

## SRM 드라이브에서 PI제어기와 SLMC의 속도 특성 비교

김진영\*, 최재동\*\*, 오성업\*, 주형준\*, 안재황\*, 성세진\*  
 충남대학교 전기공학과\*, 한국항공우주 연구소\*\*

### Speed characteristic comparison of PI controller and SLMC in SRM drives

Jin-young Kim\*, Jae-dong Choi\*\*, Jae-Hwang Ahn\*, Seung-Up Oh\*, Hyung-Jun Ju\*,  
 Se-jin Seung\*

Chungnam National University\*, Korea Aerospace Research Institute\*\*

#### ABSTRACT

In this paper the comparison of conventional PI control and nonlinear sliding mode control is presented for Switched Reluctance Motor(SRM). SRM drives require a nonlinear controller for high dynamic performance but the high nonlinearity makes a poor performance in conventional PI control. However SRMs with sliding mode control achieve a robust performance for speed control.

In this paper nonlinear sliding mode controller is suggested for high performance speed. State equation and modeling are proposed. And we present the speed comparison of PI control and SLMC.

#### 1. 서론

SRM은 각 상의 회전자 위치  $\theta$ 에 따라 상 인덕턴스의 변화가 비정현파라는 점과 전류에 의한 토크 발생비가 전류와 회전자 위치에 의한 함수로 폭넓은 범위에 걸쳐 변한다는 점에서 전형적인 비선형성을 갖는 기기라 할 수 있다. SRM과 같은 복잡한 비선형 기기를 이상적인 파라미터로 시뮬레이션 하기 위해서는 해결할 수 없는 부분이 존재하게 된다. 특히 비선형성은 높은 동적 특성이 요구되는 모터의 적용에서 PI제어를 안정적으로 만들기 힘들다. 각 상에서 인덕턴스의 주기적인 변화로 인한 토크 맥동과 그에 따른 속도 리플이 모터의 복잡한 전류제어 설계가 없다면 나타나게 된다. 따라서 일정한 속도와 토크를 만들어 내기 위해서는 각상에 흐르는 전류가 제어되어야만하고 이는 모터의 권선에 공급하는 초퍼의 출력 전압을 제어함으로써 이

루어진다. 이러한 제어 요구성들은 비선형 제어 방법에 의해 만족되어진다.

본 논문은 속도 조절을 위한 전형적인 PI제어와 비선형 슬라이딩 모드제어의 비교를 보여준다. 이를 위해 SRM 드라이브가 먼저 모델링 되어지고 각각의 제어기를 도입하여 수학적 모델링과 시뮬레이션이 이루어진다. 제어기에 따른 SRM의 속도 응답시간과 스위칭각에서의 리플정도를 보여준다. 시뮬레이션은 Matlab/Simulink를 사용하였다.

#### 2. SRM 드라이브의 수학적 모델

그림 1은 4개의 회전자 극을 갖는 6/4 SRM의 한상에 대한 동작원리를 나타낸다.

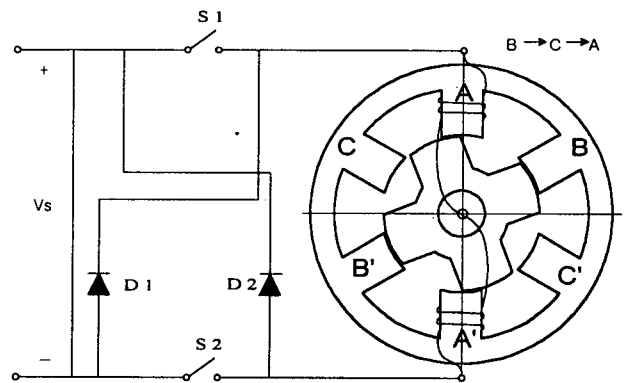


그림 1 3상 6/4 SRM의 1상에 대한 개략도

이 그림에서는 한상의 코일만 나타내었고 각 상은 권선 저항과 쇠교자속과 연관되고 회전자 각에 의존한다. SRM의 k상에서의 동작은 다음과 같다.

$$V_k = Ri_k + \frac{d\lambda_k(\theta_k, i_k)}{dt} \quad (1)$$

모터 상들간의 커플링을 무시한 k상에서의 자속은 다음과 같다.

