

적응학습 퍼지뉴로 제어를 이용한 IPMSM 드라이브의 HIPI 제어기

(HIPI Controller of IPMSM Drive using ALM-FNN Control)

김도연* · 고재섭 · 최정식 · 정철호 · 정병진 · 정동화

(Do-Yeon Kim* · Jae-Sub Ko · Jung-Sik Choi · Chul-Ho Jung · Byung-Jin Jung · Dong-Hwa Chung)

Abstract

The conventional fixed gain PI controller is very sensitive to step change of command speed, parameter variation and load disturbances. The precise speed control of interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM) drive becomes a complex issue due to nonlinear coupling among its winding currents and the rotor speed as well as the nonlinear electromagnetic developed torque. Therefore, there exists a need to tune the PI controller parameters on-line to ensure optimum drive performance over a wide range of operating conditions.

This paper is proposed hybrid intelligent-PI(HIPI) controller of IPMSM drive using adaptive learning mechanism(ALM) and fuzzy neural network(FNN). The proposed controller is developed to ensure accurate speed control of IPMSM drive under system disturbances and estimation of speed using artificial neural network(ANN) controller. The PI controller parameters are optimized by ALM-FNN at all possible operating condition in a closed loop vector control scheme. The validity of the proposed controller is verified by results at different dynamic operating conditions.

Key Word : IPMSM drive, ALM-FNN, ANN, HIPI controller, Fuzzy Control

1. 서 론

IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)은 고토크, 대전력, 고효율 및 고역률 때문에 각광을 받고 있다. 특히, IPMSM은 자석을 회전자 철심에 부착하여 강인한 회전자 구조, 비돌극 회전자, 작고 효율적인 공극과 같은 우수한 특성을 가지고 있다[1].

로보틱스, 압연 및 공작기계 등에 사용되는 고성능 드라이브는 빠르고 정확한 속도응답, 어떤 외란으로부터 속도의 빠른 회복능력, 파라미터의 변동에 양호하게 적응하여 정확한 응답특성을 얻을 수 있어야 한다. IPMSM 드라이브의 고성능을 얻기 위하여 벡터제어를 이용하였다[2] 그러나 이러한 시스템의 제어설계는 시스템의 성능을 양호하게 향상시킬 수 없었다. 벡터제어 IPMSM의 비간섭 특성은 파라미터의 변동에 많은 영향을 받는다. 이러한 제어 문제를 해결하기 위하여 제어 파라미터를 연속적으로 시스템에 적용시켜 제어해야 한다. 이를 위하여 종래의 PI 제어기, MRAC(Model Reference Adaptive Control)[3], SMC(Sliding Mode Control)[4] 및 STC(Self Tuning Control)[5] 등을 이용하였다. 그

러나 IPMSM의 정확한 d-q축 리액턴스 파라미터를 얻기가 어렵기 때문에 제어기의 설계방법이 매우 복잡하다. 특히, 종래의 고정 이득 PI 제어기는 지령속도, 파라미터 변동 및 부하외란에 매우 민감하다[6]. IPMSM 드라이브의 정밀한 속도제어는 발생 토크의 비선형성, 권선전류와 회전자 속도 사이에 나타나는 비선형 결합 때문에 매우 복잡하다[7].

이러한 문제점을 해결하기 위하여 FNN(Fuzzy-Neural Network)[8], 하이브리드 인공지능제어[9] 등의 연구가 활발하게 진행되었다. 이러한 연구들은 IPMSM 드라이브에 적용하여 양호한 성능을 얻을 수 있었다. 그리고 이 연구들은 고속 및 저속의 속도변화, 부하 변동, 관성 변화 및 정·역회전 운전 등 다양한 동작에도 우수한 성능을 얻을 수 있었다. 그러나 이러한 기법들은 종래의 PI 제어기를 대체하여 사용하였으며 PI 제어기 이득을 조절하여 양호한 성능을 얻을 수 있는 기법을 제시하지 않았다.

