

슬라이딩모드 상태디커플링을 이용한 IPMSM모터의 제어에 관한 연구

김태원*, 박승규, 윤태성, 안호균,
 창원대학교 전기공학과

Sliding Mode State Decoupling for IPM Machine Control

Tae Won Kim*, Seung Kyu Park, Ho Kyun Ahn, Tae Sung Yoon
 Dept. of Electrical Eng. Changwon National Univ.

Abstract - 영구자석 매입형 동기전동기(IPM)의 전류제어는 표면부착형 동기전동기(SPM)보다 더 복잡하다. 그 이유는 전류에 대한 최대토크특성 때문이며 고성능 토크 제어를 위해서는 d-전류와 q-전류를 독립적으로 제어할 수 있는 방법이 필요하다. 그러나 전류들간의 상태디커플링 때문에 독립적으로 제어하기가 어려우므로 상태 디커플링이 필요하다. 상태디커플링은 인덕턴스에 의해 생기며 인덕턴스의 변화 때문에 상태디커플링이 쉽게 이루어지지 않는다. 그러므로 인덕턴스의 불확실성에 대처할 수 있는 디커플링 방법의 개발을 바탕으로한 전류들의 독립적인 제어가 필요하다. 본 논문은 슬라이딩 모드제어기법을 이용하여 디커플링할 수 있는 방법을 제안하기로 한다. 기본적인 제어방법은 PI제어이며 슬라이딩모드를 이용하여 PI제어의 성능을 향상시키는 접근방법으로 도 생각할 수 있다.

1. 서 론

교류전동기를 고정좌표계에서 회전좌표계로 변환하면 원하지 않는 상태디커플링이 나타난다.[1-4] 그러므로 영구자석형 동기전동기는 전류들간의 상태디커플링이 존재하는 모델링식으로 표현된다. 영구자석형 동기전동기에는 두 가지 종류가 있다. 하나는 표면부착형(SPM)이고 다른 하나는 영구자석이 로터에 매입된 구조인 매입형 동기전동기(IPM)이다. SPM과 IPM은 같은 구조의 모델링식으로 표현되나 제어문제에 있어서는 매우 다르다. SPM에서는 d축 전류가 영이될 때 최대토크를 얻을 수 있기 때문에 d축전류를 영으로 제어하며 이 경우 커플링항이 소거되어 선형화된 모델을 얻을 수 있게되므로 제어가 용이하다. 그러나 IPM에서 최대토크를 얻기 위해서는 d축 전류도 영이 아닌 값으로 제어를 해야만 최대토크를 얻을 수 있다. 이 경우 상태디커플링이 존재하는 비선형시스템의 두 개의 출력을 독립적으로 제어한다. 실제적으로 적용시키기 위해 제일 무난한 제어방법은 상태디커플링을 사용하는 것으로 일단 두 전류의 동특성이 디커플링되면 쉽게 독립적으로 제어하는 것이 가능하다. 그러나 상태디커플링을 제공하는 인덕턴스의 값이 모터의 전류변화에 따라 변화함으로 정확한 디커플링이 쉽지 않음을 알 수 있다. 이에 대한 연구로 파라미터를 추정하는 방법들이 사용되어 왔는데[5][6] 대부분의 연구들은 디커플링 방법이 아닌 전체제동에 대한 다입력제어 방식으로 접근하였고 최근에 상태 디커플링을 행한 후에 파라미터 불확실성으로 인하여 존재하는 상태 디커플링을 처리하기 위한 파라미터추정 방법이 도입되었다[7][8]. 본 연구에서는 IPM 전동기의 전류제어에 있어서 각 전류의 독립적인 제어를 위하여 상태 디커플링을 행한 후에 파라미터 불확실성으로 인하여 미처 처리되지 못한 커플링항을 슬라이딩모드제어기를 적용함으로써 해결한다. 적용되는 슬라이딩모드제어기는 가상상태를 포함하는 슬라이딩모드제어 방법으로 전류의 동특성을 모든 시간에 걸쳐 제

어할 수 있는 장점을 가지고 있는 방법이다[9]. 본 논문에서의 제어방법은 PI제어에 기반을 두고 있으며 인덕턴스값의 불확실성으로 인한 불완전한 상태디커플링 때문에 PI제어기의 성능이 저하되는 것을 슬라이딩모드제어가 막아주는 역할을 하고 있다. 실제 제어시스템의 구성에 있어서도 일단 PI제어기로 제어를 행한 다음에 추가적으로 슬라이딩모드제어를 추가시켜주는 형태로 구성할 수 있기 때문에 상당히 실제적이라고 할 수 있다.

