

직류서보시스템을 위한 상태관측기를 갖는 편차적분 가변구조제어기

박영진 · 장성수 · 나상훈 · 이기상 · 홍순찬
단국대학교 전기공학과

Observer-Based IEVSC for a DC Servo System

Young-Jeen Park, Seoung-Su Jang, Sang-Hoon Ra, Kee-Sang Lee, and Soon-Chan Hong
Dept. of Electrical Eng., Dankook University

Abstract - A scheme of IEVSC(Integral Error Variable Structure Controller) is proposed for the DC servo systems with the disturbances which does not satisfy the matching condition. The structure of IEVSC is composed of state observer, VSC, and servo compensator which is designed for the output variable enhances the robustness against all type of disturbances. The performances of proposed IEVSC are verified through simulations for the DC servo motor.

1. 서론

직류전동기는 속도제어범위가 넓고 선형적이며 가감속시 응답특성이 좋아 위치 및 속도제어를 필요로 하는 서보제어계에 널리 이용되고 있다. 서보제어계에서 요구되는 강인성은 일반적인 선형상태관측이나 PI제어만으로는 얻기 어려운 특성이다.

C. J. Maday가 제안한 IESF(Integral Error with State Feedback)제어는 단일계관제어기의 단점인 정상상태 오차와 외란에 민감한 특성을 보완하기 위하여 편차를 적분시키고 모든 상태를 관측시키는 것으로서 선형 시불변계에 대해 과도특성이 우수하고 외란에 대해 강인한 성질을 갖는다.^[1] 강인성을 증시한 또 다른 제어기법인 가변구조제어(VSC: Variable Structure Control)는 계통의 상태가 상태공간내에서 선정된 슬라이딩 평면에 도달하여 그 평면을 따라 원점에 수렴하도록 고속 스위칭 입력을 인가하는 제어방식으로 상반되는 두 제어성능, 즉 응답의 신속성과 정확성을 동시에 달성할 수 있으며, 특히 슬라이딩 모드에서 계통 파라미터 변화 및 외란에 대해 강인한 특성을 가지고 있다.^[2] 그러나 기존 VSC의 문제점은 정합조건이 만족되지 않는 외란의 영향을 제거하는데 어려움이 있다는 것이다. 이러한 문제의 해결을 위해 IESF와 VSC의 결합 형태인 편차적분 상태관측 가변구조제어기(IESFVSC)가 제안되었다.^[3] 그러나 제안된 IESFVSC는 IESF제어기의 특징중 하나인 모든 상태의 관측을 필요로 하므로 하드웨어의 복잡성과 이에 따른 비용증가를 가져올 수 있다.

본 연구에서는 입력과 출력만으로 필요한 상태를 추정할 수 있는 감소차수 상태관측기를 포함하는 IEVSC(Integral Error Variable Structure Controller)를 제안한다. 제안된 상태관측 가변구조제어기는 상태관측기로부터 얻어진 추정상태로 부터 구성되며 직류전동기 위치제어계통에 정합조건이 만족되지 않는 외란이 발생할 경우에도 정상상태특성과 외란제거성능이 우수한 결과를 보인다.

2. 편차적분 상태관측(IESF) 제어

편차적분 상태관측(IESF)의 기본개념은 단일계관제어기의 단점인 정상상태 편차 및 외란에 민감한 특성을 보완하기 위하여 오차를 적분시키고 모든 상태를 관측시키는 것이다. 이 구조에서 각 상태에대한 적분동작은 정상상태 편차를 제거해주며, 상태관측 동작은 계통의 안정화와 외란 및 계통 파라미터의 변화에 대한 강인성을 향상시켜준다.

본절에서는 정합조건이 만족되지 않는 외란이 존재하는 3차의 직류전동기 위치제어계통에 대해 IESF제어기를 설계하여 해석한다.

