

HAI 제어를 이용한 IPMSM의 속도 추정 및 제어

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

Speed Estimation and Control of IPMSM using HAI Control

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

Abstract - Precise control of interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM) over wide speed range is an engineering challenge. 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. The back propagation neural network technique is used to provide a real time adaptive estimation of the motor speed.

1. 서 론

최근 벡터제어는 IPMSM의 고성능을 위한 드라이브 시스템에 광범위하게 적용되고 있다. 아직도 산업현장에서는 일반적으로 PI 제어기를 많이 사용하고 있다. 그러나 PI 제어기는 IPMSM의 비선형 때문에 고성능 제어에서 많은 문제점이 나타나고 있다. 특히 외란, 속도 및 부하 등의 파라미터가 변동할 경우 고성능 및 강인성 제어를 실현하기 어렵다.

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]

최근, 인공 신경회로망의 진가가 인정되어 많은 관심을 가지게 되었으며 함수를 근사화하기 위하여 다양하게 연구되고 있다.[2]-[3] 이러한 방법들은 일반적인 벡터제어 방법과 비교하여 우수한 성능을 얻을 수 있었다. 그러나 자속을 제어할 수 없으므로 포화의 영향이 나타나고 속도센서를 사용하고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 하이브리드 지능제어를 이용한 IPMSM 드라이브의 속도 추정 및 제어를 제시한다. 먼저, PI 제어기에서 나타나는 문제점을 해결하기 위하여 신경회로망과 퍼지제어를 혼합 적용한 NNF(Neural Network Fuzzy)를 설계한다. 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. 추정속도의 타당성을 입증하기 위하여 시스템을 구성하여 제어특성을 분석한다.

2. 시스템 및 하이브리드 지능제어

2.1 드라이브 시스템

본 논문에서는 공간벡터 PWM 인버터에 의해 구동되는 고성능 IPMSM의 벡터제어 시스템을 고려한다. 이러한 시스템 구성은 로봇, 항공기 및 전기자동차 등의 드라이브와 같은 고성능 제어 시스템에 응용된다.

그림 1은 공간벡터 PWM 인버터에 의하여 구동되는 일반적인 IPMSM 드라이브의 벡터제어 시스템을 나타낸다.

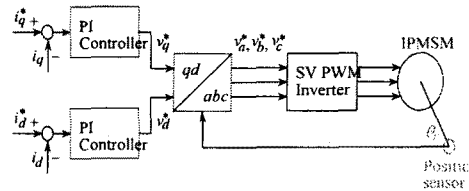


그림 1. IPMSM의 벡터제어 시스템

2.2 하이브리드 지능제어

IPMSM의 속도를 제어하기 위하여 퍼지제어기가 개발되었으며 속도 추정을 위한 ANN이 연구되었다. ANN은 파라미터 변동, 부하변화 및 시스템 외란 등에 강한 특성을 발휘하였다. 이러한 제어를 위한 설계연구는 더욱 더 새로운 방법을 모색하게 되었다. 적응, 퍼지제어, 신경회로망 및 유전자 알고리즘을 상호 혼합하여 각 제어기의 장점을 공유하는 혼합제어기가 유력한 기법으로 평가받을 것으로 예측된다.

그림 2는 하이브리드 지능제어의 연구에 대하여 도식적으로 표현을 해 보았다. 각 제어기들은 화살표 방향으로 상호 공유하여 혼합제어를 형성할 수 있다.

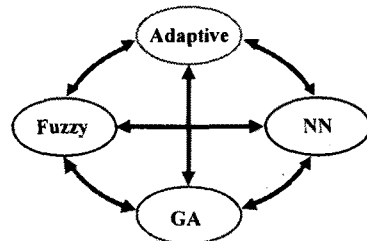


그림 2. 하이브리드 지능제어의 연구

본 논문에서는 적응제어, 신경회로망과 퍼지제어(A-NNF)을 이용하여 IPMSM의 속도를 제어하는데 적용한다. 그리고 ANN을 이용하여 IPMSM의 속도를 추정하는 시스템을 구성한다.

3. NNF 제어

NNF는 신경회로망과 퍼지제어를 혼합 구성하며 강력한 표현의 유연성과 수치 처리능력을 가지고 있다. NNF는 퍼지물의 조건부와 결론부를 클러스터링 방법과 다층 신경회로망으로 구성한다. NNF는 신경회로망과 같은 고도의 적응제어의 능력 및 퍼지제어와 같은 강인성 제어의 장점을 가지게 된다.

그림 3은 NNF의 구성을 나타내며 4층에서 4층 사이에 신경회로망은 퍼지물의 조건부, 4층과 4층 사이의 신경회로망은 퍼지물의 결론부의 구현을 나타낸다. 여기서 두 개의 입력변수는 오차 e 와 오차의 변화분 ce 이고 출력변수는 제어변수 u^* 이다.