2. 문제설정

IPM 전동기의 모델링식은 다음과 같다.

$$L_q \frac{di_q}{dt} = -R_q i_q - L_d \omega i_d - K_e \omega + V_q$$

$$L_d \frac{di_d}{dt} = L_q \omega i_q - R_d i_d + V_d$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = JK_d i_q - B\omega - T_L$$

여기서 L_q 는 전체 인덕턴스이고 L_d 는 d-축 인덕턴스, K_e 는 역기전력 상수, i_q , i_d 들은 각각 q-축과 d-축 전류들이다. $L_q \omega i_q$, $L_d \omega i_d$ 들은 커플링항이다. 전형적인 IPM전동기는 다음과 같은 전류대 최대토크 특성을 가지고 있다. 이것은 d-전류가 0일 때 최대토크의 특성을 나타내는 SPM과의 특성과는 매우 다르다는 것을 알 수 있다.

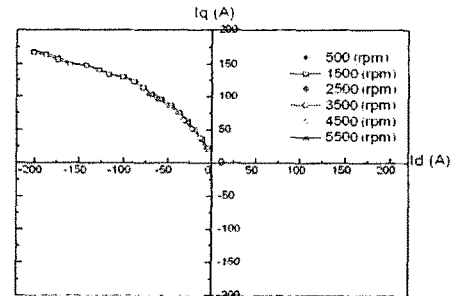


그림1 IPM모터의 전형적인 전류-토크 특성곡선

위의 특성으로부터 각 전류에 대한 최대토크를 얻기 위해서는 각각의 전류가 독립적으로 제어되어야만 한다는 것을 알 수 있다. 그림 2의 블록선도는 IPM전동기에 있어서의 디커플링을 나타낸 것이다. 디커플링은 제어성을 좌우하는 요소이며, L의 정확성에 좌우됨을 알 수 있다.

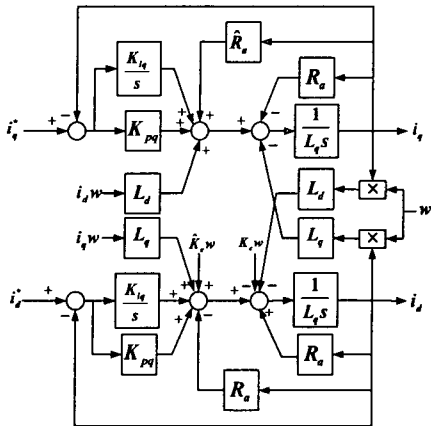


그림 2 IPM모터에서의 상태디커플링

2. 슬라이딩모드 제어의 적용

본문에서 슬라이딩모드는 다음과 같이 표현된 디커플링된 전류 동특성에 대해서 적용된다. 먼저 디커플링이 행해진 다음에 슬라이딩모드제어를 적용시킴으로써 제어기의 설계가 용이해지고 실제 하드웨어에 적용시킬 때에도 상당히 유리하다. 상태 디커플링과 PI제어를 적용한 q-축 전류에 대한 동특성의 블록선도는 다음과 같다.

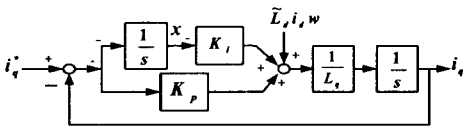


그림 3 디커플링된 i_q 전류의 동특성

위에서 $L_d i_d^w$ 는 파라미터 불확실성에 의해 처리되지 못한 커플링항이다. PI제어의 특성을 그대로 살리면서 커플링의 영향을 없애는 방안으로 본 연구에서는 슬라이딩모드제어 개념을 도입한다. PI제어기를 포함한 전체시스템의 상태방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_1 &= e \\ L_q \dot{e} &= K_I x_1 + K_P e + u + L_d i_d^w \end{aligned}$$

다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_1 &= e \\ \dot{e} &= \frac{K_I}{L_q} x_1 - \frac{K_P}{L_q} e - \frac{1}{L_q} u - \frac{L_d}{L_q} i_d^w \end{aligned}$$

위에서 주어진 1차계통에 슬라이딩모드를 적용시키는 경우 궁극적으로 제어목적을 달성하지만 과도상태에 있어서의 동특성을 보장받기가 어려워진다. 슬라이딩모드 제어에서는 이것을 도달기간 문제라고 부른다. 이러한 문제점을 피하기 위해서 다음과 같이 가상상태를 정의하여 슬라이딩평면을 구성한다. 가상상태는 다음과 같은 공칭계통을 바탕으로 하여 설계한다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_1 &= e \\ \dot{e} &= -\frac{K_I}{L_q} x_1 - \frac{K_P}{L_q} e - \frac{1}{L_q} u_0 \end{aligned}$$

가상상태를 다음과 같이 정의한다.

$$x_v = -\frac{K_I}{L_q} x_1 - \frac{K_P}{L_q} e$$

가상상태의 동특성은 다음과 같다.

$$\dot{\bar{x}}_v = -\frac{K_I}{L_q} e - \frac{K_P}{L_q} x_v$$

위의 가상상태를 포함하여 구성된 슬라이딩 평면은 다음과 같다.

