

적응 FNN 제어를 이용한 IPMSM 드라이브의 속도제어

남수명 · 이정철 · 이흥균 · 이영실 · 정동화 · 김종관*

순천대학교 전기제어공학과 · *전기안전공사

1. 서론

IPMSM 드라이브의 적용분야에서는 일반적으로 PI 제어를 많이 사용하고 있다. 그러나 PI 제어기는 고성능 제어에서 많은 문제점이 나타나고 있다. 특히 외란, 속도 및 부하 등의 파라미터가 변동할 경우 고성능 및 강인성 제어를 실현하기 어렵다. 드라이브의 양호한 성능을 얻기 위하여 적응제어가 연구되었다. 적응제어는 부하토크 또는 관성과 같은 동작의 다양한 변동에도 양호한 속도응답을 얻을 수 있으며 종래의 PI 제어기 보다 매우 양호한 성능을 얻을 수 있다. 이러한 적응제어는 STC, MRAC, SMC 및 EKF 등의 다양한 기법들이 제시되었다.[1] 그러나 적응제어 기법은 수학적 모델링에 기초를 두고 있으며 다량의 알고리즘 때문에 매우 복잡하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 퍼지제어기가 개발되었으나 다양한 부하변동과 관성변화에 대하여 강인성의 응답특성을 기대하기가 어려우며 만족할만한 성능을 얻을 수 없다.[2]

신경회로망은 드라이브의 파라미터 추정과 제어에 매우 유력한 기법으로 평가를 받았다.[3] 신경회로망은 일반적인 벡터제어 방법과 비교하여 적응제어의 능력이 우수하였다. 그러나 퍼지제어에서 나타나는 특성인 고성능 및 강인성 제어에서는 취약한 문제점이 나타난다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 감안하여 IPMSM 드라이브의 속도 제어를 위하여 퍼지제어와 신경회로망을 혼합 구성한 적응 FNN 제어를 제시하고 IPMSM의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하고 본 제어기의 타당성을 입증한다.

2. FNN 제어기의 설계

FNN 제어기는 퍼지제어와 신경회로망을 혼합 구성하며 강력한 표현의 유연성과 수치 처리능력을 가지고 있다. 이 제어기는 퍼지룰의 전반부와 후반부를 클러스터링 방법과 다층 신경회로망으로 구성한다.

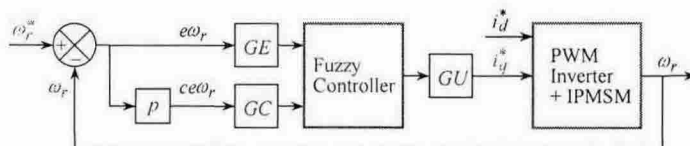


그림 1 직접 퍼지제어기에 의한 드라이브 시스템

그리고 퍼지제어와 같은 강인성 제어와 신경회로망과 같은 고도의 적응능력이 유력

한 장점이다. IPMSM 드라이브의 제어를 위한 직접 퍼지제어기의 구조는 그림 1와 같다. 일반적으로 퍼지제어기의 동적인 동작은 전문지식에 기초한 언어 제어룰의 집합에 의해 특성화된다. 언어 제어룰을 다음과 같이 가정한다.

$$\text{If } E \text{ is } A_{11} \text{ and } CE \text{ is } A_{12} \text{ then } U \text{ is } B_i \quad (1)$$

여기서 E, CE 및 U 는 각각 오차, 오차의 변화 및 제어변수를 나타낸다. A_m 은 퍼지 멤버십 함수 $\mu_A(x_i)$ 에 의해 특성화된 퍼지변수를 나타내고 B_i 는 실수로 된 상수이다.

IPMSM 드라이브의 고성능 및 강인성 제어를 위하여 동적 특성에서 다양한 속도 추종능력, 부하 변화에 적응하여 조절할 수 있는 양호한 응답특성이 요구된다. 따라서 일반적인 퍼지제어기에서는 이러한 요구에 만족할 수 없기 때문에 본 연구에서는 퍼지제어기와 신경회로망을 상호 혼합하여 FNN 제어기를 구성한다. 그림 2는 IPMSM 드라이브의 제어를 위하여 FNN 제어기의 구조를 나타낸다. 그림 3는 FNN 제어기의 구성을 나타내며 여기서 두 개의 입력변수는 오차 e 와 오차의 변화분 ce 이고 출력변수는 제어변수 u 이다.

