

적응 동일 차원 관측기를 이용한 스위치드 릴럭턴스 모터의 속도제어

신재화
인천전문대학

Speed Control of Switched Reluctance Motors Using MRAS Observer

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 binary observer. The stability and robustness of the binary 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 MRAS observer is able to estimate the speed.

1. 서론

위치센서가 없이 SRM의 가변속 속도 제어방법으로는 측정된 전압과 전류값을 통해 속도기전력을 무시하고 자기인덕턴스나 상호인덕턴스를 계산하거나 [1],[2],[3], 인덕턴스를 측정하여 상여자를 결정하는 방법[4], [5]이 있다. 이 방법은 고속영역에서 무시할 수 있는 속도기전력으로 인하여 한계를 보인다.

본 논문에서는 MRAS이론을 적용해서 상태관측기의 섭동항을 고려하여 실제의 시스템과 관측기의 모델로 구성하며 실시간으로 파라미터 추정을 실행하고 추정된 값으로 속도를 제어한다.

두 모델간의 오차는 모터 구동시 전류의 실제값과 추정값 사이의 오차로 나타나며 이러한 추정오차는 속도변동의 정보를 갖게 되고, 이를 통해 실시간 추정이 이루어진다.

전류 PWM을 통한 제어법으로 토폴리플을 저감하는 안정한 속도제어법이 기술되고 실험결과를 통하여 제안된 방법의 타당성을 입증한다.

MRAS (Mode Reference Adaptive System)관측기는 DSP(Digital Signal Processor)에 의하여 구현하며, PC 상에서 C 언어로 프로그램을 작성하여 크로스 어셈블러에 의해 기계어로 변환하여 DSP를 구동한다. 모든 프로그램의 작성 또는 변경이 PC 상에서 C 언어로 구성되므로 제어의 유연성이 양호하다.

2. 본론

2.1 SRM의 상태방정식

본 시스템에서 사용한 모터 전류 방정식은 식(1)이다.

$$\frac{d}{dt}i = Ai + Bv \tag{1}$$

여기서

$$i = [i_a \ i_b \ i_c \ i_d]^T, \quad v = [V_a \ V_b \ V_c \ V_d]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44} \end{bmatrix}$$

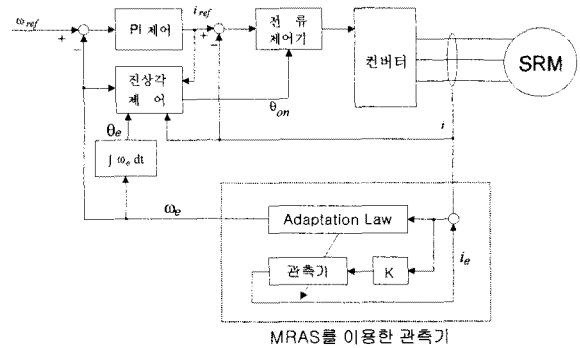
$$a_{11} = -\frac{R_a}{L_a} - \frac{\omega}{L_a} \frac{dL_a}{d\theta_a}, \quad a_{22} = -\frac{R_b}{L_b} - \frac{\omega}{L_b} \frac{dL_b}{d\theta_b}$$

$$a_{33} = -\frac{R_c}{L_c} - \frac{\omega}{L_c} \frac{dL_c}{d\theta_c}, \quad a_{44} = -\frac{R_d}{L_d} - \frac{\omega}{L_d} \frac{dL_d}{d\theta_d}$$

$$b_{11} = \frac{1}{L_a}, \quad b_{22} = \frac{1}{L_b}$$

$$b_{33} = \frac{1}{L_c}, \quad b_{44} = \frac{1}{L_d}$$

그림 1은 MRAS의 전체 블록선도를 나타내고 있다.



<그림 1> MRAS의 전체 블록도

그림 1에서 점선부분이 MRAS를 이용한 관측기로서 실제 전류와 추정전류의 오차를 통하여 속도를 추정(Adaption Law)하고, 추정된 속도의 적분에 의해 위치를 추정하고 있다.

