

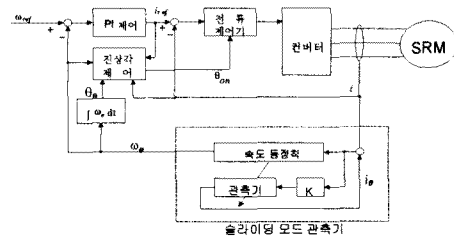
슬라이딩 관측기를 이용한 스위치드 릴럭턴스 모터의 속도제어

신재화
시립 인천전문대학

Speed Control of Switched Reluctance Motors Using Sliding Observers

Shin Jae Hwa
Inchon City College

Abstract - In this paper, a new estimation algorithm for the rotor speed for SRM drives is described. The algorithm is implemented by the sliding mode observer. The stability and robustness of the sliding observer for the parameter variations of the SRM are proved by variable structure control theory. Variable speed control of the SRM is accomplished by the estimated speed. Experiment results verify that the sliding mode observer is able to estimate the speed.



1. 서 론

위치 및 속도 센서없이 SRM을 속도제어할 수 있는 방법으로는 SRM의 선형화된 수학적 모델로부터 회전자 속도를 추정하는 방법으로 슬라이딩 모드 관측기가 제안되어 있다 [1-3]. 본 논문에서는 채터링을 제거하기 위하여 적응제어이론[4]과 가변구조 제어이론[5]을 혼합한 슬라이딩 모드 관측기를 제안한다.

시스템의 상태에 따라 실시간으로 시스템의 파라미터를 추정하는 속도 추정기와 각 상 전류를 추정하는 관측기로 구성되어 있고, 관측기의 안정성 및 속도 추정기의 안정성은 가변 제어이론과 리아프노프(Lyapunov)안정이론에 기초하여 증명하였다.

모의실험은 0.4 N·m의 부하토크를 인가한 조건에서 실시하였고, 실험 결과로 속도 추정성능을 확보하였고, 속도의 채터링을 확인하였으며 속도 추종성능은 양호하나 전류가 정·부 토크 영역 모두에서 인가되고 있었다.

2. 본 론

2.1 SRM의 속도제어에 관한 슬라이딩 관측기의 알고리즘.

본 추정 방법의 전체 블록선도는 그림1과 같다. 슬라이딩 평면을 이용하여, 전류추정오차의 수렴조건을 제시하고, 그에 따른 속도 동정치를 유도한다.

자속의 포화 및 불평형 전류 등의 비선형성을 지니고 있으므로, 비선형 시스템에 적당한 슬라이딩 모드 제어이론을 적용함으로써 안정성과 강인성을 확보할 수 있으며 관측기는 식(1)과 같다.

$$\frac{d}{dt} i_e = A_e i_e + Bv + K_s(i - i_e) \tag{1}$$

여기서, $K_s = K_{sa} + K_{sb}$

그림 1. 슬라이딩 모드 관측기의 전체 블록도

관측기상태를 실 시스템과 일치시키기 위해 슬라이딩 평면을 식(2)와 같은 전류추정오차로 설정한다.

$$s = i - i_e \tag{2}$$

추정 전류오차방정식은 아래와 같다.

$$e_i = A e_i - \Delta A i_e - \Delta B v - K_s e_i \tag{3}$$

식(3)의 슬라이딩 평면을 기준으로 Lyapunov 함수를 식(4)와 같이 설정한다.

$$\frac{d}{dt} V = s^T \frac{d}{dt} s \tag{4}$$

식(4)에 식(3)을 대입하여 정리하면 식(5)가 된다.

$$\frac{dV}{dt} = e_i^T [A e_i - \Delta A i_e - \Delta B v - K_s e_i] \tag{5}$$

식(5)에서 인덕턴스 추정오차는 없다고 가정하면 $\Delta B = 0$ 가 되며 식(6)과 같이 된다.

$$\frac{dV}{dt} = e_i^T [A e_i - \Delta A i_e - K_s e_i] \tag{6}$$

식(6)은 식(2)를 만족하여야 하므로 식(2)을 대입하여 정리하면 식(7)이 된다.

