

강인한 출력궤환 가변구조제어계의 설계

이 기 상 임 재 형^o 이 정 동

단국대학교 전기공학과

Design of Robust Output Feedback Variable Structure Control Systems

Kee-Sang Lee, Jae-Hyung Lim, Jung-Dong Lee

Dept. of Electrical Eng. Dankook Univ.

Abstract

The purpose of this study is to propose a robust OFVSCS that have the robust properties against process parameter variations and external disturbances by extending the basic OFVSCS and to evaluate its control performances. The ROFVSCS is composed of dynamic switching surfaces and output feedback switching control inputs that are constructed by the use of the unknown vector modeling technique. With the proposed scheme, existence of sliding mode is guaranteed and any nonzero bias can be suppressed in the face of disturbances and process parameter variations as far as well-known matching condition is satisfied.

Due to the fact that the ROFVSCS is driven by small number of measured information, the practical application of VSCS for the systems with unmeasurable states and for high order systems, that conventional schemes cannot be applied, is possible with the proposed scheme. It is noticeable that implementation cost of VSCS can be considerably reduced without sacrifice of control performances by adopting ROFVSCS since there is no need to measure the states with high measurement cost.

1. 서 론

가변구조제어계(VSCS: Variable Structure Control System)는 슬라이딩모드에서 프로세스 파라미터의 변화 및 외란에 대한 강인성과 응답의 속응성의 측면에서 타 제어기법에 비해 좋은 특성을 가지고 있어 각종 서보 계통의 제어에 적극적으로 도입되고 있다^{1,2}. 그러나 VSCS에 대한 대부분의 연구결과는 스위칭평면과 스위칭입력의 결정을 위해 모든 상태변수의 측정을 전제하고 있으며 이 전제조건은 가변구조제어기법의 적용범위를 크게 제한하고 있다. 따라서 이 문제는 가변구조제어 분야에서 해결되어야 할 가장 중요한 과제의 하나로 지적되어 왔지만 Decarlo³의 언급처럼 아직 뚜렷한 해결책이 제시되지 못하고 있는 실정이다^{3,4}. 이 문제의 해결을 위한 소수의 기존 연구결과와 실제적 응용과 이론적 확장을 기대하기 어려운 것으로 판단되고 있다⁵.

이 문제의 해결을 위한 최근의 연구결과로는 참고문헌 [6], [7] 등이 있다. 이 연구결과는 기존의 접근방법과 달리 측정 입출력 정보만에 의해 구동되는 동적스위칭평면과 출력 및 스위칭평면 정보에 의해 결정되는 스위칭제어입력을 포함한 본체적인 출력궤환 가변구조제어계(OFVSCS: Output Feedback Variable Structure Control System)를 제안하고 그 타당성을 보였다는 관점에서 매우 적극적인 대책이라 할 수 있다.

그러나 이들 연구는 측정 정보만을 이용한 동적스위칭평면의 제안과 이 스위칭평면과 함께 사용되어 완전한 OFVSCS를 구성할 수 있는 출력궤환 제어입력의 제안 등, 기본적인 골격을 갖추는데 초점을 둔 기초적 연구로서 강인성설계를 포함한 기타 문제점에 대한 제안은 전혀 다루어지지 않았다.

특히 OFVSCS의 강인성설계 문제는 VSC기법이 주목을 받게된 큰 이유중의 하나가 외란 및 파라미터변화에 대한 강인성을 가졌기 때문임을 고려할 때 OFVSCS기법의 실질적 적용을 가능케 하기 위해서 가장 먼저 해결되어야 할 과제로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 먼저 외란 및 파라미터변화가 발생한 경우 참고문헌 [7]에서 제안된 기본적 OFVSCS의 특성을 고찰함으로써 이 제어기법의 근본적 문제점을 도출한 다음, 강인한 출력궤환 가변구조제어계(ROFVSCS: Robust Output Feedback Variable Structure Control System)의 한가지 설계기법을 제안하고 해석적 입장에서 그 타당성을 보이고 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 보임에 목적을 두었다.

