

SPMSM 드라이브의 속도제어 및 추정을 위한 퍼지-뉴로 제어

남수명, 이정철, 이홍균, 이영실, 박병상, 정동화
 순천대학교 공과대학 정보통신공학부

Fuzzy-Neural Control for Speed Control and estimation of SPMSM drive

Su-Myeong Nam, Jung-Chul Lee, Hong-Gyun Lee, Young-Sil Lee, Bung-Sang Park, Dong-Hwa Chung
 School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ.

Abstract - This paper is proposed a fuzzy neural network controller based on the vector controlled surface permanent magnet synchronous motor(SPMSM) drive system. The hybrid combination of neural network and fuzzy control will produce a powerful representation flexibility and numerical processing capability. Also, this paper is proposed speed control of SPMSM using neuro-fuzzy control(NFC) and estimation of speed using artificial neural network(ANN) Controller. The back propagation neural network technique is used to provide a real time adaptive estimation of the motor speed.

The error between the desired state variable and the actual one is back-propagated to adjust the rotor speed, so that the actual state variable will coincide with the desired one. The back propagation mechanism is easy to derive and the estimated speed tracks precisely the actual motor speed. This paper is proposed the theoretical analysis as well as the simulation results to verify the effectiveness of the new method.

1. 서 론

최근 벡터제어는 SPMSM의 고성능을 위한 드라이브 시스템에 광범위하게 적용되고 있다. SPMSM의 드라이브 시스템에서 속도와 위치의 정보를 얻기 위하여 엔코더와 리졸버와 같은 센서를 사용한다. 그러나 이러한 센서는 실제의 적용분야에서 많은 문제점이 도출되며 시스템의 적용분야가 제한된다. 이러한 센서는 값이 비싸고 시스템의 가격을 증가시킨다. 그리고 센서의 정밀도에 영향을 주는 온도, 습도 및 먼지 등 환경적인 요인에 민감하며 시스템의 강인성을 약화시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1]-[3]

STC(Self Tuning Control), MRAC(Model Reference Adaptive Control), SMC(Sliding Mode Control) 및 EKF(Extended Kalman Filter) 등의 다양한 적응제어 기법이 제시되었다.[4] 적응제어는 부하토크 및 부하관성과 같은 광범위한 동작변화에도 양호한 속도응답을 얻을 수 있는 우수한 기법으로 평가를 받았다. 그러나 수학적 모델링에 기초하고 계산시간이 많이 소요되는 알고리즘이기 때문에 매우 복잡하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 직접 퍼지제어기가 개발되었으나 다양한 부하변동과 관성변화에 대하여 강인성의 응답특성을 기대하기가 어려우며 만족할만한 성능을 얻을 수 없다.[5]

최근, 인공 신경회로망의 진가가 인정되어 많은 관심을 가지게 되었으며 함수를 근사화하기 위하여 다양하게

연구되고 있다.[6-8] 이러한 방법들은 일반적인 벡터 제어 방법과 비교하여 우수한 성능을 얻을 수 있었다. 그러나 자속을 제어할 수 없으므로 포화의 영향이 나타나고 속도센서를 사용하고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 NFC(Neuro-Fuzzy Controller)와 ANN(Artificial Neural network) 제어를 이용한 SPMSM의 속도 제어 및 추정을 제시한다. 먼저, PI 제어기에서 나타나는 문제점을 해결하기 위하여 신경회로망과 퍼지제어를 혼합 적용한 NFC를 설계한다. 신경회로망의 고도의 적응제어와 퍼지제어기의 강인성 제어의 장점들을 접목한다. 다음은 ANN을 이용하여 SPMSM 드라이브의 속도 추정기법을 제시한다. 2층 구조를 가진 신경회로망에 BPA(Back Propagation Algorithm)를 적용하여 SPMSM 드라이브의 속도를 추정한다. 추정속도의 타당성을 입증하기 위하여 시스템을 구성하여 제어특성을 분석한다. 그리고 추정된 속도를 지령속도와 비교하여 전류제어와 공간벡터 PWM을 통하여 SPMSM의 속도를 제어한다. 본 연구에서 제시한 NFC와 ANN 제어기의 제어특성과 추정성능을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2. 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 위한 이상적인 적용은 비선형 시스템의 추정 분야에 있다. 실질적으로 어떤 이산 비선형 시스템은 지연 입·출력에서 시스템을 표현할 수 있는 NARMAX(Nonlinear AutoRegressive Moving Average with exogenous inputs) 모델에 의해서 나타낼 수 있다.[11] 일반적으로 NARMAX 모델은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-d_y), u(k), \dots, u(k-d_u)) \quad (1)$$