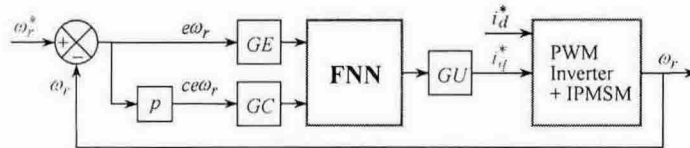


그림 2 FNN 제어기에 의한 드라이브 시스템

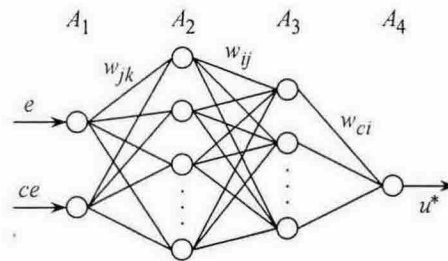


그림 3 FNN 제어기의 구성

3. FNN 제어기의 구현

3.1 전반부 구현

그림 3에 나타난 4층부터 4층 사이의 신경회로망은 퍼지룰을 위한 전반부의 구현을 나타낸다. 전반부의 멤버십 함수를 효과적으로 설계하기 위하여 신경회로망의 구조를 간단하게 하고 수렴속도를 개선하기 위하여 클러스터링 방법을 적용한다.

퍼지 룰베이스에서 입력공간은 49개의 부분 공간으로 나눈다. 룰이 동일한 동작일 경우 같은 입력공간으로 클러스터링한다. 그런 다음 새로운 클러스터링과 일치하는 룰은 전문가에 의해 재 설계되고 신경회로망으로 구현한다. 퍼지룰의 수는 클러스터링 방법

에 의해 매우 감소시킬 수 있다. 또한 이러한 구현은 비선형 함수를 설계할 수 있으며 신경세포의 시그모이드 특성에 의해 퍼지의 입력공간을 분할한다. A_3 층에서 각 신경세포의 출력은 각 부분 공간에서 퍼지물의 진리값이다. 퍼지 클러스터링과 학습을 실현하기 위하여 이전 49롤과 같은 효과를 얻는 FNN 제어기는 오차의 함수가 필요하다. FNN 제어기가 입력 데이터를 위한 요구분할의 성취도에 따라서 결정되는 오차함수는 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^r (T_i - O_i)^2 \quad (2)$$

$$T_i = \begin{cases} 1, & (x_1, x_2) \in R^r \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기서 r 는 클러스터의 수를 나타내며 T_i 는 어떤 입력 데이터가 요구되는 클러스터에 포함되는지 여부를 결정하는 함수이다. 그리고 O_i 는 A_3 층에서 신경세포의 출력이다. 오차함수를 정의한 후, 오차를 최소화하기 위하여 다음 단계는 오차 역전파 알고리즘에 의해 A_4 층과 A_3 층 사이에 가중치 W_{jk} 와 W_{ij} 를 조절한다. 가중치 조절을 통하여 신경회로망은 클러스터 된 퍼지물의 전반부를 완전하게 구현할 수 있다.

$$\Delta W_{jk} = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{jk}} = -\eta \delta_j X_k \quad (4)$$

$$\Delta W_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} = -\eta \delta_i O_j \quad (5)$$

$$\delta_i = (T_i - O_i) f'(U_i) \quad (6)$$

$$\delta_j = f'(U_j) \sum \delta_i W_{ij} \quad (7)$$

O_i 는 A_2 층에서 신경세포의 출력이며 η 는 학습률, $f(\cdot)$ 는 시그모이드 함수의 미분이며 U_i 와 U_j 는 각각 A_2 층과 A_3 층에서 각 신경세포에 대한 전체 입력을 나타낸다.

마지막으로 학습과정 동안 진동을 피하고 수렴속도를 개선하기 위하여 다음과 같은 모멘텀(momentum) 항으로 새로운 조절을 가정한다.

$$W_{jk}(t+1) = W_{jk}(t) + \Delta W_{jk} + \alpha [W_{jk}(t) - W_{jk}(t-1)] \quad (8)$$

$$W_{ij}(t+1) = W_{ij}(t) + \Delta W_{ij} + \alpha [W_{ij}(t) - W_{ij}(t-1)] \quad (9)$$

3.2 후반부의 구현

그림 3에서 A_3 층과 A_4 층 사이의 신경회로망은 퍼지물의 후반부의 구현을 나타낸다. 학습 동안 가중치 W_{α} 는 다음 오차 함수를 최소화하기 위하여 조절한다.

$$E^* = \frac{1}{2} \sum (U^* - U)^2 \quad (10)$$

여기서 U^* 와 U 는 FNN 제어기의 요구치와 실제치를 나타낸다.