2.1 위치제어 계통

본 연구에서 위치제어시스템으로 사용한 직류전동기의 특성 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_a(t) &= R_a i_a(t) + e_b(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \\ T_a(t) &= k_t i_a(t) = T_L(t) + B\omega(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \\ e_b(t) &= k_b \omega(t) \end{aligned} \quad (1)$$

직류전동기에 대한 블록선도는 그림 1과 같고 이로부터 직류전동기 위치제어계통을 상태방정식으로 표현하면 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -B/J & k_t/J \\ 0 & -k_b/L_a & -R_a/L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L_a \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/J \\ 0 \end{bmatrix} f \end{aligned} \quad (2)$$

$$y = [1 \ 0 \ 0] [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$$

여기서 $x_1 (= \theta_m)$ 은 위치, $x_2 (= \omega)$ 는 각속도, $x_3 (= i_a)$ 는 전기자전류, $u (= e_a)$ 는 계통입력(전기자 전압), $f (= \tau_L)$ 는 외란(부하 토크)이다.

2.2 편차적분 상태관측(IESF)제어기

그림 1은 식(2)와 같은 위치제어계통의 모든 상태에 대하여 IESF제어기를 적용한 경우이다. 그림 1의 계통에 대한 상태방정식은 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -k_1 & 0 & 0 \\ k_2 & 0 & 0 & -k_{D1}k_2 & -k_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -k_{D2} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -B/J & k_t/J \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_b/L_a & -R_a/L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} k_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1/J \\ 0 \end{bmatrix} f \end{aligned} \quad (3)$$

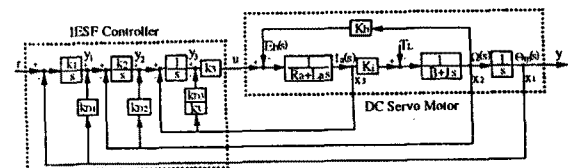


그림 1. IESF 제어기를 갖는 위치제어계통의 블록선도

식(3)으로 주어지는 계통의 출력 $Y(s)$ 와 기준입력 $R(s)$, 외란 $F(s)$ 간의 전달함수는 식(4)와 같다.

$$Y(s) = G_1(s)R(s) + G_2(s)F(s) \\ = \frac{K_i K_1 K_2 K_3}{D(s)} R(s) + \frac{s^2(L_a s^2 + (R_a + K_b K_3)s + k_3)}{D(s)} F(s) \quad (4)$$

여기에서 $D(s) = L_a s^6 + (BL_a + JR_a + JK_b)s^5 + (K_i K_b BR_a + JR_3 + BK_b)s^4 + (BK_3 + K_i K_{D2} K_3)s^3 + K_i K_2 K_3 s^2 + k_i K_{D1} K_2 K_3 s + K_i K_1 K_2 K_3$ 이다. 식(4)의 전달함수에 대해 최종치정리를 적용하면 계단형 기준입력과 외란에 대한 정상상태 특성 및 외란 제거 성능이 식(5)와 같이 얻어진다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s G_1(s) \frac{r}{s} = r \quad (5) \\ \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s G_2(s) \frac{f}{s} = 0$$

식(3) 계통의 제어기이득 $K_1, K_2, K_3, K_{D1}, K_{D2}, K_{D3}$ 는 전체 제어계가 안정하도록 선정되어야 하며 이는 극점 배치 방법의 하여 얻을 수 있다. 그러나 IESF제이기도 다른 모든 상태변환 제어기법과 마찬가지로 모든 상태변수를 제한시켜야 하기 때문에 계통의 상태를 모두 측정해야만 실현이 가능하다는 문제점을 갖고 있다.

3. 상태관측기를 갖는 IEVSC

본절에서는 단일 입력력 변수를 가지면서 정합조건이 만족되지 않는 외란이 존재하는 3차의 직류서보 위치제어 계통에 대해 감소차수관측기를 갖는 새로운 IEVSC를 제안하고 그 특성을 해석한다.

제안한 IEVSC는 기준입력항을 포함하게 되어 서보 제어계를 설계할 때 별도의 상태편차 동태방정식을 구할 필요가 없게 되고 계단 및 ramp형 기준입력에 대한 정상상태 편차가 없으며, 또한 정합조건이 만족되지 않는 계단 및 ramp형 외란의 제거성능이 매우 우수한 특성을 갖는다.