여기서 d_u 와 d_y 는 입력과 출력 벡터 u 와 y 에서 최대 지연을 나타낸다. 이 모델의 형태는 모델이 전적으로 기지 양으로 표현되기 때문에 시스템의 추정을 추구하는데 이상적이다. 그림 1은 ANN을 이용한 시스템의 추정을 나타낸다. ANN은 시스템의 NARMAX 모델을 추정하는데 사용하며 이를 위해 식(1)에서 필요한 입력과 예측 출력벡터 $\hat{y}(k+1)$ 로서 ANN의 출력을 구성한다. 이산시간 $k+1$ 에서 예측 출력벡터를 실제 출력벡터와 비교하여 식(1)에서 함수 $f(\cdot)$ 를 에뮬레이트하기 위하여 학습한다. 그리고 오차 역전파 알고리즘에 의해 ANN 하중을 새롭게 하기 위하여 오차를 사용한다.

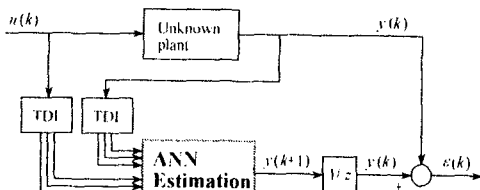


그림 1 ANN을 이용한 시스템 추정

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

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta\hat{\omega}_r(k) \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T} \{ [\hat{\phi}_s(k) - \hat{\phi}_s(k-1)] [\hat{\phi}_d(k-1)] - [\hat{\phi}_s(k) - \hat{\phi}_s(k-1)] [\hat{\phi}_d(k-1)] \} \\ &\quad - \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1) \end{aligned} \quad (2)$$

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.

$$\hat{\theta}_r(k+1) = \hat{\theta}_r(k) + T \cdot \hat{\omega}_r(k) \quad (3)$$

그림 2는 NFC와 ANN 제어기를 이용하여 속도를 추정하고 드라이브 시스템을 제어할 수 있는 블록도를 나타낸다. ANN에 의해 속도를 추정하고 추정속도와 지령속도를 비교하여 오차를 구하고 그 오차는 NFC에 입력한다. NFC에서 지령 q 축 전류를 구한다. 전류제어에 의하여 지령전압을 구한 다음, SV PWM 인버터를 구동시켜 SPMSM을 제어한다.

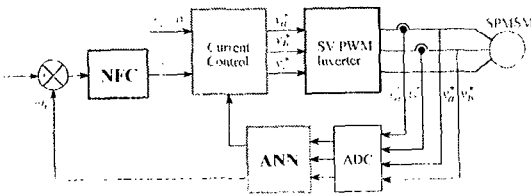


그림 2 SPMSM의 벡터제어 시스템

3. 시스템의 성능결과

그림 3은 PI, 직접 퍼지제어기 및 NFC 제어기의 스텝 지령속도 변화와 부하토크 인가하였을 경우의 속도를 비교한 결과이다. 0.2[sec]에서 스텝 지령속도를 1000[rpm]으로 운전하다가 0.6[sec]에서 지령속도를 1800[rpm]으로 변화시키고 1.0[sec]에서 1.2[sec]까지 부하토크를 3[N·m]인가하였을 경우의 응답특성이

