

直流서보 位置制御시스템을 위한 偏差積分 狀態饋還 可變構造制御器

(Integral Error State Feedback VSC for a DC Servo Position Control System)

朴永鎮* · 李起常** · 洪淳瓚**

(Young-Jeen Park · Kee-Sang Lee · Soon-Chan Hong)

요 약

직류서보 위치제어 계통에서 정합조건을 만족하지 않는 외란의 영향을 제거하기 위하여 편차적분 상태제환 가변구조제어기(IESFVSC)를 제안한다. 제안되는 제어기는 2차의 서보보상기와 상태제환 가변구조제어기로 구성되었으며 서보보상기를 포함함으로써 다양한 형태의 외란에 대한 제어계의 강인성을 증가시키는 동시에 편차방정식을 사용하지 않고도 효과적인 목표치 추적능력을 가진다. 제안된 IESFVSC를 직류전동기 위치제어계에 적용하고, 다양한 조건에서 이론적인 해석과 시뮬레이션을 수행함으로써 이 제어계가 정합조건이 만족되지 않는 계단형 및 ramp형 외란이 발생할 경우에도 매우 우수한 정상상태특성과 외란제거성능을 가짐을 입증하였다.

Abstract

A scheme of IESFVSC(Integral Error State Feedback Variable Structure Controller) is proposed for a DC servo position control system with the disturbances which do not satisfy the matching condition. The proposed control system is composed of servo compensator and state feedback VSC. The servo compensator enhances the robustness of the control system against various types of disturbance, and makes effective tracking possible without using error dynamics. The IESFVSC is applied to the practical design of a robust DC servo control system and the control performances are verified through theoretical analyses and simulations.

1. 서 론

직류전동기는 제어가 용이하여 토크, 위치 및 속도제어를 필요로 하는 서보제어계에 널리 이용되고 있고 따라서 직류전동기를 포함한 서보 계통의 제어기법 개발 및 기존 제어이론의 적용

사례는 대단히 많으며 그 결과 매우 우수한 제어 성능을 갖는 전류제어기법, 가속도제어기법, 가변 구조제어기법 등이 서보제어를 위해 효과적으로 사용되고 있다.

이중 가변구조제어(VSC: Variable Structure Control)기법은 계통의 상태가 상태공간 내에서 선정된 슬라이딩 평면에 도달하여 그 평면을 따라 원점에 수렴하도록 고속 스위칭 입력을 인가 하는 제어방식으로 기존의 제어기법과는 달리 응

* 正會員: 檀國大學校 大學院 電氣工學科 博士課程

** 正會員: 檀國大學校 工科大學 電氣工學科 教授

接受日字: 1994年 3月 28日

답의 신속성과 정확성을 동시에 달성할 수 있다. 가변구조제어계의 또다른 특징은 슬라이딩모드에서 계통파라미터 변화 및 외란에 대해 매우 강한 특성을 가진다는 것이며, 이러한 특성으로 인하여 VSC는 매니퓰레이터, 전력계통 등의 제어에 도입되고 있으며 DC전동기를 포함한 서보계통의 고성능제어에도 적극적으로 도입되고 있다.^{1), 2), 3)}

그러나 기존 VSC의 강인성은 계통방정식 자체가 정합조건을 만족하는 경우에만 보장되며 따라서 이 기법은 전기자전류를 상태변수로 포함하는 DC서보계에 적용할 경우 부하토크 변화에 대한 강인성은 보장되지 않는다. 이 문제점의 해결 방안으로는 위치, 속도만을 상태변수로 선정함으로써 정합조건을 만족시키는 방법, 부하토크를 추정하여 그 효과를 상쇄시키는 방법 등을 들 수 있다. 전자의 경우 DC전동기의 중요변수인 전기자전류를 삭제함으로써 과도기간중의 제어성능 저하가 유발될 수 있으며, 후자의 경우에는 정확한 부하토크 추정을 위한 추정기법이 도입되어야 하고, 추정알고리즘의 도입으로 계산시간이 증가한다는 문제점이 발생된다.^{3), 4)}