3.1 상태관측기 구성

본절에서는 3차의 위치제어계통에 입력과 위치출력만으로 필요한 상태를 추정할 수 있는 감소차수상태관측기(reduced-order state observer)를 설계한다. 먼저 상태관측기 구성을 위한 계통은 다음과 같이 외란항을 상태로 포함하는 4차의 동태방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & -B/J & k/J & -1/J \\ 0 & -k_b/L_a & -R_a/L_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ 0] [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T \quad (6)$$

여기서 $x_1(= \theta_m)$ 은 위치, $x_2(= \omega)$ 는 각속도, $x_3(= i_a)$ 는 전기 자전류, $x_4(= f)$ 는 외란(부하토크)이다. 식(6)를 다음과 같이 다시 써서 감소차수관측기를 설계하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dots \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ \dots & \dots \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ \dots \\ B_2 \end{bmatrix} u$$

$$y = x_1$$

$$\dot{x}_2 = Ly + z \quad (7)$$

$$\dot{z} = Fz + Gy + Hu$$

여기서 $F(= A_{22} - LA_{12})$ 는 (3×3) , $G(= FL + A_{21} - LA_{11})$, $H(= B_2 - LB_1)$ 는 (3×1) 차원의 행렬이며, 감소차수관측기의 이득 L 은 행렬 F 의 특성근이 s 평면의 좌반면에 존재하도록 극점 배치를 하여 얻는다. 위의 관계를 블럭선도로 나타내면 그림 2와 같다.

3.2 확장 계통의 구성

앞절의 위치제어계통과 같은 문제를 고려하기 위하여 출력변수를 각각 2차, 1차 적분한 서보변수 η_1, η_2 에 대한 동태방정식 ($\eta_1 = \eta_2, \eta_2 = r - x_1$)과 위치제어계통 식(2)를 병합한 다음과 같은 확장계통을 구성한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -B/J & K_i/J \\ 0 & 0 & 0 & -K_b/L_a & -R_a/L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ -1/J \end{bmatrix} f \quad (8)$$

위의 확장계통에 대한 스위칭함수를 다음과 같이 선정한다.

$$s_a = P_a X \\ = p_{11}\eta_1 + p_{12}\eta_2 + p_{13}x_1 + p_{23}x_2 + p_{33}x_3 \quad (9)$$

3.3 슬라이딩모드 특성

슬라이딩 모드에서의 조건식 $s_a = 0$ 으로부터 등가입력 u_{eq} 는 식(8)을 (10)식에 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$s_a = P_a \dot{X} \\ = p_{11}\dot{\eta}_1 + p_{12}\dot{\eta}_2 + p_{13}\dot{x}_1 + p_{23}\dot{x}_2 + p_{33}\dot{x}_3 = 0 \\ u_{eq} = -\frac{L_a p_{11}}{p_{33}} \eta_2 - \frac{L_a p_{12}}{p_{33}} (r - x_1) - \frac{L_a}{p_{33}} | p_{13} - p_{23} \frac{B}{J} \\ - p_{33} \frac{k_b}{L_a} | x_2 - \frac{L_a}{p_{33}} | p_{23} \frac{k_i}{J} - p_{33} \frac{R_a}{L_a} | + \frac{L_a p_{22}}{p_{33}} f \quad (11)$$

또한 슬라이딩모드에서 $S = 0$ 이므로

$$x_3 = -\frac{p_{11}}{p_{33}} \eta_1 - \frac{p_{22}}{p_{33}} \eta_2 - \frac{p_{13}}{p_{33}} x_1 - \frac{p_{23}}{p_{33}} x_2 \quad (12)$$

이 되며, 이 x_3 는 계통의 특성에 영향을 미치지 않는다. 식(12)를 확장계통 식(8)에 대입하여 얻은 슬라이딩 모드에서의 등가 계통은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{k_i p_{11}}{J p_{33}} & -\frac{k_i p_{22}}{J p_{33}} & \frac{k_i p_{13}}{J p_{33}} & \frac{B p_{23} + k_i p_{22}}{J p_{33}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1/J \end{bmatrix} f \quad (13)$$

또한 스위칭 함수의 설계시 이 등가제어계가 안정하도록 P_a 를 설계하게 된다.

