

FNN 기반 PI 제어기를 이용한 SynRM 드라이브의 고성능 제어

정병진, 고재섭, 최정식, 김도연, 정동화
 순천대학교 정보통신공학부

High Performance Control of SynRM Drive using FNN based PI Controller

Byung-Jin Jung, Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Do-Yeon Kim, Dong-Hwa Chung

Abstract - This paper proposes FNN based PI controller for high performance control of SynRM Drive. Traditional PI controller can't be obtained good performance because it has fixed gain. Therefore, in this paper, FNN based PI controller that gain of PI controller is tuned use FNN proposes.

FNN based PI controller proposed in this paper can be obtained excellent performance more than traditional PI controller. Algorithm proposed in this paper make a analysis and prove valid.

1. 서 론

최근 SynRM(Synchronous Reluctance Motor)은 많은 연구가들의 노력에 의해 관심을 증폭시키고 있으며[1] 교류전동기를 대체하여 적용이 가능한 장점이 인식되었다. SynRM은 회전자 설계를 개선하여 유도전동기 보다 역률과 효율면에서 우수하며[2],[3] 백터제어 기법에 의한 제어성능이 다른 고성능 교류전동기 보다 양호하다는 것이 입증되었다.[4] SynRM 드라이브를 제어하기 위하여 아직도 산업현장에서는 일반적으로 PI 제어기를 많이 사용하고 있다.[5] 이는 PI 제어기가 간단하게 구현할 수 있고 파라미터와 시스템의 응답설정 사이에 존재하는 관계가 명확하기 때문이다.

본 논문에서는 SynRM의 고성능 제어를 위하여 FNN 기반 PI 제어기를 제시한다. PI 제어기에서 나타나는 문제점을 해결하기 위하여 퍼지제어와 신경회로망을 혼합 적용한 FNN 제어기를 설계한다. 퍼지제어의 강인성 제어와 신경회로망의 고도의 적응제어의 장점을 접목한다. FNN 제어기는 PI 제어기의 고정된 이득값을 갱신한다. 또한 ANN(Artificial Neural Network)을 이용하여 SynRM의 센서리스 제어를 제시한다. 본 연구에서 제시한 알고리즘의 성능을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2. FNN 기반 PI 제어기 설계

FNN 제어기는 퍼지제어와 신경회로망을 혼합 구성하며 강력한 표현의 유연성과 수치 처리능력을 가지고 있다. FNN은 퍼지룰의 조건부와 결론부를 클러스터링 방법과 다층 신경회로망으로 구성한다. FNN은 퍼지제어와 같은 강인성 제어와 신경회로망과 같은 고도의 적응능력을 장점을 가지게 된다.

그림 1은 FNN의 구성을 나타내며 여기서 두 개의 입력변수는 오차 e 와 오차의 변화분 ce 이고 출력변수는 제어변수 u 이다.

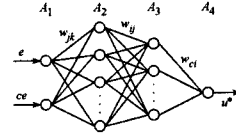


그림 1. FNN의 구성
 Fig. 1 The construction of FNN

2.1 제어기의 조건부의 구현

그림 1에서 4층에서 3층 사이에 신경회로망은 퍼지룰의 조건부의 구현을 나타낸다. 조건부의 멤버쉽 함수를 효과적으로 설계하기 위하여 신경회로망의 구조를 간단하게 하고 수렴속도를 개선하기 위하여 클러스터링 방법을 적용한다. 표 1은 퍼지제어룰의 집합을 나타낸다.

표 1. 퍼지룰 표

Table 1. Fuzzy rule table

| | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | PB | PM | PS | ZR | NS | NM | NB |
| PB | PB | PB | PM | PB | PM | PM | PM |
| PM | PB | PM | PS | PM | PM | PM | PS |
| PS | PM | PS | PS | PS | ZR | NS | NM |
| ZR | PB | PM | PS | ZR | NS | NM | NB |
| NS | PM | PS | ZR | NS | NS | NS | NM |
| NM | NS | NM | NM | NM | NS | NM | NB |
| NB | NM | NM | NM | NB | NM | NB | NB |

4층에서 각 신경세포의 출력은 각 부분 공간에서 퍼지룰의 진리값이다. 퍼지 클러스터링과 학습을 실현하기 위하여 이전 49룰과 같은 효과를 얻는 퍼지-신경회로망 제어기는 오차의 함수가 필요하다.

