

속도관측기를 이용한 관성 추정 알고리즘

최종우, 이광수, 김흥근
 경북대학교 전자전기공학부

Inertia Identification Algorithm Using Speed Observer

Jong-Woo Choi, Kwang-Soo Lee and Heung-Geun Kim
 School of Electronic & Electrical Engineering, Kyungpook National University

ABSTRACT

This paper proposes an algorithm for the moment of inertia estimation. The algorithm finds the moment of inertia observing the position error signal, which contains an error information of moment of inertia, generated by speed observer. Moreover, the proposed algorithm is easily realized in the observer-based speed detection method. The experimental results are also presented to confirm the performance of moment of inertia estimation method. The results show that the moment of inertia converges to the actual value with the proposed method.

1. 서론

최근 짧은 샘플링 시간 내에 고속의 정밀 연산을 수행할 수 있는 DSP(Digital Signal Processors)의 발달로 고속 응답 특성을 갖춘 서보시스템에 대한 요구가 증대되고 있다. 고성능의 속도제어 특성을 얻기 위해서는 정확하고 빠른 속도측정과 고성능의 속도제어 알고리즘이 필수적이다.

기존에는 인코더에 의해 발생하는 펄스의 수와 펄스사이의 시간을 측정함으로써 속도를 계산하는 M/T방식이 속도측정방법으로 많은 산업 응용분야에 적용되었다^[1,2]. 그러나 이 방식은 평균속도를 측정하는 방식으로 측정지연을 발생시켜 특히 저속영역에서 속도응답을 악화시키는 단점이 있다. 최근, 속도제어 성능을 향상시키기 위하여 관측기 이론 등의 제어이론을 적용한 속도측정방법이 많이 연구되었으며, 저속영역에서 기존의 M/T방식보다 우수한 속도 측정 성능을 보여주는 것으로 보고 되고 있다^[2,8].

게다가 근래의 서보 드라이버는 속도 혹은 위치센서로 기존의 인크리멘탈 엔코더 대신에 시리얼 엔코더를 채택

하고 있다. 시리얼 엔코더는 시리얼 통신을 통하여 구동 장치에 위치 정보를 제공한다. 대부분의 시리얼 엔코더는 구동장치에 전체 위치 정보를 전송하기 위해서는 수십 μs 정도가 소요된다. 그러므로 시리얼엔코더가 위치 센서로 사용될 경우, 시리얼 엔코더는 출력펄스를 발생 시키지 않기 때문에 기존의 M/T 방식으로 속도를 측정할 수 없다. 이 경우 제어이론을 이용한 속도측정법이 많이 사용될 것으로 전망된다.

제어이론을 기반으로한 속도측정법에서 정확한 속도 정보를 얻고, 속도제어기의 특성을 정확히 설계하기 위해서는 관성과 마찰계수와 같은 시스템 상수를 정확히 아는 것이 필요하다. 그 중에서 관성은 고성능 속도제어 성능을 얻기 위하여 가장 필수적인 상수이며, 관성추정에 관하여 많은 연구가 있어왔다^[10~14].

본 논문에서는 관성추정 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 속도관측기에서 발생하는, 관성오차의 정보를 포함하고 있는 위치 오차 신호를 관측함으로써 관성을 추정한다. 그러므로, 본 알고리즘은 관측기 기반 속도측정법에 쉽게 구현이 가능하다. 실험결과를 제시하여 제안된 관성추정법의 특성을 보여준다.

2. 본론

2.1 기계시스템의 모델링

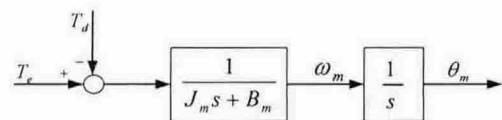


그림 1. 기계시스템의 모델링

그림 1에 표현된 기계시스템의 동적방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_d = T_e \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{rm} \quad (2)$$

여기서 ω_{rm} 은 기계각속도, T_e 는 구동토크, T_d 는 외란 부하토크, J_m 은 관성, B_m 는 마찰계수, θ_m 는 기계 각위치를 각각 나타낸다. 기계시스템의 출력은 위치이므로, 엔코더와 같은 위치센서로부터 속도정보는 식 (2)와 같이 위치를 미분함으로써 얻을 수 있다.