본 논문에서는 적응학습 메카니즘(Adaptive Learning Mechanism)과 퍼지뉴로(Fuzzy Neural Network)를 이용하여 IPMSM의 드라이브의 속도제어를 위하여 HIPI(Hybrid

Intelligent PI) 제어를 제시한다. HIPI 제어기는 종래에 많이 사용되었던 PI 제어기와 성능을 비교한다. 그리고 ANN을 이용하여 IPMSM 드라이브의 속도 추정기법을 제시한다[10]. 2층 구조를 가진 신경회로망에 BPA(Back Propagation Algorithm)를 적용하여 IPMSM 드라이브의 속도를 추정한다. 본 논문에서 제시한 HIPI 및 ANN 제어기의 제어특성과 추정성능을 분석하고 그 결과를 제시한다. 속도, 부하토크, 관성 및 회전자 저항 등 다양한 파라미터의 변동에도 강인성 및 고성능 제어가 가능한 HIPI 제어기의 양호한 성능을 확인하고 본 제어기의 타당성을 입증한다.

2. IPMSM의 모델링

SV(Space Vector) PWM 인버터에 의해 구동되는 벡터 제어 IPMSM의 속도제어 방식은 그림 1과 같다. 이러한 시스템 구성은 로봇, 항공기 및 전기자동차 등의 드라이브와 같은 고성능 제어 시스템에 응용된다.

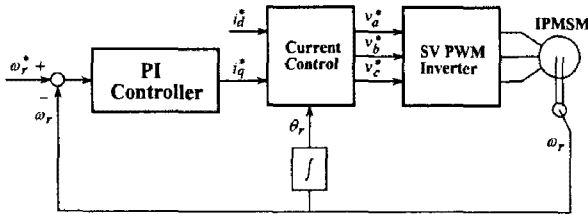


그림 1 속도제어를 위한 벡터 제어 IPMSM의 블록도
Fig. 1 Block diagram of vector controlled IPMSM for speed control

i_d^* 와 i_q^* 는 지령 토크 및 자속 성분의 전류를 나타내며 전류제어에 의해 v_a^* , v_b^* , v_c^* 를 얻는다. 이를 SV PWM 인버터에 의해 IPMSM을 제어한다. 회전자의 위치정보 θ_r 는 좌표변환에 이용한다.

동작특성을 분석하기 위한 IPMSM의 미분 방정식은 다음과 같다.

$$p i_d = (v_d - R i_d + \omega_r L_q i_q) / L_d \quad (1)$$

$$p i_q = (v_q - R i_q - \omega_r L_d i_d - \omega_r \phi_{af}) / L_q \quad (2)$$

$$p \omega_r = (T_e - T_L - B \omega_r) / J \quad (3)$$

여기서, 발생토크는 다음 식으로 표현된다.

$$T_e = \frac{3}{2} P [\phi_{af} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4)$$

3. HIPI 제어기

그림 2는 ALM과 FNN을 혼합 적용한 HIPI 제어기의 블록도를 나타낸다.

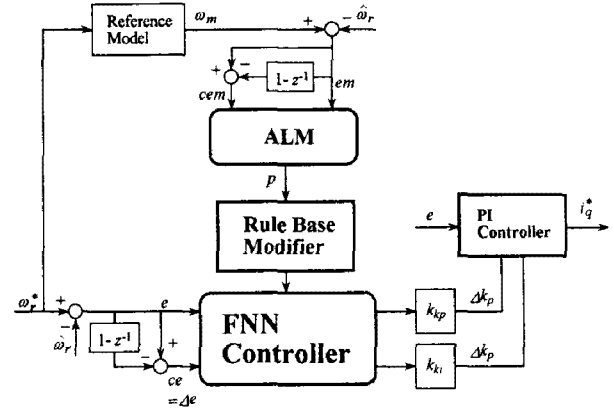


그림 2 적응학습 퍼지뉴로에 의한 HIPI 제어기
Fig. 2 HIPI controller with ALM-FNN

학습 메카니즘의 설계는 시스템 응답의 각 동적 측면이 룰 그룹에 의해 주로 영향을 받는다는 사실에 기초하여 설정한다. 바로 평가되는 설정 물에서 후반부의 변화는 시스템의 상승시간, 오버슈트, 정상상태 및 과도상태의 오차 등에 영향을 준다. 따라서 FNN 제어기에 학습 메카니즘을 적용하여 룰 베이스의 규칙을 수정한다. 학습 메카니즘은 퍼지 역모델 및 지식베이스 수정자를 포함한다. 드라이브 시스템의 속도성능은 기준모델의 속도와 추정속도의 오차에 의해 좌우된다.