2. 강인한 출력궤환 가변구조제어계의 설계

2.1 강인성 설계문제의 설정

먼저 외란이나 파라미터 변화에 대한 참고문헌 [7]의 출력궤환 가변구조제어계의 특성을 고찰하기 위해 다음의 선형 시뮬변계를 고려하자.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + \Delta A)x + (B + \Delta B)u + Ef \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2.1)$$

위에서 $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^r$ 및 $f \in R^1$ 는 각각 상태, 입력, 출력 및 외란 벡터이고 ΔA , ΔB 는 A, B와 같은 차원의 파라미터 섭동행렬이다. 전개의 편이상 식(2.1)의 계는 완전 가관측, 완전 가제어라 가정한다. 파라미터 변화와 외란의 영향을 함께 처리하기 위해 다음을 정의하면

$$\begin{aligned} Hw &= \Delta Ax + \Delta Bu + Ef \\ \text{식(2.1)은 식(2.2)로 쓸 수 있다.} \\ \dot{x} &= Ax + Bu + Hw \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2.2)$$

상태궤환 가변구조제어계에서 스위칭평면은 식(2.4)와 같이 모든 상태변수들의 선형결합으로 표현된다.

$$s(x) = Px, \quad s(x) \in R^m \quad (2.3)$$

출력궤환 가변구조제어계를 위한 동적스위칭평면은 식(2.4)의 형태로 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} D(y, z) &= Ly + Oz \\ \dot{z} &= Fz + Jy + Gu \end{aligned} \quad (2.4)$$

위에서 $D \in R^{(n-m) \times n}$ 에 수렴하도록 설계되어야 하며 이 경우 z는 다음을 만족하는 a차원의 벡터로서 정상상태에서 $z = Tx$ 를 만족한다.

$$\begin{aligned} \frac{(n-q)m}{q \cdot m - 1} &\leq a \leq m(r-1), \quad r = (A, C) \text{의 가관측 지수} \\ D(y, z) &\text{가 } s(x) \text{에 점근적으로 수렴하기 위한 조건은 다음과 같다.} \\ LC + QT &= P \\ TA - JC &= FT \\ G &= TB \\ \text{Re}[\lambda_i(F)] &\ll 0 \quad (i=1, 2, \dots, a) \end{aligned} \quad (2.5)$$

위에서 다루어진 기본적 출력궤환 가변구조제어계는 $Hw=0$ 라는 가정 하에 기술된 것이므로 외란 및 파라미터 변화가 투입된 경우 직접적 작용이 불가능하다. $Hw=0$ 인 경우에 대하여 동적스위칭평면 방정식의 변수 z와 Tx의 편차를 구한 결과는 다음과 같으며

$$\begin{aligned} \dot{e} &= Tx - z \\ \dot{e} &= Fe + Thw \end{aligned} \quad (2.6)$$

따라서 동적스위칭평면 $D(y, z)$ 는 다음으로 구해진다.

$$D(y, z) = Px + QF^{-1}Thw - Qexp(Ft)e(0) \quad (2.7)$$

식(2.7)을 참고문헌 [7]에서 제안된 출력궤환 가변구조제어계에서 슬라이딩모드가 달성된다 하더라도 외란의 영향으로 인하여 스위칭평면 자체가 변동됨으로서 특정 상태변수의 편기현상을 피할 수 없음을 의미한다. 따라서 일단 슬라이딩모드가 발생하면 모든 상태가 목표치(원점)에 도달하도록 외란 및 파라미터 변화의 영향을 고려한 동적스위칭평면과, 같은 상황에서 슬라이딩모드의 발생을 보장할 수 있는 출력궤환 스위칭제어입력이 제안되어야 한다.

이러한 강인성설계는 VSC가 서보제어기법으로서 각광을 받은 가장 큰 이유가 외란 및 파라미터 변화에 대한 강인성임을 고려할 때 새로 제안된 OFVSCS의 실질적 적용을 위해 우선적으로 해결되어야 할 문제라 하겠다.

본 연구에서 제안하는 강인한 OFVSCS(ROFVSCS)는 미지외란 모델링 기법에 근거한 것이며 그 설계는 (1) 외란 모델링과 확대계통 구성 (2) 확대계통에 대한 동적스위칭평면 및 (3) 출력궤환 스위칭제어입력의 설계 등 세단계 과정에 의해 수행된다.

