

## Sliding Mode Control 기법을 이용한 SRM 속도 제어

임종빈, 임승빈, 이성구, 고성철, 이 주  
한양대학교 전기공학과

### SRM Speed Control using Sliding Mode Control

JONG-BIN IM, SEUNG-BIN LIM, SUNG-GU LEE, SUNG-CHUL GO, JU LEE  
HANYANG UNIVERSITY

**Abstract** - This paper is intended to research the speed response of switched reluctance motor (SRM) using sliding mode control method when load is changing. The simulation compare only control by PI controller with control by PI controller and sliding mode controller. It compare with speed response using MATLAB/SIMULINK.

## 1. 서 론

스위칭 릴럭턴스 전동기 (Switched Reluctance Motor; 이하 SRM)는 간단한 구조로 인해 제작이 용이하고 구조적인 견고성으로 인해 고속 운전이 가능하며, 스위칭 소자에 의해 4상한 운전이 가능하다는 등 많은 장점을 가지고 있다.[1] 속도제어는 속도 지령을 얼마나 잘 따르는가 뿐만 아니라 속도 지령이 바뀌었을 때 얼마나 빨리 지령치를 쫓아가는가 하는 것도 중요한 특성이 된다. 산업계에서는 PI제어기가 많이 사용되나 PI제어기는 오버슈트가 발생하고 전동기에 맞는 게인 값을 찾기가 어렵다는 단점이 있다.

이에 반해 슬라이딩 모드(Sliding Mode) 제어기는 시스템의 상태에 따라 제어기 이득을 스위칭 시켜 상태 공간상에 설정한 스위칭 평면 근방에 상태를 구속하면서 목표 값에 도달시키는 제어방식인데, 시스템의 상태가 스위칭 평면상에 있다면 원래의 시스템과는 무관하게 되며 파라미터 변동이나 외란 그리고 시스템의 비선형적인 특성에 둔감한 성능을 나타낸다.[2]

본 연구에서는 파라미터 변동과 한정된 외란에 거의 영향을 받지 않으며 오버슈트가 없고, 고속응답을 실현할 수 있는 슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 속도 지령과 실제 속도를 비교한 값과 그 값의 미분 값을 이용하여 슬라이딩 모드 제어 기법으로 속도 제어를 하였다. 속도의 반응성을 확인하기 위해서 선행각과 도통각은 일정하게 설정하였다. 이 방식의 이론적인 타당성을 입증하기 위해 소프트웨어 패키지인 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션을 통하여 속도 지령에 고속응답을 함을 확인할 수 있었다.

## 2. 본 론

### 2.1 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control)

가변구조제어(Variable Structure Control) 이론은 고정된 구조를 가지는 고전적인 제어이론과는 달리 미리 설정된 스위칭 함수에 따라 불연속적으로 구조를 변화시키는 제어이론이다. 이 구조를 변화시키는 과정에서 각 구조에서는 없는 새로운 성질을 가지게 되는데 이를 슬

라이딩 모드(Sliding Mode)라고 한다. 즉, 슬라이딩 모드 제어는 시스템의 구조를 변경하여 시스템의 상태를 원하는 평면(슬라이딩 평면)에 구속시킴으로서 강인성을 얻을 수 있는 비선형 제어기법이다[4].

시스템 상태함수로서 스위칭 함수  $S(x)$ 은 슬라이딩 평면 내에서 슬라이딩 모드의 안정을 판별할 수 있는 함수로 정의하는데, 즉  $S(x) = c \times x + \dot{x}$ 로 정의한다. 만약  $S(x)$ 의 값이 0이라면 시스템은 슬라이딩 평면위에 있는 것이다.  $S(x)$ 가 0보다 크면 제어 신호는  $S(x)$ 을 감소시키기 위해 동작할 것이고,  $S(x)$ 가 0보다 작다면 제어 신호는  $S(x)$ 을 증가시키기 위해 동작할 것이다. 이러한 과정을 되풀이하다 보면 0값으로 수렴을 하게 되는데, 이러한 동작 상태를 슬라이딩 모드라고 한다.

### 2.2 슬라이딩 모드 존재 조건

$S(x)$ 을 Liapunov 함수로 두면, 슬라이딩 모드 도달 조건은 다음과 같다.