다. 그림 3(a)는 샘플링 주기를 $T_s = 0.2[msec]$ 로 하고 스텝 지령속도를 상승시킬 때 NFC 제어기의 속도는 종래의 PI 제어기와 직접 퍼지제어기의 속도에 비해 고속으로 추종하며 오버슈트가 매우 작게 나타난다. 그림 3(b)는 샘플링 주기를 $T_s = 0.5[msec]$ 로 하고 그림 3(a)와 같이 스텝 지령속도를 변화시켰을 경우의 특성이다. 그림 3(c)는 부하토크 변화에 대한 속도의 추종도 NFC 제어기가 속도 변화도 작고 정상상태에 고속으로 추종하고 있다. 그림 3(d)는 관성을 3배 증가시켜 그림 3(c)와 같이 부하를 인가하였을 경우의 응답특성이다. 샘플링 주기를 길게 하거나 관성을 증가시켰을 때 제어기는 속도 변화의 폭이 증가하고 안정화 시간이 약간 길어진다. 그러나 NFC 제어기는 파라미터의 변동에도 양호하게 추종하며 PI 및 직접 퍼지제어기 보다 매우 양호한 응답특성이 나타난다.

그림 4는 스텝 지령속도를 100[rpm]에서 -100[rpm]으로 반복적으로 변화시켰을 때의 응답특성이다. 저속에서 정·역회전 시켰을 경우에도 지령속도에 대한 실제속도와 추종속의 응답특성은 양호하며 추종속도와 추종 회전각은 실제속도와 실제 회전각에 양호하게 추종되고 있다.

그림 5는 계수 α 값의 변화에 따른 응답특성을 나타낸다. α_1 은 -8×10^{-2} 값으로 설정하였으며 그림 5(a)는 $\alpha = \alpha_1$ 이고 그림 5(b)는 $\alpha = 10 \times \alpha_1$ 이다. 그림 5(a)에서 α 의 작은 값으로 인해 큰 진동이 나타나고 속도의 오차도 증가하였다. 이 진동을 감소시키고 속도 오차를 감소시키기 위하여 그림 5(b)에서 10배로 증가시켰다. α 값을 증가시키면 추정속도의 진동은 더욱 작게 나타난다. 추정속도가 실제속도에 양호하게 추종하고 추종속도에 의한 백터제어가 양호하게 이루어지기 위하여 반복시험으로 $\alpha = 10 \times \alpha_1$ 값이 가장 좋은 값으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 이 값을 이용하여 성능결과를 얻었다.

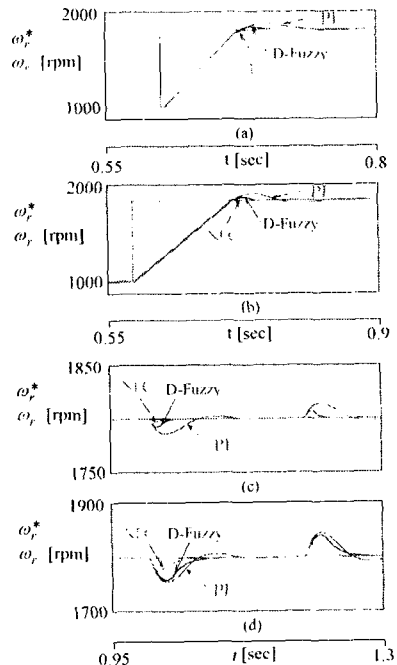


그림 3 PI, 직접 Fuzzy 및 NFC 제어기의 응답특성의 비교

5. 결 론

본 연구에서는 NFC와 ANN을 이용한 SPMSM의 속도 추정과 제어를 제시하였다. NFC를 이용하여 속도를 제어하였으며 2층 구조를 가진 신경회로망에 BPA를 적용하여 SPMSM 드라이브의 속도를 추정하였다.

