

유도전동기 드라이브를 위한 하이브리드 인공지능 제어기의 개발

고재섭, 이정철, 이홍균, 남수명, 최정식, 박병상, 정동화
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Development of Hybrid Artificial Intelligent Controller for Induction Motor Drive

Jae-Sub Ko, Jung-Chul Lee, Hong-Gyun Lee, Su-Myeong Nam, Jung-Sik Choi, Bung-Sang Park, Dong-Hwa Chung
 School of Information & Communication Engineering, Sunchon National Univ.

Abstract - This paper is proposed HAI controller for high performance of induction motor drive. The design of this algorithm based on FNN controller that is implemented using fuzzy control and neural network. This controller uses fuzzy rule as training patterns of a neural network.

The control performance of the HAI controller is evaluated by analysis for various operating conditions. The results of analysis prove that the proposed control system has strong high performance and robustness to parameter variation, and steady-state accuracy and transient response.

1. 서 론

외란, 속도 및 부하 등의 파라미터가 변동할 경우 고성능 및 강인성 제어를 실현하기 어렵다. PI 제어기의 비례이득 k_p 가 크면 상승시간이 작고 오버슈트는 커지며 안정시간이 길어진다. k_p 가 작으면 상승시간이 크고 오버슈트는 작으며 안정시간이 짧아진다. 따라서 PI 제어기에서는 이득계수를 조절하여도 드라이브의 성능을 향상시키는 데는 한계가 있다.

드라이브의 양호한 성능을 얻기 위하여 적응제어가 연구되었으며 적응제어는 종래의 PI 제어기에 비해 매우 양호한 성능을 얻을 수 있었다.[1] 이러한 적응제어 기법은 수학적인 모델링에 기초를 두고 있으며 다량의 알고리즘 때문에 매우 복잡하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 직접 퍼지제어기가 개발되었으나 다양한 부하변동과 관성변화에 대하여 강인성의 응답특성을 기대하기가 어려우며 만족할만한 성능을 얻을 수 없다.[2]

신경회로망을 드라이브의 파라미터 추정과 제어에는 매우 유력한 기법으로 평가를 받았다.[3]-[4] 신경회로망은 일반적인 백터제어 방법과 비교하여 적응제어의 능력이 우수하였다. 그러나 퍼지제어에서 나타나는 특성인 고성능 및 강인성 제어에서는 취약한 문제점이 나타난다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 감안하여 유도전동기 드라이브의 고성능 제어를 위하여 퍼지제어와 신경회로망을 혼합 구성한 적응 FNN 제어기를 제시한다. FNN 제어기는 퍼지룰의 전반부와 후반부를 클러스터링 방법과 다층 신경회로망으로 구성한다. 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 적용한다.[5] FNN 제어기의 출력과 적응 퍼지제어의 출력을 합하여 최종 출력을 얻는다. 본 제어기를 유도전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하고 본 제어기의 타당성을 입증한다.

2. 하이브리드 인공지능 제어기

유도전동기 드라이브의 속도를 추종 및 제어를 위하여 PI, PID 및 적응제어 기법이 많이 사용되었다. 그러나 이 기법들은 $d-q$ 축 파라미터를 구하는데 복잡하고 파라미터의 변동 및 부하변화에 매우 민감하였다.

유도전동기의 속도를 제어하기 위하여 적응 퍼지제어기 및 신경회로망이 개발되었다. 이러한 기법들은 파라미터 변동, 부하변화 및 시스템 외란 등에 강한 특성을 발휘하였다. 그러나 이 제어기들의 특징에서 각각의 문제점이 내포되어 있으므로 더욱 더 새로운 방법의 기법들을 개발하기 위하여 새로운 방법들이 시도되고 있다. 적응, 퍼지제어, 신경회로망 및 유전자 알고리즘을 상호 혼합하여 각 제어기의 장점을 공유하는 혼합제어가 유력한 기법으로 평가받을 것으로 예측된다.

그림 1은 하이브리드 인공지능 제어의 연구에 대하여 도식적으로 표현을 해 보았다. 각 제어기들은 화살표 방향으로 상호 공유하여 혼합제어를 형성할 수 있다.

