

이원관측기를 이용한 SRM의 가변속제어

신재화
인천전문대학

Variable Speed Control of Switched Reluctance Motors Using Binary 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 binary observer is able to estimate the speed.

1. 서 론

SRM의 위치센서가 없는 제어방법으로는 개루프에 의한 제어법[1], 상승 인덕턴스에 의한 방법[2][3][4][5], 자속/전류에 의한 방법[6], 자속연산에 의한 방법[7], 상호 유기기전력법[8], 관측기에 의한 방법[9] 등이 있다.

본 연구에서는 SRM의 고정도 가변속제어를 목적으로 속도센서없는 제어를 위한 관측기를 연구·개발하고자 한다.

이원관측기의 안전도를 해석하여, 이득을 결정하고 SRM의 인덕턴스의 불확실성에 대한 견실성을 컴퓨터 모의실험을 통하여 비교분석한다.

2. 본 론

2.1 이원 관측기

본 알고리즘에서 사용하는 모터 상태방정식은 식(6)과 같이 운동방정식을 포함하고 있다.

본 관측기의 안정성을 이원제어이론을 적용하여 검토하고, 전류 및 속도를 동시에 추정하는 방법을 제시한다.

그림 1은 이원 관측기를 포함한 제어 블록선도를 보이고 있다. 집선부분이 관측기로서, 주루프 제어기와 외부루프제어기를 갖는 구조로 되어있다. 주루프 제어기는 전류 및 속도추정에 대한 강인성을 확보하고, 외부루프 제어기는 파라미터 변동에 대한 강인성을 확보한다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} = A_s \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + B_s \begin{bmatrix} v \\ T \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $A_s = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & a_{55} \end{bmatrix}$, $B_s = \begin{bmatrix} B & 0 \\ 0 & b_{55} \end{bmatrix}$

$a_{55} = -\frac{B}{J}$, $b_{55} = \frac{1}{J}$

여기서, J : 관성 모멘트

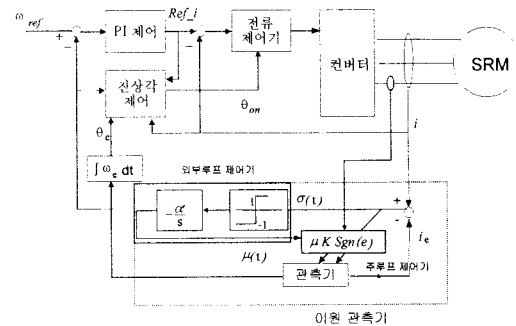


그림 1. 이원 관측기 전체 블록도

식(1)을 기초로 한 관측기는 식(2)와 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_e \\ \omega_e \end{bmatrix} = A_{se} \begin{bmatrix} i_e \\ \omega_e \end{bmatrix} + B_s \begin{bmatrix} v \\ T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \nu \quad (2)$$

여기서, $K_1 = k_1 I$, $K_2 = k_2 I_1$

$$\dot{\mu} I = -\alpha I [(\mu - \text{sgn}(\sigma(t)))]$$

$$\nu I = [\mu I \quad \sigma I \quad]$$

단, I : 4×4 단위 행렬, $I_1 = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$

$$\sigma = [(i_a - i_{ae})(i_b - i_{be})(i_c - i_{ce})(i_d - i_{de})]^T$$

본 관측기의 추정 전류오차를 이원관측기의 초평면(Hyperplane)으로 정의하면, 식(3)과 같다.

$$\sigma = [(i_a - i_{ae})(i_b - i_{be})(i_c - i_{ce})(i_d - i_{de})]^T \quad (3)$$

이원 관측기의 경우 슬라이딩 관측기와는 달리 어떤 경계내에서 연속적인 입력(추정전류 오차)을 인가하기위해 경계영역을 식(4)와 같이 설정한다.

