

## IPMSM 드라이브의 속도제어를 위한 하이브리드 지능제어

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

### Hybrid Intelligent Control for Speed Control of IPMSM Drive

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

**Abstract** - This paper considers the design and implementation of novel technique of speed estimation and control for IPMSM using hybrid intelligent control. The hybrid combination of neural network and adaptive fuzzy control will produce a powerful representation flexibility and numerical processing capability. Also, this paper is proposed speed control of IPMSM using adaptive neural network fuzzy(A-NNF) and estimation of speed using artificial neural network(ANN) controller. This paper is proposed the theoretical analysis as well as the simulation results to verify the effectiveness of the new hybrid intelligent control.

### 1. 서 론

IPMSM의 드라이브 시스템에서 속도와 위치의 정보를 얻기 위하여 엔코더와 리졸버와 같은 센서를 사용한다. 그러나 이러한 센서는 실제의 적용분야에서 많은 문제점이 도출되며 시스템의 적용분야가 제한된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1]-[2] 적응제어는 부하토크 및 부하관성과 같은 광범위한 동작변화에도 양호한 속도 응답을 얻을 수 있는 우수한 기법으로 평가를 받았다. 그러나 수학적 모델링에 기초하고 계산시간이 많이 소요되는 알고리즘이기 때문에 매우 복잡하다. 최근, 인공 신경회로망에 많은 관심을 가지게 되었으며 함수를 근사화하기 위하여 다양하게 연구되고 있다.[3]-[5] 그러나 자속을 제어할 수 없으므로 포화의 영향이 나타나고 속도 센서를 사용하고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 하이브리드 지능제어를 이용한 IPMSM 드라이브의 속도 추정 및 제어를 제시한다. 신경회로망의 고도의 적응제어와 퍼지제어의 강인성 제어의 장점들을 접목한다. 더욱 성능을 개선하기 위하여 퍼지제어는 적응 퍼지제어를 사용하여 신경회로망과 혼합제어를 구현하며 이를 A-NNF(Adaptive-NNF)라고 한다. 다음은 ANN을 이용하여 IPMSM 드라이브의 속도 추정기법을 제시한다. 2층 구조를 가진 신경회로망에 BPA를 적용하여 IPMSM 드라이브의 속도를 추정한다. 추정속도의 타당성을 입증하기 위하여 시스템을 구성하여 제어특성을 분석한다. 본 연구에서 제시한 NNF와 ANN 제어기의 제어특성과 추정성능을 분석하고 그 결과를 제시한다.

### 2. 하이브리드 지능제어

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

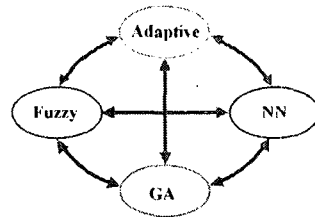


그림 1 하이브리드 지능제어의 연구

본 논문에서는 적응제어, 퍼지제어와 신경회로망(A-FNN)을 이용하여 IPMSM의 속도를 제어하는데 적용한다. 그리고 ANN을 이용하여 IPMSM의 속도를 추정하는 시스템을 구성한다.

### 3. 적응 NNF 제어기의 설계

그림 2는 NNF 제어기를 설계하고, 적응 퍼지제어기인 AFC(Adaptive Fuzzy Controller)[6]를 병렬로 연결한다. NNF에서 나타나는 오차를 보상하기 위하여 AFC를 사용하며 AFC는 기준 모델을 고려한 적응 메커니즘을 나타낸다.

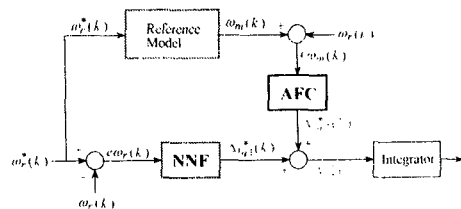


그림 2 제시한 적응 NNF 제어기의 알고리즘

AFC에 의한 출력은  $\Delta i_{q2}^*(k)$ 를 발생시킨다.  $\Delta i_{q1}^*(k)$ 과  $\Delta i_{q2}^*(k)$ 를 합하여  $\Delta i_q^*(k)$ 를 구하여 이를 적분기를 통해  $i_q^*(k)$ 를 발생시켜 플랜트에 인가한다.

NNF의 출력에서  $\Delta i_{q1}^*(k)$ 을 얻어 AFC에서  $\Delta i_{q2}^*(k)$ 와 합하면 퍼지제어기의 지령  $q$ 축 전류를 얻을 수 있다.

$$\hat{i}_q^*(k) = \hat{i}_q^*(k-1) + [\Delta i_{q1}^*(k) + \Delta i_{q2}^*(k)] \quad (1)$$

#### 4. ANN에 의한 속도 추정

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.[6] 일반적으로 NARMAX 모델은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-d_y), u(k), \dots, u(k-d_u)) \quad (2)$$

여기서  $d_u$ 와  $d_y$ 는 입력과 출력 벡터  $u$ 와  $y$ 에서 최 대 지연을 나타낸다.