2.2 안정도 해석 및 이득 K의 설정

식(1)은 나눗셈(Division)과 자속의 포화등 비선형적인 요소가 많다. 이를 극복하기 위하여 선형 제어기법을 사용할 경우, 상태방정식상의 가변극(Pole)과 가변제로(Zero)점이 존재하게 되어 속도 및 위치 추정시 리미트 사이클(Limit Cycle)등 여러 문제점이 야기된다. 따라서 적응제어를 적용하여 속도 및 위치를 동정하고 그 값을 이용하여 속도제어를 실현하는 전체 시스템을 구성한다.

첫 번째로 전동기 상태 방정식에 따른 관측기를 구성하면 식(2)와 같이 된다. 식(2)에서 이득행렬 K를 극배치기법을 통해 관측기 시스템의 안정성을 확보한다.

$$\frac{d}{dt}i_e = A_e i_e + B_e v + K e \quad (2)$$

여기서,

$$i_e = [i_{ae} \ i_{be} \ i_{ce} \ i_{de}], \quad v = [V_a \ V_b \ V_c \ V_d]^T$$

$$e = [(i_a - i_{ae})(i_b - i_{be})(i_c - i_{ce})(i_d - i_{de})]$$

$$A_e = \begin{bmatrix} a_{11e} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22e} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33e} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44e} \end{bmatrix}, \quad B_e = \begin{bmatrix} b_{11e} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{22e} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{33e} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_{44e} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_d \end{bmatrix}$$

$$a_{11e} = -\frac{R_a}{L_{ae}} - \frac{\omega_e}{L_{ae}} \frac{dL_{ae}}{d\theta_{ae}}, \quad a_{22e} = -\frac{R_b}{L_{be}} - \frac{\omega_e}{L_{be}} \frac{dL_{be}}{d\theta_{be}}$$

$$a_{33e} = -\frac{R_c}{L_{ce}} - \frac{\omega_e}{L_{ce}} \frac{dL_{ce}}{d\theta_{ce}}, \quad a_{44e} = -\frac{R_d}{L_{de}} - \frac{\omega_e}{L_{de}} \frac{dL_{de}}{d\theta_{de}}$$

$$b_{11e} = \frac{1}{L_{ae}}, \quad b_{22e} = \frac{1}{L_{be}}, \quad b_{33e} = \frac{1}{L_{ce}}, \quad b_{44e} = \frac{1}{L_{de}}$$

여기서,

$i_{ae}, i_{be}, i_{ce}, i_{de}$: 각상 추정 전류

$L_{ae}, L_{be}, L_{ce}, L_{de}$: 각상 추정 인덕턴스

$\theta_{ae}, \theta_{be}, \theta_{ce}, \theta_{de}$: 각상 추정 위치

두 번째로는 속도 동정기구 및 전류 추정 시스템의 안정도 해석에 대하여 서술한다.

본 연구에서는 Lyapunov 안정이론을 사용하여 관측기 및 속도 동정 기구의 안정도를 해석한다. Lyapunov 함수를 V 로 정의할 때 식(3)을 만족하면, 안정성이 확보될 수 있다.

$$V > 0, \quad \frac{dV}{dt} < 0 \quad (3)$$

Lyapunov 함수를 전류 추정오차와 가중 함수를 포함하여 식(4)과 같이 정의한다. 식(4)은 전류추정오차를 최소화 할 목적으로 선택되어졌다.

$$V = e^T \cdot e + f$$

$$e = i - i_e, \quad f: \text{가중 함수} \quad (4)$$

Lyapunov의 안정도를 확보하기 위하여 식(4)을 미분하여 정리하면 식(5)로 나타낼 수 있고, SRM 상태 방정식과 추정식의 오차방정식은 식(6)이 된다.

$$\frac{dV}{dt} = d \frac{e^T}{dt} \cdot e + e^T \cdot d \frac{e}{dt} + \frac{df}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt}(i - i_e) = A(i - i_e) - \Delta A i_e + \Delta B v + K(i - i_e)$$

여기서,

$$\Delta A = A - A_e, \quad \Delta B = B - B_e \quad (6)$$

식(6)에서 인덕턴스 추정오차에 기인하는 ΔB 는 '0'으로 가정한다. 따라서 식(5)에 $\Delta B = 0$ 를 대입한 후 정리하면, 식(7)과 같이 전개된다.