본 연구에서는 이러한 문제의 해결을 위하여 새로운 형태의 편차적분 상태궤환 가변구조제어기(IESFVSC : Integral Error State Feedback Variable Structure Controller)를 제안한다. 제안되는 IESFVSC는 위치출력에 대한 2차의 서보보상기를 도입하고, 이를 직류서보 위치제어계통과 병합한 확대계통에 대해 상태궤환 가변구조제어기를 설계함으로써 구성된다. IESFVSC를 직류전동기 위치제어계통에 대하여 설계하고, 이론적인 해석과 시뮬레이션을 통하여 정합조건이 만족되지 않는 계단형 및 ramp형 부하토크가 투입된 경우에도 외란추정기의 도입없이도 매우 우수한 정상상태특성과 외란제거성능이 있음을 보이고자 한다.

2. 기본적인 가변구조제어

가변구조시스템의 기본개념은 시스템의 구조가 고정되어 있지 않고 제어되는 과정에서 미리

정해진 제어법칙에 따라 가변된다는 것이다. 가변구조시스템에서는 상태공간에 위치한 임의의 불연속면을 시스템상태가 교차할 때 구조를 절환하게 되며 이로부터 가변구조 시스템의 고유한 특성을 얻게 된다.

기존의 VSC설계법을 다음과 같은 동태방정식으로 표현되는 시스템에 대하여 적용한다.

$$\dot{X} = AX + Bu + Ef \tag{1}$$

$$y = CX$$

여기에서 $X \in \mathbb{R}^n$ 는 상태벡터, $u \in \mathbb{R}^m$ 는 입력변수, $y \in \mathbb{R}^p$ 는 출력벡터, $f \in \mathbb{R}^1$ 는 미지의 외란벡터이고, A 는 $(n \times n)$, B 는 $(n \times m)$, C 는 $(p \times n)$, E 는 $(n \times 1)$ 차원의 행렬이다.

위의 계통에 대한 가변구조제어기 설계시 스위칭함수는 일반적으로 다음과 같이 상태변수의 선형결합으로 선정할 수 있다.

$$s = PX \tag{2}$$

여기에서 $P \in \mathbb{R}^n$ 는 계수벡터이다.

시스템이 슬라이딩모드상태에 들어가게 되면 시스템상태는 슬라이딩라인 상에 있게 되며 다음 조건을 만족하게 된다.

$$s = 0 \tag{3}$$

$$\dot{s} = 0$$

슬라이딩모드에서의 제어입력을 등가제어입력 $u_{eq} \in \mathbb{R}^m$ 라 하며 이것은 시스템의 상태가 슬라이딩라인인 $s=0$ 에 머무르도록 하는 제어입력 u 의 평균치의 의미를 갖는다. 이 u_{eq} 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= P\dot{X} \\ &= P[AX + Bu + Ef] = 0 \end{aligned} \tag{4}$$

$$u_{eq} = -[PB]^{-1}[PAX + PEf] \tag{5}$$

위의 등가입력을 계통에 인가한 경우 슬라이딩모드에서 정상상태조건 $s=0$ 로부터 구한 등가계통의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{X} = [I - B(PB)^{-1}P]AX + [I - B(PB)^{-1}P]Ef \tag{6}$$

여기에서 등가계통이 안정한 극점을 갖도록 극점배치방법이나 프로젝트 이론⁵⁾에 의하여 P 행렬의 계수를 선정한다.

제어입력을 식(7)과 같이 제안한다.

$$u = -[PB]^{-1}[\Psi_s X + V] \tag{7}$$

여기서 제어기 파라미터 Ψ_s 는 슬라이딩모드

존재조건 $s^T s < 0$ 을 만족시키기 위해 선정되며, V 는 외란의 영향을 보상하기 위한 추가입력이다.

