

3상 유도전동기의 실시간 제어를 위한 DSP의 뉴로-퍼지 제어기 설계

임 태우* 강 학수** 안 태천* 윤 양웅*
*원광대학교 제어계측공학과 지능정보시스템 연구실 **전주 공업대학 전기공학과

Neuro-Fuzzy Controller Design of DSP for Real-time control of 3-Phase induction motors

Taewoo Lim* Hacksu Kang** Taechon Ahn* Yangwoong Yoon*

*Dept. of Control & Instrumentation Wonkwang Univ. **Dept. of Electronic Jeonju Technical Collage

Abstract - In this paper, a drive system of induction motor with high performance is realized on the viewpoint of the design and experiment, using the DSP (TMS320F240). The speed controller for induction motor drive system is designed on the basis of a neuro-fuzzy network. The neuro-fuzzy controller acts as a feed-forward controller that provides the right control input for the plant and accomplishes error back-propagation algorithm through the network. The proposed network is used to achieve the high speedy calculation of the space vector PWM (Pulse Width Modulation) and to build the neuro-fuzzy control algorithm, for the real-time control. The proposed neuro-fuzzy algorithm on the basis of DSP shows that experimental results have good performance for the precise speed control of an induction motor drive system. It is confirmed that the proposed controller could provide more improved control performance than conventional v/f or vector controllers through the experiment.

1. 서 론

전동기의 가변속 구동은 많은 산업 분야에서 그 필요성이 증대되고 있다. 이러한 요구를 위해 과거에는 제어가 쉬운 직류전동기가 널리 사용되어왔다. 교류전동기는 기계적으로 견고하고 직류전동기에 비하여 유지·보수가 간편한 반면에 종래에는 제어의 어려움과 주파수 변환장치의 가격으로 인하여 가변속 구동에 널리 사용되지 못하였다. [1] 유도전동기는 지금까지 주로 PID 제어기에 의해 제어되어 왔다. PID 제어기는 공정 분야에서 많이 사용되는 알고리즘으로 근래에 우수한고 정교한 제어이론들이 개발되었음에도 불구하고 PID 제어가 가장 많이 사용되고 있는 이유는 제어기의 구조가 간단하며 제어대상이 지연시간이 크거나 비선형 특성을 갖지 않는다면 만족스러운 제어목적을 달성할 수 있기 때문이다. 그러나 최근 전력용 반도체 소자의 발달과 고성능 마이크로프로세서의 보급에 따른 전력전자 기술의 발전에 의해 저 가격의 신뢰성 있는 전력변환장치의 개발로 인해 교류전동기의 구동성능이 향상됨에 따라 점차 교류전동기를 사용한 가변속 구동 시스템의 사용이 확대되고 있다. [2][3] 여러 가지 교류전동기를 사용한 가변속 구동 시스템 중에서도 특히 능형 유도전동기는 구조가 간단하고 견고한 장점이 있으며, 특히 벡터제어에 의한 유도전동기 구동시스템은 직류전동기 이상의 성능을 실현할 수 있기 때문에 고성능 구동시스템을 요하는 산업분야에서 그 적용범위가 확대되고 있다. [4] 최근에는 고성능의 디지털 제어 방식을 채용한 드라이버를 이용하여 전동기를 제어하는 것이 일반화되었으며 특히, 1 사이클에 곱셈이

가능하다는 우수한 계산상의 장점을 지닌 DSP를 채용한 전동기 드라이브 시스템은 전에는 구현이 불가능했던 계산량이 많은 고성능의 제어 알고리즘들을 구현할 수 있어 큰 관심의 대상이 되고 있다. [4][5]

본 논문에서는 유도전동기를 효율적으로 제어하기 위해서 동특성이 우수하도록 고정자 전류를 토크성분 전류와 자속성분 전류로 나누어 독립적으로 제어하는 벡터제어 기법을 도입하며 [5][6], 속도와 최적으로 제어하기 위해서 지능형 알고리즘인 뉴로-퍼지 알고리즘에 이용한 제어기를 설계하여 속도를 제어하고, 동기회전 좌표계의 PI 제어기를 설계하여 전류를 제어한다. 제안한 방법을 검증하기 위하여 고속의 신호처리 소자인 DSP를 이용한 디지털 제어기와 IGBT 인버터를 이용하여 실험을 행하였다. 실험결과 제안된 지능형 알고리즘에 의해 설계된 제어기의 성능이 v/f 제어나, 일반적인 벡터제어 방법보다 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

2. 본 론

2.1 구동시스템의 구성

DSP에 의해 설계된 제어시스템에 지능형 알고리즘을 적용하여 유도전동기를 실시간으로 제어하였으며, 지능형 알고리즘을 적용한 제어시스템 구성도는 Fig 1과 같다.