ANN은 시스템의 NARMAX 모델을 추정하는데 사용 하며 이를 위해 식(2)에서 필요한 입력과 예측 출력벡 터  $\hat{y}(k+1)$ 로서 ANN의 출력을 구성한다. 이산시간  $k+1$ 에서 예측 출력벡터를 실제 출력벡터와 비교하여 식 (2)에서 함수  $f(\cdot)$ 를 에뮬레이터하기 위하여 학습한다. ANN을 이용한 시스템의 추정에서 구한 IPMSM의 최종 추정속도는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r(k+1) &= \hat{\omega}_r(k) + \Delta \hat{\omega}_r(k) = \hat{\omega}_r(k) - \frac{\Delta W_2(k)}{T} \\ &= \hat{\omega}_r(k) - \frac{\eta}{T} \{ [\hat{\phi}_q(k) - \hat{\phi}_q(k)] [\hat{\phi}_d(k-1)] - [\hat{\phi}_d(k) - \hat{\phi}_d(k)] [\hat{\phi}_q(k-1)] \} \\ &\quad - \frac{\alpha}{T} \Delta W_2(k-1) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $T$ 는 샘플링 주기를 나타내며  $\eta$ 는 학습계수가 며 학습과정에서 학습율을 나타낸다. 이 계수가 크면 하중 변화가 크다. 계수  $\alpha$ 는 현재 하중에서 변동하는 과거 하중의 영향을 결정한다.

그림 3은 적용 NNF와 ANN 제어기를 이용하여 속 도를 추정하고 드라이브 시스템을 제어할 수 있는 블록 도를 나타낸다. ANN에 의해 속도를 추정하고 추정속 도와 지령속도를 비교하여 오차를 구하고 그 오차는 NNF에 입력한다. NNF에서 지령  $q$ 축 전류를 구한다. 전류제어에 의하여 지령전압을 구한 다음, SV PWM 인 버터를 구동시켜 IPMSM을 제어한다.

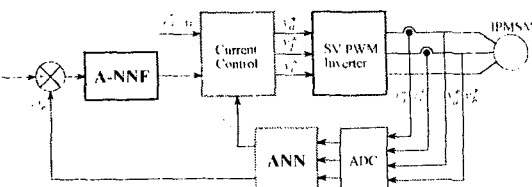


그림 3 인공지능 제어에 의한 IPMSM의 드라이브 시스템

#### 5. 시스템의 성능결과

그림 4는 PI, FNN 및 적용 FNN(A-FNN) 제어기 의 속도와  $q$ 축 전류를 비교한 결과이다. 0.2[sec]에서 스텝 지령속도를 1800[rpm]으로 운전 3[N·m]하다가 0.6[sec]에서 0.8[sec]까지 부하토크를 인가하였을 경우의 응답특성이다. 그림 4(a)는 종래의 PI, FNN 제어기 및 적용 FNN 제어기의 속도를 나타내고, 그림 4(b)는  $q$ 축 전류를 나타낸다.

그림 5는 그림 4을 명확하게 분석하기 위하여 확대한 그림이다. 그림 5(a)는 스텝 지령속도를 상승시킬 때 적용 FNN 제어기에서 속도는 종래의 PI 및 FNN 제 어기의 속도에 비해 고속으로 추종하며 오버슈트가 매우 작게 나타난다. 그림 5(b)는 부하토크 변화에 대한 속 도의 추종도 적용 FNN 제어기가 속도 변화도 작고 정 상상태에 고속으로 추종하고 있다.

그림 6은 샘플링 주기를  $T_s=2$ [msec]로 하고 1500[rpm] 으로 운전 중 0.6[sec]에서 부하토크를 3[N·m] 인가한 상태에서 0.7[sec]에서 스텝 지령속도를 1000[rpm]으로 변화하였을 때의 응답특성을 비교한다. 그림 6(a)는 실 제속도, (b)는 추종속도 및 (c)는  $q$ 축 전류를 비교한 결 과이다. 부하토크를 인가하였을 경우에도 적용 FNN 제 어기의 출력이 속도 변화가 적고 정상상태에 빠르게 도 달하며 부하를 인가한 상태에서 지령 속도를 변화시켰을 경우 응답특성이 매우 향상되고 있다.