오차함수를 정의한 후, 오차를 최소화하기 위하여 다음 단계는 오차 역전과 알고리즘에 의해 4층과 3층 사이에 가중치 W_{jk} 와 W_{jl} 를 조절한다. 가중치 조절을 통하여 신경회로망은 클러스터 된 퍼지룰의 조건부를 완전하게 구현할 수 있다.

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

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

$$W_{jk}(t+1) = W_{jk}(t) + \Delta W_{jk} + \alpha[W_{jk}(t) - W_{jk}(t-1)] \quad (2)$$

2.2 제어기의 결론부의 구현

그림 1에서 3층과 4층 사이의 신경회로망은 퍼지룰의 후반부의 구현을 나타낸다. 학습 동안 가중치 W_{kl} 는 다음 오차 함수를 최소화하기 위하여 조절한다.

$$E' = \frac{1}{2} \sum (U' - U)^2 \quad (3)$$

여기서 U^* 와 U 는 퍼지와 신경회로망의 요구치와 실제치를 나타낸다.

일반적인 델타를 사용하여 가중치 W_{α} 의 변화 ΔW_{α} 는 오차함수인 식(3)을 최소화할 수 있고 퍼지물의 후반부를 재 정의하여 다음 식을 결정한다.

$$\Delta W_{\alpha} = -\eta \frac{\partial E^*}{\partial W_{\alpha}} = -\eta \delta_{\alpha} O, \quad (4)$$

$$W_{\alpha}(t+1) = W_{\alpha}(t) + \Delta W_{\alpha} + \alpha[W_{\alpha}(t) - W_{\alpha}(t-1)] \quad (5)$$

여기서 δ_{α} 는 퍼지와 신경회로망의 출력에서 오차신호이다.

그림 2는 FNN을 이용한 PI제어기를 나타낸다.

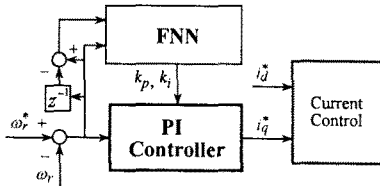


그림 2. FNN에 의한 PI 제어기
Fig. 2 PI controller with FNN

그림2에서 FNN은 PI 제어기의 이득값 k_p 와 k_i 를 출력하고, PI 제어기는 이 이득값을 이용하여 q 축 전류값을 계산한다.

3. ANN에 의한 속도 추정

ANN은 인간 두뇌의 간단한 모델에 의해 사고하는 구조로 이루어진 컴퓨팅 시스템이다. ANN은 비선형 동적 시스템의 파라미터를 추정 및 제어를 하는데 사용한다.

ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 SynRM의 최종 추정속도는 다음 식과 같다.

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

여기서 T 는 샘플링 주기를 나타내며 η 는 학습계수이며 학습과정에서 학습율을 나타낸다. 이 계수가 크면 하중 변화가 크다. 실제 구현을 위하여 학습율은 진동이 유발되지 않는 범위에서 큰 값으로 선정한다. 계수 α 는 현재 하중에서 변동하는 과거 하중의 영향을 결정한다.

추정속도를 이용한 회전자 자속의 위치는 다음과 같다.

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

그림 3은 본 연구에서 제시한 방식으로 ANN를 이용하여 속도를 추정하고 FNN 기반 PI 제어기를 이용하여 속도를 제어한다. ANN에 의해 속도를 추정하고 추정속도와 지령속도를 비교하여 오차를 구하고 그 오차는 FNN 기반 PI 제어기에 입력한다. FNN 기반 PI 제어기에서 지령 q 축 전류를 구한다. 전류제어에 의하여 지령전압을 구한 다음, SV PWM 인버터를 구동시켜 SynRM을 제어한다.