$$\frac{dV}{dt} = 2e^T [A(i - i_e) - \Delta A i_e + K(i - i_e)] + \frac{df}{dt}$$

$$= -2e^T \Delta A i_e + 2e^T (A - K)e + \frac{df}{dt} \quad (7)$$

여기서, 제2항은 K값이 충분히 큰 값으로 선정되면 부정성을 보장되므로, 식(8)의 부정성만 확보할 수 있다면, 안정성은 보장된다.

$$\frac{dV}{dt} = -2e^T \Delta A i_e + \frac{df}{dt} \quad (8)$$

따라서 Lyapunov 안정도 확보와 속도 추정을 실현하기 위하여 가중함수 f 를 속도 추정오차의 에너지 함수로 정의한다.

$$f = K_f \frac{(\omega_{eI} - \omega)^2}{L_e} \frac{dL_e}{d\theta_e} \quad (9)$$

또한 ω_e 의 동정측을 식(11)과 같이 설정한다. 식(11)은 식(10)의 토크 방정식으로부터 추정 토크 오차를 비례-적분하여 속도를 추정하고 있다.

$$T = \frac{1}{2} \left[\frac{dL_a}{d\theta_a} i_a^2 + \frac{dL_b}{d\theta_b} i_b^2 + \frac{dL_c}{d\theta_c} i_c^2 + \frac{dL_d}{d\theta_d} i_d^2 \right] \quad (10)$$

$$\omega_e = K_P (e^T i_e) + K_I \int (e^T i_e) dt = \omega_{eP} + \omega_{eI} \quad (11)$$

식(11)와 식(9)을 식(8)에 대입하여 정리하면,

$$\frac{dV}{dt} = -2e^T \Delta A i_e$$

$$+ 2K_f (\omega_{eI} - \omega) \frac{d(\omega_{eI} - \omega)}{dt} \frac{1}{L_e} \frac{dL_e}{d\theta_e}$$

$$= -2e^T \Delta A i_e$$

$$+ 2K_f \frac{1}{L_e} \frac{dL_e}{d\theta_e} \left[\omega_{eI} \frac{d\omega_{eI}}{dt} - \omega \frac{d\omega_{eI}}{dt} - \omega_{eI} \frac{d\omega}{dt} - \omega \frac{d\omega}{dt} \right] \quad (12)$$

이 된다.

한 Sampling Time에서는 속도가 불변이라고 가정하고 ($\frac{d\omega}{dt} = 0$), $\frac{d\omega_{eI}}{dt} = K_I e^T i_e$, $\omega_{eI} = \omega_e - \omega_{eP}$ 임을 이용하여 식(12)을 정리하면 식(13)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= -2e^T \Delta A i_e + 2K_f K_I \frac{1}{L_e} \frac{dL_e}{d\theta_e} [(\omega_e - \omega_{eP}) e^T i_e - \omega_e e^T i_e] \\ &= 2K_f K_I \frac{1}{L_e} \frac{dL_e}{d\theta_e} [(\omega_e - \omega) e^T i_e - (K_P i_e e^T) e^T i_e] - 2e^T \Delta A i_e \end{aligned} \quad (13)$$

식(13)에서 $\Delta A = \frac{1}{L_e} \frac{dL_e}{d\theta_e} (\omega_e - \omega)$ 이므로 $K_f = 1/K_I$ 로 정해주면 식(13)은 식(14)으로 쓸 수 있다.

$$\frac{dV}{dt} = -2K_P \frac{dL_e}{d\theta_e} \frac{1}{L_e} (e^T i_e)^2 \quad (14)$$

식(14)에 의하여 식(8)은 부정성이 보장되고 그에 따라 식(3)을 만족하게 되므로 시스템의 안정성은 보장된다. 이와 같이 식(11)을 이용하여 속도를 동정하고, 동정된 속도를 적분하여 현재 회전자의 위치를 추정한다. 추정된 속도 및 위치를 이용하여 Angle-Current Control를 행하게 된다.

$$\theta_e = \int \omega_e dt \quad (15)$$

식(15)의 회전자 위치와 선형 인덕턴스 프로파일로부터 인덕턴스를 추정할 수 있다. 그러나 실제의 인덕턴스는 전류와 회전자의 위치에 의하여 변동이 발생하므로, 정확한 인덕턴스를 추정할 수 없다. 본 관측기에서는 인덕턴스 추정오차를 관측기의 입력외란으로 간주하여 게인 K 의 설정시 강인성을 확보할 수 있도록 다음과 같이 설정한다.