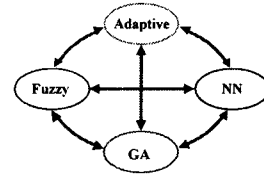


그림 1. 하이브리드 인공지능 제어의 연구

본 논문에서는 적응제어, 퍼지제어와 신경회로망을 혼합한 형태를 이용하여 하이브리드 인공지능 제어를 구성하였다. 이를 이용하여 유도전동기의 고성능 제어를 하게 된다.

3. 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. 그리고 퍼지제어와 같은 강인성 제어와 신경회로망과 같은 고도의 적응능력의 장점을 가지게 된다. 유도전동기 드라이브의 제어를 위한 직접 퍼지제어기의 구조는 그림 2와 같다.

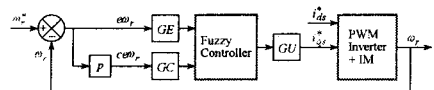


그림 2. 직접 퍼지제어기의 구조

일반적으로 퍼지제어기의 동적인 동작은 전문지식에 기초한 언어 제어룰의 집합에 의해 특성화된다. 언어 제어룰을 다음과 같이 가정한다.

$$\text{If } E \text{ is } A_1 \text{ and CE is } A_2 \text{ then } U \text{ is } B, \quad (1)$$

여기서 E, CE 및 U 는 각각 오차, 오차의 변화 및 제어 변수를 나타낸다. A_n 은 퍼지 멤버십 함수 $\mu_{A_n}(x_i)$ 에 의해 특성화된 퍼지변수를 나타내고 B_n 는 실수로 된 상수이다. E, CE 및 U 의 퍼지집합은 {NL, NM, NS, ZE, PS, PM, PL}이다.

유도전동기 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 3은 유도전동기 드라이브의 제어를 위한 FNN 제어기의 구조를 나타낸다.

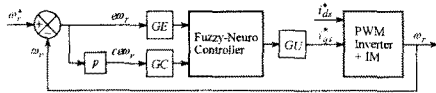


그림 3. FNN 제어기의 구조

그림 4는 FNN 제어기의 구성을 나타내며 여기서 두 개의 입력변수는 오차 e 와 오차의 변화분 ce 이고 출력변수는 제어변수 u^* 이다.

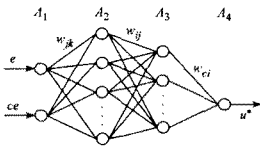


그림 4. FNN 제어기의 구성

4. 하이브리드 인공지능 제어기의 설계

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

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

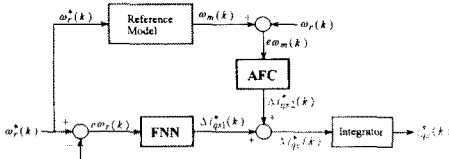


그림 5. 제시한 하이브리드 인공지능 제어기의 알고리즘

FNN 알고리즘에 의한 출력은 $\Delta i_{qs1}^*(k)$ 이며 AFC에 의한 출력은 $\Delta i_{qs2}^*(k)$ 이다. 이 두 출력을 합하여 적분기를 통해 지령 q 축 전류를 얻는다.

$$i_{qs}^*(k) = i_{qs}^*(k-1) + [\Delta i_{qs1}^*(k) + \Delta i_{qs2}^*(k)] \quad (2)$$

하이브리드 인공지능 제어기에 의해 제어되는 유도전동기의 드라이브 시스템은 그림 6과 같다.

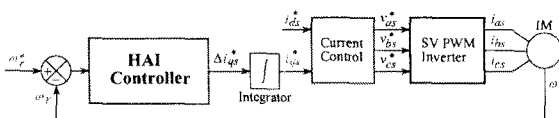


그림 6. 유도전동기의 드라이브 시스템의 구성도

5. 시스템의 성능결과

그림 7은 본 논문에서 실험을 위해 제작된 유도전동기 구동시스템을 나타낸다.

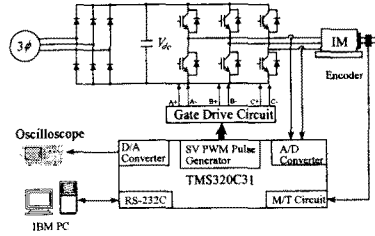


그림 7. 시스템 구성도

유도전동기의 다양한 운전조건에서 FNN 제어기와 본 논문에서 제시한 하이브리드 인공지능(HAI) 제어기의 실험 결과를 비교하였다.

