

## 신경회로망과 슬라이딩 모드제어를 이용한 IPM 제어

김재훈, 윤태성, 박승규  
 창원대학교 전기공학과 제어 및 전력전자 센터

### IPM control using by neural network and sliding mode control

Jae Hoon Kim, Tae Sung Yoon, Seung Kyu Park  
 Dept. of Electrical Engineering Changwon National University

**Abstract** - IPM(Interior Permanent Magnet) Machine의 전류 제어는 자기저항에 의존하는 토크특성 때문에 SPM(Surface Permanent Magnet) Machine보다 복잡하다. 고성능 토크제어를 위해서는 d축 전류와 q축 전류의 동특성간의 상태 decoupling이 요구된다. 그러나 전류의 상태 동특성이 coupling된 인덕턴스의 변화(온도, 파라미터들의 부정확한 측정값)는 상태 decoupling을 어렵게 한다. 그래서 이러한 변화와 각각의 전류가 독립적으로 제어될 수 있게 여러 decoupling 방법들에 초점이 맞춰지고 있다. 본 연구는 외란에 강하고, 특히 인덕턴스의 변화와 상관없는 이상적인 토크제어를 하기 위해 신경회로망을 이용하여 슬라이딩 평면(sliding surface)을 구성하고, SMC(Sliding Mode Control)를 이용하여 상태 cross-coupling의 decoupling을 위한 새로운 접근을 제안한다. 이 방법은 PI제어 성능과 SMC의 강인성을 알고리즘을 이용하여 결합한 것이라고 볼 수도 있다.

#### 1. 서 론

IPM Machine의 특성은 첫째, 고속 동작에 대해 회전자기 기계적으로 강하고, 둘째, 각각의 d-축과 q-축의 인덕턴스에 부가적으로 토크부여가 가능하다. IPM과 SPM은 같은 수학적 표현을 갖지만 위의 두 번째의 특성 때문에 제어문제에서는 매우 상이하게 나타난다. SPM에서는 zero d-축 전류는 nonzero q-축 전류를 이용하여 최대토크를 생성하는 것이 가능하고, 이는 상태 cross-coupling을 상쇄하고, 제어가 간편해진다. 그러나 IPM에서 최대토크는 오로지 주어진 LUT(Look Up Table)대로 제어되어질 때만 생성되므로 상태 cross-coupling의 어려움은 피할 수 없다. IPM Machine의 편리한 제어를 위해서는 decoupling과 정확한 파라미터가 필수 조건이지만 불행히도 고정자 저항과 영구자석 자속은 온도에 의해 변화한다 [3]. 게다가 자기포화는 공극자속밀도를 제한하고 IPM의 인덕턴스 변화를 야기한다. 그래서 인덕턴스의 파라미터 추정에는 매우 필요로 하는 부분이다 [4]. 여러 가지 파라미터 추정방법들이 전기기기 제어에서 개발되어지고 있지만 기존의 접근방법은 상태 decoupling을 이용하지 않았고, 시스템에서 발생하는 외란 또한 무시할 만큼의 결과를 얻기 힘들다. 그리고 고성능 제어기는 시스템이 복잡하고 이해하기에 힘들다. PI제어기는 보통 교류기에 사용된다. 그러나 이 제어 방법은 상태 cross-coupling 때문에 IPM에서 제대로 제어될 수 없다 [5][6]. 실시간 파라미터 추정방법은 측정 인덕턴스의 피드포워드 항처럼 사전정보가 필요하고, 안정화를 위한 보상이 없다. 이 논문의 목적은 decoupling을 위해 외란에 강하고, 불확실한 파라미터를 가지고도 원하는 출력을 얻기 위해 신경회로망과 슬라이딩 모드 제어를 기반으로 새로운 전류 제어기를 제안하는 것이다. 기본 제어기는 PI제어기에 신경회로망을 이용하여 슬라이딩 평면을 구성한 슬라이딩 모드 제어 입력 항을 추가한다. 슬라이딩 모드 제어 입력은 상태 decoupling된 모델로부터 Lyapunov 안정화를 이용하여 유도하였다.

#### 2. 본 론

**2.1 IPM Machine의 모델링과 상태cross-coupling의 decoupling**  
 IPM Machine은 식(1)과 같이 모델링될 수 있다.

$$\begin{aligned} L_q \frac{di_q}{dt} &= -R_a i_q - L_d \omega i_d - K_e \omega + V_q \\ L_d \frac{di_d}{dt} &= -R_a i_d + L_q \omega i_q + V_d \\ J \frac{d\omega}{dt} &= JK_f i_q - B\omega - T_L \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $L_q$ 는 전체 q-축 인덕턴스,  $L_d$ 는 전체 d-축 인덕턴스,  $K_e$ 는 역기전력상수,  $i_q, i_d$ 는 q-축과 d-축 각각의 전류,  $L\omega i_d, L\omega i_q$ 는 cross-coupling 항이다. 전형적인 IPM Machine은 SPM Machine과는 다른 Fig. 1 같은 최대토크-전류 특성을 가진다.

