

슬라이딩 모우드를 이용한 매입형 영구자석 동기전동기의 속도제어에 관한 연구

이 중호*, 김 장목, 설 승기, 원 중수
서울대학교 전기공학과

A Study on Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using Sliding Mode Control

Lec Jung-Ho , Kim Jang-Mok , Sul Sung-Ki , Won Jong-Soo
Dept. of Elec. Eng., Seoul Nat'l. Univ.

Abstract

In this paper the speed control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) is presented using sliding mode control. Recently in the control of the motor, various modern control theories are used. Sliding mode control is one of these, which has been spotlighted in the area of the motor drive. By using sliding mode control as the speed controller of IPMSM, the superior performances, which are the fast dynamic response without overshoot, the robustness to the external load disturbance and the alleviation of the chattering, are attained.

1. 서론

최근 공장 자동화 등에 필수적인 서보기기의 속도제어에는 속도명령에 대한 오우버슈우트(overshoot) 없는 빠른 응답, 작은 정상상태 오차 그리고 파라미터 변화나 외란에 대한 강인함 등의 성능을 필요로 하고 있다. 기존의 속도제어기에서는 주로 P-I 제어기를 사용하였는데 P-I 제어기로는 위와 같은 성능을 동시에 만족하기는 어렵다. 즉, 제어 대상의 파라미터 변화나 외란에 대해서 원하는 서보 성능을 얻고자하면 P-I 제어기의 이득(gain)들을 능동적으로 조정해야 하는 어려움이 있는 것이다.

이러한 단점을 극복하기 위해 최근에 여러가지 현대적 제어 이론이 사용되고 있으며 이중 슬라이딩 모우드 제어법은 위에서 언급한 서보 성능을 얻는 방법으로 적합하다. 즉, 슬라이딩 모우드를 이용하여 전동기 구동 시스템을 구현하였을 때는, 파라미터 변화나 외란에 강인한 성능을 얻을 수 있고 간단한 구현법으로 오우버슈우트(overshoot) 없는 빠른 응답성을 갖게 할 수 있다.

본 논문에서는 이같은 성능을 갖는 슬라이딩 모우드 제어기를 최근에 각광을 받고 있는 매입형 영구자석 동기전동기 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 속도제어에 적용하였다. IPMSM은 회전자 내부에 영구자석이 삽입되어 있다. 이 매입된 형상으로 인하여 $X_q > X_d$ 의 현상이 생기고, 자석 일치 토크 뿐만 아니라 IPMSM의 특징인 릴럭턴스 토크가 존재한다. 이로 인해 작은 제적의 회전자로 큰 토크를 발생시킬 수 있으며, 또한 상당히 넓은 운전 속도 영역을 가진다. 최근까지 발표된 IPMSM의 제어에 관한 논문은 주로 토크 제어와 고속 운전시의 약계자 제어^{[1][2]}에 관한 것이었고 가장 최근에 P-I 제어기에 의한 IPMSM의 속도제어를 한 논문이 발표되었다^[2].

본 논문에서는 이와 같은 IPMSM에 슬라이딩 모우드 제어법을 이용한 정토크 영역에서의 속도제어를 하기 위해 다음과 같은 제어법을 이용하였다. 먼저 IPMSM을 효율적으로 운전하기 위해 부하나 회전 속도에 따라 최적으로 효율을 발생시킬 수 있도록 전류의 크기에 따라서 전류 위상각을 제어하였다. 다음으로 슬라이딩 모우드 제어시에 발생하는 단점인 토크 채터링(chattering)을 없애고 정상상태 오차를 줄이기 위해 슬라이딩

모우드 제어기에 적분 보상기를 이용하였다. 그리고 슬라이딩 모우드를 이용하여 속도제어를 할 때에 필요한 전동기의 가속도 정보를 얻기 위해 미분 추정기를 이용한 가속도 추정 방법을 이용하였고 급격한 부하 외란에 대한 강인성을 증대시키기 위해 제어입력에 슬라이딩 라인을 첨가하였다. 마지막으로 전류제어 방법으로는 본질적으로 슬라이딩 모우드의 성질을 갖는 델타 변조 방법^[3]을 이용하여 전반적인 IPMSM의 제어를 슬라이딩 모우드 제어법으로 통일하였다. 이와 같은 방법을 사용함으로써 고 성능 서보 전동기 제어시에 필요한 속도 명령에 대한 오우버슈우트(overshoot) 없는 빠른 응답, 파라미터 변화나 외란에 대한 강인함, 적은 전류 맥동 등의 성능을 얻었다. 이와 같은 결과를 기존의 P-I 제어기와 비교하여 제안된 방법의 우수함을 시뮬레이션을 통해 보였다.