2.2 외란 모델링 및 확대계통의 구성

먼저 외란 w 의 각 요소 w_i 에 대한 모델은 식(2.8)과 같이 선정될 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta_i &= M_i \eta_i \\ w_i &= N_i \eta_i \quad (i=1, 2, \dots, l) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$M = \text{Block diag}(M_1, M_2, \dots, M_l)$$

$$N = \text{Block diag}(N_1, N_2, \dots, N_l)$$

이며 η_i 의 차원과 $M_i(M)$, $N_i(N)$ 는 외란 및 파라미터 변화의 정보(예상되는 파형)에 의해 쉽게 결정될 수 있다.^[6]

식(2.8)에서 η_i 를 k_i 차원이라 하면 η 는 $k = \sum_{i=1}^l k_i$ 차원의 벡터이고 M, N 은 각각 (k, k) , (l, k) 차원의 행렬이다. 확대계통은 식(2.2)의 외란벡터를 식(2.8)의 동태방정식으로 모델링하여 다시 식(2.2)과 결합시킨 것이다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_a &= A_a x_a + B_a u \\ y &= C_a x_a \end{aligned} \quad (2.9)$$

위에서 x_a 는 $[x^T \eta^T]^T$ 로서 $(n+k)$ 차원 벡터이며

$$A_a = \begin{bmatrix} A & HN \\ 0 & M \end{bmatrix}, B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}, C_a = [C \quad 0] \quad (2.10)$$

이다.

2.3 동적스위칭평면

강인한 출력궤환 가변구조제어계는 외란의 존재에도 불구하고 슬라이딩모드에서 모든 상태가 원점에 도달하도록 즉 동적스위칭평면 자체가 외란 및 파라미터 변화로 인하여 변형되지 않도록 설계되어야 한다. 먼저 기준 스위칭평면을 식(2.3)으로 선정하고 이를 다음과 같이 확대계통의 파라미터로 표현한다.

$$D^T(x) = Px = [P \quad 0]x_a = P_a x_a \quad (2.11)$$

강인한 출력궤환 가변구조제어계를 위한 동적스위칭평면은 식(2.12)와 같은 동태방정식으로 정의될 수 있으며

$$\begin{aligned} D_a(y, z_a) &= L_a y + Q_a z_a \\ z_a &= F_a z_a + J_a y + G_a u \end{aligned} \quad (2.12)$$

위에서 z_a 는 점근적으로 $T_a x_a$ 에 수렴하는 α_a 차원의 벡터로서 α_a 는 다음을 만족한다.

$$\frac{(n+k-q)m}{q+m-1} \leq \alpha_a \leq m(r_a-1), \quad r_a \text{는 } (A_a, C_a) \text{의 가관측지수}$$

식(2.12)의 각 파라미터는 다음 조건을 만족하도록 결정되며

$$\begin{aligned} L_a C_a + Q_a T_a &= P_a \\ T_a A_a - J_a C_a &= F_a T_a \\ G_a &= T_a B_a \\ \text{Re}(\lambda_i(F_a)) &< 0 \quad (i=1, 2, \dots, \alpha_a) \end{aligned} \quad (2.13)$$

이 경우 정상상태에서는 $D_a = D^T(z_a = T_a x_a)$ 가 성립되고 과도기간 중의 편차 $e_a = T_a x_a - z_a$ 는 식(2.14)에 의해 지배된다.

$$\dot{e}_a = F_a e_a, \quad e_a(0) = T_a x_a(0) - z_a(0) \quad (2.14)$$

식(2.13)의 조건은 식(2.10)을 도입함으로써 식(2.2), 식(2.12)의 파라미터로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} L_a C + Q_a T_{a1} &= P_a, \quad Q_a T_{a2} = 0 \quad (T_{a2} = 0) \\ T_{a1} A - J_a C &= F_a T_{a1} \\ G_a &= T_{a1} B \end{aligned} \quad (2.15)$$

위에서 $T_a = [T_{a1} \quad T_{a2}]$ 이며, T_{a1} 과 T_{a2} 는 각각 (a, n) 및 (a, k) 차원의 행렬이다.