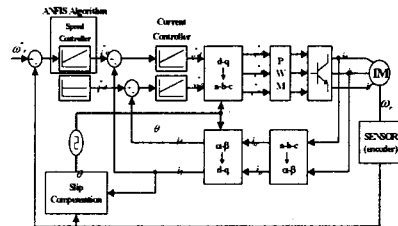


그림 1. 제어 시스템 구성도

2.2 뉴로-퍼지 네트워크의 구성

본 연구에서는 플랜트로부터 입력변수를 받기 위한 입력 층, 입력변수의 각 퍼지집합에 대한 소속함수를 계산하는 첫 번째 은닉층인 계층 1, 퍼지규칙의 전건부 If 부분의 조건을 계산하는 두 번째 은닉층인 계층 2, 상태 평가형 제어규칙의 추론연산을 수행하는 은닉층들인 계층 3, 4와 출력값을 계산하는 출력 층으로 구성되는 뉴로-퍼지 네트워크의 구조를 결정하였다. 따라서 뉴로-퍼지 네트워크는 입력층, 4개의 은닉 층 및 출력층의 6층 구조를 가지게 된다. 2개의 입력 변수(속도오차, 오차의 변화율)와 1개의 출력변수(토크성분 전류)를 가지므로 입력 층과 출력 층은 각각 2개와 1개의 뉴런으로 구성된다. 퍼지 제어기에서 전건부 언어변수를 5~7정도로 선정하는 것이 일반적이나, 본 연구의 각 계층의 뉴런

수는 Table 1과 같다.

Table 1. The number of neurons in each layer

| | | 입력층 | 계층 1 | 계층 2 | 계층 3 | 계층 4 | 출력층 |
|------|---------------|-----|------|------|------|------|-----|
| 뉴런 수 | 전건부 언어변수 (3개) | 2 | 6 | 9 | 9 | 9 | 1 |
| | 전건부 언어변수 (5개) | 2 | 10 | 25 | 25 | 25 | 1 |

또한, 각 계층의 활성화 함수는 제어규칙의 추론연산을 수행하도록 설정하였다. 이러한 neuro-fuzzy 네트워크의 구조는 퍼드포워드 신경회로망의 구조와 동일하게 되며, 각 계층의 활성화 함수를 미분 가능한 것으로 하면 오차역전파 알고리즘을 이용하여 최적의 제어기가 구현되도록 전건부와 후건부의 각 파라미터들을 조정할 수 있게 된다. 제어규칙은

$$IF \ x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } x_2 \text{ is } A_2 \text{ THEN } f = Px_1 + Qx_2 + R \quad (1)$$

형태로 구성되어 있다. 식 (1)의 전건부 퍼지집합 A_1 과 A_2 의 소속함수 $\mu_{A_1}(x_1)$ 과 $\mu_{A_2}(x_2)$ 는 범종형으로 계산되며, 최적의 소속함수는 범종형 소속함수의 파라미터들을 조정함으로써 결정할 수 있다. Fig 2은 뉴로-퍼지 네트워크의 구조로서 Table 1과 같은 구조를 가지며, 각 계층의 기능은 다음과 같다. [7]

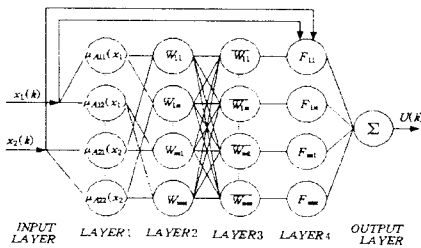


Fig 2. Architecture of a neuro-fuzzy networks

입력 층은 입력 x_1 과 x_2 의 전달기능을 한다.

