

ALM-FNN 및 FLC 제어기에 의한 SynRM 드라이브의 고성능 속도와 전류제어

(High Performance Speed and Current Control of SynRM Drive with
ALM-FNN and FLC Controller)

정병진* · 고재섭 · 최정식 · 정철호 · 김도연 · 정동화

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

Abstract

The widely used control theory based design of PI family controllers fails to perform satisfactorily under parameter variation, nonlinear or load disturbance. In high performance applications, it is useful to automatically extract the complex relation that represent the drive behaviour. The use of learning through example algorithms can be a powerful tool for automatic modelling variable speed drives. They can automatically extract a functional relationship representative of the drive behavior. These methods present some advantages over the classical ones since they do not rely on the precise knowledge of mathematical models and parameters.

The paper proposes high performance speed and current control of synchronous reluctance motor(SynRM) drive using adaptive learning mechanism-fuzzy neural network (ALM-FNN) and fuzzy logic control(FLC) controller. The proposed controller is developed to ensure accurate speed and current control of SynRM drive under system disturbances and estimation of speed using artificial neural network(ANN) controller. Also, this paper proposes the analysis results to verify the effectiveness of the ALM-FNN and ANN controller.

Key Word : SynRM drive, ALM-FNN, ANN, Fuzzy Control

1. 서 론

최근, SynRM(Synchronous Reluctance Motor)은 간단하고 강인한 구조로 설계되어 있으며 슬립링과 영구 자석이 없고 고효율과 저렴한 가격 때문에 고성능 드라이브의 적용에 각광을 받고 있다. 전동기 설계 및 전력 전자 분야의 급속한 발전으로 SynRM의 드라이브와 제어에 관한 연구에 한층 박차를 가하게 되었다[1].

벡터제어를 이용한 SynRM 드라이브를 제어하기 위하여 아직도 산업현장에서는 일반적으로 고정 이득을 가진 PI 제어를 많이 사용하고 있다[2]. 이는 간단하게 구현할 수 있고 파라미터와 시스템의 응답설정 사이에 존재하는 관계가 명확하기 때문이다. 그러나 이 제어기는 일반적으로 비선형과 불확실한 모델에 의해 복잡하고 시변이며 비선형일 경우에는 문제점이 나타난다[3]. 특히 부하 외란, 속도 및 토크 등의 파라미터가 변동할 경우 고성능 및 강인성 제어를 실현하기 어렵다.

제어기의 파라미터는 자동적으로 적용되어 제어가 가능해야 한다. 이러한 문제는 다양한 적응제어 기법을 이용하여 해결하였다. 이 기법은 MRAC(Model Reference Adaptive Control)[4] 및 STPIC(Self Tuning PI Control)[5] 등이다. 이러한 제어기의 설계는 시스템의 정확한 수학

적인 모델링에 의존한다. 그러나 부하 변동, 포화, 온도 변화 및 시스템 외란 등 파라미터의 변동 등에 의하여 시스템의 정확한 수학적인 모델링을 개발하기가 어려운 경우가 있다. 산업 프로세서의 적용에는 부하 외란, 파라미터 변동 및 어떤 모델의 불확실성 등에 대하여 고성능과 강인성을 발휘할 수 있는 기법이 필요하다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 FNN(Fuzzy-Neural Network)[6] 및 하이브리드 인공지능제어[7] 등 다양한 연구가 활발하게 진행되었다. 이러한 연구들은 대부분 속도제어에 중점을 두고 연구 되었다. SynRM의 동기 기준축에서 전류제어기의 PI 이득은 매우 높다. 높은 이득은 노이즈 민감도가 높고 토크리플이 증가하게 된다. 그리고 전동기에서 공급되는 인버터의 고유의 데드타임 때문에 불안정을 유발시킨다[8]. 전류제어기의 높은 이득은 전류응답을 악화시켜 드라이브의 동적 성능의 저하를 초래한다. 따라서 전류제어기에도 고성능 제어가 반드시 필요하게 되었다.