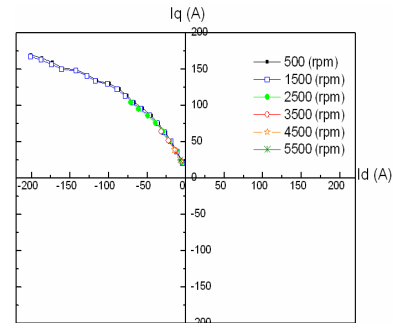


Fig. 1 IPM의 전형적인 최대 전류-토크 특성곡선

decoupling의 제어성을 결정짓는 중요한 요소이고, 파라미터  $L_d, L_q$ 의 정밀도에 의존한다.

#### 2.1 뉴럴 네트워크를 이용한 슬라이딩 모드 제어

모든 cross-coupling이 없는 가정 하에 q-축 전류 제어 시스템을 Fig. 2와 같은 블록선도로 모델링할 수 있다.

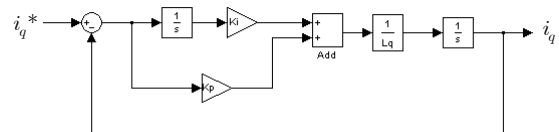


Fig. 2 최적상태의 q-축 전류 제어 시스템

Fig. 2로부터 식(2)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= e \\ L_q \dot{e} &= K_1 x_1 + K_p e \end{aligned} \quad (2)$$

위 식을 식(3)으로 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} x_1 &= e = x_2 \\ \dot{e} &= -\frac{K_1}{L_q} x_1 - \frac{K_p}{L_q} e + \frac{1}{L_q} u \end{aligned} \quad (3)$$

슬라이딩 모드 제어를 위의 시스템에 바로 적용시킬 수 있지만 일반적인 슬라이딩 모드 제어는 위상 도달 기간 동안 과도 응답을 보장하지 못한다. 이러한 문제들을 피하고, PI제어기의 성능을 유지하기 위해 일반적인 방법으로는 보통의 선형 시스템을 기반으로 가상 상태(virtual state)를 정의하고, 선택되어진 가상 상태를 토대로 슬라이딩 평면을 구성한다. 하지만 본 연구에서는

가상 상태 대신 신경회로망을 이용하여 슬라이딩 평면을 구성하는 방법으로 불확실한 파라미터 값과 시스템에서 발생하는 외란에 둔감한 견실한 제어를 설계한다.

## 2.2 뉴럴 네트워크의 BP알고리즘 이용한 슬라이딩 평면 구성

신경회로망의 사용은 인덕턴스의 영향을 받지 않았을 때의 전류 제어의 동특성을 유지할 수 있도록 슬라이딩 모드제어를 구성하는데 있어서 슬라이딩 평면을 구성하는데 그 목적이 있다. 신경회로망은 함수 추정처럼 통계적 학습이론의 하나이다 [6]. 일반적으로 역전파 알고리즘과 다층 신경회로망으로 신경망회로를 구성한다. 최적상태사이의 관계를 근사화하기 위한 2층 신경망회로는 Fig. 3처럼 생각할 수 있다.

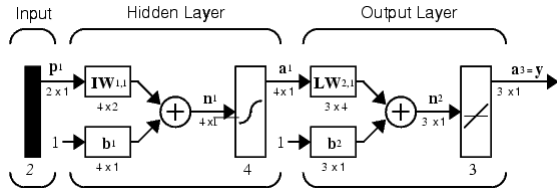


Fig. 3 Two-layer networks

위 Fig. 3의 입력과 출력사이의 관계를 식 (4)처럼 표현할 수 있다

$$a_1 = \text{logsig} \sum_{n=1}^k (IW_{1,1} \times p_1 + b_1) \quad (4)$$

$$a_2 = \text{purelin} \sum_{n=1}^k (LW_{2,1} \times a_1 + b_2)$$

$$y = \sum_{n=1}^k \left( \frac{LW_{2,1}}{1 + \exp^{-(IW_{1,1} \times p_1 + b_1)}} + b_2 \right)$$

여기서 k는 뉴런의 수이다. 위 식(4)를 기반으로 하여 슬라이딩 평면을 구성하면 다음 식(5)와 같다.

$$s = x_2 - \sum_{n=1}^k \left( \frac{LW_{2,1}}{1 + \exp^{-(IW_{1,1} \times x_1 + b_1)}} + b_2 \right) \quad (6)$$

## 2.3 슬라이딩 모드 제어입력의 유도

슬라이딩 모드 도달 조건은 식 (7)과 같다.

$$\dot{s}s < 0 \quad (7)$$

슬라이딩모드에 도달하도록 하는 입력의 유도과정은 식(8)과 같다.

$$\dot{s} = \dot{x}_2 - \sum_{n=1}^k \left( \frac{LW_{2,1}}{1 + e^{-(IW_{1,1} \times x_1 + b_1)}} \right) = -2x_2(t) + u(t) + h(t) - P(t) - x_1(t) + u(t) + h(t) \quad (8)$$