2. IPMSM의 제어

IPMSM은 기존의 대부분의 영구자석 동기기인 표면 부착형과는 달리 그 자체의 돌극성 ($L_d < L_q$)으로 인해 토크 성분은 릴럭턴스 토크 성분이 있다. 따라서 IPMSM을 효율적으로 운전하기 위해서 전류 크기에 따라서 전류 위상각을 제어하여야 하는 어려움이 있다. 이러한 특성을 고려하여 IPMSM을 벡터제어하는 방법에는 고정자 자속 기준 벡터제어^[4]와 회전자 자속 기준 벡터제어^[5]가 있다. 고정자 자속 기준 벡터제어는 벡터제어의 d 축을 고정자 자속 상에 두어 토크 성분 전류로 토크를 생성 제어할 수 있게 하였으나 d-q 상호간의 상호 간섭 현상으로 인해 정확하게 구현하기가 매우 어렵다. 또 회전자 자속 기준 벡터제어는 단위 전류당 최대 토크를 얻도록 하기 위해 최적 i_d , i_q 전류를 얻는 복잡한 함수를 이용하여야 하는 어려운 점이 있다. 따라서 본 논문에서는 좀 더 간편하게 토크 제어를 할 수 있도록 아래와 같은 방법을 사용한다.

i_q 전류가 정해지면 토크 식(1)로부터 단위 전류당 최대 토크를 얻게 하는 i_d 전류를 식(2)처럼 얻을 수 있다.^[2]

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (1)$$

$$i_d^* = \frac{\psi_f}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\psi_f^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^{*2}} \quad (2)$$

여기서, T_e : 토크, i_d, i_q : d축 q축 전류, L_d, L_q : d축 q축 인덕턴스, p : 극 쌍수, ψ_f : 영구자석의 쇄교자속

즉, i_d^* 를 속도 제어기로부터 결정하고 i_d^* 는 i_q^* 과 식(2)에 의해 결정하면 간단한 방법으로 토크 제어를 할 수 있다.

3. IPMSM의 슬라이딩 모우드 제어기 설계

슬라이딩 모우드 제어는 본질적으로 비선형 제어대상이 슬라

이딩 평면이라고 하는 상태 평면상의 미리 정해진 궤적을 따라 가도록 시스템의 구조를 고속으로 스위칭하는 제어법이다. 이같은 슬라이딩 모드 제어법을 사용하게 되면 파라미터 변화나 외란 등에 둔감한 좋은 성능을 얻을 수 있다. 본 논문에서 사용한 슬라이딩 모드 제어법은 아래와 같은 방법을 이용하였다.

우선 상태 변수는

$$X = (x_1, x_2) = (\omega_m^* - \omega_m, -\dot{x}_1) = (\omega_m^* - \omega_m, \frac{d\omega_m}{dt}) \text{ 이다.}$$

이에 따른 상태 방정식은

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix} u \quad (3)$$

위상 평면에서 정의되는 슬라이딩 라인, 여기서 시스템이 슬라이딩 라인을 는 다음과 같이 정한다.

$$u = \psi_1 x_1 + \psi_2 x_2 \quad (\text{단, } a = \frac{B}{J_m}, b = \frac{3W_r}{2J_m \tau}, \omega_m^*: \text{가속도 명령, } B: \text{여기서, } \omega_m^*: \text{기계 가속도, } \omega_m^*: \text{각속도 명령, } \tau: \text{적분계수, } x_1 < 0)$$

$$c = \begin{cases} \alpha_2 & \text{if } \sigma \dot{\sigma} > 0 \\ \beta_2 & \text{if } \sigma \dot{\sigma} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