2.2 전차원 속도 관측기

외란 부하토크의 변화가 제어기의 샘플링 주기에 비해 매우 작으므로 외란 토크는 일정하고, 그 미분은 '0'으로 가정한다. 그러므로

$$\frac{dT_d}{dt} = 0 \quad (3)$$

식 (1)~(3)으로부터 상태방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (4)$$

$$y = Cx \quad (5)$$

$$\text{여기서 시스템 행렬 : } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{입력 행렬 : } B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{J_m} & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\text{출력행렬 : } C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{시스템 상태 : } x = [\theta_m \quad \omega_m \quad T_d]^T$$

$$\text{입력변수 : } u = T_e$$

$$\text{출력변수 : } y = \theta_m$$

입력변수는 구동토크 T_e 이다. 상태변수는 기계각위치 θ_m , 기계각속도 ω_m 과 외란부하토크 T_d 다. 출력변수는 기계각위치 θ_m 이다. 식 (4)는 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ T_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ T_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} T_e \quad (6)$$

상태방정식 (4)와 상태관측이론을 사용하여 다음과 같이 전차원 상태추정기를 구성할 수 있다.

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + K(y - C\hat{x}) \quad (7)$$

$$\text{실제 상태의 추정치 : } \hat{x} = [\hat{\theta}_m \quad \hat{\omega}_m \quad \hat{T}_d]^T$$

$$\text{비레이득 : } K = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]^T$$

식 (7)은 다음과 같이 다시 표현 할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ T_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} T_e + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} (\theta_m - \hat{\theta}_m) \quad (8)$$

비레이득을 잘 설정함으로써 만족스러운 오차 특성을 얻을 수 있다. 오차의 동특성은 상태방정식 (7)에서 추정기 식 (8)을 빼면 구할 수 있다.

$$\tilde{x} = x - \hat{x} \quad (9)$$

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = (A - KC)\tilde{x} \quad (10)$$

오차의 특성방정식은 다음과 같다.

$$\det[sI - (A - KC)] = 0 \quad (11)$$

또는

$$s^3 + \frac{k_1 J_m + B_m}{J_m} s^2 + \frac{k_2 J_m + k_1 B_m}{J_m} s - \frac{k_3}{J_m} = 0 \quad (12)$$

만약 행렬 $A - KC$ 가 안정하고 충분히 빠른 고유값을 가지도록 벡터 K 를 정한다면 오차 \tilde{x} 는 알려진 입력 $u(t)$ 과 초기값 $\tilde{x}(0)$ 에 관계없이 '0'으로 감소하여 그 값을 유지하게 된다. 즉, 추정치 $\hat{x}(t)$ 는 초기값 $\hat{x}(0)$ 에 관계없이 실제값 $x(t)$ 에 수렴함을 의미한다.

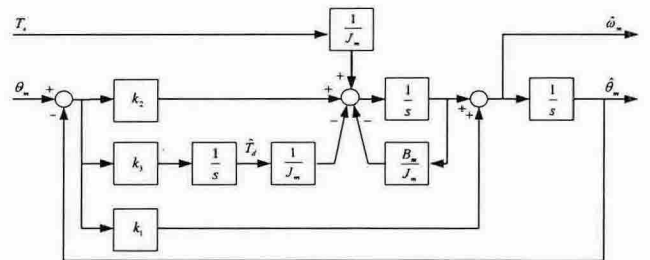


그림 2. 3차 속도 및 외란토크 추정기의 블록도

이득 벡터 K 는 다음과 같이 정할 수 있다. 요구되는 추정기 오차의 극의 위치를 $s_i = \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 라고 한다면 요구되는 추정기의 특성방정식은 다음과 같다.

$$\alpha_e(s) = s^3 - (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3)s^2 + (\beta_1\beta_2 + \beta_2\beta_3 + \beta_3\beta_1)s - \beta_1\beta_2\beta_3 = 0 \quad (13)$$

이득벡터 K 는 식 (12)와 (13)의 계수를 비교함으로써 다음과 같이 구해진다.

$$k_1 = -(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3) - \frac{B_m}{J_m} \quad (14)$$

$$k_2 = (\beta_1\beta_2 + \beta_2\beta_3 + \beta_3\beta_1) + (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3) \frac{B_m}{J_m} + \left(\frac{B_m}{J_m}\right)^2 \quad (15)$$

$$k_3 = \beta_1\beta_2\beta_3 J_m \quad (16)$$

그림 2는 3차 속도 및 외란토크 추정기의 블록도이다.

2.3 관성추정

제어기에서 알고 있는 관성 \hat{J}_m 는 실제의 관성 J_m 과 일반적으로 다르기 때문에 추정기의 식 (8)은 수정되어야 한다. 여기서 마찰토크의 영향은 매우 적어서 마찰계수를 무시할 수 있다고 가정한다. 수정된 상태방정식과 추정기 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ T_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ T_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix} T_e \quad (17)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\hat{J}_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_m \\ \hat{\omega}_m \\ \hat{T}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\hat{J}_m} \\ 0 \end{bmatrix} T_e + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} (\theta_m - \hat{\theta}_m) \quad (18)$$

식 (17)과 (18)을 초기값 '0'인 조건에서 라플라스 변환하면 다음과 같은 식들을 얻을 수 있다.