지금까지 논의한 기존의 VSC는 계통방정식 자체가 정합조건 $(RS(E) \subset RS(B))$ 을 만족하는 경우에만 강인성이 보장되며, 따라서 이 기법은 전기자전류를 상태변수로 포함하는 DC서보계에 적용할 경우 부하토크 변화에 대한 강인성은 보장되지 않는다는 문제점이 발생한다.

3. 편차적분 상태제한 가변구조제어기 (IESFVSC)

본 장에서는 정합조건이 만족되지 않는 외란이 존재하는 3차의 직류서보 위치제어계통에 대해 강인성을 갖는 IESFVSC를 제안하고 그 특성을 해석한다.

제안되는 IESFVSC는 기준입력항을 포함하게 되어 서보제어계를 설계할 때 별도의 상태편차 동태방정식을 구할 필요가 없게 되고 계단형 및 ramp형 기준입력에 대한 정상상태 편차가 없으며, 또한 정합조건이 만족되지 않는 계단형 및 ramp형 외란의 제거능력이 매우 우수한 특성을 갖는다.

3.1. 위치제어 계통

본 연구에서 위치제어시스템으로 사용한 직류 전동기의 등가회로는 그림 1로 주어지고, 전동기의 특성방정식은 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} e_a(t) &= R_a i_a(t) + e_b(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \\ T_e(t) &= k_t i_a(t) = T_L(t) + B\omega(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} \\ e_b(t) &= k_b \omega(t) \end{aligned} \quad (8)$$

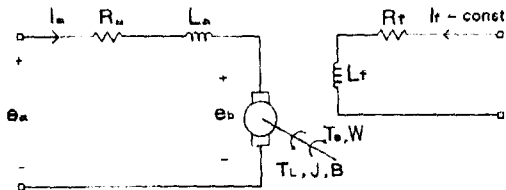


그림 1. 직류전동기 등가회로
Fig. 1. Schematic diagram of a DC motor

여기서 전동기 각 파라미터들은 다음과 같다.

- R_a : 전기자저항[ohm]
- L_a : 전기자 인덕턴스[H]
- i_a : 전기자 전류[A]
- e_a : 전기자 단자전압[V]
- J : 관성모멘트[kg cm sec²]
- B : 마찰계수[kg cm / rpm]
- ω : 각속도[rad / sec]
- T_a : 전기자 발생토크[kg m]
- e_b : 역기전력[V]
- T_L : 부하토크[kg m]
- k_t : 토크 상수[kg cm / A]
- k_b : 역기전력 상수[V / rpm]

식(8)을 라플라스 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_a(s) &= sL_a I_a(s) + R_a I_a(s) + k_b \Omega(s) \\ T_e(s) &= k_t I_a(s) = sJ\Omega(s) + B\Omega(s) + T_L(s) \end{aligned} \quad (9)$$

전동기의 위치제어를 위해서는 전동기의 각변위 θ_m 이 필요하며 이는 각속도 ω 로부터 구할 수 있고 다음과 같이 표현된다.

$$\Theta_m(s) = \frac{1}{s} \Omega(s) \quad (10)$$

식(9), (10)의 관계를 블록선도로 나타내면 그림 2와 같다.

그림 2로부터 전동기 위치제어 계통을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{B}{J} x_2 + \frac{k_t}{J} x_3 - \frac{1}{J} f \\ \dot{x}_3 &= -\frac{k_b}{L_a} x_2 - \frac{R_a}{L_a} x_3 + \frac{1}{L_a} u \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $x_1(=\theta_m)$ 은 위치, $x_2(=\omega)$ 는 각속도, $x_3(=i_a)$ 는 전기자 전류, $u(=e_a)$ 는 계통입력(전기자 전압), $f(=T_L)$ 는 외란(부하토크)이다. 식(11)을 행렬형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + Bu + Ef \quad (12)$$

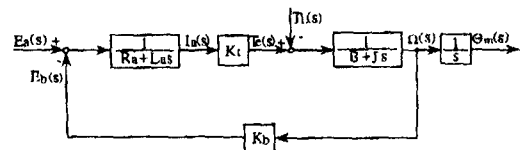


그림 2. 직류전동기의 블록선도
Fig. 2. Block diagram of a DC motor

$$y=CX$$

여기서

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -B/J & k_t/J \\ 0 & -k_b/L_a & -R_a/L_a \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L_a \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ -1/J \\ 0 \end{bmatrix}, C = [1 \ 0 \ 0].$$

이다.