계층 1은 입력 x_1 과 x_2 에 대하여 전건부 퍼지집합 A_{1j} 와 A_{2j} 의 소속함수 $\mu_{A_{1j}}(x_1)$ 과 $\mu_{A_{2j}}(x_2)$ 를 계산하기 위하여, 각각 뉴런들은 식 (1)와 같은 활성화함수를 가진다.

$$\mu_{A_{1j}}(x_1) = \exp\left(-\frac{(x_1 - b_{1j})^2}{2a_{1j}}\right) \quad (1-2)$$

$$\mu_{A_{2j}}(x_2) = \exp\left(-\frac{(x_2 - b_{2j})^2}{2a_{2j}}\right)$$

2.3 뉴로-퍼지 제어기의 학습

학습은 뉴로-퍼지 제어기 내의 전건부와 후건부의 각 파라미터 초기화로부터 시작되며, 뉴로-퍼지 제어기에 출력에 의한 유도전동기의 출력과 지도 레터적간의 오차를 이용하여, 각 파라미터들은 시제역전파 알고리즘에 의하여 오차가 감소하는 방향으로 조정된다. 이러한 과정은 전체 지도레터에 대하여 반복 실시하게 되며, 학습이 완료된 후 시스템의 최대오차와 허용오차 범위 이하로 감소하거나 증가 또는 발전하면 각 파라미터의 학습률과 지도레터를 변화시켜서 다음 단계 학습을 실시한다. 각 단계 학습의 결과레터적과 조정된 파라미터들은 다음 단계

학습의 지도레터적과 초기 파라미터로 사용하며, 학습은 정상상태 오차가 정해진 규격 이내로 될 때까지 실시한다.

2.4 뉴로-퍼지 제어기의 DSP 적용

설계된 뉴로-퍼지 제어기를 DSP에 적용하기 위하여, 전건부와 후건부의 파라미터를 학습에 따른 온라인 튜닝에 의하여 설정한 후 결과를 Look-up 테이블로 만들어 3상 유도전동기의 실시간 제어에 사용하였다.

학습은 여러 단계로 진행되며, 각 단계 학습은 별도의 학습률과 지도레터를 사용한다. 1단계의 학습은 초기레터를 사용하고, 2단계 이후의 학습은 직전의 학습결과를 이용하여 실시하였다. 또한 1단계 학습은 전체 구간에 대하여 실시하여 오차가 큰 부분의 파라미터 값들을 조정하여 응답시간을 단축하도록 하며, 2단계 이후의 학습은 지도레터적의 '0.0' 이후의 구간에 대하여 실시하여 정상상태 오차를 감소시키도록 파라미터의 값을 조정하였다. 전건부 파라미터 a_{1j} 와 a_{2j} 의 초기값은 {20.0}으로 하였으며, b_{1j} 와 b_{2j} 는 정상적인 운전조건을 포함하도록 [-20.0, +20.0] 구간과 [-30.0, +30.0] 구간을 각각 x_1 과 x_2 의 퍼지집합의 수인 3등분과 5등분한 값으로 하였다. 후건부 파라미터 P_{ij} , Q_{ij} , R_{ij} 의 초기 값은 [-1.0, +1.0] 구간의 난수 값으로 하였다.

학습은 전체 10 단계를 진행하여 전체 학습 횟수는 1000회였으며, 전건부 언어변수가 5개일 때의 학습에 따른 각각의 전건부 및 후건부 파라미터의 값들은 Table 2.(a)와 같이 그리고 전건부 언어변수가 3개일 때의 학습에 따른 각각의 전건부 및 후건부 파라미터의 값들은 Table 2.(b)과 같이 구해진다.