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{2} \frac{d}{dt} S(x)^2 < 0 \quad (1)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} S(x) \frac{dS(x)}{dt} < 0 \quad (2)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} SS' < 0 \quad (3)$$

시스템이 원하는 동특성을 가지도록 스위칭 평면을 결정하면 스위칭 평면에 도달한 뒤 계속 슬라이딩 모드가 유지되도록 적절한 제어입력을 선정해야 한다. 즉 식 (3)의 슬라이딩 모드 존재 조건에 만족하는 스위칭 이득을 결정해야 한다. 이를 설명하기 위해서 다음과 같은 2계 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -a_1 x_1 - a_2 x_2 - bu, \quad b > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $x_1$ 과  $x_2$ 는 상태 오차 변수이며,  $a_1, a_2, b$ 는 상수이거나 시변 파라미터 값이다. 스위칭 라인과 제어 입력  $u$ 를 다음과 같이 두면

$$S = cx_1 + x_2 = 0 \quad (c > 0) \quad (5)$$

$$u = \lambda x_1, \quad \lambda = \begin{cases} \alpha, & S_1 > 0 \text{ 일 때} \\ \beta, & S_1 < 0 \text{ 일 때} \end{cases} \quad (6)$$

위 슬라이딩 제어시스템을 따르는  $S$ 의 미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{S} &= cx_1 + \dot{x}_2 \\ &= (c-a_2)x_2 - a_1x_1 - b\lambda x_1 \\ &= (c-a_2)S - [b\lambda + a_1 + c(c-a_2)]x_1 \end{aligned} \quad (7)$$

그러므로

$$S\dot{S} = (c-a_2)S^2 - [b\lambda + a_1 + c(c-a_2)]Sx_1 \quad (8)$$

이 되며, 식 (3)의 슬라이딩 모드 존재 조건에 적용하면 다음과 같은 조건식이 성립한다.

$$c - a_2 \leq 0 \quad (9)$$

$$\begin{cases} b\alpha + a_1 + c(c-a_2) > 0, & Sx_1 > 0 \text{ 일 때} \\ b\beta + a_1 + c(c-a_2) < 0, & Sx_1 < 0 \text{ 일 때} \end{cases} \quad (10)$$

그러므로, 식 (10)과 같은 조건식이 범위 내에서 스위치 이득  $\alpha$  와  $\beta$  를 정하면 된다. 슬라이딩 모드가 존재하기 위해서는 스위칭 라인의 기울기  $c$  가 고유벡터의 기울기보다 작은 값을 가져야 하며, 시스템의 특성은  $c$  에 의해 새로운 특성을 가지므로 시스템의 파라미터들과 무관하게 된다.

### 2.3 모델링

Matlab을 사용하여 SRM 및 제어장치를 모델링하였다. Soft Chopping PWM 방식을 사용하였으며, 전체 모델링은 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 크게 (1) SRM Motor, (2) 제어기 모델로 이루어져 있으며, 모델링에 사용된 모터의 사양은 표 1과 같다.

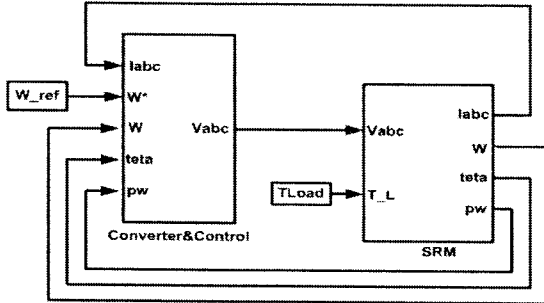


그림 1. SRM의 전체 모델링

항 목	값	
고 정 자	돌극수	6
	극호각	30°
	상수	3
	상당저항	0.46[Ω]
회 전 자	돌극수	4
	극호각	44°
정 격	입력전압	48[V]
	토크	0.4[Nm]
관성모멘트 [J]	0.002[kg · m <sup>2</sup> ]	
마찰계수 [B]	0.00001[kg · m <sup>2</sup> /sec]	

표 1. SRM의 사양.

