

고정자 저항 추정기를 갖는 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 SRM 센서리스 제어 연구

오주환, 이진우, 권병일
한양대학교

A novel Sensorless Control of SRM using the Sliding Mode Observer with the Estimation of Stator Resistance

Ju-hwan Oh, Jin-woo Lee, Byung-il Kwon
Hanyang University

Abstract - This paper presents a new speed and position sensorless of Switched Reluctance Motor(SRM) based on the sliding mode observer. The sliding mode observer structure and its design method are discussed. Also, Lyapunov functions are chosen for determining the speed and the stator resistance estimator. The effectiveness of the proposed observer system is confirmed by the computer simulation.

1. 서 론

최근에 스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)가 가변속 드라이브의 출원으로 산업용, 가정용, 견인용으로 주목을 받고 있다. SRM은 고효율, 고속운전, 간단한 전자기적 구조로 이루어져있으며 전력용 반도체 소자의 기술 개발이 급속히 이루어짐에 따라 실용적인 가치가 더 높아지고 있다.

하지만 SRM은 회전자 위치와 동기적으로 상간(phase to phase) 전류를 정류(commutation)하기 위해 직접적인 회전자 위치센서가 필요하여 엔코더나 레졸버 또는 홀센서가 취급되기 때문에 SRM가격대비 센서의 가격이 가중된다. 또한 SRM의 크기, 별도의 하드웨어와 진동 및 습도 등의 많은 주위환경에 대한 영향을 받기 때문에 사용환경에 제한을 받는다.[1][2]

그래서 주위환경에 제한을 받지 않는 제어방법으로써 센서리스 제어방법이 많이 연구되고 있는데 그중 상승 인덕턴스의 제어방법[3]과 상태관측기에 의한 제어방법[4][5]이 있다.

먼저 인덕턴스에 의한 방법은 상승되는 인덕턴스의 변화가 회전자위치와 전류에 의한 함수이므로 실제상전류의 변화율을 알면 회전자위치를 알 수 있다. 하지만 이 방법은 연산오차를 줄이기 위하여 고속연산이 필요하며 SRM의 동작범위의 제한을 가중시킨다. 상태관측기에 의한 제어방법에서 축소차원 루엔버거는 SRM의 회전속도 및 위치 그리고 상전류를 추정하는데 사용된다. 하지만 매우 큰 회전자 관성으로써 비선형을 발생하기 때문에 성능이 떨어지는 원인이 된다.

이런 문제를 해결하기 위해 슬라이딩 모드 관측기 제어방법이 제시되었다.[6][7] 슬라이딩 모드 관측기는 비선형적인 SRM을 선형화된 수학적 모델로부터 회전자의 위치와 속도를 추정할 수 있다. 하지만 관측기의 전기적인 제정수나 기계적인 제정수에 대한 의존도를 더욱 가중시키고 있어 불연속적인 입력으로 인하여 추정치의 채터링(chattering)이 발생된다.

본 논문에서는 기존의 슬라이딩 모드관측기의 전기적인 제정수에 의해 발생하는 채터링문제를 해결하기 위하여 고정자 저항 추정기를 갖는 새로운 속도 및 위치센서리스 제어기법을 제안한다. 제안된 방법은 정상상태에서 전동기의 고정자 저항 변동과 속도를 동시에 추정하면서 스위치드

드 릴럭턴스 전동기의 속도 및 위치센서리스 제어가 가능하게 한다. 제안된 관측기의 타당성을 증명하기 위해서 모의 실험을 행하였다.