한편 제어 이득(gain) ψ_1, ψ_2 는 슬라이딩 모드의 존재 조건

$\sigma \dot{\sigma} < 0$ 에 의해 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{aligned} \sigma \dot{\sigma} &= \sigma (c \dot{x}_1 + \dot{x}_2) = \sigma (c \dot{x}_1 - \dot{x}_2) = \sigma (c \dot{x}_1 + ax_2 - bu) \\ &= \sigma (c \dot{x}_1 + ax_2 - b(\psi_1 x_1 - \psi_2 x_2)) \\ &= \sigma (c \dot{x}_1 - b\psi_1 x_1 + (a + b\psi_2)x_2) \\ &= \sigma (c \dot{x}_1 - b\psi_1 x_1 - (a + b\psi_2) \dot{x}_1) \\ &= (c - a - b\psi_2)\sigma \dot{x}_1 - b\psi_1 \sigma x_1 < 0 \end{aligned} \quad (5)$$

위의 식을 만족하기 위한 제어입력의 이득(gain) $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 값은 다음 조건을 만족하도록 정한다.

$$\begin{cases} \beta_2 < \min \left| \frac{c-a}{b} \right| \\ \max \left| \frac{c-a}{b} \right| < \alpha_2 \\ \beta_1 < 0 < \alpha_1 \end{cases} \quad (6)$$

한편, 슬라이딩 모드에서 나온 출력 u 는 본질적으로 불연속 인 값이므로 큰 채터링(chattering) 현상을 일으킨다. 이러한 현상을 방지하고 정상상태 오차를 줄이기 위해 슬라이딩 모드 출력 다음 단계 적분 보상을 추가한다. 적분 보상을 첨가함으로써 높은 주파수의 불연속 신호 대신 평균 토크 신호가 나가게 되고 정상상태 오차를 줄이게 된다. 적분 보상의 출력은 i_d^* 로 참고 식 (2)에 의해 i_d^* 로부터 단위 전류당 최대 토크를 내는 최적 i_d^* 를 구한다. 구해진 i_d^*, i_q^* 를 정지 3상 전류로 변환하여 본질적으로 슬라이딩 모드 성능을 갖는 델타 변조 전류제어법을 이용한 전류제어를 한다.

슬라이딩 모드를 이용하여 속도 제어를 구성하려면 슬라이딩 라인을 구현하기 위해 속도 뿐만 아니라 가속도도 구해야 한다. 가속도는 이론적으로는 속도의 미분값이지만 실제로는 높은 주파수의 속도에 대한 가속도는 측정하기가 매우 어려운 값이다. 따라서 추정하는 방법을 이용하여 가속도를 얻을 수 있는 데 본 논문에서는 그림 2와 같은 미분 추정기를 따로 써서 가속도를 추정한다. 이 미분 추정기를 이용하게 되면 이상적인 미분기의 단점인 고주파수 부근에서의 문제를 해결할 수 있다. 즉,

미분 추정기의 전달함수 $\hat{\omega}_r / \omega_r = j\omega / (j\omega\tau_d + 1)$ 에서 $\omega \gg 0$ 이면 $\hat{\omega}_r \approx \omega_r / \tau_d$ 이 되어 고주파수 부근에서의 미분기의 단점을 보상한다. 그러나, 미분기로서의 성능을 갖게 하려면 τ_d 값을 충분히 작게 해야 한다. 그림 1은 지금까지 설명한 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 IPMSM의 속도제어법을 나타내고 있다.

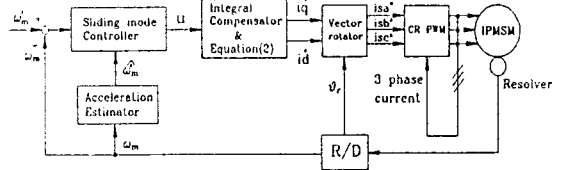


그림 1. 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 IPMSM의 속도제어 블록도

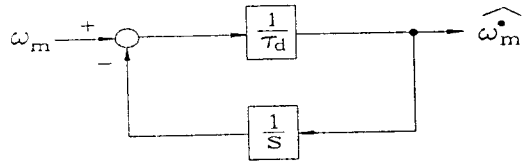


그림 2. 가속도 추정을 위한 미분 추정기

여기서 스텝 부하 등과 같은 외란에 대해 보다 강인한 성능을 얻기 위해 제어 입력에 슬라이딩 라인을 추가한 새로운 제어입력을 사용하면 기존의 슬라이딩 모드 제어입력에서 얻을 수 있는 것보다 더 강인한 성능을 얻게 할 수 있다.