3.2. 확대계통의 구성

앞절의 위치제어계통에서 외란에 대한 강인성을 증진시키기 위하여 새로운 상태변수 $\eta_i (i=1, 2)$ 로 주어지는 2차의 서보보상기를 다음과 같은 동태방정식으로 정의한다.

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_1 &= \eta_2 \\ \dot{\eta}_2 &= r - x_1 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 η_1, η_2 는 각각 출력편차를 2차, 1차 적분한 서보변수이고, $r(t)$ 는 기준입력이다.

위의 서보변수에 대한 동태방정식과 위치제어계통 식(11)을 병합한 다음과 같은 확대계통을 구성한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \\ \dots \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -B/J & k_t/J \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -k_b/L_a & -R_a/L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \dots \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 1/L_a \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ -1/J \\ 0 \end{bmatrix} f \quad (14)$$

위의 확대계통에 대한 스위칭함수를 다음과 같이 선정한다.

$$s_a = P_a X_a = p_{11}\eta_1 + p_{12}\eta_2 + p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_3 x_3 \quad (15)$$

슬라이딩 모드에서의 조건식 $\dot{s}_a = 0$ 으로부터 등가입력 u_{eq} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{s}_a = P_a \dot{X}_a = p_{11}\dot{\eta}_1 + p_{12}\dot{\eta}_2 + p_1 \dot{x}_1 + p_2 \dot{x}_2 + p_3 \dot{x}_3 \quad (16)$$

식(14)를 식(16)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$u_{eq} = \frac{L_a p_{11}}{p_3} \eta_2 - \frac{L_a p_{12}}{p_3} (r - x_1) - \frac{L_a}{p_3} \{ p_1 - p_2 \frac{B}{J} - p_3 \frac{k_b}{L_a} \} x_2 - \frac{L_a}{p_3} \{ p_2 \frac{k_t}{J} - p_3 \frac{R_a}{L_a} \} x_3 + \frac{L_a p_2}{p_3 J} f \quad (17)$$

식(17)의 등가입력을 확대계통(14)에 인가하였을 때 슬라이딩 모드에서의 등가계통은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -B/J & k_t/J \\ 0 & -\frac{p_{11}}{p_3} & -\frac{p_{12}}{p_3} & -\frac{Jp_1 - Bp_2}{Jp_3} & -\frac{k_t p_2}{Jp_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{p_{12}}{p_3} \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1/J \\ -\frac{p_2}{Jp_3} \end{bmatrix} f \quad (18)$$

스위칭 함수의 설계시 이 등가제어계가 안정하도록 스위칭함수 계수행렬 P_a 를 설계한다.

3.3. 슬라이딩모드 특성

슬라이딩모드에서는 $s_a = 0$ 인 조건이 또한 만족되므로 식(15)로부터

$$x_3 = -\frac{p_{11}}{p_3} \eta_1 - \frac{p_{12}}{p_3} \eta_2 - \frac{p_1}{p_2} x_1 - \frac{p_2}{p_3} x_2 \quad (19)$$

이 되며, 이 x_3 는 계통의 특성에 영향을 미치지 않는다. 식(19)를 확대계통 식(14)에 대입하면 식(20)과 같이 4차계로 축약되어진 결과를 얻을 수 있다. 이 식(20) 역시 식(18)과 함께 슬라이딩 모드에서의 동일한 계통특성을 나타내는 등가제어계이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_t p_{11}}{Jp_3} & -\frac{k_t p_{12}}{Jp_3} & -\frac{k_t p_1}{Jp_3} & -\frac{Bp_3 + k_t p_2}{Jp_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1/J \end{bmatrix} f \quad (20)$$