그림 8과 9는 무부하 상태에서 스텝 지령속도를 정격인 1720[rpm]으로 운전시켰을 경우의 FNN 제어기와 HAI 제어기의 응답특성 결과이다. 그림 (a)는 지령속도와 실제속도, 그림 (b)는 q 축 전류를 나타내고 그림 (c)는 발생토크를 나타낸다. 스텝 지령속도에 대한 실험결과와 HAI 제어기의 속도가 FNN 제어기에 비해 오버슈트가 크게 감소하고, 상승 시간이 빠르며, 정상상태에 빠르게 도달한다.

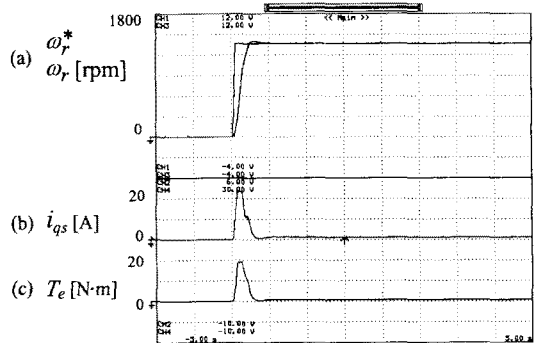


그림 8. 스텝 지령속도에 대한 FNN 제어기의 응답특성

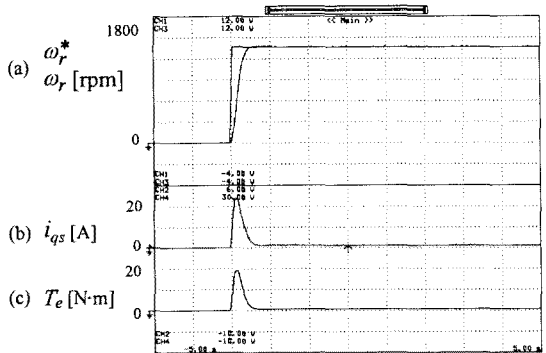


그림 9. 스텝 지령속도에 대한 HAI 제어기의 응답특성

그림 10과 11은 무부하 상태에서 1000[rpm]으로 운전 중, 부하토크를 10[N·m]인가 한 경우의 FNN 제어기와 HAI 제어기의 응답특성을 나타낸다. 일정한 속도로 운전 중, 부하토크를 인가한 경우 HAI 제어기의 응답특성은 FNN 제어기 보다 속도 변화가 감소하고 빠르게 지령속도에 도달한다.