2.4 출력궤환 스위칭제어입력

2.3절에서 설계된 동적스위칭평면과 함께 강인한 출력궤환 가변구조제어계를 구성할 수 있는 한가지 출력궤환 스위칭제어입력을 식(2.16)으로 선정한다.

$$u = -(PB)^{-1}[\dot{y}_d y + \dot{z}_a z_a + v] \quad (2.16)$$

위에서 \dot{y}_d, \dot{z}_a 는 각각 (m, q) , (m, α_a) 차원의 스위칭이득행렬로서 제어계 동작중 각 요소는 식(2.17)과 같이 선정된다.

$$\dot{y}_d(i, j) = \begin{cases} \dot{y}_d(i, j), & d_{iy} > 0 \\ \dot{y}_d(i, j), & d_{iy} < 0 \quad (i=1, \dots, m, j=1, \dots, q) \end{cases} \quad (2.17a)$$

$$\dot{z}_a(i, j) = \begin{cases} \dot{z}_a(i, j), & d_{iz} > 0 \\ \dot{z}_a(i, j), & d_{iz} < 0 \quad (i=1, \dots, m, j=1, \dots, \alpha_a) \end{cases} \quad (2.17b)$$

v 는 외란 및 파라미터 변화가 발생한 경우에도 슬라이딩모드의 존재를 보장하기 위해 도입된 외란보상용 벡터이다.

식(2.2)의 프로세스, 식(2.12)의 동적스위칭평면과 식(2.16) 및 식(2.17)로 표현된 출력궤환 스위칭제어입력으로 구성된 출력궤환 가변구조제어계에서 슬라이딩모드의 존재가 보장되기 위한 각 스위칭이득의 결정조건은 다음 정리에 기술한 바와 같다.

$$\langle \text{정리 1} \rangle \quad k_p C = PA - Q_a F_a \quad (2.18a)$$

$$k_z = Q_a F_a \quad (2.18b)$$

를 만족하는 $[k_y, k_z]$ 가 존재하는 경우 출력궤환 가변구조제어계에서 슬라이딩모드의 존재를 보장하는 이득은 다음 조건을 만족한다.

$$\begin{cases} \dot{y}_d(i, j) > k_y(i, j) \\ \dot{y}_d(i, j) < k_y(i, j) \quad (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, q) \end{cases} \quad (2.19a)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_d(i, j) > k_z(i, j) \\ \dot{z}_d(i, j) < k_z(i, j) \quad (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, \alpha_a) \end{cases} \quad (2.19b)$$

$$v_i = \begin{cases} v_i > (LCH)_i \max d_{ai} > 0 \\ v_i < (LCH)_i \max d_{ai} < 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (2.19c)$$

<증명> 먼저 D_a 를 식(2.16), (2.18)로부터 구하면

$$\begin{aligned} \dot{D}_a &= L_a C(Ax + Bu + Hw) + Q_a(F_a z_a + J_a y + G_a u) \\ &= (PA - Q_a F_a T_{a1})x + PBu + Q_a F_a z_a + L_a C H w \\ &= (k_y - \dot{y}_d)y + (k_{za} - \dot{z}_d)z_a + (L_a C H w - v) \end{aligned}$$

슬라이딩모드는 $D_a \dot{D}_a < 0$ 또는 $d_{ai} \dot{d}_{ai} < 0$ ($i=1, 2, \dots, m$)일 때 존재하므로 이를 검증하기 위해 $d_{ai} \dot{d}_{ai}$ 를 표현한 결과는 다음과 같다

$$\begin{aligned} d_{ai} \dot{d}_{ai} &= \sum_{j=1}^q (k_y(i, j) - \dot{y}_d(i, j)) y_j d_{ai} \\ &\quad + \sum_{j=1}^{\alpha_a} (k_{za}(i, j) - \dot{z}_d(i, j)) z_{aj} d_{ai} + d_{ai} [(L_a C H)_i w - v_i] \end{aligned}$$

여기에 식(2.19)를 대입하면 각 항이 부의 값으로 되고 따라서 $d_{ai} \dot{d}_{ai} < 0$ ($i=1, 2, \dots, m$)이 항상 성립한다. ■

위의 정리에 식(2.18)의 해가 존재하지 않는 경우에는 다음 식을 만족하는 $[k_y, k_z]$ 를 사용할 수 있다.