본 논문에서는 인공지능제어 기법인 ALM-FNN(Adaptive Learning Mechanism -FNN)을 설계하여 SynRM 드라이브의 고성능 및 강인성 제어를 구현한다. 이 제어기는 속도제어에 적용하며 FLC(Fuzzy Logic Control)는 전류제어에 적용한다. 그리고 ANN을 이용하여 SynRM 드라이브의 속도 추정기법을 제시한다. 2

층 구조를 가진 신경회로망에 BPA(Back Propagation Algorithm)를 적용하여 SynRM 드라이브의 속도를 추정한다. 본 논문에서 제시한 ALM-FNN과 FLC 및 ANN 제어기의 제어특성과 추정성능을 분석하고 그 결과를 제시한다.

2. SynRM 드라이브 시스템

SynRM의 이상적인 등가회로는 그림 1과 같다.

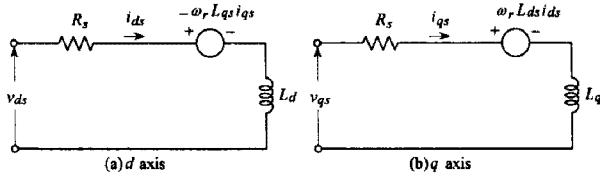


그림 1. SynRM의 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of SynRM

이 등가회로에 의한 전압방정식은 다음과 같다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_r L_q i_{qs} \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{d}{dt} i_{qs} + \omega_r L_d i_{ds} \quad (2)$$

SynRM의 토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3P}{2} (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs} \quad (3)$$

식 (3)을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3P}{2} L_d (1 - L_q / L_d) i_{ds} i_{qs} \quad (4)$$

그림 2는 벡터제어에 의해 제어되는 SynRM 드라이브 시스템의 블록도를 나타낸다. 이 시스템은 두 개의 제어루프로 구성한다. 하나는 속도제어기이며 다른 하나는 전류제어기이다. 속도제어기는 속도 오차를 통하여 지령 q 축 전류를 발생시킨다. 그리고 전류제어기는 속도제어기의 출력을 통하여 얻은 지령 전류와 실제 전류 사이의 오차 전류에 의해 지령 q 축 전압을 발생시킨다. SV-PWM은 전동기의 실제 전압을 발생시키기 위하여 3상 인버터의 전력용 반도체소자를 점호하여 PWM 신호를 발생시킨다. 그리고 속도와 위치의 추정은 ANN에 의하여 수행한다.

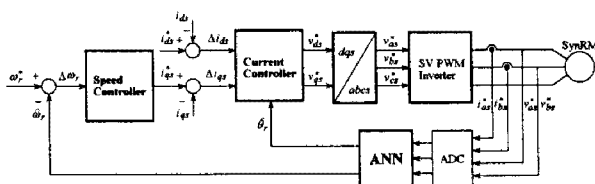
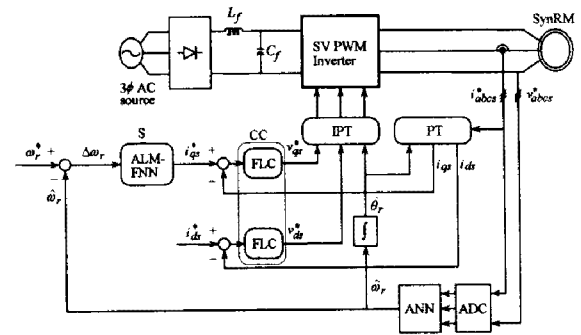


그림 2. 벡터제어에 의한 SynRM 드라이브 시스템의 블록도
Fig. 2. Block diagram of SynRM drive system with vector control

3. ALM-FNN 제어기

ALM-FNN에 제어되는 SynRM의 벡터제어 시스템은 그림 3과 같다. ALM-FNN은 학습 메카니즘을 이용한 퍼지와 신경회로망으로 구성한다. 속도제어기는 ALM-FNN으로 제어하고 전류제어기는 FLC로 제어하며 ANN으로 속도를 추정한다[9]. 인공지능제어를 이용하여 SynRM 드라이브의 속도 제어 및 추정에 대한 시스템을 나타낸다. 그림 3에 대한 약자의 표현은 다음과 같다.