$$\frac{dV}{dt} = e_i^T \left\{ \left(\frac{-L}{R} - \frac{1}{L} \frac{dL}{d\theta} \right) e_i - \frac{1}{L} \frac{dL}{d\theta} (\omega_e - \omega) i_e - K_s e_i \right\} < 0 \quad (7)$$

K_s 에 대하여 풀면 식(8)이 된다.

$$K_s > \max \left[- \left(\frac{L}{R} + \frac{1}{L} \frac{dL}{d\theta} \right) - \frac{1}{L} \frac{dL}{d\theta} \left| \omega_e - \omega \right| \frac{|i_e|}{|i - i_e|} \right] \quad (8)$$

위의 식(8)을 만족하는 K_s 를 선정하면, 전류추정오차는 '0'으로 수렴하게 된다. K_{s1}, K_{s2} 의 상대적 조건은 다음과 같다.

$$K_{s1} > K_{s2} > 0 \quad (9)$$

2.1.1 리아프노프(Lyapunov)함수를 이용한 속도 동정척

Lyapunov함수로 속도추정오차를 선정하면, 식(10)과 같다.

$$\frac{d}{dt} V = (\omega_e - \omega) \frac{d\omega}{dt} \quad (10)$$

속도 적응칙을 다음의 식(11)과 같이 설정하면, 식(12)는 음이 되어 안정성이 확보된다.

$$\frac{d\omega_e}{dt} = g K_s e_i \quad (11)$$

여기서, g 는 양의 상수

2.1.2. 속도관측기

식(11)은 식(12)와 같은 속도 동정척으로 도출될 수 있다. 식(12)를 간략화 함과 동시에 응답속도를 빠르게 하기 위해 K_P 를 추가하고, 일정한 수속속도를 유지할 수 있도록 적분 이득 K_I 를 부가하면 식(13)으로 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{d\omega_e}{dt} = g(K_{s1} + K_{s2} \operatorname{sgn}(i_e))(i - i_e) \quad (12)$$

$$\omega_e = K_P(i - i_e) \operatorname{sgn}(i_e) + K_I \int (i - i_e) \operatorname{sgn}(i_e) dt \quad (13)$$

비선형적인 토크 방정식인 식(14)를 동작점(전류에 대한 동작점)에서 선형화하면, 식(15)와 같이 된다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (14)$$

따라서 식(13)은 토크 추정오차를 PI함으로서 속도를 추정하고 있다.

$$T_{Lin} = \frac{dL}{d\theta} i_o i = K_{fLin} i \quad (15)$$

여기서, T_{Lin} : 선형화된 토크,

i_o : 동작점에서의 전류,

K_{fLin} : 선형화된 토크 상수.

이를 토대로 관측기를 구성하면 안정성을 보증하고, 실시스텝의 추정 성능 또한 확보 할 수 있다.

3. 실험 장치

본 실험에서 사용한 전동기의 규격은 표 1과 같다.

전체 블록선도에서 PI제어부는 속도오차를 비례-적분하여 새로운 전류 지령치를 생성하고, 진상각 제어부는 지령전류, 실제전류, 추정속도를 이용하여, 진상각(θ_{on})을 결정한다. 전류 제어부에서는 진상각과 회전자위치의 비교에 의해 도통각(점호각과 소호각 사이)을 결정하고, 도통각에서 실제전류가 지령전류를 추종하도록 히스테리시스(Hysteresis) 전류제어를 실행한다.

관측기 부분에서는 실제전류 및 추정전류 그리고, 그 오차를 이용하여 전동기 속도 및 위치, 인덕턴스를 추정한다.