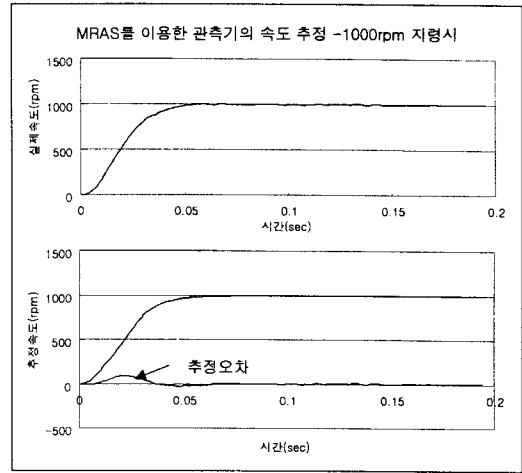
$$K > -\frac{R}{L_e} - \frac{\omega_e}{L_e} \frac{dL_e}{d\theta_e} - \left(\frac{1}{L_{max}} - \frac{1}{L_e} \right) V \quad (16)$$

여기서 L_{max} : 인덕턴스의 최대값

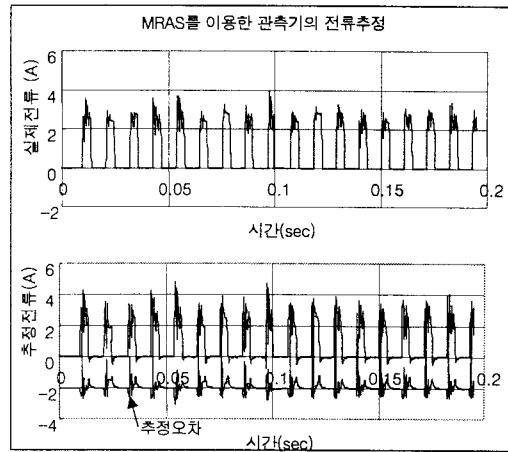
식(16)에 따라 전류를 추정할 때 외란인 인덕턴스 추정오차를 제거할 수 있다.

따라서 안정하고, 강인한 관측기의 구성은 식(16)의 조건을 만족하는 이득 K 를 설정하고, 식(11)에 의한 속도 추정으로 성취되어질 수 있다.

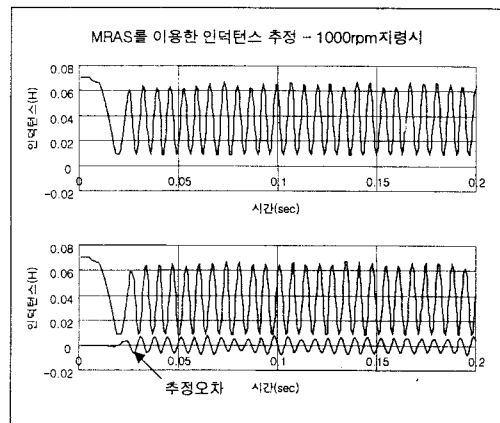
2.3 모의실험 결과



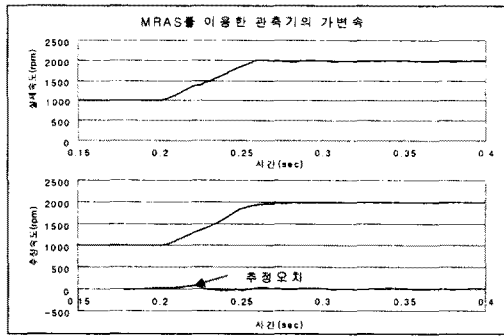
<그림 2> 추정속도, 실제속도, 추정오차



<그림 3> 추정전류, 실제전류, 추정오차



<그림 4> 실제인덕턴스, 추정인덕턴스, 추정오차



〈그림 5〉 추정속도, 실제속도, 추정오차

그림 2에서부터 그림 4까지는 속도 지령 1,000[rpm]에서 추정속도 실제속도, 실제전류 와 추정전류, 실제 인덕턴스, 추정 인덕턴스를 나타내고 있다. 추정 성능은 양호하며, 인덕턴스 추정시 오차가 발생하고 있다.