$$k_p C + k_z T_{a1} = PA \quad (2.20)$$

식(2.20)의 해는 z_a 와 $T_a x_a$ 의 과도편차 $e_a = T_a x_a - z_a$ 의 영향을 무시한 결과이므로 도달시간을 증가시키는 단점이 있지만 이 단점은 F_a 의 고유치를 비교적 큰 부의 실수로 선정함으로써 편차를 급속히 영에 수렴시키는 동시에 z_a 에 대한 스위칭이득을 식(2.21)과 같이 수정함으로써 보완될 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{y}_d(i, j) = \dot{y}_d(i, j) + \delta_{ij} \\ \dot{z}_d(i, j) = \dot{z}_d(i, j) - \delta_{ij} \end{cases} \quad (2.21)$$

2.5 슬라이딩모드에서의 제어계특성과 강인성조건

ROFVSCS가 외란 및 파라미터 변화의 발생에도 불구하고 슬라이딩모드를 발생함은 명백하다. 그러나 OFVSCS의 특성을 좌우하는 매우 중요한 사항은 슬라이딩모드에서 과연 스위칭평면의 외란에 의한 변동과 그로 인한 상태변수의 편기현상이 제거되었는가 하는 것이다. 먼저 동적스위칭평면의 외란에 대한 $D_a=0$ 의 의미를 고찰하기 위해 D_a 를 전개하면

$$D_a = Px - Q \exp[F_a t] e_a(0), \quad e_a(0) = T_a x_a(0) - z_a(0) \quad (2.22)$$

따라서 D_a 는 점근적으로 $D^T(x)$ 에 수렴하고 과도기간 이후 외란 및 파라미터 변화로 인한 D_a 의 변화는 발생하지 않음을 알 수 있다.

강인성설계와 관련하여 고찰해야 할 또 하나의 사항은 D_a 가 궁극적으로 $Px=0$ 를 의미한다 하더라도 모든 상태변수가 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_i = 0$ ($i=1, 2, \dots, n$)임을 의미하지 않을 수도 있다는 점이다. 이 문제는 슬라이딩모드에서의 계통특성을 나타내는 등가제어계를 고찰해야만 확인될 수 있다. 등가제어입력을 구한 결과는 식(2.23)과 같다

$$u_a = -(PB)^{-1}[PAX - Q_a F_a e_a + L_a C H w] \quad (2.23)$$

이를 원래의 계통방정식인 식(2.2)에 대입하면 다음의 등가제어계가 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{e}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I - B(PB)^{-1}P]A & B(PB)^{-1}Q_a F_a \\ 0 & F_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ e_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I - B(PB)^{-1}P \\ 0 \end{bmatrix} H w \quad (2.24)$$

위식으로 부터 제한된 강인한 출력궤환 가변구조제어계의 강인성에 관한 다음 정리가 성립된다.

<정리 2> 강인한 출력궤환 가변구조제어계의 강인성조건

식(2.1) 또는 식(2.2)의 프로세스, 식(2.12)의 동적스위칭평면 및 식(2.16)의 출력궤환 스위칭제어입력으로 구성된 강인한 출력궤환 가변구조제어계가 슬라이딩모드에서 외란 및 파라미터 변화에 무관하게 슬라이딩모드를 하여 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_i = 0$ 되기 위한 조건은 다음과 같다.

$$[I - B(PB)^{-1}P]H = 0 \quad (2.25)$$

위의 불변성조건은 RS $[H] \subset$ RS $[B]$ (RS는 Range Space)와 동등하며 이 강인성조건과 관련된 매우 중요한 사실은 식(2.25)의 조건이 일반적인 상태공간 가변구조제어계에서의 강인성조건과 동일하다는 것이다. 따라서 본 연구에서 제안된 강인한 출력궤환 가변구조제어계는 소수의 측정입출력정보만에 의해 구동됨에도 불구하고 모든 상태변수의 측정을 전제한 상태공간 가변구조제어계와 같은 강인성을 가짐을 알 수 있다.