표 1 8/6 SRM의 규격

Number of stator poles	8	Rotor pole arc	24.6°
Number of stator phases	4	Phase resistance	1.2 Ω
Stator pole arc	22.8°	Minimum inductance	9 mH
Number of rotor poles	6	Maximum inductance	72 mH
Rated voltage	240V	Rated speed	4,000 rpm
Rated current	5A	Rated output	1HP
Rated torque	1.78 N·m		

표 2. 부하의 규격

Rated torque	3.8 N·m	Break Maximum voltage	24 V
Rated current	4.8 A	Maximum speed	3,600 rpm
Break Maximum torque	3.2 N·m	Maximum output	1.27 kW

상기의 모든 동작은 TMS320C31 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하여 실행하였다. 부하로서는 브레이크(Brake)가 부착되어 있는 BLDCM(Brushless DC Motor)을 사용하였고, 각각의 사양은 표 2에 나타내었다.

본 실험에서 사용하는 SRM의 정격부하 조건이 0.8 N·m 이므로 표 2에서 나타낸 브레이크가 부착된 전동기는 적당하다. 그러나 기동시에 과부하(정지 토크 3.8 N·m)가 인가되므로, SRM의 초기 구동에서 전상각 5°를 강제적으로 인가하여 이를 극복하였다. 3상 220V를 정류하기 위하여 3상 정류다이오드를 사용하였다. 컨버터(Converter)는 1.5n형을 사용하였다.

3.1 1.5n 스위치 컨버터(1.5n switch converter)

본 연구에서 사용된 컨버터는 1.5n 스위치형으로 기존의 비대칭형 컨버터에 비해 소자와 Freewheeling 다이오드가 각각 2개씩 적은 형태를 지니고 있다.

그림 2는 1.5n 스위치 컨버터의 회로를 나타내고 있다.

여기서, V_{dc} : 전원전압,

i_n : 각 상의 전류,

R_n : 각 상의 고정자 저항,

L_n : 각 상의 고정자 인덕턴스,

E_n : 각 상의 역기전력,

$n=1\sim4$: 고정자의 상.

본 실험에서 사용하는 SRM의 정격부하 조건이 0.8 N·m 이므로 표 2에서 나타낸 브레이크가 부착된 전동기는 적당하다. 그러나 기동시에 과부하(정지 토크 3.8 N·m)가 인가되므로, SRM의 초기 구동에서 전상각 5°를 강제적으로 인가하여 이를 극복하였다. 그림 3은 그림 2의 회전자 위치에 대한 동작을 보여주고 있다. SRM은 정 토크를 얻기 위하여 인덕턴스의 상승시에 전류를 인가하여야 하므로, 인덕턴스의 변화율이 양(+)인 구간에서 스위칭 소자를 ON/OFF하여야 한다. 본 실험에서 사용한 컨버터는 A/C상 과 B/D상의 동작은 동일하므로, A/C상에 대해서만 그림 7에 나타냈다.

전동기의 A상 인덕턴스(L_a)가 상승하기 바로 직전인 θ_a 에서 T_{ac} 와 T_a 를 도통시키면, A상 권선에 전류 i_a 가 흐르게 되고, SRM은 정 토크를 발생하게 된다. 다음순간인 θ_b 에서 T_{ac} 와 T_a 를 소호하면, 권선에 축적된 에너지가 Freewheeling 다이오드인 D_{ac} 와 D_a 를 통해 전원측으로 회생되게 되고, 회생동작이 완료되는 θ_c 에서 다이오드는 더 이상 도통되지 않게 된다. 마찬가지로 C상 인덕턴스(L_c)가 상승 직전인 θ_d 에서 T_{ac} 와 T_c 를 도통시키면, C상 권선에 전류 i_c 가 흐르게 되어, 전동기는 토크를 발생하게 된다. 회생 동작도 동일하게 D_{ac} 와 D_c 를 통해 이루어진다.

본 회로의 특징은 T_{ac} 와 D_{ac} , T_{bd} 와 D_{bd} 가 2개의 스위칭 소자의 역할을 담당하고 있으므로, 2개의 스위칭 소자를 줄일 수 있으나, 상압 소자는 하압 소자에 비해 스위칭 횟

수가 2 배가 되므로, 소자 정격에 이를 고려하여야 한다.