2. 고정자 저항 추정기를 갖는 SRM의 센서리스 구동

2.1 SRM의 구조 및 동작원리

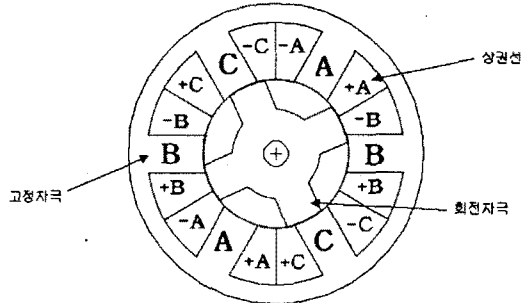


그림 1 SRM 평면도 구조(6/4)

Fig. 1 structure of SRM(6/4)

SRM은 그림 1과 같이 고정자는 집중권을 갖고 회전자에는 권선이나 영구자석과 같은 계자가 없으므로 매우 견고하며 간단한 구조로 되어있다. SRM의 각상에 발생하는 토오크는 식(1)과 같다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (1)$$

SRM은 돌극형 자기구조를 가지며 단방향 여자방식으로 구동된다. 고정자 상관선에 여자에너지를 인가하여 식(1)의 토오크를 발생하기 위해 그림 2와 같은 기본 스위칭 구조를 갖는다.

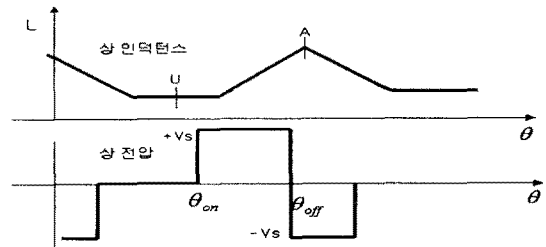


그림 2 SRM의 기본스위칭 구조

Fig. 2 Fundamental switching structure of SRM

식(1)의 최대 토오크를 얻기 위하여 그림 2의 토오크 발생구간 ($\theta_{on}, \theta_{off}$)을 최대한 활용하여 부하전류에 대응하는 전류의 확립과 소호를 신속히 하여 얻는다.

2.2 슬라이딩모드 관측기

본 논문에서는 슬라이딩 관측기에 기본을 둬서 SRM의 상태방정식만을 이용하여 위치추정 및 속도를 추정하며, SRM의 상태방정식은 식(2)와 같다.

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{-R_s}{L_s} i_s - \frac{1}{L_s} \frac{\partial L_s}{\partial \theta_s} \omega i_s + \frac{V}{L_s} \quad (2)$$

여기서,

- V: 상전압, i_s : 각 상의 전류,
- L_s : 각 상의 고정자 인덕턴스,
- θ_s : 각 상의 회전자위치, ω : 회전 속도,
- s: 고정자의 상수[3상].

식(2)을 기초로 한 관측기는 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{i}_s}{dt} = & -\frac{\hat{R}_s}{L_s} \hat{i}_s - \frac{1}{L_s} \frac{\partial \hat{L}_s}{\partial \hat{\theta}_s} \hat{\omega} \hat{i}_s \\ & + \frac{V}{L_s} + K_s e_s \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

- \hat{i}_s : 각 상의 추정전류, \hat{L}_s : 각 상의 추정 인덕턴스,
- $\hat{\theta}_s$: 각 상의 추정위치, $\hat{\omega}$: 추정속도,
- K_s : 관측기 이득 $K_s \text{Sgn}(e_s)$,
- e_s : $i_s - \hat{i}_s$ 각상전류 오차

추정전류오차방정식은 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(i_s - \hat{i}_s) = & \frac{-R_s}{L_s} i_s + \frac{\hat{R}_s}{L_s} \hat{i}_s - \frac{\partial L_s}{L_s \partial \theta_s} \omega i_s \\ & + \frac{\partial \hat{L}_s}{L_s \partial \hat{\theta}_s} \hat{\omega} \hat{i}_s + \Delta A V - K_s e_s \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $\Delta A = \frac{1}{L_s} - \frac{1}{\hat{L}_s}$

관측기상태를 실제시스템과 일치시키기 위해 슬라이딩 평면을 식(5)와 같이 전류 추정오차로 설정한다.

$$S = i_s - \hat{i}_s = 0 \quad (5)$$

슬라이딩 모드 관측기는 식(5)에서 보는 것과 같이 1차 식만을 이용하므로 수평축에서만 발생한다. 슬라이딩 평면을 기준으로 수렴하기 위하여 리아노프(Lyapunov)함수를 식(6)과 같이 설정하고 스위치드 릴럭턴스 전동기의 위치 및 고정자 저항을 추정하기 위해 식(7)과 같이 설정하였다.