#### 2.3.1 SRM Motor 모델링

SRM은 회전자와 고정자 모두 돌극 구조로 되어 있어서, 회전자의 위치에 따라 공극이 변함으로서 자기 저항이 달라진다. 이러한 자기 저항의 변화는 공극에 저장되는 자기 에너지의 변화를 초래하고 에너지 보존 법칙에 의해 자기 에너지의 변화량만큼 기계에너지로 바뀌게 되고, 이러한 고정자 환상에 대한 전압 방정식과 기계 방정식은 각각 식 (1),(2)로 표현된다.

$$v_j = ri_j + \frac{d\psi_j}{dt} \quad (11)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [T_j(\theta, i_j) - T_L(\theta, \omega) - B\omega_m] \quad (12)$$

또한 이중 돌극형 SRM의 자기구조상 자기회로의 coenergy  $W'_c$ 는

$$W'_c = \frac{1}{2} i^2 \cdot L \quad (13)$$

이므로 토크는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_j = \frac{\partial W'_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (14)$$

그러므로 m상에서의 토크와 속도는 다음과 같다.

$$T \quad (15)$$

$$\omega = \frac{1}{J} \int \sum_{j=1}^m [T_j(\theta, i_j) - T_L(\theta, \omega) - B\omega_m] dt \quad (16)$$

SRM 전동기의 모델링은 그림 2에 나타내었다.

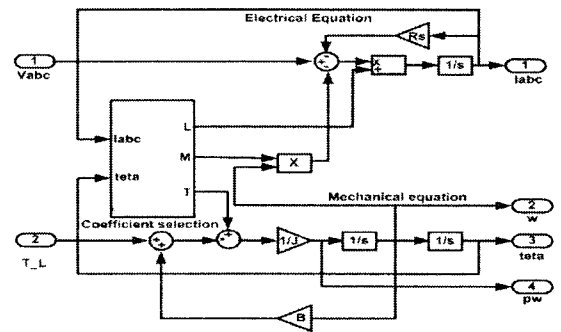


그림 2. SRM 전동기 모델링

#### 2.3.2 슬라이딩 모드 컨트롤 모델링

속도 제어 시 슬라이딩 모드 제어기는 속도와 가속도의 값을 필요로 한다. SRM의 기계 방정식을 위 식(12)와 같고, 시스템의 상태벡터를

$$x = [\omega_{ref} - \omega, -\frac{d\omega}{dt}]^T \quad (17)$$

와 같이 두면 이 때의 기계 방정식은 다음과 같은 행렬식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} u \quad (18)$$

위에서와 같이 스위칭 함수  $S(x)$ 를 다음과 같이 정의한다면 다음과 같이 된다.

$$S(x) = cx_1 + x_2 \quad (19)$$

설정된 스위칭 라인 상에서 슬라이딩 모드가 존재하도록 하는 제어 입력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 \quad (20)$$

$$\lambda_1 = \begin{cases} \alpha_1, & Sx_1 > 0 \text{ 일 때} \\ \beta_1, & Sx_1 < 0 \text{ 일 때} \end{cases} \quad (21)$$

$$\lambda_2 = \begin{cases} \alpha_2, & Sx_2 > 0 \text{ 일 때} \\ \beta_2, & Sx_2 < 0 \text{ 일 때} \end{cases}$$

$\lambda_1, \lambda_2$ 는 스위칭 이득을 나타낸다.

슬라이딩 모드 존재조건을 만족하기 위해 식 (3)을 이용하여 스위칭 이득의 조건식을 구하면

$$S\dot{S} = -\frac{K}{J}\lambda_1 Sx_1 + \left[ c - \left( \frac{B+K\lambda_2}{J} \right) Sx_2 + \frac{T_L}{J} S \right] \quad (22)$$

$$\begin{cases} -\frac{K}{J}\alpha_1 < 0, & Sx_1 > 0 \text{ 일 때} \\ -\frac{K}{J}\beta_1 > 0, & Sx_1 < 0 \text{ 일 때} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_1 > 0 \\ \beta_1 < 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} c - \left( \frac{B+K\alpha_2}{J} \right) < 0, & Sx_2 > 0 \text{ 일 때} \\ c - \left( \frac{B+K\beta_2}{J} \right) > 0, & Sx_2 < 0 \text{ 일 때} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha_2 > \frac{J}{K} \left( c - \frac{B}{J} \right) \\ \beta_2 < \frac{J}{K} \left( c - \frac{B}{J} \right) \end{cases} \quad (24)$$

이와 같이 슬라이딩 모드 속도 제어기 설계 시 위의 조건식을 만족하는 스위칭 이득 값 ( $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ )을 선정하면 된다. 본 논문에서는 스위칭 이득 값을  $c=250, \alpha_1=150, \alpha_2=1.8, \beta_1=-150, \beta_2=-1.8$ 로 설정하였다.