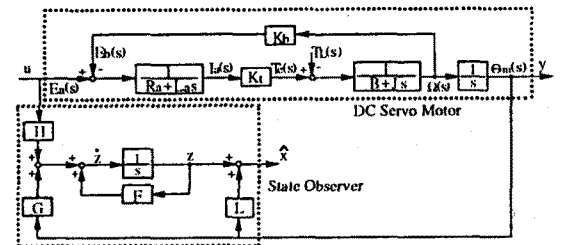


그림 2. 감소차수관측기를 갖는 직류전동기 위치제어계통

위의 등가계통에서 기준입력 $R(s)$ 와 출력 추적편차 $E(s) = R(s) - Y(s)$ 간의 전달함수 $G_1(s)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_1(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{s^2 \left[s^2 + \frac{s(Bp_3 + k_1 p_2)}{Jp_3} + \frac{k_1 p_1}{Jp_3} \right]}{|s| - A_{eq}} \quad (14)$$

여기서 $|s| - A_{eq}| = s^4 + s^3(Bp_3 + k_1 p_2)/Jp_3 + s^2 k_1 p_1/Jp_3 - s k_1 p_2/Jp_3 - k_1 p_1/Jp_3$. 정상상태 특성을 고찰하기 위해 위의 전달함수에 최종치정리를 적용하면 다음과 같이 계단형, ramp형 기준입력에 대해 정상상태 편차가 0이 된다.

$$\lim_{s \rightarrow 0} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s G_1(s) \frac{r}{s} = 0 \quad (15)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s G_1(s) \frac{r}{s^2} = 0$$

또한 외란 제거 성능을 고찰하기 위하여 외란 $F(s)$ 와 출력 $Y(s)$ 간의 전달함수 $G_2(s)$ 를 구하면 다음과 같으며

$$G_2(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{s^2(-1/J)}{|s| - A_{eq}} \quad (16)$$

최종치정리로 부터 계단 및 ramp형 외란에 대해 강인함을 알 수 있다.

$$\lim_{s \rightarrow 0} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s G_2(s) \frac{f}{s} = 0 \quad (17)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s G_2(s) \frac{f}{s^2} = 0$$

3.4 제어입력의 설계

식(8)로 주어지는 확장계통이 슬라이딩모드를 유지하도록 하는 제어입력 u 를 다음과 같이 제안한다.

$$u = -\frac{L_a}{p_3} [\Psi_n \eta_2 + \Psi_o e_0 + \Psi_2 x_2 + \Psi_3 x_3 + V] \quad (18)$$

여기에서 $e_0 = r - x_1$ 이고 식(9)의 스위칭함수로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{s}_a &= p_{11} \eta_1 + p_{12} \eta_2 + p_1 \dot{x}_1 + p_2 \dot{x}_2 + p_3 \dot{x}_3 \\ &= p_{11} \eta_2 + p_{12} e_0 + \left(p_1 - \frac{B p_2}{J} - \frac{k_1 p_3}{L_a} \right) x_2 \\ &\quad + \left(\frac{k_1 p_2}{J} - \frac{R_a p_3}{L_a} \right) x_3 - \frac{p_2}{J} f + \frac{p_3}{L_a} u \end{aligned} \quad (19)$$

여기에서 $k_n = p_{11}$, $k_o = p_{12}$, $k_2 = p_1 - B p_2/J - k_1 p_3/L_a$, $k_3 = k_1 p_2/J - R_a p_3/L_a$, $k_f = -p_2/J$ 라 하고, 식(18)을 식(19)에 대입하여 정리하면 다음과 같으며

$$\dot{s}_a = (k_n - \Psi_n) \eta_2 + (k_o - \Psi_o) e_0 - \Psi_1 x_1 + (k_2 - \Psi_2) x_2 + (k_3 - \Psi_3) x_3 + (k_f - V) \quad (20)$$