$$V_{LP} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^s e_j^2 > 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_{LP}}{dt} = & \sum_{j=1}^s \left\{ e_j \left[\frac{d}{dt}(i_j - \hat{i}_j) \right] + (\omega - \hat{\omega}) \frac{d\hat{\omega}}{dt} \right. \\ & \left. + (R_j - \hat{R}_j) \frac{d\hat{R}_j}{dt} \right\} < 0 \end{aligned} \quad (7)$$

식(4)를 식(7)에 대입하면 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dV_{LP}}{dt} = & \sum_{j=1}^s \left\{ e_j \left[\frac{-R_j}{L_j} i_j + \frac{\hat{R}_j}{L_j} \hat{i}_j \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{\partial L_j}{L_j \partial \theta_j} \omega i_j + \frac{\partial \hat{L}_j}{L_j \partial \hat{\theta}_j} \hat{\omega} \hat{i}_j \right] \right. \\ & \left. - K_j e_j \right\} + (\omega - \hat{\omega}) \frac{d\hat{\omega}}{dt} + (R_j - \hat{R}_j) \frac{d\hat{R}_j}{dt} < 0 \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)은 한 추정주기 내에서 인덕턴스가 일정하다고

$$\left(\frac{dL_s}{dt} = \frac{d\hat{L}_s}{dt} \right) \text{ 가정하고 전개한 수식이다.}$$

식(8)이 만족되도록 K_s 가 선택된다면 식(5)는 평면 S로 수렴하게 된다.

2.3 속도 및 고정자 저항 추정

스위치드 릴럭턴스 전동기의 속도 및 위치 그리고 고정자 저항을 추정하기 위해서 식(8)을 식(9)와 식(10)으로 설정한다.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^s \left\{ e_j \left[\left(-\frac{R_j}{L_j} + \frac{\hat{R}_j}{L_j} \right) \hat{i}_j + \frac{1}{L_j} \left(-\frac{\partial L_j}{\partial \theta_j} \omega i_j \right. \right. \right. \\ \left. \left. - \left(-\frac{\partial L_j}{\partial \hat{\theta}_j} \hat{\omega} \hat{i}_j \right) \right] \right\} + (\omega - \hat{\omega}) \frac{d\hat{\omega}}{dt} + (R_j - \hat{R}_j) \frac{d\hat{R}_j}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^s e_j \left[-\frac{R_j}{L_j} (i_j - \hat{i}_j) - K_j e_j \right] < 0 \quad (10)$$

식(9)는 전동기의 속도와 고정자 저항에 대한 식이 서로 연관된 항이 없으므로 전동기의 속도와 고정자 저항을 추정할 수 있는 추정식으로 도출할 수 있어 다음 식(11), 식(12)와 같이 두 개의 식으로 각각 분리할 수 있다. 또한 식(10)은 관측기가 안정할 수 있도록 관측기이득을 구할 수 있다.

$$\sum_{j=1}^s \left\{ e_j \left(\frac{-R_j}{L_j} + \frac{\hat{R}_j}{L_j} \right) \hat{i}_j + (R_j - \hat{R}_j) \frac{d\hat{R}_j}{dt} \right\} = 0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^s \left\{ e_j \left[\frac{1}{L_j} \left(-\frac{\partial L_j}{\partial \theta_j} \omega i_j - \left(-\frac{\partial L_j}{\partial \hat{\theta}_j} \hat{\omega} \hat{i}_j \right) \right) \right] \right. \\ \left. + (\omega - \hat{\omega}) \frac{d\hat{\omega}}{dt} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

식(11)로 부터 다음 식(13)과 같이 고정자저항 추정식을 이끌어낼 수 있으며 식(12)로부터 다음 식(14)와 같이 속도 추정식을 이끌어낼 수 있다. (여기서 $\theta_j = \hat{\theta}_j$, $i_j = \hat{i}_j$ 으로 가정한다)

$$\frac{d\hat{R}_s}{dt} = -e_s \left[\frac{1}{L_s} \hat{i}_s \right] \quad (13)$$