실험에 사용된 컨버터는 스위칭 소자로는 IGBT를 사용하고, 다이오드는 Fast Recovery 다이오드를 사용하였다.

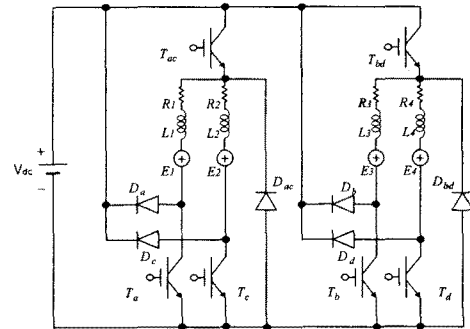


그림 2. 1.5n 스위치 컨버터

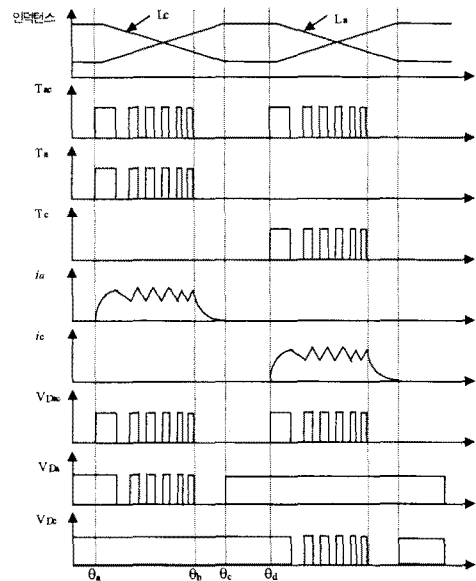


그림 3. 본 실험에 사용한 컨버터의 동작파형 (A, C상)

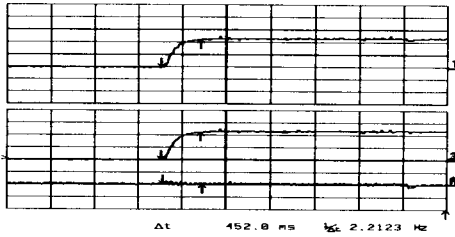
4. 실험결과

그림 4는 600rpm에서 실제·추정속도 추정오차를 나타내는데 정상상태에서 속도가 20rpm정도 흔들리고 있다. 관측기에 불연속적인 입력(전류 오차)이 인가되고 있음을 의미한다.

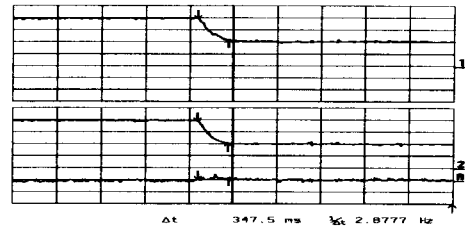
그림 5에서는 실제속도, 추정속도, 추정오차를 나타내고 있다. 속도 추정오차는 ± 30 rpm이다. 600rpm 지령시 속도 오차의 채터링이 발생하고 있는 것은 불연속적인 전류오차가 관측기에 입력되고 있으므로, 추정속도가 미세하게 떨리게 된다.

그림 6에서부터 그림 8까지는 가변속 지령을 주었을 경우의 파형으로 추정속도의 흔들림 현상은 계속해서 나타나고 있다.

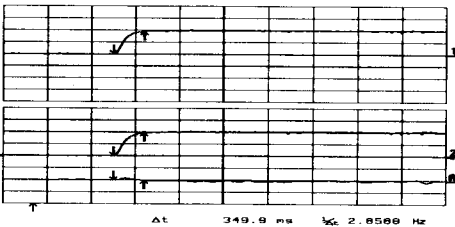
무부하시의 슬라이딩 관측기의 경우에서 나타난 문제점으로 추정속도가 채터링을 발생하고 있는 것이다. 그러나 속도 추정 및 추종은 오버슈트 없이 이루어지고 있음을 확인하였다.