일반적인 델타룰을 사용하여 가중치 W_{ci} 의 변화 ΔW_{ci} 는 오차함수인 식(10)을 최소화할 수 있고 퍼지룰의 후반부를 재 정의하여 다음 식을 결정한다.

$$\Delta W_{ci} = -\eta \frac{\partial E^*}{\partial W_{ci}} = -\eta \delta_c O_i \quad (11)$$

$$W_{ci}(t+1) = W_{ci}(t) + \Delta W_{ci} + \alpha [W_{ci}(t) - W_{ci}(t-1)] \quad (12)$$

여기서 δ_c 는 FNN 제어기의 출력에서 오차신호이다.

4. 적응 FNN 제어기의 설계

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

그림 5는 FNN 제어기를 설계하고, 적응 퍼지제어기인 AFC(Adaptive Fuzzy Controller)[6]를 병렬로 연결한다. FNN에서 나타나는 오차를 보상하기 위하여 AFC를 사용하며 AFC는 기준 모델을 고려한 적응 메카니즘을 나타낸다.

FNN 알고리즘에 의한 출력은 $\Delta i_{q1}^*(k)$ 이며 AFC에 의한 출력은 $\Delta i_{q2}^*(k)$ 이다. 이 두 출력을 합하여 적분기를 통해 지령 q 축 전류를 얻는다.

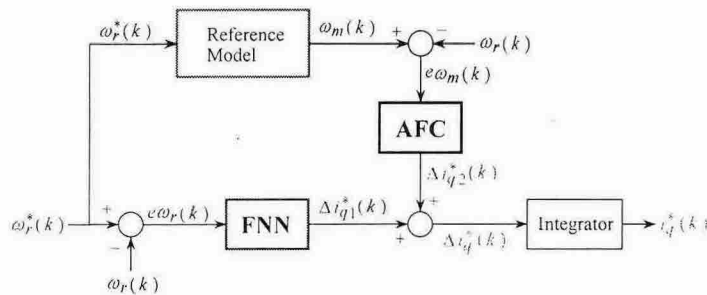


그림 4 제시한 적응 FNN 제어기의 알고리즘

적응 FNN 제어기에 의해 제어되는 IPMSM의 드라이브 시스템은 그림 5과 같고 인버터는 공간벡터 PWM 방식을 사용한다.

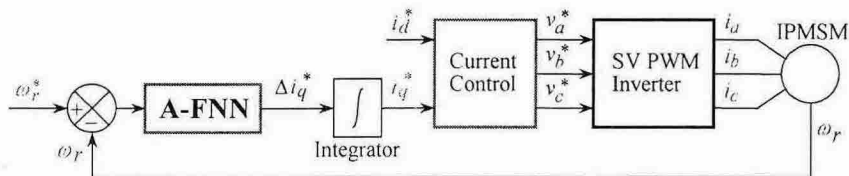


그림 5 IPMSM의 드라이브 시스템의 구성도

5. 시스템의 성능결과

그림 6는 PI, FNN 및 적응 FNN(A-FNN) 제어기의 속도와 q 축 전류를 비교한 결과이다. 0.2[sec]에서 스텝 지령속도를 1800[rpm]으로 운전하다가 0.6[sec]에서 지령속도를 1000[rpm]을 변화하였을 경우의 응답특성이다. 그림 6(a)는 종래의 PI, FNN 제어기 및 적응 FNN 제어기의 속도를 나타내고, 그림 6(b)는 q 축 전류를 나타낸다.

그림 7은 샘플링 주기를 $T_s = 2[\text{msec}]$ 로 하고 1000[rpm]으로 운전 중, 0.7[sec]에서 1.0[sec]까지 지령속도를 1800[rpm]으로 변화시켰을 때 FNN 및 A-FNN 제어기의 응답특성을 비교하여 나타낸다. 속도 변화에도 적응 FNN 제어기의 응답 특성이 양호하게 나타난다.