즉, $u = \psi_1 x_1 + \psi_2 \dot{x}_1 + k_d \sigma$ 로 제어입력을 정한다. 이와 같은 제어입력을 이용하면 스텝 부하와 같은 급격한 외란에 대하여 P-I 제어는 물론이고 기존의 슬라이딩 모드 제어입력보다 작은 속도 변화와 빠른 회복성을 얻을 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 검토

시뮬레이션에서 사용된 IPMSM의 사양과 슬라이딩 모드의 각종 파라미터값은 표 1과 같다.

표 1

IPMSM의 정격 및 각종 파라미터	
정격 출력 : 600 [W]	정격 회전수 : 2500 [rpm]
정격 토크 : 2.25 [Nm]	정격 전류 : 1.9 [A]
R = 8.85 [Ω]	c=30
Ld = 0.037 [H]	a1=0.1
Lq = 0.09536 [H]	a2=0.12
p=2 [pole paires]	β1=-0.2
J = 0.0000996 [kg·m ²]	β2=-0.2
B = 0.000038 [Nmsec/rad]	kd=0.7
ψf = 0.2163 [wb]	τ=10

여기서는 기존의 P-I 제어기와 제안한 슬라이딩 모드 제어기를 비교한다. P-I 제어기로는 같은 제어 이득(gain)을 가지고 오버슈트(overshoot) 없는 응답과 스텝 부하 토크에 대한 작은 변화, 빠른 회복성을 동시에 얻기 어렵다. 즉, 초기 스텝 속도 명령에 대해 오버슈트(overshoot) 없는 응답을 얻고자 하면 스텝 부하 토크에 대해 매우 좋지 않은 응답성을 보이고, 반면에 스텝 부하 토크에 대해 작은 변화, 빠른 회복성을 얻으면 초기 스텝 속도 명령에 대해서는 큰 오버슈트(overshoot)가 생긴다.

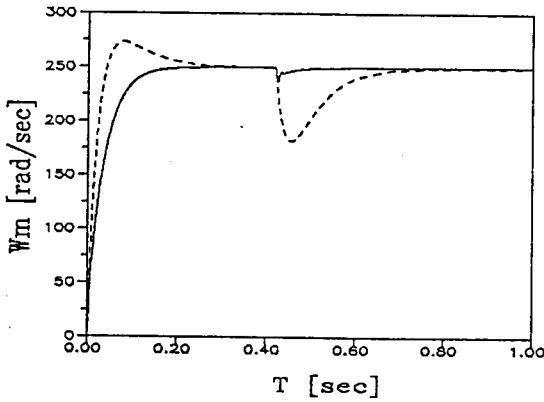


그림 3. 스텝 속도명령과 스텝 부하에 대한 슬라이딩 모드와 P-I 제어와의 비교

그림 3은 스텝 속도명령과 정상상태 도달 후의 스텝 부하 인가에 대한 슬라이딩 모드 제어법과 기존의 P-I 제어법의 응답을 비교한 것이다. 접선의 응답은 P-I 제어기에 의한 것이고 실선은 슬라이딩 모드 제어를 이용하였을 때의 응답이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 제안한 슬라이딩 모드에 의한 속도제어법을 이용하게 되면 오버슈트(overshoot) 없는 빠른 응답을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 스텝 부하 인가시에는 기존의 P-I 제어기에 의한 것보다 작은 속도 변화와 빠른 회복성 등의 우수한 동적 특성을 갖게 할 수 있다.