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = e_s \left[\frac{1}{L_s} \frac{\partial L_s}{\partial \hat{\theta}_s} \hat{i}_s \right] \quad (14)$$

식(10)으로부터 전체적인 시스템이 안정될 수 있도록 관측기이득을 구하면 다음 식(15)과 같이 관측기의 이득을 구할 수 있다.

$$K_s > \max \left\{ -\frac{\hat{R}_s}{L_s} \right\} \quad (15)$$

식(15)을 만족하도록 관측기 이득을 설정하면, 전체적인 시스템은 안정하게 된다.

그림 3은 슬라이딩 관측기에 기본을 둔 고정저항 추정기를 갖는 SRM의 새로운 속도 및 위치 센서리스제어의 전체적인 블록도 이다.

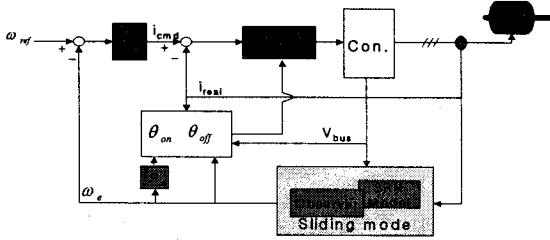


그림 3 슬라이딩 관측기에 기본을 둔 SRM의 새로운 제어 블록도

Fig. 3 Block diagram of new control of SRM based on sliding mode observer

그림 2 스위칭각의 점호각 θ_{on} 은 식(16)로 정의하였고 소호각 θ_{off} 는 고정시켰다.[8]

$$\theta_{on} = \frac{L_{min} di_{cmd}}{V_{bus}} \cdot \omega \quad (16)$$

여기서 슬라이딩 관측기는 식(13), 식(14)와 식(15)로 구성되며 각상의 전압과 전류를 입력으로 하여 추정속도 및 위치 그리고 고정자권선에 저항변동을 추정하여 출력하게 된다.

2.4 모의실험 결과

제안된 새로운 관측기의 타당성을 확인하기 위해서 다음 표 1과 같은 모의실험용 SRM에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다.

표 1 모의 실험용 SRM 모델 사양
Table. 1 Specification of simulation SRM model

고정자 극수	6	고정자 극호	15[deg]
회전자 극수	4	회전자 극호	15[deg]
고정자 상수	3	고정자 요크 폭	16[mm]
상권선 저항	72.5[Ω]	회전자 요크 폭	10[mm]
상 최소 인덕턴스	0.025[mH]	상 최대 인덕턴스	0.295[mH]

모의 실험은 기준속도를 정지상태 0[rpm]에서 스텝적으로 300[rpm], 0.3초 후에 1100[rpm]으로, 다시1초 후에 500[rpm]으로 운전했을 때의 결과로써 초기 위치를 정확히 알고 있다고 가정하였으며 정격부하를 인가한 상태에서 모의 시뮬레이션을 한 결과이다. 그림 4와 그림 5는 추정된 속도에 의해서 제어되고 있는 전동기의 동작상태 결과를 실제속도와 추정속도의 결과로 보여주고 있다. 그림 6은 전동기의 회전자의 실제 및 추정위치를 보여준다. 속도 및 위치 추정 결과를 보았을 때 제안된 관측기는 저속과 고속에서의 상태와 급변하는 과도상태에서도 회전자의 위치 및 속도를 잘 추정하고 있음을 볼 수 있다. 또한 그림 7은 전동기의 토오크분 상 전류를 보여주고 있다.