$$G_\delta = x : \sigma^+ \cdot \sigma^- \leq 0 \quad (4)$$

단, $\sigma^+ = \sigma - \delta$ $\delta : const$

$$\sigma^- = \sigma + \delta \quad 0 < \delta \leq 1$$

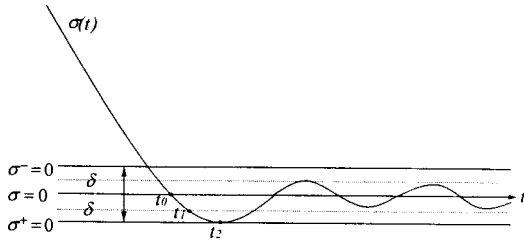


그림 2. 이원관측기의 G_δ 영역과 오차 궤적

그림 2는 식(4)을 도시한 것이다. δ 는 G_δ 영역의 폭을 나타내는 설계 파라미터로서, δ 를 너무 작게 하면, 영역은 슬라이딩 면과 같아지게 되어 슬라이딩 관측기와 같은 특성을 갖게 된다. 또, t_0, t_1, t_2 는 각각 $|d| = 0, \delta/2, \delta$ 에 도달하는 시간을 나타내고 있으며, 시간이 진행될수록 오차는 '0'으로 수렴하고 있다.

이와 같이 이원 관측기는 연속적인 오차 입력을 통하여 채터링없이 속도를 추정할 수 있도록 한다.

2.2 이원관측기의 오차방정식 및 이득설정

추정 전류오차가 G_δ 영역 이내로 도달하기 위한 조건을 찾기 위하여 전류추정오차 방정식을 구하여야 한다. 그러나 식(1)과 식(2)은 비선형 방정식이므로 선형화하여 오차 방정식을 구하면, 식(5)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_i \\ e_\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_i \\ e_\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \nu \quad (5)$$

단, $e_i = i_e - i, e_\omega = \omega_e - \omega$

$$F_{11} = \left[-\frac{R}{L} - \frac{1}{L} \frac{dL}{d\theta_e} \omega_e \right] I$$

$$F_{12} = \left[-\frac{1}{L} \frac{dL}{d\theta_e} i \right] I_1^T$$

$$F_{21} = \frac{1}{J} \left[\frac{1}{L} \frac{dL}{d\theta_e} i \right] I_1$$

$$F_{22} = \frac{-B}{J}$$

식(6)의 추정오차가 '0'으로 수렴하기 위해서는 G_δ 의 경계에서 다음의 조건을 만족하면 된다.

$$\sigma^+(t) \cdot \dot{\sigma}^+(t) < 0, \sigma^-(t) \cdot \dot{\sigma}^-(t) < 0 \quad (6)$$

또, 관성형의 특성을 갖기 위해서는 다음과 같은 μ 의 조건을 만족해야만 한다.[10]

$$-\mu(t_2) \operatorname{sgn} \sigma(t_2) \geq 1 - h \quad (7)$$

여기서, $0 < h < 1$

2.2.1 전류추정 제어이득 K_1 의 설정

영역 G_δ 내에 들어온 $\sigma(t)$ 가 영역을 벗어나지 않고 계속 영역내에 머물러 있을 조건은 이득행렬 K_1 을 적절하게 선택함으로써 확보되어 질 수 있다. 먼저 추정오차가 양 ($\sigma(t) > 0$)인 경우에 대하여 서술한다. 추정오

차가 양이므로, 식(12)으로부터 $\dot{\sigma}(t) < 0$ 이어야만 한다. 따라서, 전류추정 오차방정식(5)을 이용하여, 식(8)을 구할 수 있다.

$$F_{11}E_1 + F_{12}E_2 + K_1\nu < 0 \quad (8)$$

또한 식(7)에 의하여 μ 의 범위를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$-\mu(t_2) \operatorname{sgn} \sigma(t_2) \geq 1 - h \quad (9)$$

