

일반화 관측기법을 이용한 T·G 리플의 영향력 감소를 위한 속도추정 알고리즘

Development of Speed Estimation Algorithm for Low-effecting of T·G Ripple by Using Generalized Observation Technique

김환성 · 이충환 · 김상봉

H. S. Kim, C. H. Lee and S. B. Kim

Key Words : Generalized Observer(일반화 관측기), T.G(Tacho-generator), Ripple(리플), Spectrum Analysis(스펙트럼분석)

Abstract : Generally, T.G(Tacho-generator, Tachometer) sensor is used widely for sensing the angular velocity in rotary machine. By limitation of T.G sensor's structure, the sensed angular velocity include a periodic noise, and the noise is called "ripple" as an electrical term. To reduce the effecting of the ripple, many kinds of filters are designed and installed, but there is necessary a trade off between response time and adapted frequency band.

In this paper, we propose a generalized observer to estimate an angular velocity from the output signal of T.G sensor. The generalized observer is proposed firstly for continue systems, and it is applied to DC servo motor with T.G sensor. For simulation, we measure T.G signals at 60, 400, 570 rpm respectively, and analysis those to obtain the resonance frequency of ripple by FFT method. To verify the effectiveness of the proposed algorithm, we compare the results with those of a RC low frequency band filter.

1. 서 론

현대 각 산업공정에서는 다양한 구동기를 이용하여 위치 및 속도제어를 행하고 있으며, 이를 위해서는 엔코더, 포텐쇼미터, T.G, 레졸버 등이 이용되고 있다. 위치제어계에서는 엔코더, 또는 포텐쇼미터가 이용되어 펄스 카운팅값 및 전압변화에 따라 거리계산을 하고 있으며, 속도제어를 위해서는 T.G 및 엔코더를 이용하여 전압치 및 펄스 카운팅값에 대한 펄스 폭간의 시간 및 단위시간당의 펄스 카운팅 값을 이용하여 속도계산을 행하고 있다. 이와 같은 위치센서를 이용한 경우는 위치 값을 계산기에 의해 근사 미분을 행하여 속도값을 얻을 수 있으나, 주파수 영역에서의 게인이 높게 되어 노이즈를 증폭시키므로 오차값이 커져 사용분야가 제한되는 단점이다.

또한, 현재까지 속도제어계에서 T.G를 이용한 속도 추정법이 널리 이용되고 있으나, T.G의 기계적 구조로 인하여 리플(Ripple)이 발생되고 있으며, 이와 같은 리플은 모터 드라이브 내에서 필터링에 의해 제거되어 사용되고 있는 현실이다.

그러나, 속도가 고속인 경우는 상대적으로 리플의 진폭이 작아지므로, 고속필터링기법에 의해 유효하나, 저속인 경우에는 상대적으로 리플의 진폭이 커지므로 필터링을 행하는 경우, 저주파 영역에서는 필터링효과가 있으나 응답속도가 떨어지며, 고주파영역에서의 필터링은 응답속도는 빠르나 필터링효과가 거의 없게 된다. 따라서, 이와 같이 저속영역에서 T.G 사용시의 문제가 대두되어, 정확한 속도제어가 어려운 실정이다.

본 연구에서는 일반화 관측기 기법을 이용하여 저속영역에서의 리플에 의한 속도추정을 행하고자 한다. 먼저, 연속계의 일반화 관측기를 제안하며, 특정 주파수 외란에 대해서 설계가 가능함을 보인다. 따라서 주기적인 형태의 신호에 대해서 정확히 추정 및 소거가 가능하므로 리플의 영향이 가장

접수일 : 1999년 12월 14일

김환성 : 한국해양대학교 물류시스템공학과

이충환 : 부경대학교 대학원 기계공학과

김상봉 : 부경대학교 기계·자동차공학부

많이 미치는 주파수 영역에 맞게 일반화관측기를 설계할 수 있다. 본 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 RC 저대역 통과필터를 이용하여 비교 시물레이션을 행하도록 한다.