SV : Space Vector	FLC : Fuzzy Logic Controller
PWM : Pulse Width Modulation	SynRM : Synchronous Reluctance Motor
PT : Park Transformation	SC : Speed Control
IPT : Inverse PT	CC : Current Control
ALM-FNN : Adaptive Learning Mechanism-Fuzzy Neural Network	ANN : Artificial Neural Network
	ADC : Analog Digital Conversion

그림 3 ALM-FNN에 의한 SynRM의 벡터제어 시스템
Fig. 3 Vector control system of SynRM with ALM-FNN

SynRM 드라이브의 속도제어를 위한 ALM-FNN 제어기는 그림 4와 같다. 이 제어기를 속도제어기와 대체하여 사용한다. FNN 제어기는 드라이브 시스템의 동작을 관측하고 요구되는 지령치로 실제 성능을 비교한다. 학습 메카니즘은 요구되는 시스템 동작으로 거의 일치시키기 위하여 FNN 제어기를 수정한다. FNN의 입력은 ω_r 오차 e 및 오차의 변화분 ce 이다. FNN의 출력 Δi_{qs}^* 는 중심 비퍼지화 방법에 의해 계산한다. Δi_{qs}^* 를 적분하여 i_{qs}^* 를 얻는다.

학습 메카니즘의 설계는 시스템 응답의 각 동적 측면이 이를 그룹에 의해 주로 영향을 받는다는 사실에 기초하여 설정한다. 바로 평가되는 설정 룰에서 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.

$$em(kT) = x(kT) - \hat{x}(kT) \quad (5)$$

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

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.

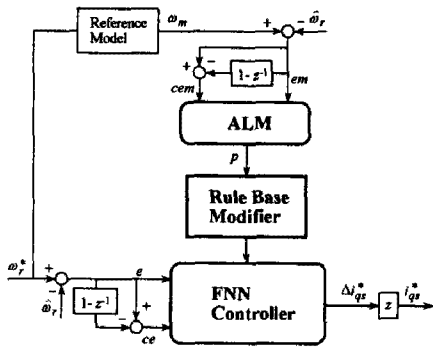


그림 4 속도제어를 위한 ALM-FNN 제어기
Fig. 4 ALM-FNN controller with speed control

퍼지 역모델은 오차 $em(kT)$ 를 사상하여 프로세서의 입력 $p(kT)$ 를 변화시키며 $em(kT)$ 를 영이 되도록 강제화 시킨다. 역모델의 입력은 식(5) 및 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 의해 FNN 제어기의 지식베이스를 변화시킨다. 이 변화는 FNN 제어기에서 출력의 멤버쉽 함수의 중앙을 수정하여 구현한다.

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

여기서 첨자 i 는 역모델에 의해 동작하는 i 번째 멤버쉽 함수를 나타낸다. 여기서 각 부분 변화는 각 시간에서 이루어진다. 이 방법에서 FNN 제어기는 요구되는 $i_q^*(kT)$ 를 발생하기 위하여 강제화 시킨다. 이는 기준모델과 같이 동작시키기 위하여 전동기를 강제화 시킨다.

4. 시스템의 성능결과

그림 5(가)는 0.2[sec]에 1800[rpm]으로 운전 중, 0.6[sec]에서 0.8[sec]까지 부하토크를 $6[N \cdot m]$ 인가하였을 경우의 응답특성을 나타낸다. 그림 5(가-a)는 지령속도와 추정속도, 그림 5(가-b)는 d 축 전류, 그림 5(가-c)는 q 축 전류 및 그림 5(가-d)는 a 상 전류를 나타낸다. 그림 5(나)는 응답특성을 명확하게 검토하기 위하여 그림 5(가)의 과도응답 부분을 확대한 것으로 그림 5(나

-a)는 속도상승에 따른 응답특성, 그림 5(나-b)는 부하인가에 따른 응답특성 나타낸다. 본 논문에서 제시한 ALM-FNN 제어기는 FNN 제어기 및 PI 제어기에 비하여 오버슈트가 작고 상승시간 및 안정화 시간도 짧게 나타남을 알 수 있다.

그림 6은 파라미터 변화에 대한 4상한 운전의 응답특성을 나타낸 것으로서 그림 6(가)은 전기자 저항을 3배 $R_s = 3R_s$ 로 증가시켰고, 그림 6(나)은 관성을 3배 $J_m = 3J_m$ 로 증가시켰을 경우의 응답특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 ALM-FNN 제어기는 FNN 및 PI 제어기에 비해 속도오차가 적게 나타남을 알 수 있으며 이로써 파라미터 변동에서도 제시한 제어기의 양호한 응답특성을 확인할 수 있다.