$s_a \dot{s}_a$ 를 구하면 아래와 같다.

$$s_a \dot{s}_a = (k_n - \Psi_n) s_a \eta_2 + (k_o - \Psi_o) s_a e_0 - \Psi_1 s_a x_1 + (k_2 - \Psi_2) s_a x_2 + (k_3 - \Psi_3) s_a x_3 + (k_f - V) s_a \quad (21)$$

이제 슬라이딩 모드 존재조건인 $s_a \dot{s}_a < 0$ 을 만족시키기 위한 제어기 파라미터 $\Psi_n, \Psi_o, \Psi_1, \Psi_2, \Psi_3$ 를 설계하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Psi_n &= \begin{cases} \Psi_n^+ > k_n & : s_a \eta_2 > 0 \\ \Psi_n^- < k_n & : s_a \eta_2 < 0 \end{cases} \\ \Psi_o &= \begin{cases} \Psi_o^+ > k_o & : s_a e_0 > 0 \\ \Psi_o^- < k_o & : s_a e_0 < 0 \end{cases} \\ \Psi_1 &= \begin{cases} \Psi_1^+ > 0 & : s_a x_1 > 0 \\ \Psi_1^- < 0 & : s_a x_1 < 0 \end{cases} \\ \Psi_2 &= \begin{cases} \Psi_2^+ > k_2 & : s_a x_2 > 0 \\ \Psi_2^- < k_2 & : s_a x_2 < 0 \end{cases} \\ \Psi_3 &= \begin{cases} \Psi_3^+ > k_3 & : s_a x_3 > 0 \\ \Psi_3^- < k_3 & : s_a x_3 < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (22)$$

또한 식 (18)에서 V 는 외란의 최대치에 대한 사전정보를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V = \begin{cases} V^+ > |K_{rf}|_{\max} & : s_a > 0 \\ V^- < |K_{rf}|_{\min} & : s_a < 0 \end{cases} \quad (23)$$

4. 시뮬레이션

앞장에서 설계된 IEVSC의 강인성을 보이기 위하여 기존의 VSC와 시뮬레이션을 통한 특성 비교를 하였다. 본 연구에서 사용한 직류서보전동기의 경격은 75[V], 5[A], 300[W], 3000[rpm]이고 각 상수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_a &= 1.4 \quad [\text{ohm}], & L_a &= 2.7 \times 10^{-3} \quad [\text{H}] \\ J &= 3.2 \times 10^{-3} \quad [\text{kg cm sec}^2], & B &= 0.4 \times 10^{-3} \quad [\text{kg cm/rpm}] \\ k_t &= 2.44 \quad [\text{kg cm/A}], & k_b &= 25 \times 10^{-3} \quad [\text{V/rpm}] \end{aligned}$$

위의 전동기상수에 의한 계통의 파라미터는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.125 & 762.5 \\ 0 & -9.259 & -518.5 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 370.37 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ -312.5 \\ 0 \end{bmatrix}$$

먼저 기존의 VSC 설계과정에서 외란의 보상을 고려하기 위하여 등가계통을 구성하고 극점이 [-90 -100]에 존재하도록 P행렬의 계수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P &= [0.0318 \quad 0.0006 \quad 0.0027] \\ k_1 &= 0, \quad k_2 = 0.0067, \quad k_3 = -0.8873 \\ |K_{rf}|_{\max} &= 0.9980 \end{aligned}$$

제안된 IEVSC의 확장계통을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \\ \dots \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & : & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & : & -1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & : & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & : & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & : & 0 & -0.125 & 762.5 \\ 0 & 0 & : & 0 & -9.259 & -518.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \dots \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ -312.5 \\ 0 \end{bmatrix} f$$

$$y = [0 \quad 0 \quad : \quad 1 \quad 0 \quad 0] [\eta_1 \quad \eta_2 \quad : \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$$