$$s\theta_m(s) = \omega_m(s) \quad (19)$$

$$s\omega_m(s) = \frac{1}{J_m}(T_e(s) - T_d(s)) \quad (20)$$

$$sT_d(s) = 0 \quad (21)$$

$$s\hat{\theta}_m(s) = \hat{\omega}_m(s) + k_1(\theta_m(s) - \hat{\theta}_m(s)) \quad (22)$$

$$s\hat{\omega}_m(s) = \frac{1}{\hat{J}_m}(T_e(s) - \hat{T}_d(s)) + k_2(\theta_m(s) - \hat{\theta}_m(s)) \quad (23)$$

$$s\hat{T}_d(s) = k_3(\theta_m(s) - \hat{\theta}_m(s)) \quad (24)$$

식(19)~(24)를 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta\theta_m(s) = \theta_{m,hpf}(s) \cdot \left(1 - \frac{J_m}{\hat{J}_m}\right) \quad (25)$$

식 (25)에서 $\theta_{m,hpf}(s)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\theta_{m,hpf}(s) = \frac{s^3}{s^3 + k_1s^2 + k_2s - \frac{k_3}{\hat{J}_m}} \theta_m(s) \quad (26)$$

즉, $\theta_{m,hpf}(s)$ 는 각위치 θ_m 을 알고 있는 계수로 고주파 통과 필터를 적용한 값이다. 그러므로, 식 (25)는 만약 각위치 오차와 각위치를 알고 있다면 실제의 관성을 구할 수 있음을 나타낸다. 식 (25)는 추정관성이 실제관성과 일치하는 경우 위치 오차는 항상 '0'이 됨을 의미하고, 추정관성과 실제관성이 다른 경우에는 식(25)에 의해서 위치오차가 발생함을 의미한다.

식 (25)에 $\theta_{m,hpf}(s)$ 을 곱하게 되면

$$\Delta\theta_m(s)\theta_{m,hpf}(s) = \theta_{m,hpf}(s)^2 \cdot \left(1 - \frac{J_m}{\hat{J}_m}\right) \quad (27)$$

이 되어서 $\Delta\theta_m\theta_{m,hpf}$ 은 추정관성과 실제관성의 차를 표현하는 신호가 된다. 이 값을 '0'으로 제어함으로써 관성을 추정할 수 있다.

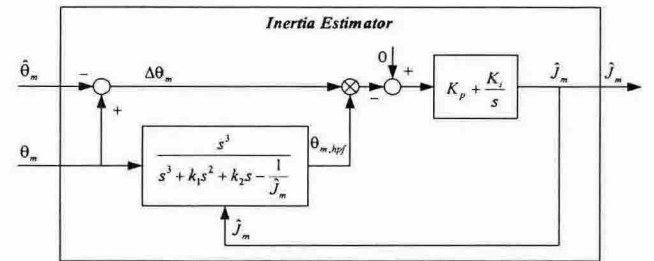


그림 3. 관성추정기

그림 3은 관성추정기의 블록도이다. 오차신호 $\Delta\theta_m\theta_{m,hpf}$ 를 PI 제어기를 사용하여 '0'으로 제어함으로써 관성을 구할 수 있다. 그림 4는 제안된 관성추정기를 포함한 속도제어기를 나타낸다.

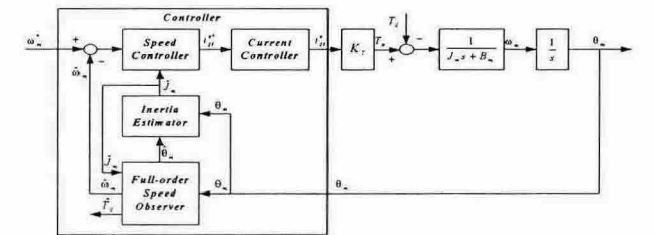


그림 4. 관성추정기를 포함한 속도제어기

2.4 실험결과

제안된 추정기의 실현가능성을 검증하기 위하여 900W 영구자석 동기전동기를 대상으로 실험을 행하였다. 실험에 사용된 전동기의 관성값은 무부하 상태에서 가감속 시험으로 구해졌으며 약 0.00149

[kg-m²]으로 구해졌다.

그림 6과 7은 속도지령이 ±1000rpm으로 교번하고 초기의 관성값이 ±20% 오차를 가질 경우의 속도응답과 관성추정 특성을 보여준다. 두 경우 모두 추정된 관성값은 실제값(0.00149[kg-m²])에 수초이내에 수렴함을 볼 수 있다. 추정된 관성값이 실제값에 수렴할수록, 속도응답특성이 향상되는 것을 볼 수 있다. 실제로 수렴된 관성 추정값은 실제관성보다 약간 큰 값 (약 0.00155[kg-m²])에 수렴하는데 이는 무부하 가감속시험에서 구한 값이 약간의 오차를 포함하는 것으로 추정된다.