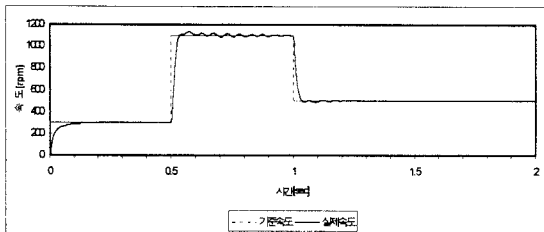


그림 4 실제 속도
Fig. 4 Real speed

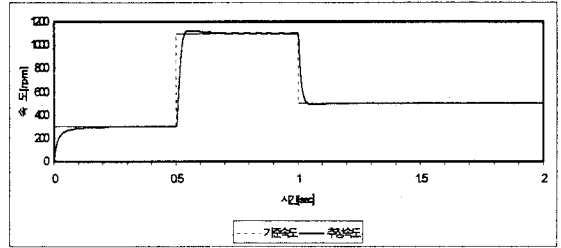


그림 5 추정속도
Fig. 5 Estimated speed

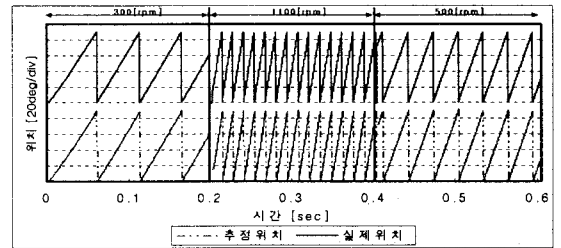


그림 6 속도영역별 회전자의 실제 및 추정위치
Fig. 6 Real and Estimated position of rotor

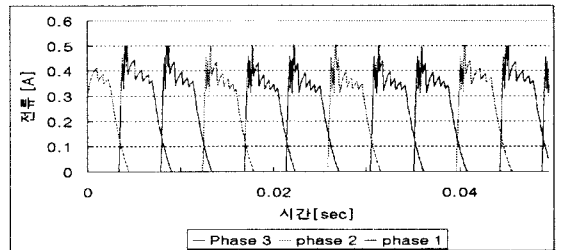


그림 7 토오크분 전류
Fig. 7 Torque-producing Current

그림 8~그림 11은 1100[rpm] 정상상태일 때 고정자 저항을 0.3[sec]에서 200[%](72.5Ω→145Ω) 변화 시켰을 때의 모의 실험 결과이다. 그림 8은 고정자 저항 추정 특성을 보여주고 있다. 저항값을 추정하는데 0.25[sec]정도 걸리나 실제 전동기 운전중에 저항 변동은 급변하는 상태는 이루어지지 않고 천천히 이루어지므로 문제가 없으리라 사료된다. 그림 9는 실제 저항 추정기를 갖지 않고 1100[rpm] 정상상태에서 저항 변동이 이루어졌을 때의 실제속도를 보여주고 있다. 기준속도와 실제속도의 오차는 ±100[rpm]정도의 오차를 발생하였다. 그림 10은 고정자 저항 추정기를 가졌을 때의 실제속도를 보여주고 있다. 고정자 저항 변동이 이루어지더라도 지령속도에 잘 수렴한다는 것을 보여주고 있다.

그림 11은 고정자 저항 추정기를 갖고 있을 때의 실제속도와 갖지 않았을 때의 실제속도간의 오차를 보여주고 있다. 속도오차는 ±7.3[%] 정도이다.

3. 결 론

본 논문에서는 비선형적 특성이 강하고, 자속 포화에 의한 회로정수의 변동이 심한 SRM에 적합한 슬라이딩 모드 제어론을 기초로한 고정자 저항 추정관측기를 갖는 속도 제어법을 제시하였다.

본 관측기를 통한 모의 실험결과 저·고속가변속시 넓은 속도의 제어영역에서 흔들림 없이 고속응답을 얻을 수 있었으며 고정자 저항 변동에도 속도와 위치추정에 있어서 강인한 추정성능을 확인할 수 있었다. 정격부하에서도 견실한 추정 성능을 유지하여 시스템의 신뢰성을 높일 수 있었다.

본 논문에서 제안된 관측기는 일반적인 비선형 시스템에서도 효과적으로 적용될 것이라 사료된다.