위의 확장계통에 대한 등가계통의 극점이 [-0.03 -80 -100 -150]에 존재하도록 P행렬의 계수를 구하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\begin{aligned} P_a &= [-0.1275 \quad -4.2529 \quad 0.1240 \quad 0.0012 \quad 0.0027] \\ k_n &= -0.1275, \quad k_o = -4.2529, \quad k_2 = 0.0988, \quad k_3 = -0.5093 \\ |k_{rf}|_{\max} &= 1.7340 \end{aligned}$$

비측정변수 x_2, x_3 및 외란의 추정을 위한 상태관측기의 극점은 [-100 -150 -550]으로 선정했으며 관측기설계를 위한 동태방정식과 결과적인 관측기방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dots \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & : & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & : & -0.125 & 762.5 & -312.5 & 0 \\ 0 & : & -9.259 & -518.5 & 0 & 0 \\ 0 & : & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 370.37 \end{bmatrix} u$$

$$y = x_1$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 281.35 \\ -21.54 \\ -50.91 \end{bmatrix} y + \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -281.48 & 762.50 & -312.50 \\ 12.28 & -518.51 & 0 \\ 50.91 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} -79710.2 \\ 14624.2 \\ 14325.1 \end{bmatrix} y + \begin{bmatrix} 0 \\ 370.37 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

모든 시뮬레이션 결과에서 스위칭함수 및 제어입력은 비측정 변수에 대한 추정치 \hat{x}_2, \hat{x}_3 에 근거하여 결정된 것이다. 설계된 위의 두 제어계를 시뮬레이션한 결과는 그림 3, 4, 5, 6과 같다. 시뮬레이션 샘플링 시간은 0.5[ms]로 하였고, 기준입력(θ_{ref})은 x [rad]으로 주었으며, 외란은 전동기에 인가 되는 부하로 하였다.

$t = 0.5$ [sec]에 50% 부하를 외란으로 인가한 경우 기존의 VSC와 IEVSC를 비교해 볼때 그림 3의 IEVSC 출력응답에서 외란이 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

그림 5(c), 그림 6(c)의 제어입력은 전동기 정격전압 75[V]에 대하여 입력제한을 준 경우의 결과이다.

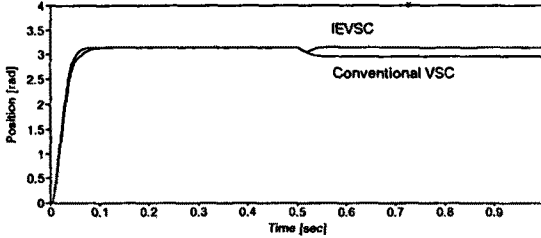


그림 3. IEVSC와 기존VSC의 출력응답

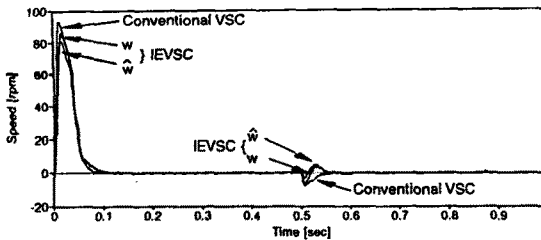
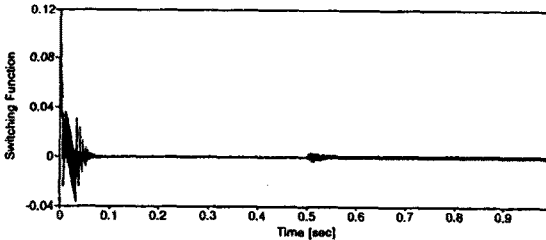
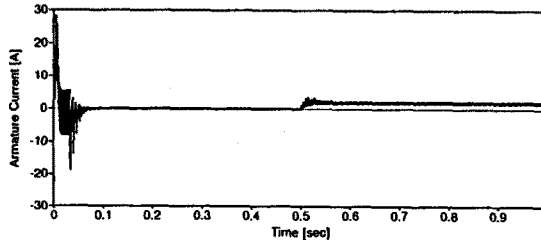