$$em(kT) = \omega_m(kT) - \hat{\omega}_r(kT) \quad (5)$$

$$cem(kT) = em(kT) - em(kT - T) \quad (6)$$

여기서 오차 $em(kT)$ 는 각 시간순시에서 얻어지는 필요한 속도성능의 측정 정도이다. 성능이 만족할 경우인 $em(kT) = 0$ 에서 학습 메카니즘은 FNN 제어기에서 수정할 필요가 없다. 그렇지 않으면 학습 메카니즘은 요구되는 속도성능을 얻기 위하여 FNN 제어기의 룰 베이스를 동조시켜 수정을 해야 한다.

퍼지 역모델은 오차 $em(kT)$ 를 사상하여 프로세서의 입력 $p(kT)$ 를 변화시키며 $em(kT)$ 를 영이 되도록 강제화 시킨다. 역모델의 입력은 식 (5)와 식 (6)과 같이 오차와 오차 변화분으로 정의한다. 퍼지의 수행과정은 FNN 제어기에서 사용한 방법과 유사하게 사용한다. 프로세서에서 변화 $p(kT)$ 는 입력오차 $em(kT)$ 에 기초하여 퍼지 역모델에 의해서 발생한다.

지식베이스의 수정자는 $p(kT)$ 에 따라서 FNN 제어

기의 지식베이스를 변화시킨다. 이 변화는 FNN 제어기에서 출력의 멤버십 함수의 증상을 수정하여 구현하며 수정하는 식은 다음과 같다.

$$C_i(kT) = C_i(kT - T) + p(kT) \quad (7)$$

여기서 첨자 i 는 역모델에 의해 동작하는 i 번째 멤버십 함수를 나타낸다. 여기서 각 부분 변화는 각 시간에서 이루어진다. 이 방법에서 FNN 제어기는 요구되는 $\Delta k_p, \Delta k_i$ 를 발생하기 위하여 강제화 시킨다. 이는 기준 모델을 추종하도록 전동기를 제어한다. 또한 IPMSM 드라이브의 속도 센서리스를 위하여 ANN 제어기를 구현하였다[10].

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

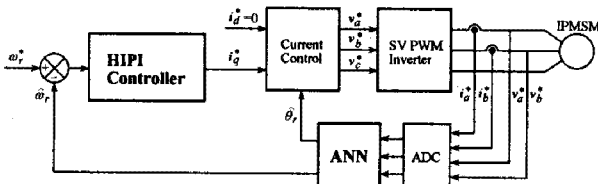


그림 3 제시한 IPMSM의 드라이브 시스템
Fig. 3 Proposed Drive system of IPMSM

4. 시스템의 성능결과

그림 4(가)는 0.1[sec]에 1800[rpm]으로 운전 중, 0.4[sec]에서 0.6[sec]까지 부하토크를 $3[N \cdot m]$ 인가하고, 지령속도를 0.8[sec] 1000[rpm]으로 변화하였을 경우의 응답특성을 나타낸다. 그림 4(가-a)는 지령속도와 추정 속도, 그림 4(가-b)와 그림 4(가-c)는 HIPI 제어기에서 구한 이득 k_p, k_i 를 나타내고, 그림 4(가-d)는 q 축 전류를 나타낸다. 그림 4(나)는 명확하게 검토하기 위하여 그림 4(가)의 과도상태 및 부하인가에 따른 응답특성을 확대하여 해석한 결과를 나타낸다. 그림 4(나-a)는 속도 상승에 따른 응답특성, 그림 4(나-b)는 부하인가에 따른 응답특성, 그림 4(나-c)는 속도하강에 따른 응답특성을 나타낸다. 본 논문에서 제시한 HIPI 제어기는 FNN 제어기 및 PI 제어기에 비하여 오버슈트도 작고 안정화 시간도 짧은 양호한 성능이 나타난다.

