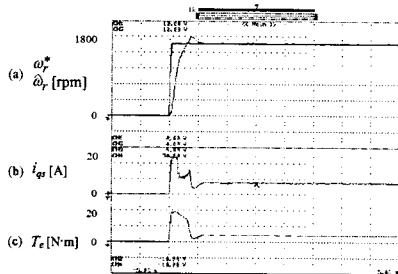


그림 8 부하 인가에 대한 DFLLC의 응답특성

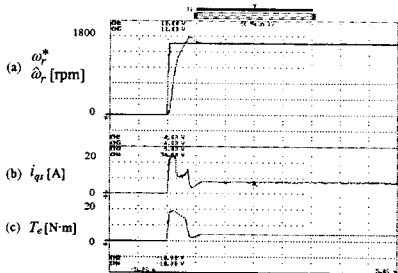


그림 9 부하 인가에 대한 AFLC의 응답특성

그림 10에서 스텝 지령속도를 -1200[rpm]과 1200[rpm]으로 정·역회전 시켰을 경우의 DFLLC의 응답특성이다. 그림 11은 그림 10과 같은 조건에서 운전하였을 경우의 AFLC의 응답특성이다. AFLC는 DFLLC 보다 오버슈트도 적게 나타나며 안전화 시간도 빠르다.

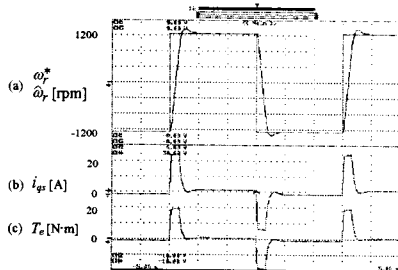


그림 10 스텝 지령속도의 변화에 대한 DFLLC의 응답특성

## 7. 결론

본 논문에서는 AFLC에 의한 유도전동기의 ANN 센서리스를 제시하여 고성능 속도제어 및 속도추정을 얻을 수 있었다. AFLC 제어기를 이용하여 유도전동기의 속도를 제어하였으며 ANN을 이용하여 속도를 추정하였다. 제시한 AFLC 제어기는 종래의 DFLLC 제어기 보다 성능이 우수한 결과를 얻을 수 있었다. 특히, 속도, 부하토크, 관성 및 저항 등 파라미터 변동에도 양호한 응답특성을 얻을 수 있었으며 고성능 및 강인성 제어를 확인할 수 있었다. ANN을 이용하여 다양한 지령속도의 변화에도 추정속도는 추정속도에 양호하게 추정하였다. 지령속도를 정·역회전 운전 및 4상한 운전시켰을 경우에도 추정속도는 지령속도에 양호하게 추정하였다. 그리고 부하토크를 인가할 경우에도 추정속도는 지령속도에 양호한 추정성능을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시한 AFLC 제어기의 타당성을 입증할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.