식(20)의 등가계통에서 기준입력 $R(s)$ 와 정상상태 편차 $E(s) (=R(s) - Y(s))$ 간의 전달함수 $G_1(s)$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_1(s) = \frac{E(s)}{R(s)} = \frac{s^2\{s^2 + s(Bp_3 + k_1p_2)/Jp_3 + k_1p_1/Jp_3\}}{|sI - A_{eq}|} \quad (21)$$

여기서 $|sI - A_{eq}| = s^4 + s^3(Bp_3 + k_1p_2)/Jp_3 + s^2k_1p_1/Jp_3 - sk_1p_{12}/Jp_3 - k_1p_{11}/Jp_3$ 이다.

정상상태 특성을 고찰하기 위해 위의 전달함수에 최종치정리를 적용하면 다음과 같이 계단형 기준입력($r(t) = k_r U(t)$) 및 ramp형 기준입력($r(t) = k_r t U(t)$)에 대해 정상상태 편차가 0이 된다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sG_1(s) \frac{k_r}{s} = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sG_1(s) \frac{k_r}{s^2} = 0$$

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

$$G_2(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{s^2(-1/J)}{|sI - A_{eq}|} \quad (22)$$

최종치정리로부터 계단형 외란($f(t) = k_f U(t)$) 및 ramp형 외란($f(t) = k_f t U(t)$)이 출력에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sG_2(s) \frac{k_f}{s} = 0$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sG_2(s) \frac{k_f}{s^2} = 0$$

3.4. 제어입력의 설계

식(14)로 주어지는 확대계통이 슬라이딩모드를 유지하도록 하는 제어입력 u 를 다음과 같이 제안한다.

$$u = -\frac{L_a}{p_3} \{\Psi_n \eta_2 + \Psi_e e_\theta + \Psi_1 x_1 + \Psi_2 x_2 + \Psi_3 x_3 + V\} \quad (23)$$

여기서 $e_\theta = r - x_1$ 이다. 식(15)의 스위칭 함수로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{s}_a &= p_{11}\dot{\eta}_1 + p_{12}\dot{\eta}_2 + p_{13}\dot{x}_1 + p_{22}\dot{x}_2 + p_{23}\dot{x}_3 \\ &= p_{11}\eta_2 + p_{12}e_\theta + \left\{p_{11} - \frac{Bp_2}{J} - \frac{k_1p_2}{L_a}\right\}x_2 \\ &\quad + \left\{\frac{k_1p_2}{J} - \frac{R_a p_3}{L_a}\right\}x_3 - \frac{p_2}{J}f + \frac{p_3}{L_a}u \end{aligned} \quad (24)$$

여기에서 $k_n = p_{11}$, $k_e = p_{12}$, $k_2 = p_{11} - Bp_2/J - k_1p_2/L_a$, $k_3 = k_1p_2/J - R_a p_3/L_a$, $k_f = -p_2/J$ 라 하고, 식(23)을 식(24)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

며

$$\begin{aligned} \dot{s}_a &= (k_n - \Psi_n)\eta_2 + (k_e - \Psi_e)e_\theta - \Psi_1 x_1 \\ &\quad + (k_2 - \Psi_2)x_2 + (k_3 - \Psi_3)x_3 + (k_f - V) \end{aligned} \quad (25)$$

$s_a \dot{s}_a$ 를 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} s_a \dot{s}_a &= (k_n - \Psi_n)s_a \eta_2 + (k_e - \Psi_e)s_a e_\theta - \Psi_1 s_a x_1 \\ &\quad + (k_2 - \Psi_2)s_a x_2 + (k_3 - \Psi_3)s_a x_3 + (k_f - V)s_a \end{aligned} \quad (26)$$