본 논문은 BK21 지원에 의하여 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] S. K. Panda, G. A. J. Amaratunga, "Switched Reluctance Motor Drive Without Direct Rotor Position Sensing", IEEE Annual meeting, Vol. 1, pp.525-530, 1990
- [2] Gabriel Gallegos-Lopez, Philip C. Kjaer, T. J. E. Miller, "A New Sensorless Method for Switched Reluctance Motor Drives", IEEE Trans, Vol. 34, pp.832-840, 1998
- [3] P.Laurent, M. Gabsi, B.Multon, "Sensorless Rotor Position Analysis Using Resonant Method for Switched Reluctance Motor", IEEE IAS Annual Meeting, Vol. 1, pp.687-694, 1993
- [4] Lumsdaine, A.,Lang, J.H, "State observer for variable-reluctance motors", IEEE Trans, Vol. 37, pp.133-142, 1990
- [5] I.-W.Yang, Y.-S.Kim, "Rotor Speed and Position sensorless control of a switched reluctance motor using the binary observer", IEEE Proceedings-, Vol. 147, pp. 220-226, 2000
- [6] Husain, I., Sodhi, S., Ehsani, M., "A sliding mode observer based controller for switched reluctance motor drives", IEEE IAS Annual meeting, Vol.1, pp. 635-643, 2-6 Oct. 1994
- [7] John, G., Eastham, A.R., "Speed control of switched reluctance motor using sliding mode control strategy", IEEE IAS Annual meeting, Vol.1, pp.263-270, 8-12 Oct. 1995
- [8] Michael T. DiRenzo, "Switched Reluctance Motor control - Basic Operation and Example Using the TMS320F240" TEXAS INSTRUMENTS, SPRA420A, pp. 2-12, 2000
- [9] Wilfrid Perruquetti, Jean Pierre Barbot, "Sliding mode control in engineering " Marcel dekker press, 2002

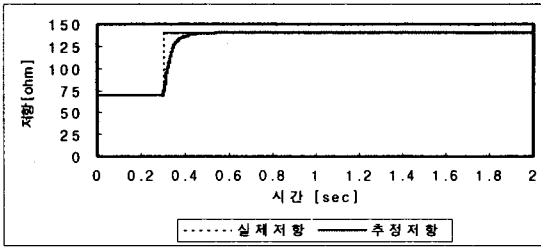


그림 8 고정자 저항 추정

Fig. 8 Estimated stator resistance

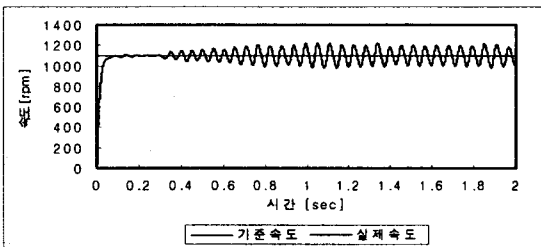


그림 9 고정자 저항 추정기를 갖지 않을 때 실제속도
Fig. 9 Real speed without stator resistance estimator

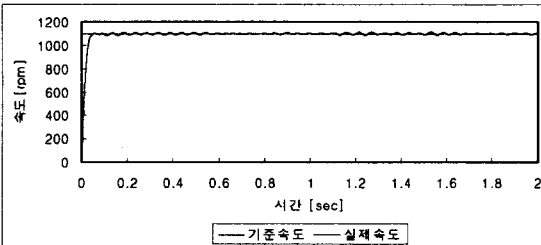


그림 10 고정자 저항 추정기를 가졌을 때의 실제속도
Fig. 10 Real speed with stator resistance estimator

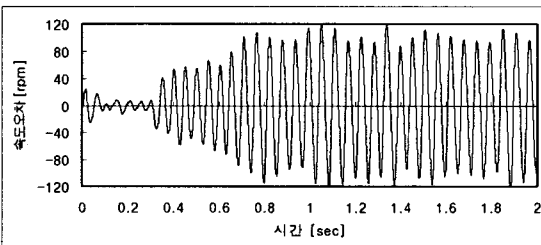


그림 11 고정자 저항 추정기를 가졌을 때와 갖지 않았을 때의 실제속도 오차(저항미추정시속도-저항추정시속도)
Fig. 11 Real speed error of with and without stator resistance estimator