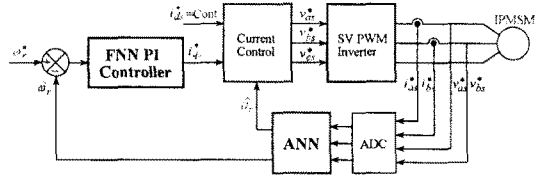


그림 3. 제시한 SynRM의 드라이브 시스템
Fig. 3 Proposed Drive system of SynRM

4. 시스템의 성능결과

그림 4는 0.1[sec]에서 지령속도를 1800[rpm]으로 운전시키고 0.5-0.7[sec]에서 부하토크를 5[N·m]으로 인가했을 경우에 나타나는 응답특성이다. 그림 4(a)는 지령속도와 실제속도이며 본 논문에서 제시한 FNN 기반 PI(FNNPI) 제어기를 종래의 PI 제어기를 비교하였다.

그림 (b)와 (c)는 FNNPI 제어기에서 구한 이득 k_p , k_i 를 나타낸다. 그리고 그림 (d)는 q 축 전류를 나타낸다.

그림 5는 더욱 명확하게 검토하기 위하여 그림 4의 초기와 부하가 인가된 상태를 확대한 결과이다. FNNPI 제어기가 PI 제어기 보다 오버슈트가 작고 상승시간도 짧으며 빠르게 안정화되고 정상상태에 빠르게 추종한다.

그림 6은 0.1sec에서 지령속도를 1800[rpm], 0.7[sec]에서 부하토크 5[N·m]인가하고 관성을 정격의 2배로 증가시켰을 경우에 나타나는 응답특성이다.

그림 7은 0.1sec에서 지령속도를 1800[rpm], 0.7[sec]에서 부하토크 5[N·m]인가하고 전기자저항을 정격의 2배로 증가시켰을 경우에 나타나는 응답특성이다. 관성과 전기자저항의 파라미터의 변동이 있을 경우에는 FNNPI 제어기의 성능이 더욱 효능을 발휘하며 양호하게 나타난다.

그림 8은 다양한 속도변화에 대한 ANN의 속도추정 성능을 나타내고 있다. 속도 오차는 1[%] 내로 추종 성능이 매우 우수하다.

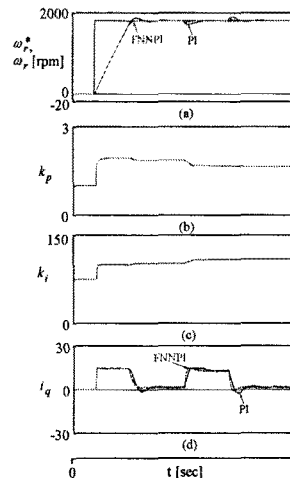


그림 4. PI와 FNNPI 제어기의 응답특성의 비교
Fig. 4 The comparison of response characteristics with PI and FNNPI controller

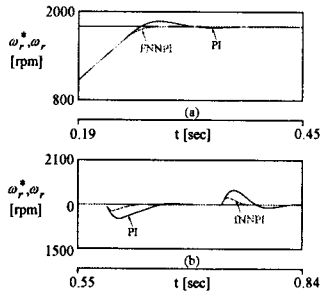


그림 5. PI와 FNNPI 제어기의 응답특성의 비교
 Fig. 5 The comparison of response characteristics with PI and FNNPI controller

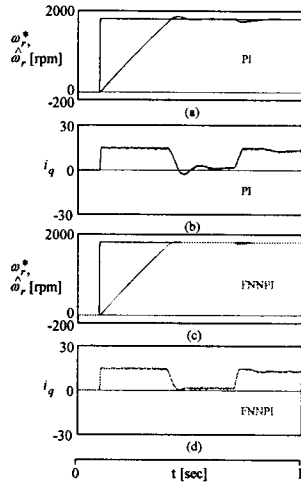


그림 6. 속도와 부하의 변화에 대한 응답특성 비교 [$J = 2J_n$]