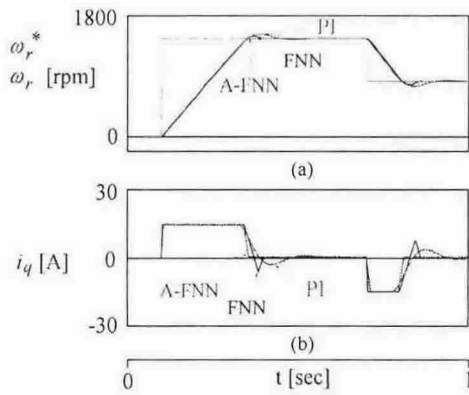


그림 6 PI, FNN 및 적응 FNN 제어기의 응답특성의 비교

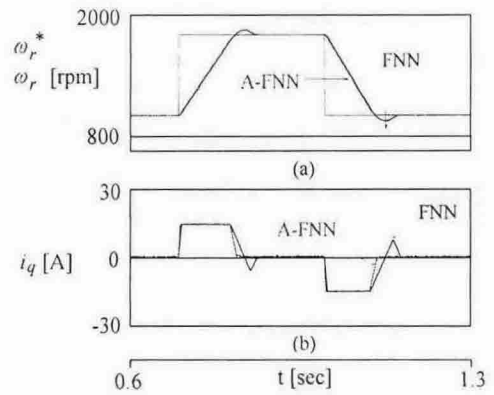


그림 7 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답비교 $T_s = 2[\text{msec}]$

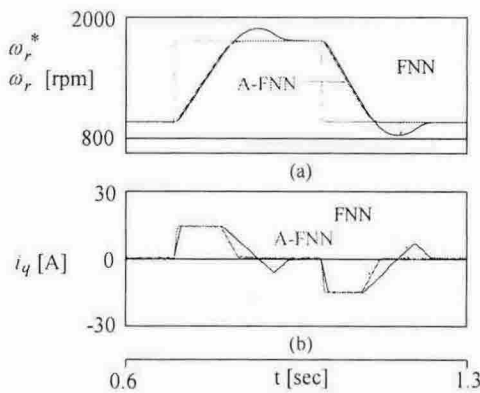


그림 8 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답비교 $T_s = 5[\text{msec}]$

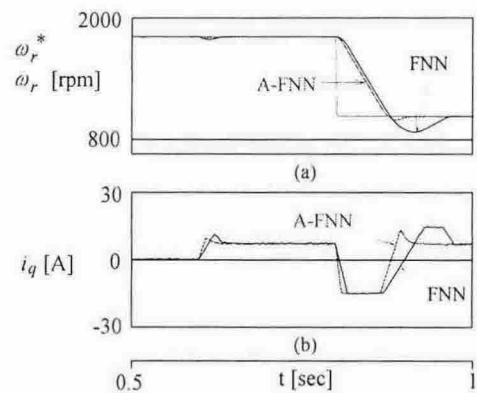


그림 9 부하토크와 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답비교

그림 8은 그림 7과 같은 조건에서 샘플링 주기를 $T_s = 0.5[\text{msec}]$ 로 변화 시켰을 때 FNN 및 적응 FNN 제어기의 속도와 q 축 전류를 비교한 결과이다. 샘플링 주기를 길게 하였을 경우 오버슈트가 커지고 정상상태에 늦게 도달한다. 샘플링 주기를 크게 할 경우에는 적응 FNN 제어기의 응답특성이 더욱 양호하게 나타나는 결과를 확인할 수 있다.

그림 9는 1800[rpm]으로 운전 중, 0.6[sec]에서 부하토크를 $3[\text{N}\cdot\text{m}]$ 인가한 상태에서 0.8[sec]에서 스텝 지령속도를 1000[rpm]으로 변화하였을 때의 응답특성을 비교한다. 부하토크를 인가하였을 경우에도 적응 FNN 제어기의 출력이 속도 변화가 적고 정상상태에 빠르게 도달하며 부하를 인가한 상태에서 속도를 변화시켰을 경우 응답특성이 매우 향상되고 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 적응 FNN 제어기가 속도의 변화, 부하 변화의 운전조건에서 FNN 제어기보다 응답특성이 매우 향상된다.

6. 결 론

본 연구에서는 IPMSM 드라이브의 속도제어를 위하여 적응 FNN 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.

적응 FNN 제어기를 IPMSM의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하였다. 샘플링 시간, 속도, 부하토크에도 적응 FNN 제어기는 FNN 제어기 보다 상승시간은 빠르고 오버슈트는 작게 나타나며 고성능으로 적응 추정할 수 있었다.

본 연구에서는 제시한 적응 FNN 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] F. Mrad, Z. Gao and N. Dhayagyagude, "Fuzzy logic control of automated screw fastening," *IEEE IAS Ann. Meet.*, pp. 1673-1680, 1985.
- [3] Q. Guo, R. Luo and L. Wang, "Neural network adaptive observer based position and velocity sensorless control of PMSM," AMC '96-MIE. Proceedings., 1996 4th International Workshop, vol. 1, pp. 41-46, 1996.