Table 2. parameter of five linguistic variables
(a) premise parameters

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|----------|----------|--------|---------|---------|
| a_{1j} | 16.7235 | 12.6257 | 2.1968 | 15.2492 | 18.6792 |
| b_{1j} | -16.2483 | -2.5791 | 2.3649 | 5.3672 | 17.5460 |
| a_{2j} | 18.2495 | 12.0349 | 7.6492 | 18.2490 | 15.5609 |
| b_{2j} | -15.6708 | -12.3024 | 3.5734 | 14.1548 | 19.6052 |

(b) consequent parameters

| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
|----------|-----|---------|---------|----------|----------|----------|
| P_{ij} | j=1 | 1.5828 | -0.8566 | -1.3398 | -1.1196 | -0.9627 |
| | j=2 | 0.1244 | -1.4597 | -2.1687 | -3.2591 | -3.7244 |
| | j=3 | -1.3536 | -6.7529 | -14.2751 | -10.2493 | -3.2662 |
| | j=4 | -1.1088 | -4.6592 | -13.5483 | -17.4596 | -12.5483 |
| | j=5 | -2.2441 | -0.5226 | -3.9480 | -5.6126 | -3.8048 |
| Q_{ij} | j=1 | 0.6576 | -1.2444 | -3.9566 | -1.4676 | -0.1446 |
| | j=2 | -1.5082 | -3.2458 | -8.6541 | -4.6703 | 0.5762 |
| | j=3 | 0.1083 | 0.5738 | -7.2491 | -6.9547 | -3.7432 |
| | j=4 | -0.7728 | 0.1728 | -8.1583 | -7.2761 | -6.6056 |
| | j=5 | 1.4976 | -0.1408 | -4.2249 | -2.3988 | -0.6749 |
| R_{ij} | j=1 | 1.7988 | -1.0379 | 0.4532 | -1.3382 | 0.4062 |
| | j=2 | 0.8219 | 1.6348 | 1.7024 | -1.6427 | -0.7984 |
| | j=3 | 1.1109 | 1.6961 | 3.5128 | -2.3764 | 1.3512 |
| | j=4 | 0.6476 | 1.9254 | 5.6397 | 1.5924 | 1.9152 |
| | j=5 | 0.0524 | -0.8069 | -1.2176 | -0.1159 | 1.4134 |

뉴로-퍼지 제어기에 의해 3상 유도전동기를 실시간으로 제어하는 데에 있어 뉴로-퍼지 알고리즘의 수행시간에 따른 제어성능을 향상시키기 위해서, 위와 같이 Table 2. (a)와 (b)에 설정된 각각의 전건부 및 후건부 파라미터를 Look-up 테이블로 만들어 사용하였다.

3. 실험 결과

본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능을 고찰하기 위하여 DSP를 이용한 전동기 구동 시스템에 의해 유도전동기를 구동하였으며, 실험에 사용된 유도전동기의 정격을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Motor parameter

| | | | |
|-------------------|------------|---------------------|--|
| 정격 출력 | 37 [Kw] | P | 4 |
| 정격 속도 | 2800 [RPM] | 관성능률 J | 3.5×10^{-4} [Kgm ²] |
| R _s | 8.9 [Ω] | 기동전류 | 14.5 [A] |
| R _r | 26.4 [Ω] | 마찰계수 B _m | 1.464 [kgm ²] |
| 정격 전부하 전류 | 4 [A] | T _e | 0.23 [kgm] |
| 정격 I _d | 1.7 [A] | 기동 토크 | 210 [%] |
| 정격 전압 | 230 [V] | 최대 토크 | 270 [%] |
| L _m | 1.26 [H] | 선형 부하 | 1 [kg] |

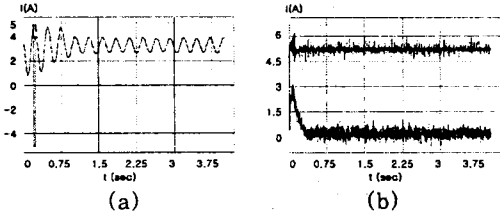


Fig 3. Current by control method(no load)
(a) v/f control (b) vector control

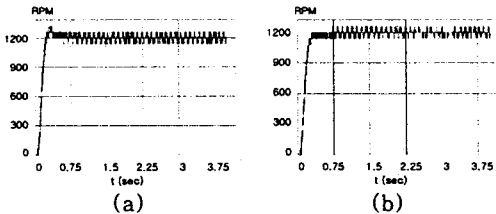


Fig 4. Motor speed by control method(no load)
(a) neuro-fuzzy control(3 variables) (b) neuro-fuzzy control(5 variables)