식(8)과 식(9) 그리고, 식(2)의 ν 의 정의에 의해 정리하면, K_1 에 대한 범위를 식(10)과 같이 구할 수 있다.

$$K_1 > \frac{1}{(-l+h)\sigma(t)} [F_{11}e_i + F_{12}e_\omega] \quad (10)$$

식(10)에서 $\sigma(t) \leq \delta$ 이므로, 다음과 같이 변경할 수 있다.

$$K_1 > \frac{1}{(-l+h)\delta} [F_{11}\delta + F_{12}e_\omega] \quad (11)$$

$\sigma(t) < 0$ 인 경우 유사하게 수식을 전개하면 식(12)과 같다.

$$K_1 > \frac{1}{(l-h)\delta} [F_{11}\delta - F_{12}e_\omega] \quad (12)$$

따라서, K_1 은 식(11)과 식(12)을 동시에 만족하여야 하므로, K_1 의 경계는 다음과 같다.

$$K_1 > \max \left[\begin{array}{l} \sup | \frac{1}{(-1+h)\delta} [F_{11}\delta + F_{12}e_\omega] | \\ \sup | \frac{1}{(1-h)\delta} [F_{11}\delta - F_{12}e_\omega] | \end{array} \right] \quad (13)$$

2.2.2 회전자속도 추정이득 K_2 의 설정

영역 G_δ 내에서 속도 추정오차가 원점에 수렴할 조건은 K_2 를 적절하게 설정함으로써 확보되어 질 수 있다. G_δ 영역 내에서 e_i 를 상수로 가정하면 식(5)로부터 식(14)을 구할 수 있다.

$$\dot{e}_i = d = F_{11}e_i + F_{12}e_\omega + K_1\nu \quad (14)$$

여기서, $d : \text{const}$

또한, 식 (5)에서 e_ω 에 대하여 전개하면 식(15)과 같다.

$$\dot{e}_\omega = F_{21}e_i + F_{22}e_\omega + K_2\nu \quad (15)$$

식(14)을 ν 에 대해서 정리하고, 식(15)에 대입하면 식(16)으로 된다.

$$\dot{e}_i = (F_{21} - K_2K_1^{-1}F_{11})\delta + (F_{22} - K_2K_1^{-1}F_{12})e_\omega + K_2K_1^{-1}d \quad (16)$$

식(16)으로부터 $F_{22} - K_2 K_1^{-1} F_{12}$ 의 고유치를 음으로 하면, e_ω 를 원점으로 수렴시킬 수 있다. SRM은 특성상 한 상 내지는 두 상을 여자시켜 토크를 발생시키므로, 식(17), 식(18)에서 한 상(A상)을 여자한 것으로 가정하고, K_2 의 범위를 구하였다.

$$(F_{22} - K_2 K_1^{-1} F_{12}) = -\frac{B}{J} + \frac{1}{L_{ae}} \frac{dL_{ae}}{d\theta_{ae}} i_{ae} \frac{K_{2a}}{K_{1a}} < 0 \quad (17)$$

$$K_{2a} < \frac{B}{J} L_{ae} \frac{d\theta_{ae}}{dL_{ae}} \frac{1}{i_{ae}} K_{1a} \quad (18)$$

여기서, i_{ae} : A상 추정전류

L_{ae} : A상 추정 인덕턴스

$K_{1a} = k_1$

$K_{2a} = k_2$

2.2.3 보조루프 제어이득 α 의 설정

본 절에서는 외부루프 조정기의 이득 α 를 구한다. 본 설정은 G_δ 영역에서 실시하므로, $\sigma(t)$ 의 범위는 $-1 < \sigma(t) < 1$ 이다.