$$\lambda_k = L_k(\theta_k) i_k \quad (2)$$

식 (1)과 (2)의 조건으로

$$V_k = R i_k + L_k(\theta_k) \frac{di_k}{dt} + i_k \frac{dL_k(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{V_k - R i_k - i_k \frac{dL_k(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}}{L_k(\theta)} \quad (4)$$

식 (4)에서 보듯이 SRM의 실행은 모터 파라미터인 인덕턴스  $L_k(\theta_k)$ 에 의해 이루어짐을 알 수 있다. k상에서의 순간 출력 토크  $T_k$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$T_k = \frac{1}{2} \frac{dL_k(\theta)}{d\theta} i_k^2 \quad (5)$$

따라서 6/4 SRM의 3상 출력 토크  $T_{out}$ 은 다음과 같다.

$$T_{out} = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL(\theta-30^\circ)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL(\theta-60^\circ)}{d\theta} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 발생토크는 전류의 제곱에 비례하고 회전자 위치에 대한 인덕턴스의 변화율에 비례함을 알 수 있다. 이 식에 의한 Matlab/Simulink 상에서 모델링한 토크의 시스템 블록도가 그림 2와 같다.

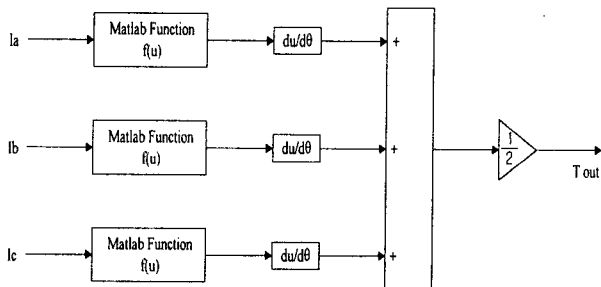


그림 2 토크방정식에 의한 모델표현

## 2. PI제어기 설계

PI제어는 일정한 파라미터를 가지는 선형 시스템

과 고정된 동작점에서 조정되는 시스템에서 유리하다. 그러나 실제 시스템에서는 시스템 고유의 비선형성들을 피할수 없다. 본 논문에서는 PI제어 이론을 SRM 드라이브 시스템에 적용시켜 시뮬레이션한다. trial-and-error 방법이 최적제어 파라미터를 찾기위해 사용된다.

제어기는 다음과 같이 표현된다.

$$e(t) = \omega_r^*(t) - \omega_r(t) \quad (7)$$

$$c(t) = K_p e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(t) dt \quad (8)$$

여기서  $e(t)$ 는 레퍼런스 속도와 실제 속도 사이의 오차이고  $c(t)$ 는 제어기 출력이다. 초퍼의 듀티 사이클은 제어기 출력  $c(t)$ 에 비례한다. 그림 3은 PI제어기를 부착한 전체 모델 블록도를 나타낸 것으로 제어기 부분과 드라이브 부분으로 크게 나누어진다.

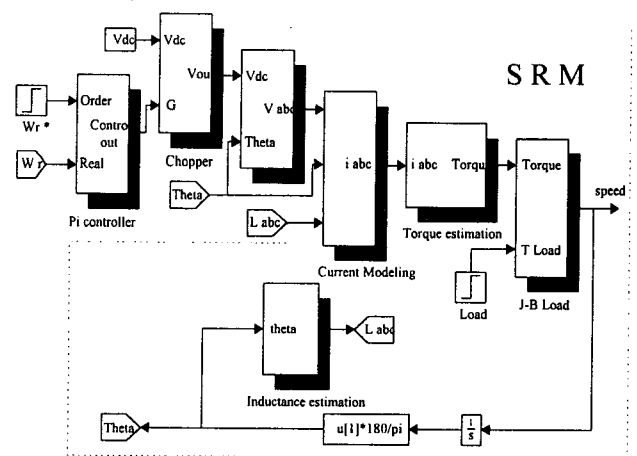


그림 3 PI제어기를 부착한 SRM의 전체 Simulink 모델 블록도

## 3. SLMC 설계

자기포화가 없고 상호 인덕턴스와 손실을 거의 무시하면 SRM의 기계적인 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (T_d - T_l - B\omega) \quad (9)$$