이제 슬라이딩모드 존재조건인 $s_a \dot{s}_a < 0$ 을 만족시키기 위한 제어기파라미터 $\Psi_n, \Psi_e, \Psi_1, \Psi_2, \Psi_3$ 를 설계하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Psi_n &= \begin{cases} \Psi_n^+ > k_n; & s_a \eta_2 > 0 \\ \Psi_n^- < k_n; & s_a \eta_2 < 0 \end{cases} \\ \Psi_e &= \begin{cases} \Psi_e^+ > k_e; & s_a e_\theta > 0 \\ \Psi_e^- < k_e; & s_a e_\theta < 0 \end{cases} \\ \Psi_1 &= \begin{cases} \Psi_1^+ > 0; & s_a x_1 > 0 \\ \Psi_1^- < 0; & s_a x_1 < 0 \end{cases} \\ \Psi_2 &= \begin{cases} \Psi_2^+ > k_2; & s_a x_2 > 0 \\ \Psi_2^- < k_2; & s_a x_2 < 0 \end{cases} \\ \Psi_3 &= \begin{cases} \Psi_3^+ > k_3; & s_a x_3 > 0 \\ \Psi_3^- < k_3; & s_a x_3 < 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (27)$$

또한 식(23)에서 V 는 외란의 최대치에 대한 사전정보를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V = \begin{cases} V^+ > |k_f|_{\max}; & s_a > 0 \\ V^- < |k_f|_{\min}; & s_a < 0 \end{cases} \quad (28)$$

4. 시뮬레이션

앞장에서 설계된 IESFVSC의 강인성을 보이기 위하여 기존의 VSC와 시뮬레이션을 통한 특성 비교를 하였다. 본 연구에서 사용한 직류서보전 동기의 각 상수들은 다음과 같다.

$$R_a = 1.4[\text{ohm}], L_a = 2.7 \times 10^{-3}[\text{H}]$$

$$J = 3.2 \times 10^{-3}[\text{kg cm sec}^2]$$

$$B = 0.4 \times 10^{-3}[\text{kg cm / rpm}]$$

$$k_1 = 2.44[\text{kg cm / A}]$$

$$k_b = 25.0 \times 10^{-3}[\text{V / rpm}]$$

위의 전동기상수에 의한 계통의 파라미터는 다음과 같다.

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

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ -312.5 \\ 0 \end{bmatrix}$$

제안된 IESFVSC의 설계를 위해 확대계통을 구성하면 다음과 같고

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \\ \dots \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -1 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -0.125 & 762.5 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -9.259 & -518.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \dots \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 370.37 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ -312.5 \\ 0 \end{bmatrix} f$$

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

위의 확대계통에 대한 등가계통의 극점이 $\{-0.03 \ -80 \ -100 \ -150\}$ 에 존재하도록 p_n 행렬의 계수를 구하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

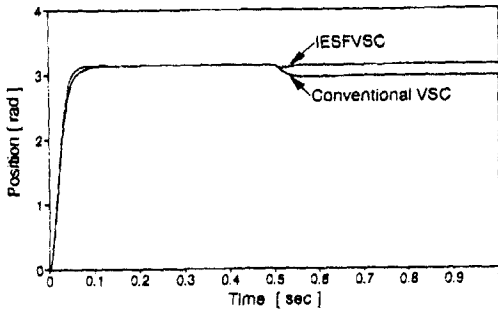


그림 3. IESFVSC와 기존 VSC의 출력응답
Fig. 3. Position responses of IESFVSC and conventional VSC.

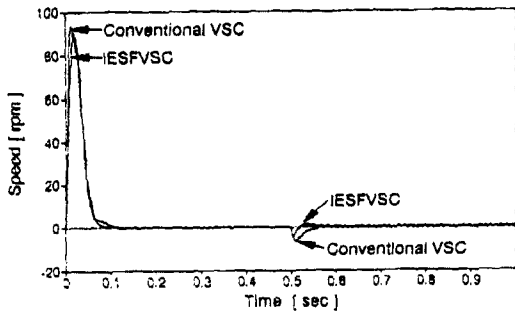


그림 4. IESFVSC와 기존 VSC의 각속도 응답
Fig. 4. Speed responses of IESFVSC and conventional VSC.