여기서  $P = \sum_{n=1}^k \frac{LW_{2,1}}{1 + e^{-(IW_{1,1} \times x_1 + b_1)}}$  이다. 그리고 식(8)에서 슬라이딩 모드 제어입력이 얻어진다.

$$u(t) = \frac{1}{1-P} (-Px_1(t) + 2x_2(t) - 2.16 \cdot \text{sign}(s)) \quad (9)$$

## 3. 시뮬레이션

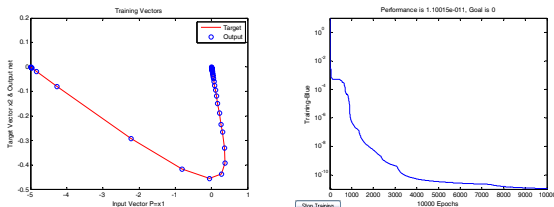


Fig. 4  $x_1$ 와  $e$ 의 관계 학습 및 신경회로망의 훈련

Fig. 6의 파라미터를 가지고 역전파 알고리즘을 이용하여, 오차  $e$ 와 상태 값  $x_1$ 의 관계를 학습시킨 뒤 식(6)과 같이 슬라이딩 평면을 구성하였다. 그리고 여기서 이용한 뉴런 수는 11개이고, 훈련횟수는 5000회이다. Fig. 4에서 목표 함수를 근사한 모습과 근사하는 동안 훈련되는 과정을 그래프로 확인할 수 있다.

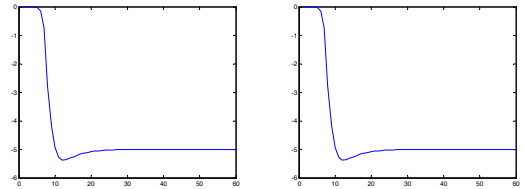


Fig. 5 최적상태와 cross-coupling가 있을 때의 제어기 출력

슬라이딩 모드제어 입력을 유도한 뒤, Fig. 5와 같이 최적 상태 때의 출력과 cross-coupling이 포함되었을 때의 출력을 시뮬레이션으로 비교한 결과 일치함을 확인할 수 있었고, 위 결과를 바탕으로 외란 및 불확실한 인덕턴스의 변화에 대해 견실한 제어를 설계할 수 있는 가능성을 볼 수 있었다.

Parameter	Value
Max. Torque	7.66 Nm
Max. Speed	6200rpm
R	1.45
Lq	11.04mH
Ld	3.74mH
pm	0.0858Wb
J	99.6kg.m
Poles	4

Fig. 6 IPM의 파라미터

## 3. 결 론

본 논문에서는 IPM의 제어에 있어서 외란과 불확실한 decoupling 항을 처리하기 위하여 신경회로망과 슬라이딩 모드 제어를 기반으로 새로운 전류 제어를 제안하였다. d-축 전류와 q-축 전류의 기본적인 독립제어기는 PI제어기이며 외란이나 불확실성이 존재하지 않는 경우의 PI제어 동특성을 슬라이딩평면이 갖도록 신경회로망을 이용하였다.

## [참 고 문 헌]

- [1] S.R. MacMinn, T.M. Jahns, "Control Techniques for Improved High-Speed Performance of Interior PM Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. IA-27, pp. 997-1004, Sep./Oct. 1991.
- [2] L. Harnefors and H.P. Nee, "Model-based control of AC machines using the internal model control method," IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. IA-34, pp. 133-141, Jan. 1998.
- [3] Hyunbae Kim, R.D. Lorenz, "Improved Current Regulators for IPM Machine Drives Using On-Line Parameter Estimation," Proc. of IEEE IAS Annual Meeting, Pittsburgh, Oct 11-19, 2002.
- [4] Hyunbae Kim, Jason Hartwig, and Robert D Lorenz, "Using On-Line Parameter Estimation to Improve Efficiency of IPM Machine Drives," Proc. of the IEEE PESC Conference, Queensland, Australia, June 23-27, 2002.
- [5] S. K. Park, H. G. Ahn, "Robust controller design with novel sliding surface," IEEProceeding Control Theory Applications, vol.146, no.3, pp.242-246, 1999
- [6] SeungKyu Park, "Sliding mode decoupling for IPM machine"
- [7] 林相德 朴勝燁 全寅孝 崔重喙, "온라인 동조 PI 제어기법을 이용한 영구자석형 동기전동기의 속도제어기 설계", Vol.1, No.1, 1999
- [8] 김영일, "서포트 벡터 학습을 이용한 함수 근사와 퍼지 LQRQL 제어기 설계에 관한 연구", 학위논문(석사)- 고려대학교 대학원: 제어계측공학과 메카트로닉스 전공, 2003.
- [9] 홍경수 이근복, "회귀신경망을 이용한 슬라이딩 모드 제어", 추계학술대회논문집, Vol.2000, No.-, 2000
- [10] 김성근 박건우 고태연, "슬라이딩 평면을 이용한 I-PD 제어기의 구성", 産業技術研究誌, Vol.15, No.-, 2001
- [11] 全寅孝, "신경망 컴퓨터에 의한 로봇 조작기 제어에 관한 연구", Vol.15, No.-, 1995