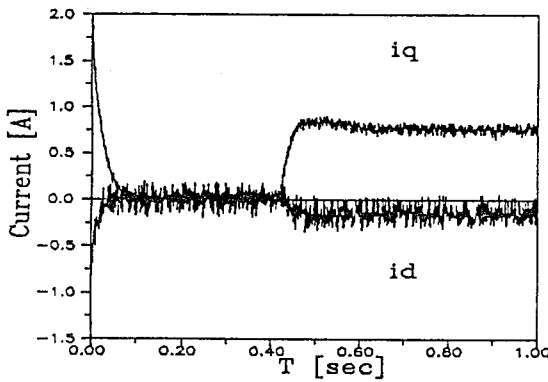


그림 4. P-I 제어 이용시 스텝 속도명령과 스텝 부하에 대한 d축, q축 전류

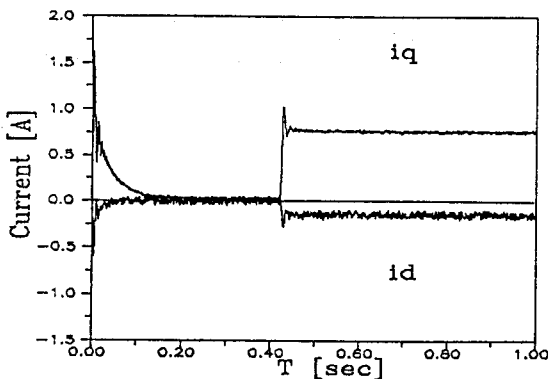


그림 5. 슬라이딩 모드 제어 이용시 스텝 속도명령과 스텝 부하에 대한 d축, q축 전류

한편, 그림 4와 5는 각각 동일한 조건하(델타 변조 전류제어기 이용)에서의 슬라이딩 모드 제어와 P-I 제어를 이용하였을 때의 d축, q축 전류이다. 델타 변조 방법도 일종의 슬라이딩 모드 제어법이므로 모우터의 슬라이딩 모드 제어시에 적합한 전류제어법이고 또한 슬라이딩 모우드를 이용한 속도제어기에 적분 보상기를 이용하게 되면 슬라이딩 모우드의 단절인 채터링(chattering) 현상이 제거된다. 한편, 슬라이딩 모우드 제어는 P-I 제어보다 속도를 일정하게 유지한다. 이와 같은 이유들로 인해 슬라이딩 모우드 제어시의 정상상태 전류 맥동이 기존의 P-I 제어의 것보다 적음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 슬라이딩 모우드를 이용한 IPMSM의 속도제어 시뮬레이션을 하였다. IPMSM의 운전방법은 부하나 회전 속도에 따라 항상 최적으로 효율을 발생시킬 수 있도록 전류 위상각을 제어하는 최대 효율 제어법을 사용하였고, 전류제어 방법도 일종의 슬라이딩 모우드 제어인 델타 변조를 이용하였다. 제안된 슬라이딩 모우드를 이용하여 IPMSM의 속도제어를 하면 기존의 P-I 제어기에 비해 다음과 같은 우수한 성능을 얻을 수 있음을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다.

- (1) 오버슈트(overshoot) 없는 빠른 응답성.
- (2) 토크 외란에 대한 작은 변화와 빠른 회복성.
- (3) 적은 채터링(chattering) 현상.

앞으로는 실제 실험을 통하여 위의 시뮬레이션 결과를 확인할 계획이다.

참고 문헌

- [1] V.I.Utkin, " Variable structure systems with sliding modes ", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-22, no. 2, pp.210-222, 1977.
- [2] S.Morimoto, T.Ueno, M.Sanada, Y.Takeda and T.Hirasa, " Variable speed drive system of interior permanent magnet synchronous motor for constant power operation", in *Proc. PCC*, Yokohama, 1993, pp.402-407.
- [3] T.M.Jahns, G.B.Kliman and T.W.Neumann, " Interior permanent magnet synchronous motor for adjustable-speed drive", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.22, No.4, pp.738-747, July/Aug. 1986.
- [4] T.M.Jahns, "Flux weakening regime operation of an interior permanent magnet synchronous motor drive", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 23, No.4, pp.681-689, July/Aug. 1987.
- [5] S.R.MacMinn & T.M.Jahns, "Control techniques for improved high-speed performance of interior PM synchronous motor", in *Proc. IEEE/IAS Conf. Rec.*, 1988, pp.272-280.
- [6] B.K.Bose, "A high performance inverter-fed drive system of an interior permanent magnet synchronous machine", in *Proc. IEEE/IAS Conf. Rec.*, 1987, pp.269-276.
- [7] E.Ho and P.C.Sen, "Control dynamics of speed drive systems using sliding mode controllers with integral compensation", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.27, No.5, pp.883-892, Sep/Oct. 1991.
- [8] P.D.Ziogas. "The delta modulation techniques in static PWM inverter." *IEEE Trans. Industry Application*, vol.17, No.2, pp.199-204, Mar/Apr. 1981.