2. DC 모터와 T.G 모델링

본 연구에서는 구동기로서 T.G가 외장된 DC 서보 모터를 이용한다. 일반적인 DC 서보 모터의 모델은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다¹⁾.

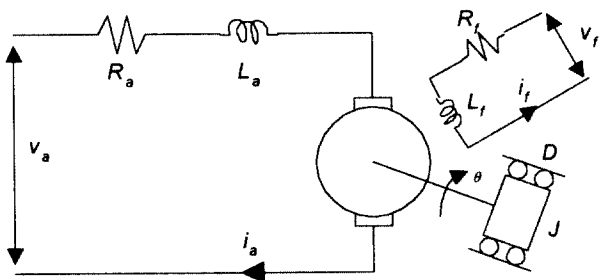


Fig. 1 Schematic diagram of DC servo motor

여기서,

- L_a, R_a : 전기자 회로의 인덕턴스와 저항
- L_f, R_f : 자계 회로의 인덕턴스와 저항
- D : 점성마찰계수
- J : 관성 모우먼트
- v_a, i_a : 전기자 전압, 전류
- v_f, i_f : 자계 전압, 전류

위의 모델로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$v_a(t) = L_a \dot{i}_a(t) + R_a i_a(t) + M(t) \dot{\theta}(t) \quad (1a)$$

$$v_f(t) = L_f \dot{i}_f(t) + R_f i_f(t) \quad (1b)$$

$$M(t) i_a(t) = J \ddot{\theta}(t) + D \dot{\theta}(t) \quad (1c)$$

여기서,

- $M(t)$: 상호 인덕턴스
- $M(t) \dot{\theta}(t)$: 모터의 역기전력
- $M(t) i_a(t)$: 모터의 발생 토크

일반적으로 DC 서보 모터는 $i_f(t)$ 가 일정하므로 $v_f(t) = R_f i_f(t)$ 으로 되어 (1)식은

$$v_a(t) = L_a \dot{i}_a(t) + R_a i_a(t) + k_m \dot{\theta}(t) \quad (2a)$$

$$k_m i_a(t) = J \ddot{\theta}(t) + D \dot{\theta}(t) \quad (2b)$$

로 된다. 단, $k_m = M(t) =$ 모터 토크 상수(일정) 위의 식에서 빠른 모드 i_a 를 $R_a i_a(t) + k_m \dot{\theta}(t) = v_a(t)$ 의 관계를 이용하여 소거하면 다음과 같다.

$$\ddot{\theta}(t) = -\left(\frac{k_m^2}{JR_a} + \frac{D}{J}\right)\dot{\theta}(t) + \frac{k_m}{JR_a} v_a(t) \quad (3)$$

상태변수를 $x_1 = \theta, x_2 = \dot{\theta}$ 로 하여 상태방정식을 세우면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (4b)$$

여기서,

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\left(\frac{k_m^2}{JR_a} + \frac{D}{J}\right) \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_m}{JR_a} \end{bmatrix}, \quad C = [0 \quad 1], \quad u = v_a$$

또한, 식(3)을 Laplace 변환시켜 입력 전압에 대한 각속도의 전달함수로 표현하면

$$G(s) = \frac{s\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{\frac{k_m}{JR_a}}{s + \left(\frac{D}{J} + \frac{k_m^2}{JR_a}\right)} \quad (5)$$

로 되며 정상상태($t \rightarrow \infty, s \rightarrow 0$)에서의 응답은

$$G(0) = \frac{k_m}{DR_a + k_m^2} = k_1 \quad (6)$$

로 일정 입력 전압에 대해 각속도가 일정함을 알 수

있다.