$$s = x_v + \frac{K_I}{L_q} x_1 + \frac{K_P}{L_q} e$$

위의 슬라이딩모드는 PI제어가 적용된 공칭계통의 동특성을 갖는다[9]. 슬라이딩모드에 도달하기 위한 슬라이딩모드 제어입력을 구하는 과정은 다음과 같다. 슬라이딩평면에 도달할 조건은 다음과 같다.

$$s \dot{s} < 0$$

\dot{s} 는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= s \left(\dot{x}_v + \frac{K_I}{L_q} \dot{x}_1 + \frac{K_P}{L_q} \dot{e} \right) \\ &= s \left(\frac{K_P}{L_q} x_v - \frac{K_P}{L_q} e - \frac{K_I}{L_q} x_1 - \frac{K_P}{L_q} e - \frac{1}{L_q} u - \frac{L_d}{L_q} i_d^w \right) \end{aligned}$$

입력 u 를 다음과 같이 결정한다.

$$u = -K_P x_1 - K_P e - L_q x_v + \lambda i_d \text{sign}(s)$$

위의 입력을 인가하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\dot{s} = s \left(-\frac{K_P}{L_q} \lambda i_d \text{sign}(s) \right) < 0$$

그러므로 시간이 지나감에 따라 슬라이딩평면에 도달하게 된다. 본 연구에서는 가상상태의 초기치를 다음과 같이 결정함으로써 초기시간부터 슬라이딩평면에 상태들이 머무르도록 하였다.

$$x_v(0) = \frac{K_I}{L_q} x_1(0) + \frac{K_P}{L_q} e(0)$$

d-축 전류에 대한 제어입력은 q-축 전류와 같은 과정을 통하여 구해진다.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 모터의 파라미터는 다음과 같다.

Parameter	Value
R	1.45
Lq	11.04mH
Ld	3.74mH
pm	0.0858Wb
J	99.6kg

인덕턴스의 불확실성은 20%로 시뮬레이션 하였다.

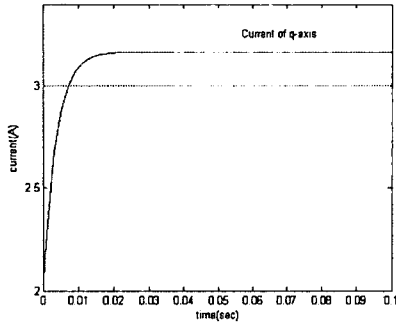


그림 4 PID제어기를 적용한 경우의 q-축 전류 응답

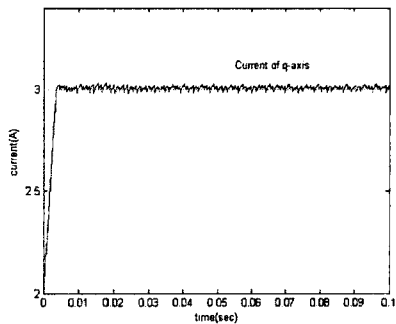


그림 5 제안된 제어기에 의한 q-축 전류 응답

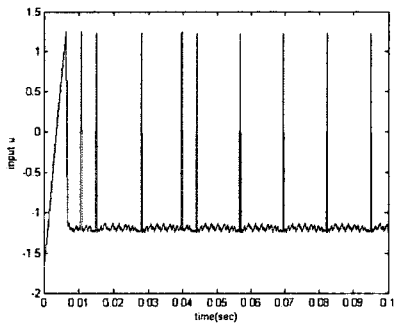


그림 6 q-축 제어입력

3. 결 론

IPM전동기를 제어하는데 있어서 상태 디커플링과 PI제어, 슬라이딩모드제어를 함께 사용함으로써 모터구동시 전류의 변화에 따른 인덕턴스 변화에도 대응할 수 있도록 함으로써 id전류와 iq전류 각각의 독립적인 제어가 용이하도록 하였다. 제시된 방법은 일단 PI제어기를 적용시킨 후 슬라이딩모드제어입력을 별도로 추가하는 설계과정을 거치기 때문에 실제 적용에 유리한 장점을 가지고 있다.

이 논문은 2004년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음

[참 고 문 헌]

[1] S. Morimoto, M. Sanada, Y. Taketa, "Wide-Speed Operation of Interior Permanent-Magnet SynSynchronous

Motors with High Performance Current Regulator", IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. IA-30, pp. 920-926, Jul./Aug. 1994.

[2] J. Kim, S. Sul, "Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Driven for the Flux Weakening Operation", IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. IA-33, pp. 43-48, Jul./Aug. 1997.

[3] H. Kubota, K Matsuse, T. Nakano, "DSP-based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor", IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. IA-29, pp. 344-348, Mar./Apr. 1993.

[4] H. Sugimoto, S. Tamai, "Secondary Resistance Identification of an Induction Motor Applied Model Referrence Adaptive system and Its Characteristics", IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. IA-23, pp. 296-303, Mar./Apr. 1987.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.