제어기의 모델링은 그림 3에 나타내었다.

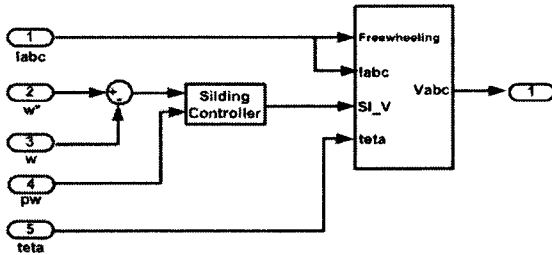


그림3. 제어기 모델링

## 2.4 Simulation.

반부하시 일 때와 전 부하 일 때 지령 속도가 각각 1500[rpm]으로 놓았을 때, 속도 제어기가 PI제어기일 때와 슬라이딩 모드 제어기일 때의 변화를 관찰하였다. 반부하시 PI 제어기에 비해 슬라이딩 모드 제어기가 3%, 전 부하시에는 3.5% 지령 속도에 먼저 도달함을 확인할 수 있었다.

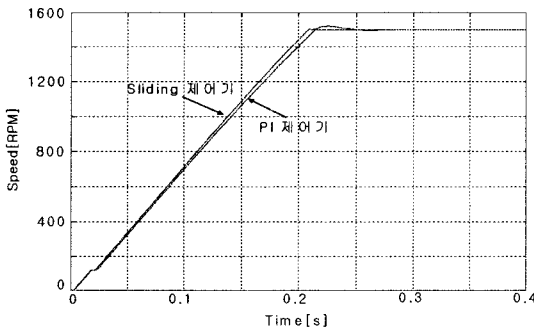


그림 4. 반부하시 PI제어기와 슬라이딩 제어기 속도파형

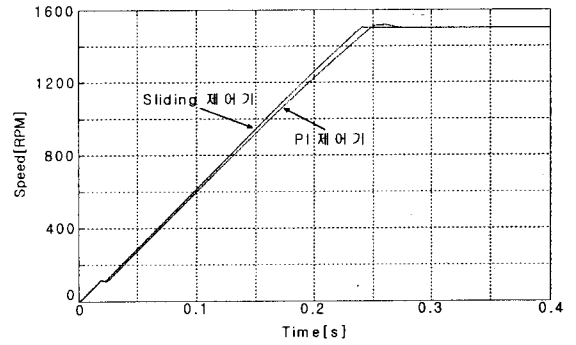


그림 5. 전부하시 PI제어기와 슬라이딩 제어기 속도파형

## 3. 결 론

본 연구에서는 SRM의 속도 제어 시 지령 속도에 빠르게 도달하기 위해 슬라이딩 모드 제어 방법을 제안하였다. Matlab/Simulink를 통하여 슬라이딩 속도 제어기가 PI 속도 제어기에 비해 빠르게 지령 속도에 따라가는 것을 확인할 수 있었다.

시뮬레이션을 통해 제안된 제어기에 좀 더 다른 제어 기법을 추가하여 빠른 속도 추정 속에서도 적은 토크 리플을 내는 것이 향후 과제로 남는다.

## 감사의 글

본 논문은 산업자원부의 중점추진 과제인 신·재생에너지 발전의 계통연계 기초기술개발 연구 (과제번호: R-2004-B-125)의 지원으로 수행된 논문입니다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 김민희, 백원식, "스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동원리 및 특징", 전력전자학회지 제 7권 제 5호, 2002년.
- [2] 권완주, "퍼지-슬라이딩 모드를 이용한 유도전동기의 속도 제어" 한양대학교 석사학위논문, page 1, 1993년.
- [3] G. John, A.R. Eastham, "Speed Control of Switched Reluctance Motor Using Sliding Mode Control Strategy", IEEE IAS Annual meeting, Vol 1, pp.263-270, October 1995.
- [4] V. I. Utkin, "Sliding Mode Control Design Principles and Application to Electric Drives' IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 40, No. 1, February 1993