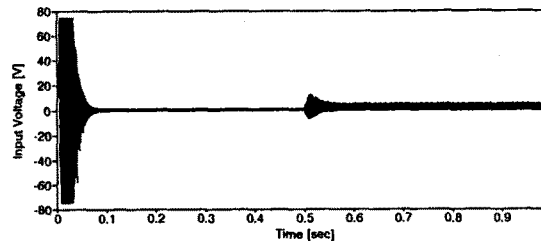
그림 4. IEVSC와 기존VSC의 각속도응답



(a) 스위칭함수 궤적

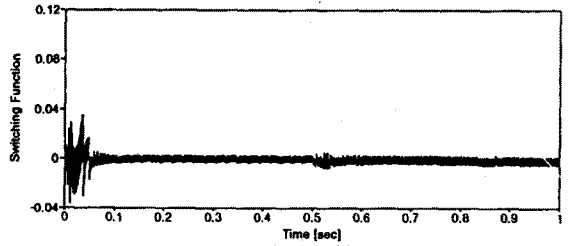


(b) 전기자전류

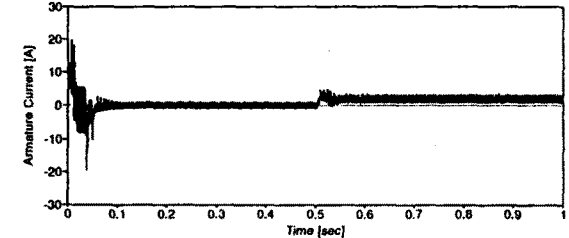


(c) 입력전압(제어입력)

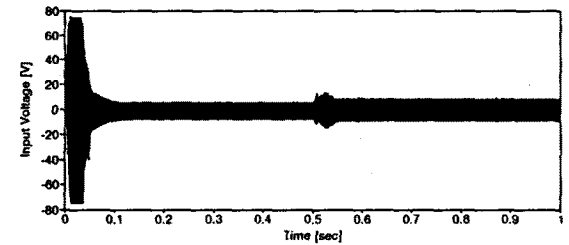
그림 5. 기존VSC의 부하응답특성



(a) 스위칭함수 궤적



(b) 전기자전류



(c) 입력전압(제어입력)

그림 6. IEVSC의 부하응답특성

5. 결론

본 연구에서는 비측정변수를 가진 직류서보시스템의 강인한 제어를 위하여 상태관측기를 포함하는 새로운 구조의 IEVSC를 제안하고 그 성능을 검토하였다.

제안된 IEVSC는 위치출력에 대한 서보보상기, 상태관측기 및 가변구조제어기로 구성되어 있으며, 정합조건이 만족되지 않는 외란을 포함하는 직류전동기 위치제어계통에서 계단 및, ramp형으로 나타나는 외란의 영향을 제거할 수 있음을 슬라이딩 모드에서 전달함수를 해석함으로써 보였다.

서보전동기 3차계통의 모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 확인한 중요특성은 다음과 같다.

- (i) 계단형 외란 뿐만 아니라 ramp형 외란에 대해서도 기존 VSC에 비해 강인한 특성을 갖는다.
- (ii) VSC 분야에서 일반적으로 사용되는 편차 동태방정식을 구하지 않고도 효과적인 제어가 가능하다.
- (iii) 위치출력만을 측정함에도 불구하고 모든 변수를 측정할 경우와 동일한 제어성능을 가진다.

참 고 문 헌

1. C. J. Maday, Computer-Aided Design of Feedback Control Systems for Time Response, Instrument Society of America, 1987.
2. V. I. Utkin, "Variable structure system with sliding modes", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-22, no. 2, pp. 212-222, 1977.
3. 박영진, 윤덕용, 홍순찬, "직류서보 위치제어시스템을 위한 편차분상상태계환 가변구조제어기", 대한전기학회 전력전자연구회 학술연구발표회 논문집, pp. 98-103, 1993.