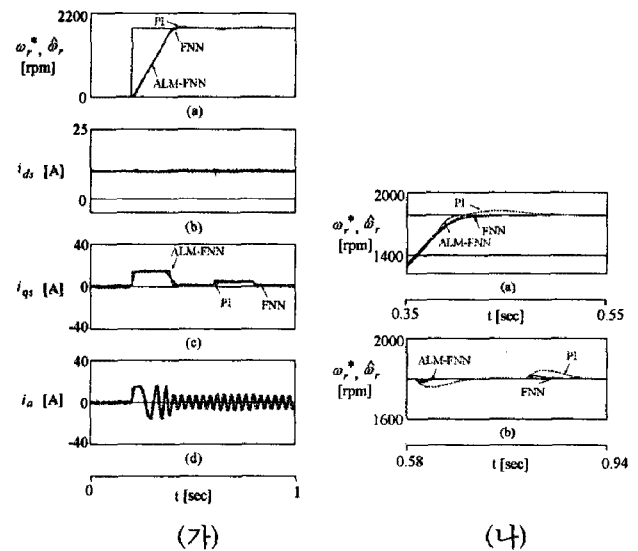


그림 5. 지령속도와 부하토크 변화에 대한 응답특성
Fig. 5. Response characteristic with command speed and load torque variation

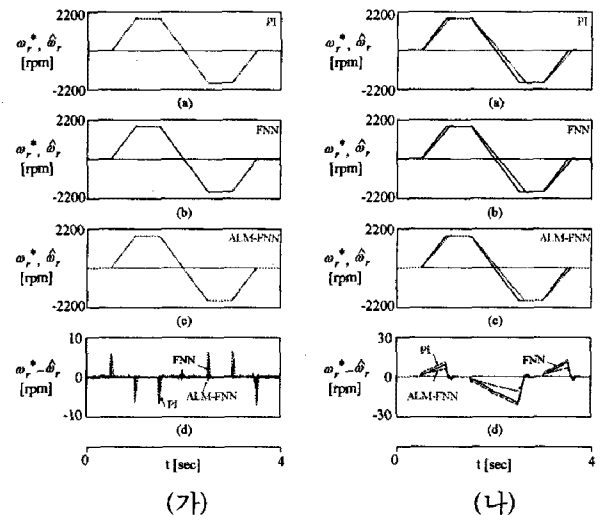


그림 6. 파라미터 변화에 대한 4상한 운전 응답특성
Fig. 6. Response characteristic of quadrant drive with parameter variation

그림 7은 부하변화에 대한 전류제어 응답특성을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 7(가)는 PI 제어기의 응답특성, 그림 7(나) FLC 제어기의 응답특성을 나타낸다. 또한 각 그림의 (a)는 부하변화에 대한 속도응답, (b)는 a상 지령전류와 실제전류, (c)는 전류오차 및 (d)는 a상의 스위칭 시간을 나타낸다. 부하변화에 대한 과도응답 부분에서 FLC 제어기는 PI 제어기에 비해 오버슈트 및 안정화 시간이 짧으며, 전류 오차가 작게 나타나고 있다.

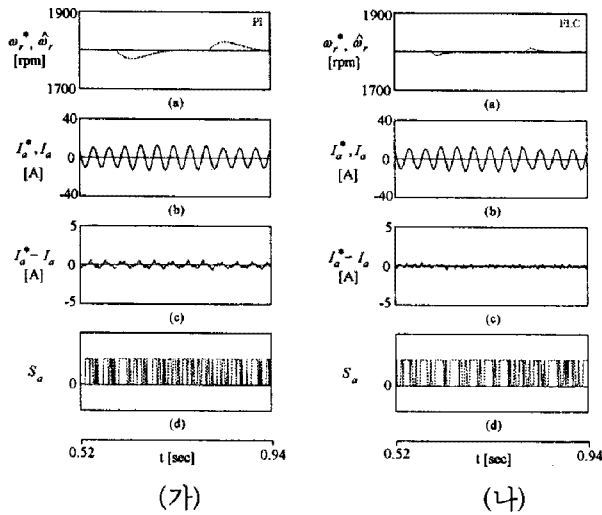


그림 7. 부하변화에 대한 전류제어 응답특성 비교
Fig. 7. response characteristic comparison of current control with load torque variation