3. 수치예 및 시뮬레이션 결과 검토

지금까지 논의된 강인한 출력궤환 가변구조제어기의 타당성을 입증하기 위하여 다음의 파라미터를 갖는 식(2.2)의 다변수계통을 고려한다.

$$A = \begin{bmatrix} -1.5 & 0 & 0.1 & 0.4 & 0.4 \\ -0.2 & -1 & 0 & -0.25 & 1 \\ -0.3 & 0.2 & -2 & -0.1 & 0.2 \\ 0.1 & 0 & -0.2 & -2 & 0.5 \\ 0.5 & 0.4 & 0 & 0 & -0.5 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 5 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

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

3.1 확장모델 수립과 동적스위칭평면 설계

설계의 편의상 계단형태의 외란을 가정하면 외란 모델의 파라미터는 $M = [0]$, $N = [1]$ 이 되며 확장모델은 다음과 같이 구해진다.

$$A_s = \begin{bmatrix} -1.5 & 0 & 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0 \\ -0.2 & -1 & 0 & -0.25 & 1 & 0 \\ -0.3 & 0.2 & -2 & -0.1 & 0.2 & 0 \\ 0.1 & 0 & -0.2 & -2 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0.4 & 0 & 0 & -0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 5 & 0 \\ 0 & 50 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

위의 계통에 대한 동적스위칭평면 설계를 위한 기준스위칭 평면은 동가제어계의 고유치가 -6, -4, -2를 갖도록 다음과 같이 선정하였으며

$$P_s = \begin{bmatrix} 1.8380 & -0.5876 & -0.5384 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.0256 & 0.0432 & 0.0149 & 0 & 0.02 & 0 \end{bmatrix}$$

동적 스위칭평면 파라미터를 구한 결과는 다음과 같다.

$$F_s = \begin{bmatrix} -10 & 0 \\ 0 & -10 \end{bmatrix}, J_s = \begin{bmatrix} -92.7157 & -11.3958 & -245.5432 \\ 3.3996 & 0.5683 & 14.4290 \end{bmatrix}$$

$$G_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, L_s = \begin{bmatrix} 13.8397 & 0 & 29.9994 \\ -0.4384 & 0.02 & -1.783 \end{bmatrix}, Q_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{s1} = \begin{bmatrix} -12.0017 & -0.5876 & -30.5379 & 0.2 & 0 \\ 0.4640 & 0.0232 & 1.7978 & 0 & 0 \end{bmatrix}, T_{s2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

3.2 스위칭제어입력의 설계

(1) 상태궤환 스위칭제어입력

$$u = -(PB)^{-1}(\dot{r}x + v)$$

여기서 \dot{r} 의 결정기준인 k_x 는

$$k_x = PA = \begin{bmatrix} -2.4579 & 0.4799 & 1.2207 & 0.5359 & 0.1399 \\ -0.0415 & -0.0322 & -0.0272 & -0.0021 & 0.0464 \end{bmatrix}$$

이 되고, v 의 결정기준인 PHW_{max} 는 다음과 같이 구해진다.

$$PHW_{max} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix}$$

(2) 출력궤환 스위칭제어입력

$$u = -(PB)^{-1}(\dot{r}y + \dot{r}z_a + v)$$

식(2.20)으로부터 구해진 다음의 근사해를 이용하여 식(2.19)를 만족하도록 스위칭이득을 설정하였으며

$$[k_y \ k_z] = \begin{bmatrix} -8.5876 & 0.1399 & -65.3226 & 2.6797 & 82.5298 \\ 1.5286 & 0.0464 & 6.2206 & -0.0103 & -3.6494 \end{bmatrix}$$

외란보상을 위한 v 의 선정기준인 $LCHW_{max}$ 는 다음과 같다.

$$LCHW_{max} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix}$$

3.3 시뮬레이션 결과 및 검토

파라미터 변화는 계통파라미터 A(4.1)에 $(1+\sin 10t)$ 가 곱해진 형태로 가정하였으며 외란으로는 크기가 5인 단위계단함수를 3초 이후에 투입했다.

그림1과 그림2는 각각 상태궤환 가변구조제어계와 강인한 출력궤환 가변구조제어계에 대한 상태변수와 스위칭평면의 시간궤적을 비교한 결과이다. 각각의 상태궤환은 제안된 강인한 출력궤환 가변구조제어계가 적은 개수의 측정 출력정보 만에 의해 구동됨에도 불구하고 모든 상태변수의 측정능을 전제로 설계된 상태궤환 가변구조제어계와 거의 동등한 제어성능을 가짐을 보여주고 있으며 슬라이딩모드에서의 도달시간도 훨씬 짧음을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 가변구조제어계의 실질적 적용과 관련된 가장 큰 문제점의 하나로 지적되고 있는 상태변수의 가용성에 대한 전제조건을 제거하기 위하여 참고문헌 [7]에서 제안된 출력궤환 가변구조제어계에 도입할 수 있는 한가지 형태의 출력궤환 스위칭제어입력을 제안하고 더불어 이 기법의 실질적 적용을 가능케 하기 위한 강인성 설계기법을 제시한 다음 수치예를 들어 그 유용성을 입증하였다.