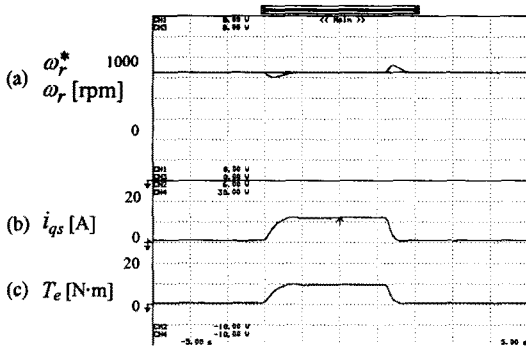


그림 10. 부하토크 변화에 대한 FNN 제어기의 응답특성

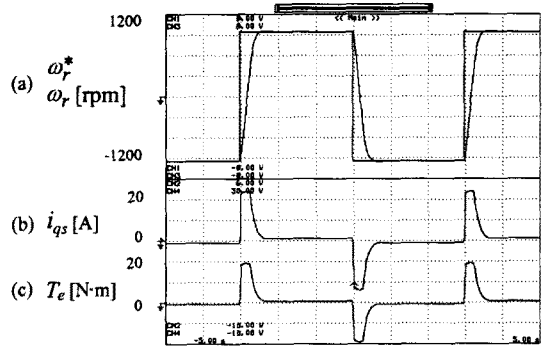


그림 13. 스텝 지령속도의 변화에 대한 HAI 제어기의 응답특성

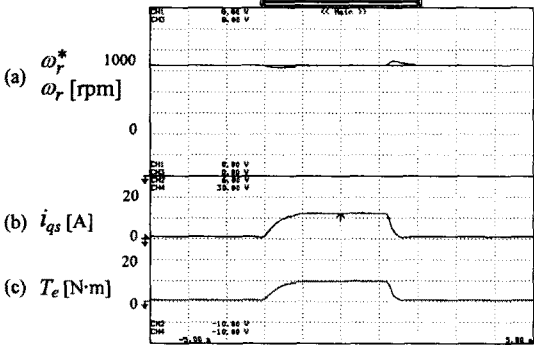


그림 11. 부하토크 변화에 대한 HAI 제어기의 응답특성

그림 12와 13에서 스텝 지령속도를 $-1200[\text{rpm}]$ 과 $1200[\text{rpm}]$ 으로 정역회전 시켰을 경우의 FNN 제어기와 HAI 제어기의 응답특성을 나타낸다. HAI 제어기의 속도는 FNN 제어기의 속도에 비하여 오버슈트가 감소하며 정상상태에 빠르게 도달한다.

HAI 제어기의 속도는 FNN 제어에 비교하여 스텝 지령속도 변화와 부하 인가시 속도 변화, 정역회전 운전 등에 오버슈트가 감소하고 상승시간이 빠르며 정상상태에 빠르게 도달하였다. 그리고 정속도 운전에서 부하를 인가한 경우에 속도변화의 폭이 감소하고 빠르게 지령속도에 추종하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 HAI 제어기가 지령속도의 변화, 부하변화 등의 광범위한 운전조건에서 FNN 제어기보다 응답특성이 매우 향상되므로 HAI 제어기의 타당성을 입증할 수 있었다.

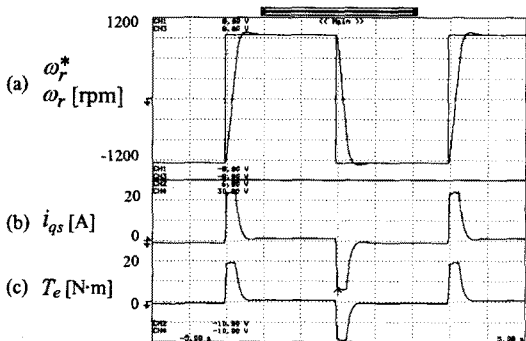


그림 12. 스텝 지령속도의 변화에 대한 FNN 제어기의 응답특성

6. 결론

본 연구에서는 유도전동기 드라이브의 고성능 제어를 위하여 하이브리드 인공지능 제어기를 제시하였다. FNN 제어기는 퍼지룰의 조건부와 결론부를 클러스터링 방법과 다중 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.

하이브리드 인공지능 제어기를 유도전동기의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도상태 등의 응답특성을 분석하였다. 샘플링 시간, 속도, 부하토크 및 관성의 변화에도 하이브리드 인공지능 제어기는 FNN 제어기 보다 상승시간은 빠르고 오버슈트는 작게 나타나며 고성능으로 적용 추종할 수 있었다. 그리고 전동기의 정역회전인 4상한 운전에서도 적응 FNN의 성능은 우수하게 나타났다.

본 연구에서는 제시한 하이브리드 인공지능 제어기는 파라미터의 변동 및 과도상태에서 드라이브의 응답특성이 양호하게 나타났다.

[참고 문헌]

- [1] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "Adaptive control," Addison-Wesley, 1989.
- [2] D. H. Chung, "Fuzzy control for high performance vector control of PMSM drive system," KIEE, vol. 47, no. 12, pp. 2171-2180, 1998.
- [3] M. G. Simoes and B. K. Bose, "Neural network based estimation of feedback signals for a vector controlled induction motor drive," IEEE Trans. IA, vol. 31, no. 3, pp. 620-629, 1995.
- [4] M. T. Wishart and R. G. Harley, "Identification and control of induction machines using neural networks," IEEE Trans. IA, vol. 31, no. 3, pp. 612-619, 1995.
- [5] D. H. Chung, et al., "MRAC fuzzy control for high performance control of induction motor," The Trans. of KIEP, vol. 7, no. 3, pp. 215-223, 2002.