그림 8은 ANN에 의한 속도추정에 대한 응답특성을 나타낸다. 지령속도를 1000[rpm]→1800[rpm]→200[rpm]으로 다양하게 변화시켰을 경우 응답특성이며, 그림 8(a)는 지령속도와 실제속도, 그림 8(b)는 지령속도와 추정속도, 그림 8(c)는 q축 전류, 그림 8(d)는 실제속도와 추정속도 오차를 나타낸다. 그림 8(d)에서 속도오차가 1% 내로 추정성능이 매우 우수하게 나타났다.

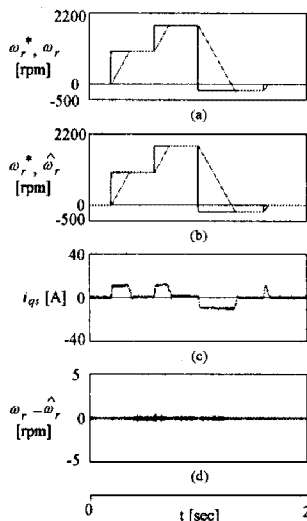


그림 8. 속도추정에 대한 응답특성
Fig. 8. Response characteristic with speed estimation

5. 결론

본 논문은 ALM-FNN 및 FLC 제어기에 의한 SynRM 드라이브의 고성능 속도와 전류제어에 대한 것으로서 정상상태, 과도상태 및 파라미터의 변동에 대한 속도응답과 전류제어 및 속도추정 등의 응답특성을 분석하였다. 속도 및 부하토크 변화에서 ALM-FNN 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 FLC 제어기는 SynRM 드라이브의 전류제어기에 적용되어 종래의 PI 제어기에 비해 전류오차가 작게 나타남을 알 수 있었다. 속도 변화에 대한 ANN의 속도 추정성능도 속도 오차가 1% 이내로 매우 우수한 추정성능을 나타내었다. 따라서 본 논문에서 제시한 ALM-FNN 및 FLC 제어기는 강인성과 고성능의 응답특성을 얻을 수 있었고 ANN에 의한 추정 성능도 만족할만한 결과를 얻었다. 이로써 본 논문의 타당성을 입증할 수 있었다.

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

참고 문헌

- [1] T. H. Liu and H. H. Hsu, "Adaptive controller design for a synchronous reluctance motor drive system with direct torque control," IET-EPA, vol. 1, no. 5, pp. 815-824, 2007.
- [2] Z. Ibrahim and E. Levi, "Comparative analysis of fuzzy logic and PI speed control in high performance AC drives using experimental approach," Proc. of IEEE IAS'2000, Rome, Italy, CD-ROM paper 46-3, 2000.
- [3] J. C. Lee and D. H. Chung, "MRAC fuzzy control for high performance of induction motor drive," The Trans. of KIEP, vol. 7, no. 3, pp. 215-223, 2002.
- [4] S. Maiti, C. Chakraborty, Y. Hori and M. C. Ta, "Model reference adaptive controller-based rotor resistance and speed estimation techniques for vector controlled induction motor drive utilizing reactive power," IEEE Transactions on IE, vol. 55, no. 2, pp. 594-601, 2008.
- [5] S. Yaacob and F. A. Mohamed, "Real time self tuning controller for induction motor based on PI method," Annual Conference Proceedings of the SICE, pp. 909-914, 1999.
- [6] 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.
- [7] J. S. Ko, J. S. Choi, J. C. 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.
- [8] F. J. Lin and C. M. Liaw, "Control of indirect field oriented induction motor drives considering the effects of dead-time and parameter variation," IEEE Trans. on IE, vol. 40, no. 5, pp. 486-495, 1993.
- [9] J. S. Choi, J. S. Ko, and D. H. Chung, "Efficiency Optimization Control of SynRM with ANN Speed Estimation," KIEE, vol. 55P, no. 3, pp. 117-122, 2006.