$\sigma(t) > 0$ 의 경우 $\text{sgn}(\sigma(t)) = 1$ 이고, 식(2)로부터 $\dot{\mu}(t) = -\alpha(\mu(t) + 1)$ 가 된다. 따라서 그 해는 식(19)과 같다.

$$\mu(t) = -1 + [\mu(t_0) + 1] \exp[-\alpha(t - t_0)] \quad (19)$$

보조루프 조정기의 이득은 식(7)의 조건을 만족함으로서 구할 수 있다. 따라서 식(7)을 식(20)과 같이 가정한다.

$$-\mu(t_2) \text{sgn}\sigma(t_2) < 1 - h \quad (20)$$

식(19)과 식(20)에 의하여 식(21)을 얻을 수 있다.

$$t_2 - t_0 < \frac{1}{\alpha} \ln \frac{2}{h} \quad (21)$$

식(22)은 속도추정오차에 가중치($\frac{1}{\delta} \geq 0$)를 주어 설정한 함수이다. 따라서 식(20)에 의한 식(21)이 식(22)의 존재조건을 만족하지 못한다면, 전류 및 속도 추정은 실패하게 된다.

식(21)이 식(22)을 만족하는지 판별하기 위하여 식(22)을 미분한다. 미분한 식을 다시 $[t_0, t_2]$ 시간동안 적분하여 정리하면, 식(23)으로 된다.

$$\varphi(t) = \frac{\sigma(t)}{\delta} \quad (22)$$

여기서, $|\varphi(t)| < 1$ at G_δ
 $|\varphi(t)| = 1$ at $t = t_2$

$$\varphi(t_2) \leq \frac{1}{\delta} \overline{K_0} (t_2 - t_0) \quad (23)$$

여기서, $\overline{K_0} = \sup |F_{11} e_i + F_{12} e_\omega + K_1 v|$

만약 $\alpha > \frac{1}{\delta} \overline{K_0} \ln \frac{2}{h}$ 이라 가정하고, 식(23)에 식(21)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\varphi(t_2) \leq \frac{\alpha}{\ln \frac{2}{h}} (t_2 - t_0) < 1 \quad (24)$$

식(30)은 식(31)에서 가정한 $|\varphi(t_2)| = 1$ 에 모순된다. 따라서 반증을 위한 가정 식(20)은 모순이며, 식(21)도 모순이다.

그러므로, 식(7)은 합당하게 되고, α 의 범위는 식(25)과 같다.

$$\alpha > \frac{1}{\delta} \overline{K} \cdot \ln \frac{2}{h} \quad (25)$$

전류 및 속도의 정확한 추정을 위하여 식(13)과 식(18)을 만족하는 주루프게인을 설정하고, 식(26)을 만족하는 외부루프게인을 설정하면, 관측기 시스템은 안정된다. 또한, G_δ 영역에서 오차를 서서히 수렴시켜감으로서 슬라이딩 관측기에서 발생하는 불연속적인 입력에 의한 채터링이 저감된다.

2.3 모의실험결과

그림 3은 속도지령 1,000rpm에서 추정속도 실제속도, 추정오차를 나타내고 있다. 추정성능은 양호하다.

그림 4는 실제전류 및 추정전류, 추정오차를 보이고 있다. 부토크 영역에서의 전류 인가는 없으며 또한 전류의 채터링도 일어나지 않고 있다.