T.G 모델은 DC 서보 모터의 역 모델을 취하고 있으므로, 일정가속도에 대해서 일정 전압으로 출력된다. 위의 DC 서보 모터와 T.G의 모델의 블록 선도는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

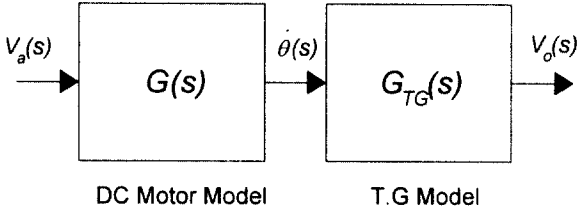


Fig. 2 Block diagram of DC servo motor with T.G

3. 일반화 관측기의 설계

다음의 선형 연속 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (4b)$$

여기서, (A, C) 는 가관측이며, $x \in R^n$, $y \in R^p$, $u \in R^m$ 이다.

다음의 일반화 관측기를 고려하자.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K\zeta(t) + H\epsilon(t) \quad (7a)$$

$$\dot{\zeta}(t) = N\zeta(t) + M\epsilon(t) \quad (7b)$$

$$\epsilon(t) = y(t) - C\hat{x}(t) \quad (7c)$$

식(1)에 대해 식(2)가 일반화 관측기로 되기 위해서는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \{x(t) - \hat{x}(t)\} = 0 \quad (8a)$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \zeta(t) = 0 \quad (8b)$$

위의 식(4)에 대해서 식(7)이 일반화 관측기로 성립될 충분조건은 다음의 정리와 같이 주어진다.

보조정리 1 : 식(4)에 대해 식(7)이 일반화 관측기로 성립할 충분조건은

$$\lambda_i \begin{bmatrix} A - HC & -K \\ MC & N \end{bmatrix} \leq 0, \quad \forall i=1, \dots, n+m \quad (9)$$

이다.

증명 : 생략.

위의 보조정리1은 외란 추정 관측기의 성립조건과 유사한 관계를 보이고 있다^{2,3)}.

식(4)의 선형 이산 시스템에 대해서 노이즈가 포함된 형태의 시스템을 고려하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (10a)$$

$$y(t) = Cx(t) + \delta(t) \quad (10b)$$

여기서 $\delta \in R^p$ 는 출력에 영향을 미치는 노이즈 성분으로서 다음과 같은 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$P(D)\delta(t) = 0 \quad (11)$$

여기서 D 는 미분연산자로서 $\frac{d}{dt}$ 를 나타내며, $P(D)$ 는 D 의 다항식으로서 다음과 같이 주어진다.

$$P(D) = D^{(r)} + a_{r-1}D^{(r-1)} + \dots + a_1D + a_0 \quad (12)$$

식(7a)와 식(10)으로부터 출력오차함수를 구해보면 다음과 같이 나타낸다.

$$\epsilon(t) = Ce_x(t) - \delta(t) \quad (13)$$

위의 식에 $P(D)$ 를 작용시켜 식(11)의 관계를 이용하면

$$\begin{aligned} \epsilon^{(r)} = & -a_{r-1}\epsilon^{(r-1)} - \dots - a_1\epsilon^{(1)} - a_0\epsilon \\ & + CP(D)e_x(t) \end{aligned} \quad (14)$$

으로 되며, 위의 식을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{\xi}(t) = N\xi(t) + MCP(D)e_x(t) \quad (15)$$

단,

$$\xi = [\varepsilon \ \varepsilon^{(1)} \ \dots \ \varepsilon^{(r-1)}]^T$$

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \dots & \dots & \dots & -a_{r-1} \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ I \end{bmatrix}$$

로 된다.