Fig. 6 The comparison of response characteristics with speed and load torque

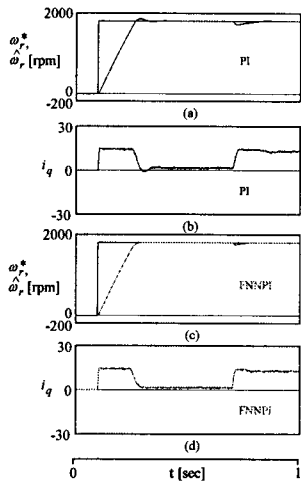


그림 7. 속도와 부하의 변화에 대한 응답특성 비교 [$R = 2R_n$]

Fig. 7 The comparison of response characteristics with speed and load torque

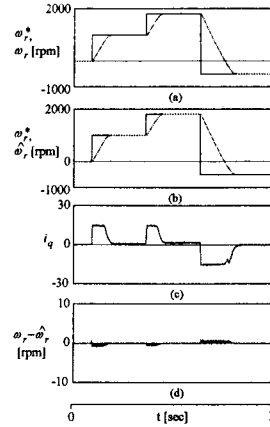


그림 8. 스텝 지령속도 변화 따른 속도 추정
 Fig. 8 Speed estimation with step command speed change

5. 결 론

본 논문에서는 SynRM 드라이브의 고성능 제어를 위하여 FNN 기반 PI 제어기를 제시하였다. FNN 기반 PI 제어기는 종래의 고정 이득 PI 제어기의 강인성을 증가시키기 위하여 신경회로망과 퍼지제어를 혼합한 FNN에 기초하여 설계한다. 이 제어기는 부하토크, 지령 q 축 전류 및 속도 오차 등 피드백 동작조건에 따라 양호하게 학습된 신경회로망을 이용하여 적합한 이득을 제공한다. FNN 기반 PI 제어기를 SynRM의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하였다. 속도 및 부하토크 변화에서 FNN 기반 PI 제어기는 종래의 PI 제어기 보다 오버슈트, 상승시간 및 안정화 시간이 양호하게 나타났다. 그리고 회전자 저항 및 관성 등과 같은 파라미터 변동에도 강인성 및 고성능이 나타났으며 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다. 속도와 부하토크의 변화에 대한 ANN에 의한 추종성능도 양호하게 나타났으며 속도 오차가 1% 이내로 매우 우수한 추정성능을 보여 주었다. 본 논문에서 제시한 FNN 기반 PI 제어기는 강인성과 고성능의 응답특성을 얻을 수 있었고 ANN에 의한 추종성능도 만족할만한 결과를 얻을 수 있었으므로 본 논문의 타당성을 입증할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] T. A. Lipo, "Synchronous reluctance machines: A viable alternative for A.C. drives?," in Proc. Int. Conf. Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines, Zurich, Switzerland, Aug., pp. 27-29, 1991.
- [2] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Rotor design optimization of synchronous reluctance machine," IEEE Trans. Energy conversion, vol. 9, no. 2, pp. 359-365, 1994.
- [3] A. Staton, T. J. E. Miller and S. E. Wood, "Optimization of the synchronous reluctance motor geometry," in Conf. Rec. Electrical machines and Drives, London, UK, pp. 156-160, 1991.
- [4] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Field oriented control of synchronous reluctance machine," in Conf. Rec. IEEE Power Electron Specialists Conf., pp 425-431, 1993.
- [5] Z. Ibrahim and E. Levi, "Comparative analysis of fuzzy logic and PI speed control in high performance AC drives using experimental approach," Proc. of IEEE IAS'2000, Rome, Italy, CD-ROM paper 46-3, 2000.