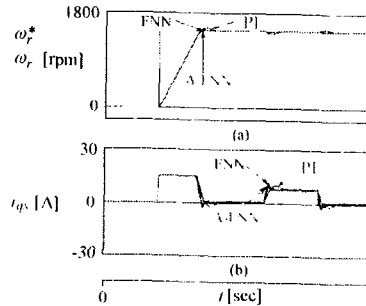


그림 4 PI, FNN 및 적용 FNN 제어기의 응답특성의 비교

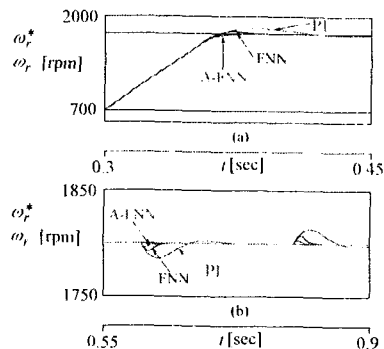


그림 5 PI, FNN 및 적용 FNN 제어기의 응답특성의 비교

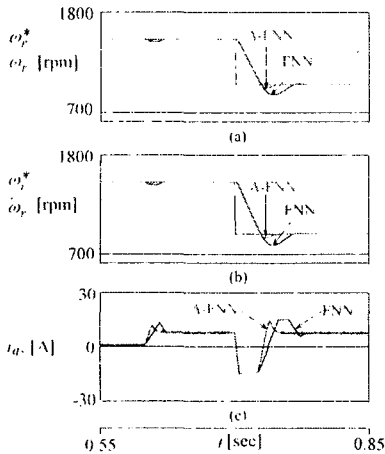


그림 6 부하토크와 스텝 지령속도의 변화에 대한 응답비교 ( $T_s = 2[\text{msec}]$ )

그림 7은 스텝 지령속도를 500[rpm]과 -500[rpm]으로 반복해서 변화시켰을 경우의 적응 FNN 제어기의 응답특성을 나타낸다. 그림 7(a)은 지령속도와 실제속도를 나타내고, 그림 7(b)은 지령속도와 추종속도를 나타낸다. 그림 7(c)은  $q$ 축 전류를 나타내고, 그림 7(d)은 실제 회전각과 추종 회전각을 나타낸다. 스텝 지령속도 변화에 실제 속도와 추종속도는 지령속도에 양호하게 추종하며 실제 회전각과 추종 회전각이 거의 유사하게 나타난다.

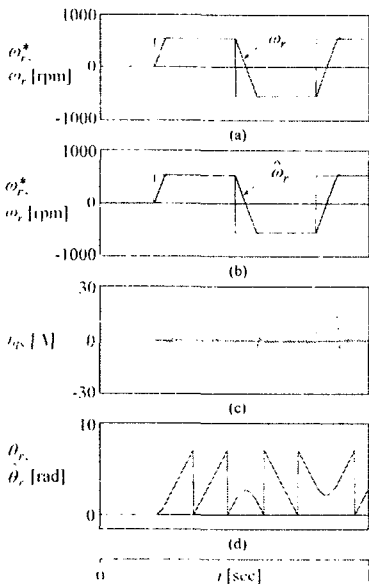


그림 7 스텝 지령속도의 변화에 대한 적응 FNN 제어기의 응답특성 (500[rpm]→-500[rpm])

## 6. 결론

본 연구에서는 적응 NFC와 ANN을 이용한 IPMSM의

속도 추정과 제어를 제시하였다. 적응 NFC를 이용하여 IPMSM의 속도를 제어하였으며 ANN은 IPMSM의 속도를 추정하였다.

적용 NFC와 ANN 제어기는 종래의 PI 및 NFC 보다 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 부하토크를 인가할 경우에도 추정속도는 실제속도에 양호한 추정성능을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 제시한 적응 NFC와 ANN 제어기는 시스템의 응답특성이 양호하게 나타났으며 속도의 추정 및 제어도 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제시한 퍼지-ANN 제어기의 타당성을 입증할 수 있었다.

## [참고 문헌]

- [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] K. S. Narendra and K. Parthasarthy, "Identification and control of dynamical system using neural network," IEEE Trans. Neural Networks, vol. 1, no. 1, pp. 4-27, 1990.
- [4] Cybenko, "Approximations by superposition of a sigmoidal function," Mathematics of Contr., Signals and Syst., vol. 2, pp. 303-314, 1989.
- [5] A. K. Toh, E. P. Nowicki and F. Ashrafzadeh, "A flux estimator for field oriented control of an induction motor using an artificial neural network," IEEE IAS Conf. Rec. Ann. Meet., vol. 1, pp. 585-592, 1994.
- [6] I. J. Leontaritis and S. A. Billings, "Input-output parametric models for nonlinear systems," Int. J. Contr., vol. 41, pp. 303-344, 1985.