식(13)의 출력오차함수를 이용하여 관측오차를 구하면

$$\dot{e}_x(t) = (A - HC)e_x(t) - K\zeta(t) - H\delta(t) \quad (16)$$

로 되며, 위의 식에 $P(D)$ 를 작용시켜 식(11)의 관계를 이용하면 다음과 같이 된다.

$$P(D)\dot{e}_x(t) = (A - HC)P(D)e_x(t) - KP(D)\zeta(t) \quad (17)$$

변수 $\xi(t)$ 와 $\zeta(t)$ 사이에는 식(7b)와 식(15)에 의해 다음의 관계에 있으므로

$$\xi(t) = P(D)\zeta(t) \quad (18)$$

위의 관계를 이용하면 식(17)은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$P(D)\dot{e}_x(t) = (A - HC)P(D)e_x(t) - K\xi(t) \quad (19)$$

식(15)와 식(19)로 확대계를 구성하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_e(t) = \begin{bmatrix} A - HC & -K \\ MC & N \end{bmatrix} x_e(t) \quad (20)$$

단,

$$x_e(t) = \begin{bmatrix} P(D)e_x(t) \\ \xi(t) \end{bmatrix}$$

따라서, 보조정리1을 만족하도록 관측기 게인 K 와 H 를 설계하면 노이즈 δ 에 대해서도 영향

을 받지 않는 관측기를 설계할 수 있다.

4. 실험 및 고찰

본 절에서는 일반화 관측기의 유효성을 위해 저대역 통과 CR필터를 설계하여 비교·검토를 행하였다. 먼저, (4)식과 같이 유도된 DC 서보 모터는 (A, C)불가관측이므로 관측기를 구현할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 DC 서보 모터에 레귤레이터 제어책을 지닌 드라이브가 포함된 형태로 고려하여 모델을 행하였다. 구해진 모델은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1.0000 \\ -0.1351 & -67.9709 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 13.5135 \end{bmatrix}$$

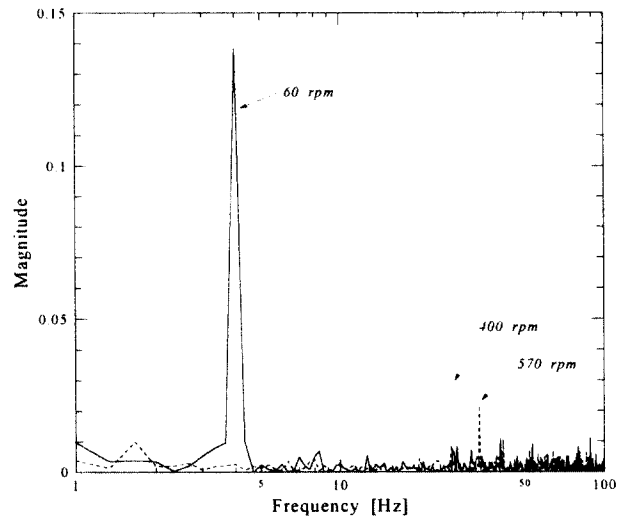


Fig. 3 Responses of spectrum analysis of T.G data

T.G에 인가되는 주기적인 외부 노이즈를 고려하기 위해서 DC 서보 모터를 60rpm, 400rpm, 570rpm으로 구동하였을 경우 T.G로부터 각속도를 계측하였으며, 이들의 스펙트럼 결과는 Fig. 3으로 나타낼 수 있었다.

위의 스펙트럼분석으로부터 저주파수 대역에서의 진폭은 고주파수대역에 비해 상대적으로 크게 나타나고 있으므로, 이로부터 저주파수 대역의 리플이 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 제안하는 일반화관측기를 이용한 알고리즘과 비교를 위해 차단주파수를 5Hz로 하는 RC 저역 통과필터를 설계하였다. RC 저대역 통과 필터의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{RC}(s) = \frac{1}{1 + CRs}$$

단, $R=100[\Omega]$ $C=0.002[F]$

일반화 관측기 설계시 위의 스펙트럼 분석을 바탕으로 하였으며, 이때 일반화 관측기 계인은 다음과 같이 구해진다.

$$K = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.1215 \\ 0 & 8.7884 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} -0.5252 \\ 1.1342 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 1.0000 \\ -77.3777 & 0 \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

DC 서보 모터가 60rpm, 400rpm, 570rpm으로 회전하는 경우에 대한 일반화 관측기와 RC 저대역 통과필터를 이용한 시뮬레이션 결과는 Fig. 3~5에 나타낸다.