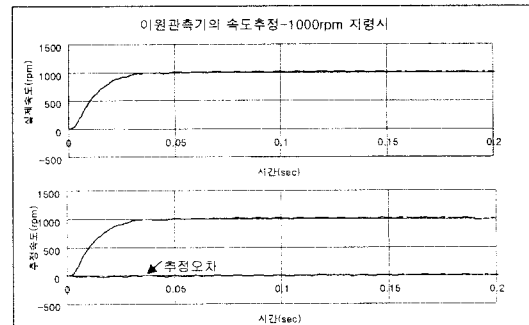


그림 3. 실제속도, 추정속도, 추정오차

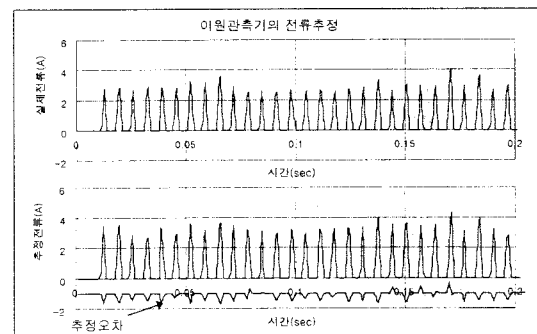


그림 4. 실제전류, 추정전류 및 추정오차

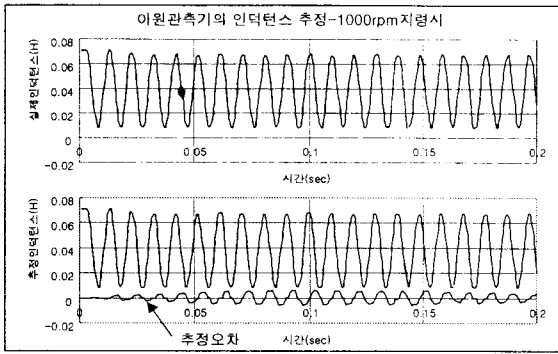


그림 5. 실제 인덕턴스, 추정 인덕턴스, 추정오차

그림 5는 실제 인덕턴스, 추정 인덕턴스, 추정오차를 보이고 있다. 정현파 형태의 오차는 나타나고 있으나, 점진적으로 작아지고 있다.

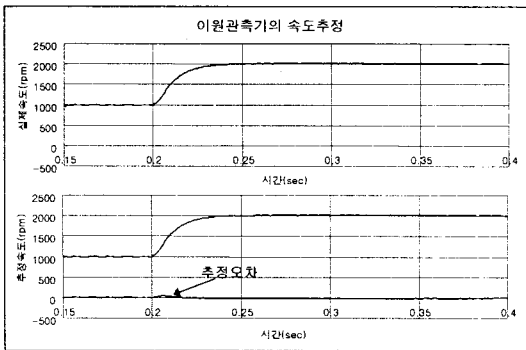


그림 6. 실제속도, 추정속도 및 추정오차

그림 6은 속도지령 1,000rpm에서 2,000rpm으로 가변속하였을 경우의 실제속도, 추정속도, 추정오차를 나타내고 있다. 과도시에만 오차가 나타날 뿐 속도 떨림 현상이 나타나지 않고 있다. 모의 실험에서 0.4N.m의 부하 토크를 인가한 상황에서 실시하였다.

3. 결 론

본 모의실험의 결과로 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 속도 및 위치 추정성능을 확보할 수 있었다.
- 2) 목표치 응답성능을 확보하였다.
- 2) 부하에 대하여 견실함을 확인하였다.
- 3) 부토크 영역에서의 전류 인가를 제거할 수 있었고, 고속에서의 속도 채터링이 제거되었음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] J. T. Bass, N. M. Ehsani and T. J. Miller, "Robust Torque control of Switched Reluctance Motors Without a Shaft Position Sensor", IEEE Trans. IE, Vol. IE-33, No.3, pp.212-216, 1986.

[2] 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.

[3] 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

[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. Kulkarni, 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] J. P. Lyons, S. R. MacMinn, M. A. Preston, "Flux/Current Methods for SRM Rotor Position Estimation," IEEE IAS Annual Meeting, pp.482 - 487, 1991.

[7] P. P. Acarnley, C. D. French, and I. H. Albahadly, "Position Estimation in Switched-Reluctance Drives", EPE, pp.765-770, 1995.

[8] I. Husain and M. Ehsani, "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.

[9] C. Elmas, and H. Z. L. Parra, "Position Sensorless Operation of a Switched Reluctance Drive Based on Observer", EPE, pp.82-87, 1993.

[10] S.V. Emelyanov, Binary Automatic Control Systems, Mir Publishers, Moscow, 1987.