속도 에러와 레퍼런스 속도를 상태 변수로 선정한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} u \quad (10)$$

$$+ \begin{bmatrix} -\dot{\omega}_r \\ -\frac{1}{J} \dot{T}_l \end{bmatrix}$$

$$x_1 = \omega_r^* - \omega_r = e(t) \quad (11)$$

$$x_2 = -\frac{B}{J} \omega_r + \frac{1}{J} T_d - \frac{1}{J} T_l \quad (12)$$

여기서  $\dot{\omega}_r$ 과  $\dot{T}_l$ 은 외란으로 간주한다. 외란을 무시하면 다음과 같은 상태 방정식으로 쓸수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (13)$$

오차 모델을 이용하여 슬라이딩 표면  $s$ 는 다음과 같이 표현한다.

$$s = cx_1 + \dot{x}_1 = 0 \quad (14)$$

여기서  $c$ 는 슬라이딩 라인의 기울기이며 양수로 아주 크고 오차  $x_1$ 은  $s=0$ 로 빠르게 사라질 것이다. Lyapunov 함수를 고려하면

$$V(s) = \frac{s^2}{2} \quad (15)$$

슬라이딩 모드 제어의 중요 포인트는  $\dot{V}(s) < 0$ 와 같은 제어기 출력  $U$ 를 찾아내는 것이다.

$$U = A_1 x_1 + A_2 \dot{x}_1 \quad (16)$$

여기서

$$\begin{aligned} A_1 &= \alpha_1, & s x_1 > 0 \\ & \beta_1, & s x_1 < 0 \\ A_2 &= \alpha_2, & s \dot{x}_1 > 0 \\ & \beta_2, & s \dot{x}_1 < 0 \end{aligned} \quad (17)$$

제어기 이득  $A_1, A_2$ 는 슬라이딩 모드의 존재 조건을 기반으로 찾을 수 있다.

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \dot{s} < 0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} s \dot{s} &= (cx_1 + \dot{x}_1)(c\dot{x}_1 + ax_2 - bu) \\ &= (c - a - bA_2)s\dot{x}_1 - bA_1 s x_1 \end{aligned} \quad (19)$$

$$a = \frac{B}{J}, \quad b = \frac{1}{J}$$

상태 방정식과 슬라이딩 표면  $s$ 로부터 식 (19)와 같은 식이 만들어진다. 그림 4는 본 논문에서 사용한 슬라이딩 모드 제어의 블록 다이어그램이다.

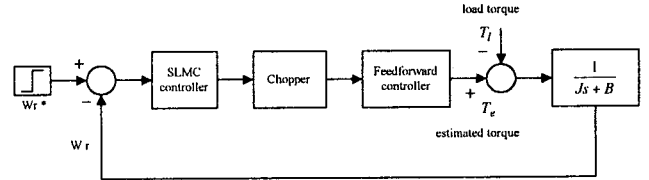


그림 4 SLMC 블록다이어그램

#### 4. 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션은 Matlab/Simulink 상에서 이루어졌고 시뮬레이션에 사용된 모터의 설계 파라미터는 표 1과 같다.

그림 5와 6은 각각 PI제어기와 SLMC에서 1000[rpm] 속도 응답 특성을 보여준다. 결과 과정에서 보듯이 PI제어기는 SLMC보다 약 1[sec] 정도 늦은 속도응답 특성을 보인다. 또한 그림 5과형의 굵은 선의 결과는 심하지는 않지만 어느정도의 원하지 않는 오실레이션을 포함함을 볼수 있다. 반면 SLMC는 빠른 응답 특성과 함께 스위칭에 의한 리플이 거의 없는 속도 응답을 보인다. 그림 7과 8은 모터 속도 변화시의 각각의 제어기에서의 변화를 보여준다. 그림의 결과처럼 부하속도 변화시 PI 제어기는 1500[rpm]의 정상상태에 도달하는데 약 1.31[sec]가 걸리고 슬라이딩 모드 제어는 약 0.77[sec]가 걸려 좀더 안정적이고 빠른 응답을 가짐을 확인할 수 있다.