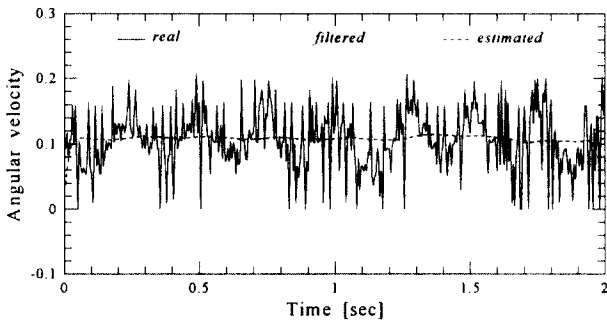


Fig. 4 Real, filtered and estimated data at 60 rpm

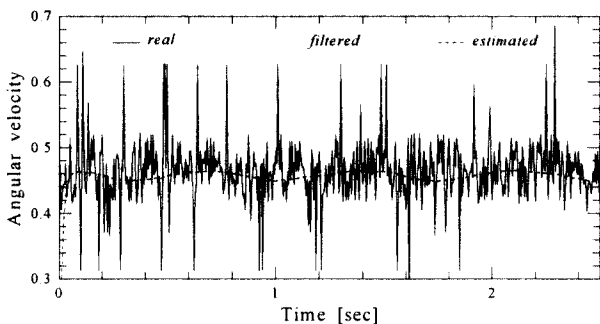


Fig. 5 Real, filtered and estimated data at 400 rpm

시뮬레이션 결과, RC 저대역 통과필터 설계시 주파수 대역을 낮게 설정하면 리플의 감쇠는 현저하게 줄어드나 응답속도가 늦어지며, 주파수 대역

을 높게 설정하며 응답속도는 빠르나, 저대역에서의 리플의 감쇠가 이루어지지 않는 것을 알 수 있다. 그러나, 일반화관측기를 적용한 경우는 모든 주파수영역에서 응답이 빠름을 보이며, 특히 설정한 주파수 영역에서의 노이즈 제거가 탁월함을 확인할 수 있었다.

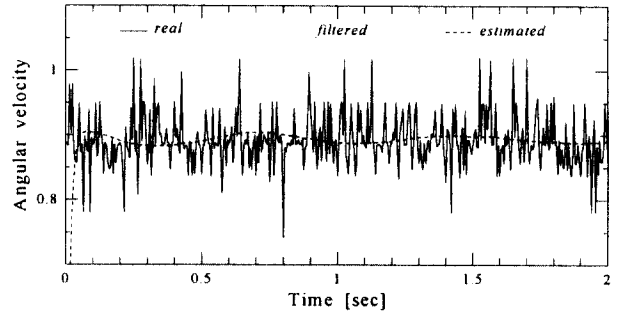


Fig. 6 Real, filtered and estimated data at 570 rpm

6. 결 론

본 논문에서는 일반화 관측기를 이용한 DC 서보 모터의 T.G 리플 저감에 관해 연구를 행하였다. T.G 리플을 T.G에 추가되는 주기적인 외부의 외란으로 간주하여, 이 외부의 외란을 소거하여 순수한 각속도를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 본 제안된 유효성을 확인하기 위해 일반적인 RC 저역 통과 필터의 시뮬레이션을 통하여 비교를 행하였으며, 이 결과, 제안된 알고리즘이 빠른 응답특성을 보이며, T.G 리플 저감에 효과적임을 밝혔다.

참고문헌

1. 김상봉, 하주식, "메카니칼 시스템 제어", 한미출판사, 1992
2. 川路 等, "オブザーバ", コロナ社, 1994
3. 김환성, 박홍수, 김상봉, "컨테이너 크레인 시스템의 하물중량 추정에 관한 연구", 한국항공학회 '98 추계학술대회논문집, pp. 175~180, 1998
4. 김환성, 이충환, 김상봉, "일반화 관측기의 구조 및 노이즈 억제 특성에 관한 연구", '98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 429~432, 1998