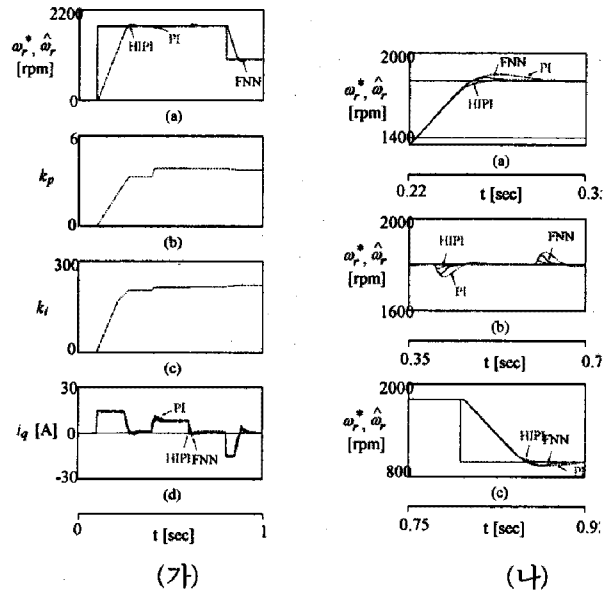


그림 4. 지령속도와 부하토크 변화에 대한 응답특성
Fig. 4. Response characteristics with command speed and load torque variation

그림 5는 0.1[sec]에 1800[rpm]으로 운전 중, 0.6[sec]에서 0.8[sec] 사이에 부하토크를 $3[N \cdot m]$ 인가하고 파라미터가 변동하였을 경우의 응답특성을 나타낸 것으로서 전기자 저항을 2배 증가할 경우 응답특성을 나타낸다. 그림 6은 관성 J_n 이 3배로 증가하였을 경우 4상한 운전에 대한 응답특성을 나타낸다. 그림 6(d)의 속도오차에서 HIPI 제어기는 종래의 PI 및 FNN 제어기에 비하여 속도오차가 현저하게 작게 나타나고 있다. 전기자 저항 및 관성 등의 파라미터가 변동하였을 경우에는 HIPI 제어기의 성능이 매우 우수하게 나타나고 있다.

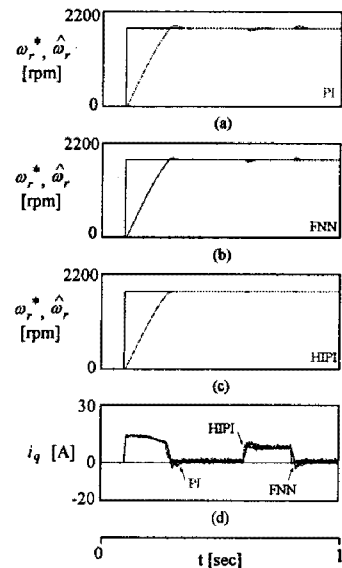


그림 5. 지령속도 및 부하변화에 대한 응답특성 ($R_a = 2R_a$)
Fig. 5. Response characteristic with command speed and load torque variation ($R_a = 2R_a$)

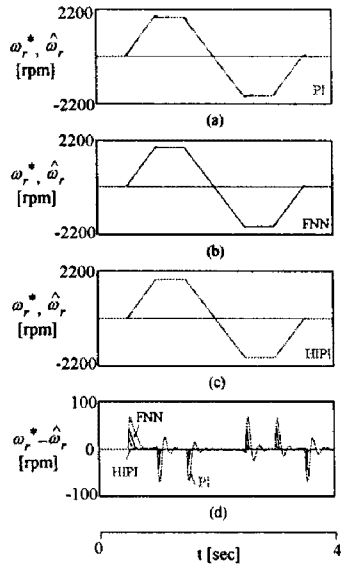


그림 6. 4상한 운전에 대한 응답특성 ($J_n = 3J_n$)
 Fig. 6. Response characteristic with quadrant drive ($J_n = 3J_n$)

그림 7은 ANN에 의한 속도추정에 대한 응답특성을 나타낸다. 지령속도를 1500[rpm]→1800[rpm]→-500[rpm]으로 다양하게 변화시켰을 경우 응답특성이며, 그림 7(a)는 지령속도와 실제속도, 그림 7(b)는 지령속도와 추정속도, 그림 7(c)는 i_q 축 전류, 그림 7(d)는 실제속도와 추정속도 오차를 나타낸다. 그림 7(d)에서 속도오차가 1% 내로 추정성능이 매우 우수하게 나타났다.