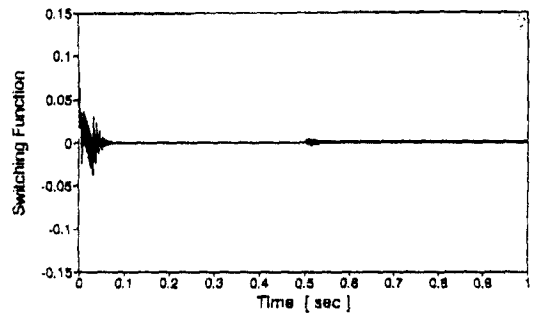
$p_n = [-0.1275 \ -4.2529 \ 0.1240 \ 0.0012 \ 0.0027]$
위의 P_n 값으로부터 제어입력 구성을 위하여 각 파라미터들을 구한 결과는 다음과 같다.

$$k_n = -0.1275, \quad k_e = -4.2529,$$

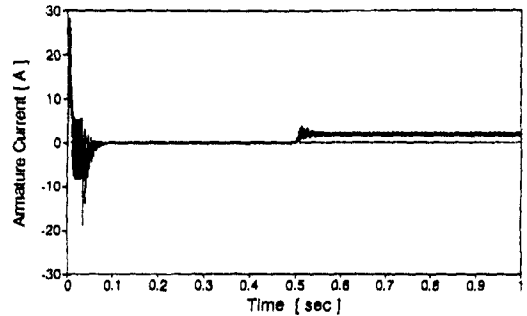
$$k_1 = 0, \quad k_2 = 0.0988, \quad k_3 = -0.5093,$$

$$|k_{df}|_{\max} = 1.7340$$

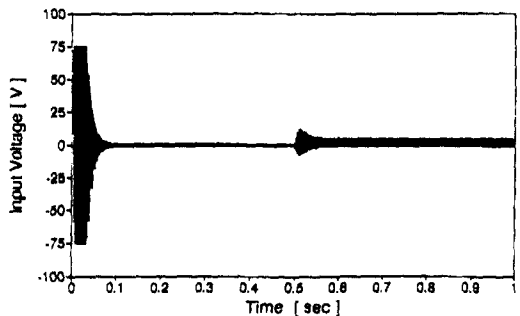
설계된 IESFVSC의 강인성을 확인하기 위하여 기존의 VSC를 설계하였으며 시뮬레이션을 통한 특성비교를 한다. 설계된 기존 VSC의 스위칭함



(a) 스위칭함수 제적



(b) 전기자전류



(c) 입력전압(제어입력)

그림 5. 기존 VSC의 부하응답특성

Fig. 5. Time responses of conventional VSC for 50% load.

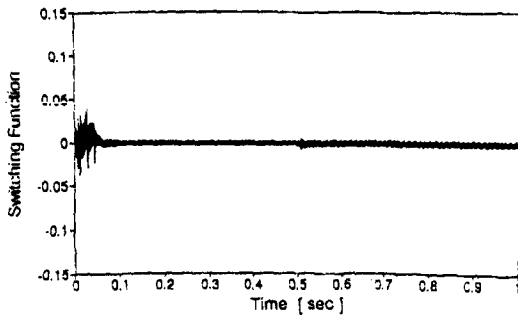
수 계수행렬 P와 제어입력의 구성을 위한 각 파라미터들은 슬라이딩모드에서 동가계통의 극점을 $[-90 \ -100]$ 으로 선정하였을 경우 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P = [0.0318 \ 0.0006 \ 0.0027]$$