제안된 강인한 출력궤환 가변구조제어계는 외란모델링기법에 근거하여 설계되었으며 소수의 측정 정보 만에 의해 구동됨에도 불구하고 모든 상태변수를 사용하는 기존의 상태궤환 가변구조제어계에서의 강인성 조건인 $RS[H]CR[B]$ 가 만족되는 한 외란 및 파라미터 변화에 대한 강인성을 가질 뿐만 아니라 슬라이딩모드에서의 도달시간이 상태궤환 가변구조제어계의 경우보다 훨씬 짧도록 설계될 수 있다는 특성을

갖는다.

참고 문헌

- [1] H. S. Ramirez, T. A. W. Dwyer, "Variable Structure Controller design for space craft nutation damping", IEEE Trans. Auto. Contr., AC-32 No. 5, pp. 436-438, 1987.
- [2] H. Hashimoto, "Variable structure strategy for motion control system : application to electrical machines", Proc. IECON'87, pp. 159-165, 1987.
- [3] V. I. Utkin, "Variable structure system - present and future", Automat. Remote control, Vol. 44, No. 9, pp. 1105-1120, 1983.
- [4] B. A. White, "Reduced order switching function in variable structure control system", IEE proc., Vol. 130, No. 2, March, 1983, pp. 33-40.
- [5] R. A. Decarlo et. al., "Variable structure control of nonlinear multivariable system: A Tutorial", proc. IEEE, Vol. 76, pp. 212-232, march 1988.
- [6] K. S. Lee et al., "A new dynamic switching function for output feedback variable structure control", Trans. of KIEE, Vol. 40, no. 7, pp. 706-717, July 1991.
- [7] K. S. Lee, D. S. Cho, "Design of an output feedback variable structure control system", Trans. of KIEE, Vol. 41, No. 8, pp. 883-892, 1992.
- [8] C. D. Johnson, "Theory of disturbance - accommodating controller", Control and dynamic system, vol. 12, pp. 387-489.
- [9] K. S. Lee, S. W. Bae, "A process fault detection filter design by fault vector modelling approach and an application", Trans. of KIEE, Vol. 36, No. 6, pp. 430-436, 1987.

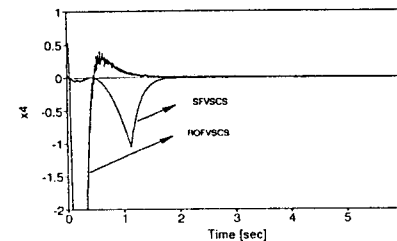
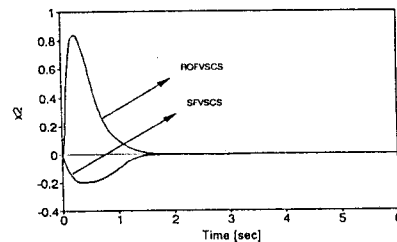
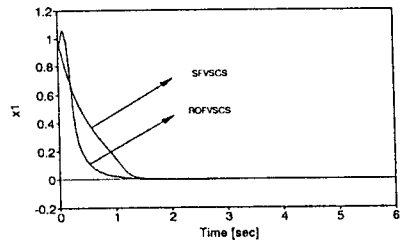


그림 1. 각 제어계에 대한 상태변수의 시간궤적(x_1, x_2, x_4)

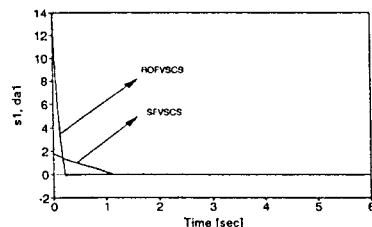


그림 2. 각 제어계에 대한 스위칭평면의 시간궤적(s_1, d_1)