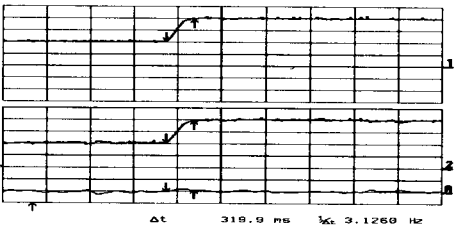
상:250rpm/div 중:250rpm/div 하: 125rpm/div 0.5sec/div
 그림 4. 실제속도(상), 추정속도(중), 추정오차(하)
 600rpm 속도지령



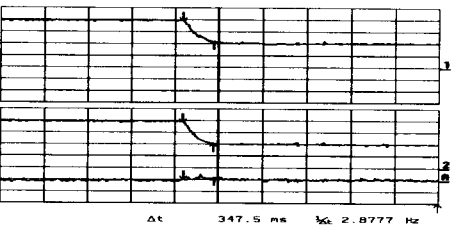
상:500rpm/div 중:500rpm/div 하: 250rpm/div 0.5sec/div
 그림 8. 실제속도(상), 추정속도(중), 추정오차(하)
 2,000-2,500rpm 가변속지령



상:500rpm/div 중:500rpm/div 하:250rpm/div 0.5sec/div
 그림 5. 실제속도(상), 추정속도(중), 추정오차(하)
 1,000rpm 속도지령



상:500rpm/div 중:500rpm/div 하:50rpm/div 0.5sec/div
 그림 6. 실제속도(상), 추정속도(중), 추정오차(하)
 1,000rpm-2,000rpm 가변속지령



상:500rpm/div 중:500rpm/div 하: 250rpm/div 0.5sec/div
 그림 7. 실제속도(상), 추정속도(중), 추정오차(하)
 2,000rpm-1,000rpm 가변속지령

5. 결 론

본 연구는 속도 센서를 사용하지 않고 SRM을 정속 및 가변속할 수 있는 구동시스템에 관한 연구로서 기존의 속도 센서를 갖는 SRM의 제어보다 저가이면서, 신뢰성이 우수하고, 부하 및 전동기 회로정수변동에 견실한 특성을 갖는 SRM의 가변속 제어를 제안하였다.

SRM은 전류가 상승하면, 자속이 포화되어 인덕턴스가 비선형성을 갖게 되므로, 회로 정수의 변동에 강한 속도 센서가 없는 제어기로서 적응 슬라이딩 모드관측기를 제안하고, 실제로 구현하였다.

가변구조 제어이론에 기초한 적응 슬라이딩 모드 관측기는 슬라이딩 초평면을 속도 추정오차로 설정하여 오차가 '0'으로 수렴하기 위한 조건을 제시하였고, 이를 이용하여 속도를 추정하였다. 추정성능은 오버슈트없이 회로 정수 및 외란의 변동에 강한 반면 불연속적인 제어 입력으로 인하여, 추정성능이 저하되고, 추정속도의 채터링이 나타나는 단점이 있었다.

새롭게 제안된 적응 슬라이딩 모드 관측기는 DSP를 이용하여 구현되었으며, 실험을 통하여 추정성능 및 부하에 대한 견실성을 갖는 속도센서없는 제어기가 구현되었음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Yang, S. K. Panda and Y. C. Liang, (1991). Sliding Mode Control for Switched Reluctance Motors : An Experimental Investigation . IEEE 96-101
- [2] V. I. Utkin (1993). Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives IEEE 23-36
- [3] J. P. Lyons, S. R. MacMinn and M. A. Preston, (1991). Flux/Current Methods for SRM Rotor Position Estimation, IEEE IAS 482 - 487.
- [4] A. Lumsdaine and J. H. Lang, (1990). State Observer for Variable-Reluctance Motor, IEEE Trans. Vol. IE-37, No.2, 133-142.
- [5] I. Husain, S. Sodhi and M. Ehsani, (1994). A Sliding Mode Observer Based Controller for Switched Reluctance Motor Drives, IEEE IAS 635-643.