그림 5는 속도지령 1,000[rpm]에서 2,000[rpm]으로 가변속하였을 경우의 실제 속도 및 추정속도 와 추정오차를 나타내고 있다. 정상상태에서는 오차가 없이 우수한 추정성능을 보이고 있다. 위의 경우는 0.4 [Nm]의 부하토크를 인가한 상황에서 모의실험을 실시하였다.

본 모의실험의 결과 다음과 같다.

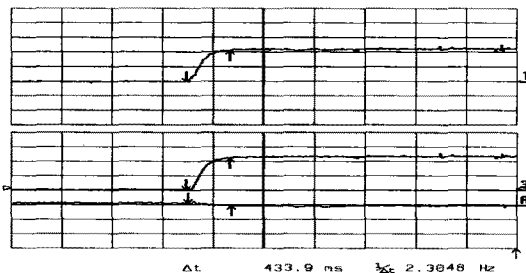
- 1) MRAS를 이용한 속도추정은 최대오차 5[%]이내의 범위로 속도 및 위치 추정성능을 확보하였다.
- 2) 목표치 응답 특성을 확보하였다.
- 3) 부하에 대한 강인성을 확인하였다.

3. 실험 장치

본 실험에서 사용한 모터의 규격과 실험장치도와 1.5n 컨버터는 참고문헌 [6]과 같다.

4. 실험결과

그림 6은 600[rpm]지령시 추정속도, 실제속도, 및 추정오차를 나타내고 있다. 낮은 속도 영역에서 토크 리플이 심할 것으로 예측되었으나, 무부하이므로 토크 리플에 따른 속도의 흔들림은 보이지 않고 있다. 추정오차는 거의 '0'으로 수렴하고 있다.

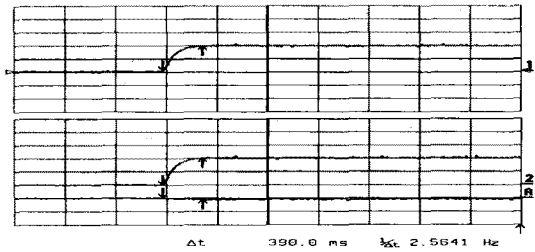


상: 250rpm/div 중: 250rpm/div 하: 250rpm/div 0.5sec/div

〈그림 6〉 실제속도(상), 추정속도(중), 추정오차(하) 600[rpm]지령

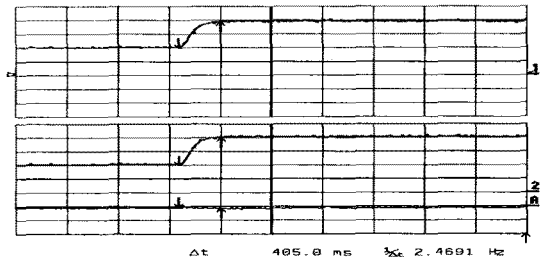
그림 7은 1,000[rpm]시의 실제속도, 추정속도, 추정오차를 나타내고 있다.

그림 8은 지령속도를 1,000[rpm]에서 2,000[rpm]으로 가속한 경우의 실제, 추정속도와 추정오차를 나타내고, 그림 9는 2,000[rpm]에서 1,000rpm으로 감속한 경우의 실제, 추정속도와 추정오차를 나타내고 있다.