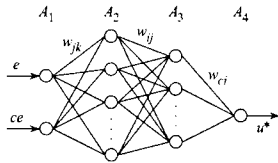


그림 3. NNF 제어기의 구성

4. 적응 NNF 제어기 설계

IPMSM 드라이브는 과도 특성에서 다양한 속도 추정 능력, 부하 및 관성 등 파라미터의 변동에도 고성능 및 강인성이 요구된다. 적응 NNF 제어기는 NNF 제어기에 기준 모델을 설계하여 퍼지추론으로 구현할 수 있는 적응 메카니즘으로 구성한다.

그림 4는 NNF 제어기를 설계하고, 적응 퍼지제어기인 AFC(Adaptive Fuzzy Controller)[4]를 병렬로 연결한다. NNF에서 나타나는 오차를 보상하기 위하여 AFC를 사용하며 AFC는 기준 모델을 고려한 적응 메카니즘을 나타낸다.

NNF 알고리즘에 의한 출력은 $\Delta i_{q1}^*(k)$ 이며 AFC에 의한 출력은 $\Delta i_{q2}^*(k)$ 이다. 이 두 출력을 합하여 적분기를 통해 지령 q 축 전류를 얻는다.

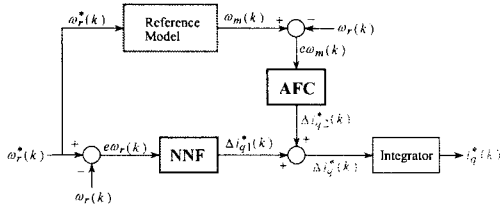


그림 4. 제시한 적응 NNF 제어기의 알고리즘

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.

AFC의 입력은 기준모델의 출력과 실제속도의 오차 ($e\omega_m(k)$)와 오차의 변화분($ce\omega_m(k)$)을 사용한다. 오차와 오차의 변화분은 다음과 같다.

$$e\omega_m(k) = \omega_m(k) - \omega_r(k) \quad (1)$$

$$ce\omega_m(k) = e\omega_m(k) - e\omega_m(k-1) \quad (2)$$

위의 두 입력은 적응 퍼지의 룰 베이스에 의해 지령 q 축 전류에 보상되는 $\Delta i_q^*(k)$ 가 발생된다. 여기서 $\omega_m^*(k)$

는 기준모델에 의한 지령속도이며 $\omega_r(k)$ 는 실제 회전자 속도이다.

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

$$i_q^*(k) = i_q^*(k-1) + [\Delta i_{q1}^*(k) + \Delta i_{q2}^*(k)] \quad (3)$$

5. 시스템 구성

그림 5는 적응 NNF와 ANN 제어기를 이용하여 속도를 추정하고 드라이브 시스템을 제어할 수 있는 블록도를 나타낸다. ANN에 의해 속도를 추정하고 추정속도와 지령속도를 비교하여 오차를 구하고 그 오차는 NNF에 입력한다. NNF에서 지령 q 축 전류를 구한다. 전류제어에 의하여 지령전압을 구한 다음, SV PWM 인버터를 구동시켜 IPMSM을 제어한다.

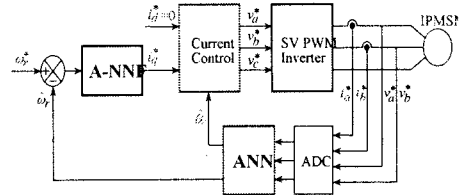


그림 5. 하이브리드 인공지능 제어에 의한 IPMSM의 드라이브 시스템

6. 시스템의 성능결과

본 연구에서 사용한 IPMSM의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. IPMSM의 파라미터

극수	4
전기자 저항 R_s	0.98[Ω]
영구자석 쇠교자속 ϕ_n	0.147[Wb]
정격 주파수	60[Hz]
전기자 최대전류 I_{am}	15[A]
전기자 최대전압 V_{am}	200[V]
d 축 인덕턴스 L_d	9.1[mH]
q 축 인덕턴스 L_q	18.82[mH]
정격 속도	1800[rpm]

그림 6은 PI, NNF 및 적응 NNF(A-NNF) 제어기의 속도와 q 축 전류를 비교한 결과이다. 0.2[sec]에서 스텝 지령속도를 1800[rpm]으로 운전하다가 0.6[sec]에서 0.8[sec]까지 부하토크를 3[N·m]인가하였을 경우의 응답특성이다. 그림 6(a)는 스텝 지령속도를 상승시킬 때 적응 NNF 제어기에서 속도는 종래의 PI 및 NNF 제어기의 속도에 비해 고속으로 추종하며 오버슈트가 매우 작게 나타난다. 그림 6(b)는 부하토크 변화에 대한 속도의 추종도 적응 NNF 제어기가 속도 변화도 작고 정상상태에 고속으로 추종하고 있다.