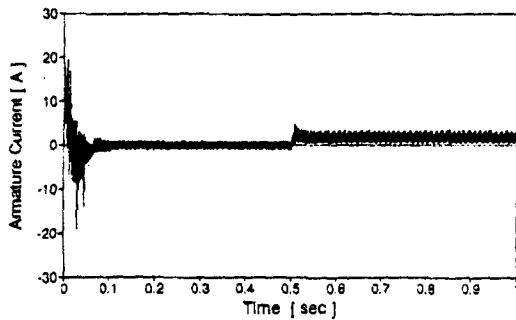
$$k_1 = 0 \quad k_2 = 0.0067 \quad k_3 = -0.8873$$

$$|K_f|_{\max} = 0.9980$$

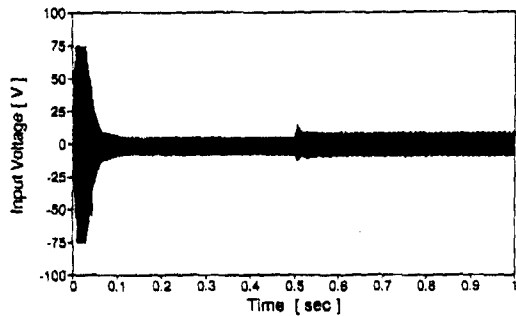
설계된 위의 두 제어계를 시뮬레이션한 결과는 그림 3, 4, 5, 6과 같다. 시뮬레이션 계산간격은



(a) 스위칭함수 계적



(b) 전기자전류



(c) 입력전압(제어입력)

그림 6. IESFVSC의 부하응답특성

Fig. 6. Time responses of IESFVSC for 50% load

0.2(ms)로 하였고, 기준입력(θ_{ref})은 π (rad)으로 주었으며, 외란은 전동기에 인가되는 부하로 하였다.

$t=0.5$ (sec)에 50% 부하를 외란으로 인가한 경우 기존의 VSC와 IESFVSC를 비교해 볼 때 그림 3의 IESFVSC 위치출력 응답에서 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.

5. 결론

본 연구에서는 직류서보 위치제어계통을 위한 새로운 편차적분 상태회환 가변구조제어기(IESFVSC)를 제안하였다.

제안된 IESFVSC는 계단형 외란 뿐만 아니라 ramp형 외란에 대해서도 강인한 특성을 보장하기 위하여 2차의 동태방정식으로 표현되는 서보 보상기를 도입하였고, 이를 직류서보 위치제어계통과 병합한 확대계통에 대해 설계된 상태회환 가변구조제어기로 구성되었다.

특히 제안된 IESFVSC가 정합조건이 만족되지 않는 외란을 포함하는 직류전동기 위치제어계통에서 계단형 및 ramp형으로 나타나는 외란의 영향을 제거할 수 있음을 슬라이딩모드에서 전달함수를 해석함으로써 보였다.

서보전동기 3차계통의 모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 외란제거성능이 기존의 VSC에 비하여 상당히 우수함을 보였다.

이 연구는 1992년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호 : 92-2200-01-01-3

참고 문헌

- 1) V. I. Utkin, "Variable structure system with sliding modes", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-22, No. 2, pp. 212-222, 1977.
- 2) H. Hashimoto, "Variable structure strategy for motion control systems: application to electrical machines", Proc. IECON '87, pp. 159-165, 1987.

- 3) R. A. DeCarlo, S. H. Zak, and G. P. Matthews, "Variable structure control of nonlinear multivariable systems : A Tutorial", IEEE Proc., Vol. 76, No. 3, pp. 212-232, 1988.
- 4) A. J. Calise and K. V. Raman, "A servo compensator design approach for variable structure systems", '82 ACC, pp. 1014-1019, 1982.
- 5) O. M. E. El-Ghezawi, A. S. I. Zinober, and S. A. Billings, "Analysis and design of variable structure systems using a geometric approach", Int. J. Control, Vol. 38, No. 3, pp. 657-671, 1983.

◇ 著者紹介 ◇



박 영 진 (朴永鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 단국대 공대 강사.



이 기 상 (李起常)

1952년 10월 24일생. 1978년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 단국대 공대 전기공학과 교수.



홍 순 찬 (洪淳瓚)

1950년 2월 24일생. 1973년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1975~1978년 해군사관학교 교수부 전기공학과 전임 강사. 1986~1987년 Texas A&M University 방문교수. 1978~현재 단국대 공대 전기공학과 교수.