표 1 모델링 전동기의 설계정수

고정자/회전자 극수	6/4	기저부하[HP]	1.0
고정자 외경	135 mm	기저속도[rad/s]	80
고정자 내경	87.5 mm	공극	0.32 mm
고정자 극호	30°	상당 권선수	100
회전자 극호	45°	도체 직경	1.0 mm
고정자 극 높이	13.7 mm	최소 인덕턴스	7.9 mH
회전자 극 높이	12.4 mm	최대 인덕턴스	65.2 mH

## 5. 결 론

본 논문에서 보인 시뮬레이션 결과에 의해 PI제어기는 훌륭하다고는 할 수 없지만 어느 정도 안정된 속도 응답 특성을 갖는다. 그러나 비선형성에 의한 오실레이션을 피할 수 없다. 반면 슬라이딩 모드 제어기에 의한 비선형 제어는 PI제어보다 좀더 빠르고 안정된 응답 특성을 보인다. 따라서 슬라이딩 모드 제어는 플랜트 파라미터에 대해 강인한 제어 특성을 보이고 파라미터 변화에 둔감함을 갖는다.

## 참 고 문 헌

- [1] 오인석, "SRM 토크맥동 저감에 관한 연구," 충남대학교 전기공학과 박사학위논문, 1998년. 8월.
- [2] Zhan, Y.J.; Chan, C.C.; Chau, K.T. "A novel sliding-mode observer for indirect position sensing of switched reluctance motor drives." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* Volume: 46 2 , April 1999 , Page(s): 390 -397.
- [3] Haiqing Yang; Panda, S.K.; Liang, Y.C. "Sliding mode control for switched reluctance motors: an experimental investigation." *Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1996, Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22nd International Conference on* Volume: 1 , 1996 , Page(s): 96 -101 vol. 1.
- [4] John, G.; Eastham, A.R. "speed control of switched reluctance motor using sliding mode control strategy." *Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE* Volume: 1 , 1995 , Page(s): 263 -270 vol. 1.

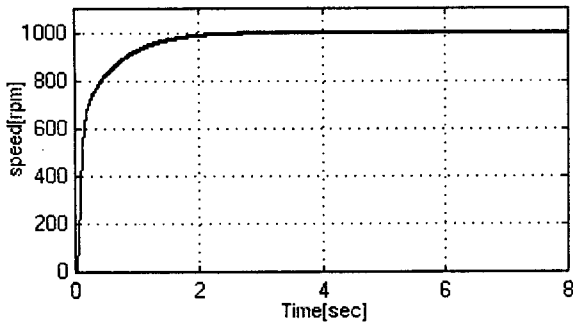


그림 5 PI제어기에 의한 1000[rpm] 속도 파형

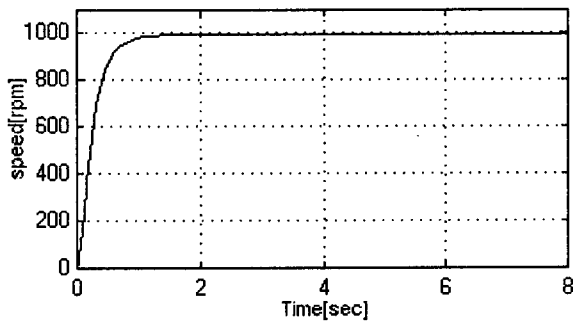


그림 6 SLMC에 의한 1000[rpm] 속도 파형

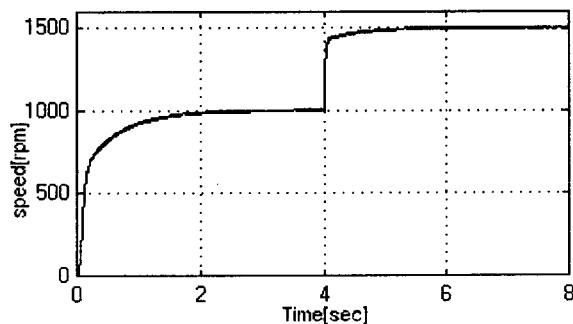


그림 7 PI제어기의 1000[rpm]에서 1500[rpm]속도 변이

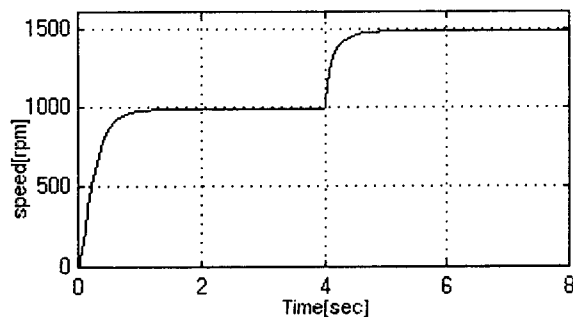


그림 8 SLMC의 1000[rpm]에서 1500[rpm]속도 변이