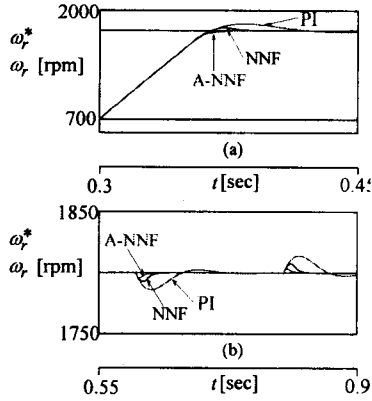


그림 6. PI, NNF 및 적응 NNF 제어기의 응답특성의 비교

그림 7은 무부하 상태로 4상한 운전 중 0.7[sec]에서 부하토크를 3(N·m) 인가한 상태에서 NNF 및 적응 NNF 제어기의 응답특성을 나타낸다. 그림 7(a)는 NNF 제어기의 지령속도, 실제속도 및 추종속도를 나타낸다. 그림 7(b)는 적응 NNF 제어기의 지령속도, 실제속도 및 추종속도를 나타내며 실제속도와 추종속도는 지령속도에 양호하게 추종하고 있다. 그림(c)는 지령속도와 실제속도의 오차를 나타내며 적응 NNF 제어기의 속도오차가 NNF 제어기에 비해 매우 감소하고 있다.

그림 8은 관성을 3배 증가시키고 그림 7과 같은 조건에서 운전하였을 경우의 응답특성을 나타낸다. 관성의 증가에 따라 지령 속도변화에 대한 실제속도는 크게 변화한다. 그러나 적응 NNF 제어기는 NNF 제어기 보다 속도변화의 폭은 감소되고 실제속도가 지령속도에 양호하게 추종하고 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 적응 NNF 제어기가 속도의 변화, 부하변화 및 관성변화 등의 광범위한 운전조건에서 NNF 제어기보다 응답특성이 매우 향상된다.

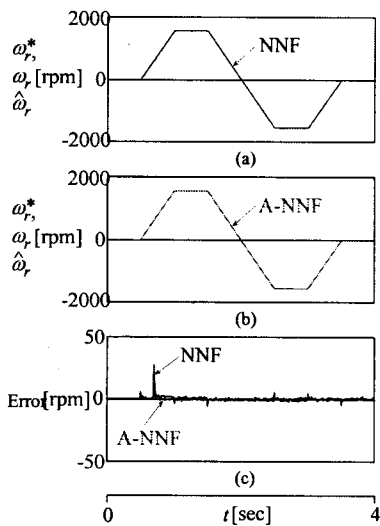


그림 7. 4상한 동작에서 NNF 제어기와 적응 NNF 제어기의 응답비교 ($J = J_n$)

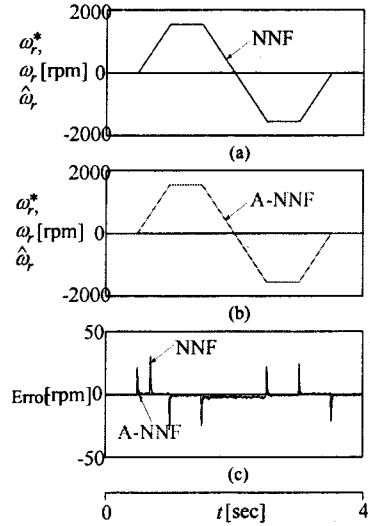


그림 8. 4상한 동작에서 NNF 및 적응 NNF 제어기의 응답비교 ($J = 3J_n$)

7. 결 론

본 연구에서는 적응 NNF와 ANN을 이용한 IPMSM의 속도 추정과 제어를 제시하였다. 적응 NNF를 이용하여 IPMSM의 속도를 제어하였으며 ANN은 IPMSM의 속도를 추정하였다.

적용 NNF와 ANN 제어기는 종래의 PI 및 NNF 보다 성능이 우수한 결과를 얻었으며 고성능 및 강인성 제어를 확인할 수 있었다. ANN을 이용하여 다양한 지령속도의 변화에도 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다. 지령속도를 정·역회전 운전 및 4상한 운전시켰을 경우에도 추정속도는 실제속도에 양호하게 추정하였다. 그리고 부하토크를 인가할 경우에도 추정속도는 실제속도에 양호한 추정성능을 확인할 수 있었다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] H. Kubota and K. Matsuse, "Speed sensorless field oriented control of induction motor with rotor resistance adaptation," IEEE Trans. on IA, vol. 30, no. 5, pp. 1219-1224, 1994.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] D.H. Chung, "Fuzzy control for high performance vector control of PMSM drive system," KIEE, vol. 47, no. 12, pp. 2171-2180, 1998.