NFC-ANN 제어기는 종래의 PI 및 직접 퍼지제어기보다 성능이 우수한 결과를 얻었으며 고성능 및 강인성 제어를 확인할 수 있었다. ANN을 이용하여 다양한 지령속도의 변화에도 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다. 지령속도를 정·역회전 운전시켰을 경우에도 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다. 그리고 부하토크, 샘플링 시간 및 관성의 변화에도 추정속도는 실제속도에 양호한 추정성능을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 제시한 NFC와 ANN은 시스템의 응답 특성이 양호하게 나타났으며 속도의 추정 및 제어도 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제시한 NFC와 ANN의 타당성을 입증할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. Schauder, "Adaptive speed identification for vector control of induction motors," IEEE Trans. on IA, pp. 1054-1061, 1992.
- [2] F. Z. Feng, T. Fukao, "Robust speed identification for speed sensorless vector control of induction motors," IEEE Trans. on IA, vol. 30, no. 5, pp. 1234-1240, 1994.
- [3] H. Kubota and K. Matsuse, "Speed sensorless field oriented control of induction motor with rotor resistance adaption," IEEE Trans. on IA, vol. 30, no. 5, pp. 1219-1224, 1994.
- [4] K.J. Astron and B. Wittenmark, "Adaptive control," Addison-Wesley, 1989.
- [5] D. H. Chung, "Fuzzy control for high performance vector control of PMSM drive system," KJEE, vol. 47, no. 12, pp. 2171-2180, 1998.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] I. J. Leontaritis and S. A. Billings, "Input-output parametric models for nonlinear systems," Int. J. Contr., vol. 41, pp. 303-344, 1985.

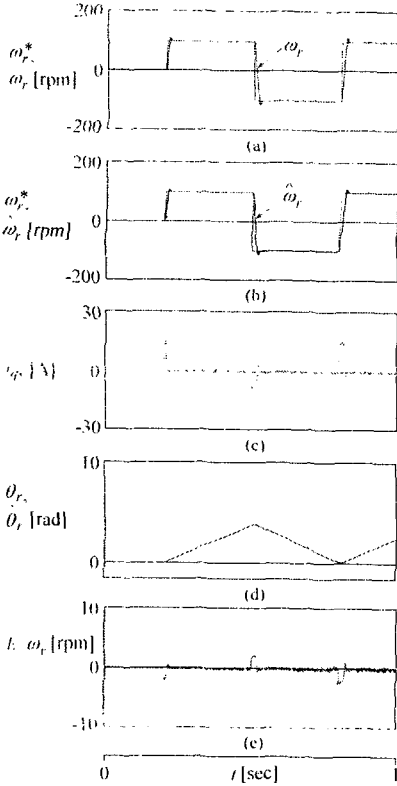


그림 4 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답특성(100[rpm]→-100[rpm])

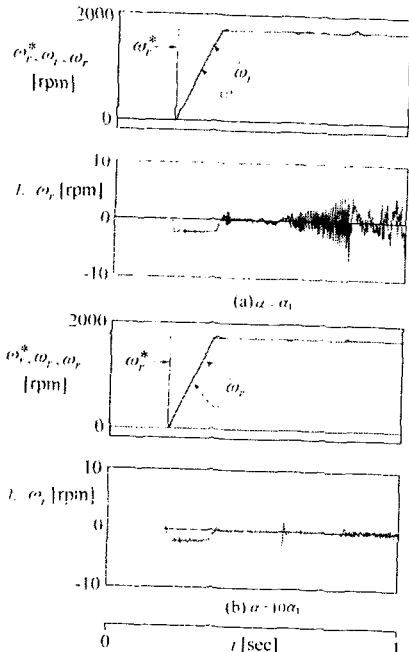


그림 5 계수 α 값의 변화에 따른 응답특성