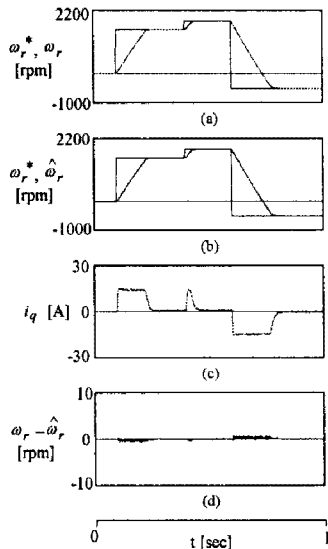


그림 7. 속도추정에 대한 응답특성
 Fig. 7. Response characteristic with speed estimation

5. 결론

본 논문에서는 HIPI 제어를 IPMSM의 드라이브 시스템에 적용하여 파라미터의 변동, 정상상태 및 과도 상태 등의 응답특성을 분석하였다. 속도 및 부하토크

변화에서 HIPI 제어기는 종래의 PI 및 FNN 제어기 보다 오버슈트, 상승시간 및 안정화 시간이 양호하게 나타났다. 그리고 전기자 저항 및 관성 등의 파라미터 변동에도 강인성 및 고성능이 나타났으며 양호한 응답특성을 얻을 수 있었다. 또한 속도와 부하토크의 변화에 대한 ANN에 의한 추종성능도 양호하게 나타났으며 속도 오차가 1[%] 이내로 매우 우수한 추정성능을 보여 주었다. 본 논문에서 제시한 HIPI 제어기는 강인성과 고성능의 응답특성을 얻을 수 있었고 ANN에 의한 추종성능도 만족할만한 결과를 얻었다. 이로써 본 논문의 타당성을 입증할 수 있었다.

본 과제(결과물)는 교육과학기술부·지식경제부·노동부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] G. R. Stemon, "Electric machines and drives," Addison-Wesley Publication Company, pp. 503-511, 1992.
- [2] 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. 217-220, 1972.
- [3] N. Golea, A. Golea and M. Kadjudj, "Robust MRAC adaptive control of PMSM drive under general parameters uncertainties," IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 1533-1537, 2006.
- [4] B. Singh, B. P. Singh and S. Dwivedi, "DSP based implementation of sliding mode speed controller for vector controlled permanent magnet synchronous motor drive," India International Conference on Power Electronics, pp. 22-27, 2006.
- [5] Y.A.-R.I. Mohamed, "Adaptive Self-Tuning Speed Control for Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive With Dead Time," IEEE Transaction on EC, vol. 21, no. 4, pp. 855-862, 2006.
- [6] M. A. Rahman and M. A. Hoque, "On-line self tuning ANN based speed control of a PM DC motor," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, vol. 2, no. 3, pp. 169-178, 1997.
- [7] M. A. Rahman and Ping Zhou, "Field circuit analysis of brushless permanent magnet synchronous motors," IEEE Trans. on IE, vol. 43, no. 2, pp. 256-267, 1996.
- [8] H. G. Lee, S. M. Nam, J. S. Ko, J. S. Choi, J. C. Lee and D. H. Chung, "The speed control and estimation of IPMSM using adaptive FNN and ANN," ICCAS 2005, p. 134, 2005.
- [9] J. S. Ko, J. S. Choi, J. H. Lee and D. H. Chung, "Maximum torque control of IPMSM drive with hybrid artificial intelligent controller," Proceeding of ICMATE'06, Session B1, pp. 177-182, 2006.
- [10] J. S. Choi, J. S. Ko, and D. H. Chung, "Efficiency Optimization Control of SynRM with ANN Speed Estimation," KEE, vol. 55P, no. 3, pp. 117-122, 2006.