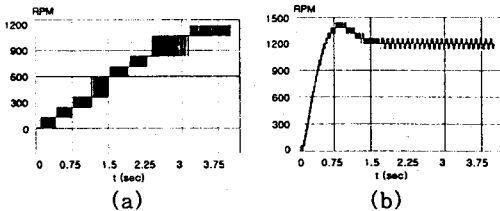


Fig 5. Motor speed by control method(load)
(a) v/f control (b) vector control

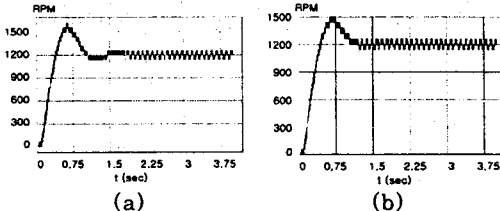


Fig 6. Motor speed by control method(load)
(a) neuro-fuzzy control(3 variables) (b) neuro-fuzzy control(5 variables)

제안된 알고리즘의 성능을 알아보기 본 논문에서 제안된 뉴로-퍼지 알고리즘과 일반적으로 유도전동기의 구동에 사용되고있는 v/f 제어와 벡터제어 방법을 사용하여 유도전동기를 구동하고 토크성분 전류와 속도 특성에 의해 성능을 비교하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 3상 유도전동기의 속도를 실시간으로 제어하기 위하여 DSP(TMS320F240)와 지능형 알고리즘인 neuro-fuzzy에 의해 3개와 5개의 전건부 언어변수를 가지는 neuro-fuzzy 제어를 설계하였으며, 실험을 통해 일반적으로 사용되는 제어기들과 비교하였다. 또한 부하가 있을 때와 없을 때의 성능을 비교하기 위하여 1Kg의 선형부하를 사용하여 유도전동기의 성능을 비교하였다. 이상의 내용을 바탕으로 하여 전체적인 성능을 비교한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1) 부하가 없을 경우 전건부 언어변수가 3개인 뉴로-퍼지 제어기가 우수한 성능을 나타냈으나, 부하가 있을 경우에는 전건부 언어변수가 5개인 뉴로-퍼지 제어기가 전건부 언어변수가 3개인 뉴로-퍼지 제어기에 비해 오버슈트가 작고 전체적인 성능에서 우수함을 알 수 있다.

2) 뉴로-퍼지 제어기의 전건부 및 후건부의 파라미터를 Look-up 테이블로 만들어 사용함으로써, 뉴로-퍼지 제어기의 사용에 의해 3상 유도전동기를 실시간으로 제어할 수 있으며, 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.

3) 컴퓨터와 DSP 보드와의 인터페이스에 의해 컴퓨터에서 DSP 보드로의 다운과 DSP 보드에서 컴퓨터로의 결과의 디스플레이가 용이하도록 시스템이 구성되어, 알고리즘의 수정 및 보완이 용이하다. 제안된 neuro-fuzzy 제어기는 빠른 응답 특성과 정밀도를 요하는 분야에서 서보 제어용으로 효과적으로 적용될 수 있을 것이며, 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 전기자동차 등에 동력용으로 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] S. B. Dewan and A. Straughen, "Power semiconductor circuits", Toronto, Canada Mar, 1975
- [2] 박민호, 원충연, "서보 운전을 위한 전력변환기 및 제어이론", 전기학회지, 제36권 9호, pp. 17~31, 1987.
- [3] F. Blaschke, "The principle of field orientation as applied to the new transvector closed loop control system for rotating field machines", Siemens Review, Vol. 34, pp. 217~221, 1972.
- [4] S. Beierke, "Enhanced fuzzy controlled AC motor using DSP", Embedded Systems Conference, pp. 545~553, 1995.
- [5] B. K. Bose, "Power electronics and AC drivers", Prentice-Hall, 1986.
- [6] P. C. Krause, "Analysis of electric machinery", McGraw-Hill Book, 1987
- [7] M. Ouhrouche, "Vector control of an induction motor with on-line rotor resistance identification", Proc. of the 1999 IEEE Canadian Conf. on Elec. and Computer Eng., Vol. 2, pp. 1121~1125, 1999.
- [8] R. Bonnert, R. S. Wu, "Improved three phase pulse width modulation for over modulation", in Conf. Rec. Ieee-IAS Annual Meeting, Chicago, IL., 1984.