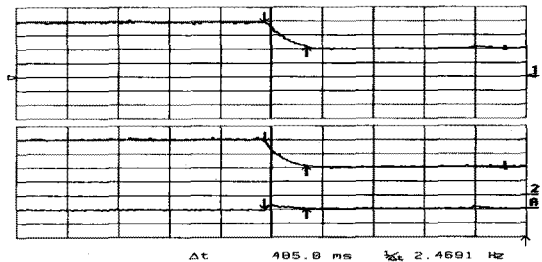
상: 500rpm/div 중: 500rpm/div 하: 500rpm/div 0.5sec/div

〈그림 7〉 추정속도(상), 실제속도(중), 추정오차(하) 1,000[rpm] 지령



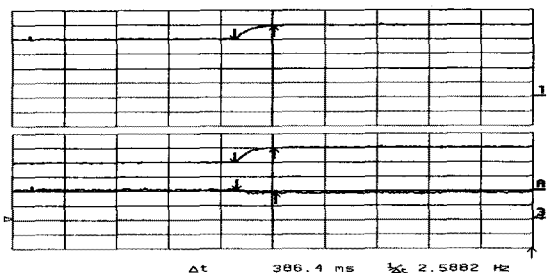
상: 500rpm/div 중: 500rpm/div 하: 250rpm/div 0.5sec/div

〈그림 8〉 실제속도(상), 추정속도(중), 추정오차(하) 1,000-2,000[rpm] 가변속 지령



상: 500rpm/div 중: 500rpm/div 하: 250rpm/div 0.5sec/div

〈그림 9〉 실제속도(상), 추정속도(중), 추정오차(하) 2,000-1,000[rpm] 가변속 지령



상: 500rpm/div 중: 500rpm/div 하: 250rpm/div 0.5sec/div

〈그림 10〉 실제속도(상), 추정속도(중), 추정오차(하) 2,000 - 2,500[rpm] 속도지령

[그림 10]은 2,000[rpm]으로부터 2,500[rpm]으로 가속한 경우의 실제, 추정속도와 추정오차를 나타내었다. 가·감속 시에도 역시 추정은 잘 이루어지고 있으며, 지령속도에 대한 응답성능도 양호하다.

5. 연구 결과

SRM은 전류가 상승하면, 자속이 포화되어 인덕턴스가 비선형성을 갖게 되므로, 회로 정수의 변동에 강인한 속도센서가 없는 제어기로서 적응 동일차원 관측기를 제안하고, 실제로 구현하였다.

적응제어이론에 기초로 한 MRAS를 이용한 관측기는 Lyapunov 안정도 해석법을 기초로 하여 안정도 해석을 실시하였고, 관측기 이득을 설정하여 속도를 추정하였다. 그러나 인덕턴스 변동에 의한 비선형성을 완전하게 극복하지 못하고, 속도 추정에 있어서 리밋 사이클(Limit Cycle)을 형성하고 있다.

광범위의 속도제어를 위해서는 채터링과 외란 및 회로 정수 변동에 대한 강인성의 Trade-Off가 중요하며, 이를 위한 연구가 필요하다고 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. P. Acarnley, R. J. Hill and C. W. Hooper, 'Detection of Rotor Position in Stepping and Switched Motors by Monitoring of Current Waveforms', IEEE Trans. IE, Vol. IE-32, No.3, pp.215-222, 1985.
- [2] S. K. Panda, and G. A. J. Amaratunga, 'Switched Reluctance Motor Drive Without Direct Rotor Position Sensing', IEEE IAS Annual Meeting, pp. 525-530, 1990
- [3] I. Husain and M. Ehani, 'Rotor Position Sensing in Switched Reluctance Motor Drives by Measuring Mutually Induced Voltage', IEEE Trans. IA, Vol.IA-30, No.30, pp.665-672, 1994.
- [4] P.Laurent, M. Gabsi and B. Multon, 'Sensorless Rotor Position Analysis Using Resonant Method for Switched Reluctance Motor', IEEE IAS Annual Meeting, pp.687-694, 1993.
- [5] M. Ehsani, I. Husain and A. B. Kulkani, 'Elimination of Discrete Position Sensor and Current Sensor in Switched Reluctance Motor Drives', IEEE Trans.IA, Vol. IA-28, No.1, pp.128-135, 1992.
- [6] 신재화, "적응 슬라이딩 모드를 이용한 SRM의 가변속제어", 시립인천전문대학 논문집, Vol.40, pp.37-47, 2004.