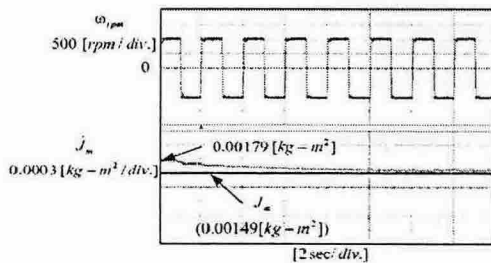


그림 6. +20% 오차를 가질 경우 관성 추정 특성

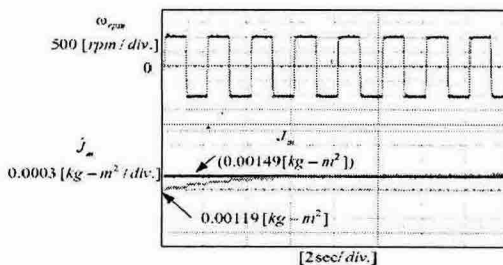


그림 7. -20% 오차를 가질 경우 관성 추정 특성

3. 결 론

본 논문에서는 관성추정 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 속도관측기에서 발생하는, 관성오차의 정보를 포함하고 있는 위치 오차 신호를 관측함으로써 관성을 추정한다. 그러므로, 본 알고리즘은 관측기 기반 속도추정법에 쉽게 구현이 가능하다. 실험결과를 제시하여 제안된 관성추정법의 특성을 확인하였다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호: R-2005-B-109) 주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

[1] T. Ohmae, T. Matsuda, K. Kamiyama, and M. Tachikawa, "A Microprocessor - Controlled High - Accuracy Wide - Range Speed Regulator for Motor

Drives," *IEEE Trans. Ind Electron.*, vol. 29, no. 3, pp. 207~211, Aug., 1982.

[2] 설승기, 전기기기제어론, 도서출판 브레인코리아, 2002, PP. 96~104.

[3] Robert D. Lorenz and Keith W. Van Patten, "High-Resolution Velocity Estimation for All-Digital, ac Servo Drives," *IEEE Trans. Ind Appl.*, vol. 27, no. 4, pp. 701~705, July/Aug., 1991.

[4] Kouetsu Fujita and Katsumasa Sado, "Instantaneous Speed Detection with Parameter Identification for ac Servo Systems," *IEEE Trans. Ind Appl.*, vol. 28, no. 4, pp. 864~872, July/Aug., 1992.

[5] Heui-Wook Kim and Seung-Ki Sul, "A new motor speed estimator using Kalman filter in low speed range," *IEEE Trans. Ind Electron.*, vol. 43, no. 4, pp. 498~504, Aug., 1996.

[6] Seung-Ho Song and Seung-Ki Sul, "An instantaneous speed observer for low speed control of AC machine," *APEC'98*, 1998, pp. 581~586.

[7] Taeg-Joon Kweon and Dong-Seok Hyun, "High-performance speed control of electric machine using low precision shaft encoder," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 14, no. 5, pp. 838~849, Sep., 1999.

[8] Sheng-Ming Yang and Shuenn-Jenn Ke, "Performance evaluation of a velocity observer for accurate velocity estimation of servo motor drives," *IEEE Trans. Ind Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 98~104, Jan./Feb., 2000.

[9] Gene F. Franklin, J. David Powell, and Abbas Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 3rd edition, Addison Wesley, pp. 515~527.

[10] Ichiro Awaya, Yoshiki Kato, Iwao Miyake, and Masami Ito, "New motion control with inertia identification function using disturbance observer," *IECON'92*, 1992, pp. 77~81.

[11] Nam-Joon Kim, Hee-Sung Moon, and Dong-Seok Hyun, "Inertia identification for the speed observer of the low speed control of induction machines," *IEEE Trans. Ind Appl.*, vol. 32, no. 6, pp. 1371~1379, Nov./Dec., 1996.

[12] Seok-Joon Hong, Heui-Wook Kim, and Seung-Ki Sul, "A novel inertia identification method for speed control of electric machine," *IECON'96*, 1996, pp. 1234~1239.

[13] Yujie Guo, Lipei Huang, Yang Qiu, and Masaharu Muramatsu, "Inertia Identification and Auto-Tuning of Induction Motor Using MRAS," *PIEMC 2000*, vol. 2, 2000, pp. 1006 ~ 1011.

[14] K.B. Lee, J.Y. Yoo, J.H. Song, and I. Choy, "Improvement of low speed operation of electric machine with an inertia identification using ROELO," *IEE Proceedings, Electric Power Applications*, vol. 151, no. 1, pp. 116~120, Jan., 2004.