

출력궤환 가변구조제어계의 강인성 설계

이기상, 임재형^o, 이정동
단국대학교 전기공학과

Design of Output Feedback Variable Structure Control Systems with Robust Properties

Kee-Sang Lee, Jae-Hyung Lim, Jung-Dong Lee
Dept. of Electrical Eng. Dankook University

Abstract - It has been well known that the assumption of full state availability is one of the most important restrictions to the practical realization of VSCS. And several attempts to alleviate the assumption had been made. However, it is not easy to find a positive scheme among them. Recently, an output feedback variable structure control system(OFVSCS) was proposed and the effectiveness of the scheme was validated for the disturbance free systems.

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 through power system stabilizer design example. The ROFVSCS is composed of dynamic switching function 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 informations, 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 the 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. 서론

가변구조제어는 슬라이딩모드에서 프로세스 파라미터의 변화 및 외란에 대한 강인성과 응답의 속용성 측면에서 타 제어기법에 비해 좋은 특성을 가지고 있어 각종 서보 계통의 제어에 적극적으로 도입되고 있다[1][2]. 그러나 가변구조제어에 대한 대부분의 연구결과는 스위칭평면과 제어입력의 결정을 위해 모든 상태 변수의 측정을 전제하고 있으며 이 전제조건은 가변구조제어기법의 적용범위를 크게 제한하고 있다. 따라서 이 문제는 가변구조 제어 분야에서 해결되어야 할 가장 중요한 과제의 하나로 지적되어 왔지만 Decarlo의 언급처럼 아직 뚜렷한 해결책이 제시되지 못하고 있는 실정이다[3][4]. 이 문제의 해결을 위한 소수의 기존 연구결과는 실제적 응용과 이론적 확장을 기대하기 어려운 것으로 판단되고 있다[5].

이 문제의 해결을 위한 최근의 연구결과로는 참고문헌 [6], [7] 등이 있다. 이 연구결과는 기존의 접근방법과 달리 측정 입력 정보만에 의해 구동되는 동적스위칭평면과 출력 및 스위칭 평면 정보에 의해 결정되는 스위칭제어입력을 포함한 본격적인 출력궤환 가변구조제어계를 제안하고 그 타당성을 보였다는 관점에서 매우 적극적인 대책이라 할 수 있다.

그러나 이들 연구는 측정 정보만을 이용한 동적스위칭평면의 제안과 이 스위칭평면과 함께 사용하여 완전한 출력궤환 가변구

조제어계를 구성할 수 있는 출력궤환 제어입력의 제안 등, 기본적인 골격을 갖추는데 초점을 둔 기초적 연구로서 강인성설계를 포함한 기타 문제점에 대한 제안은 전혀 다루어지지 않았다.

특히 출력궤환 가변구조제어계의 강인성설계 문제는 가변구조 제어 기법이 주목을 받게된 큰 이유중의 하나가 외란 및 파라미터변화에 대한 강인성을 가졌기 때문임을 고려할 때 출력궤환 가변구조제어 기법의 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 출력궤환 가변구조제어계의 특성을 고찰함으로써 이 제어기법의 근본적 문제점을 도출한 다음, 출력궤환 가변구조제어계의 강인성 설계기법을 제안하고 해석적 입장에서 그 타당성을 보였으며 실제로서 전력계통에서의 안정화기 설계에 적용함으로써 그 유용성을 보임에 목적을 두었다.

2. 기본적 출력궤환 가변구조제어계의 설계

기존의 상태궤환 가변구조제어계는 스위칭평면과 스위칭제어입력의 결정을 위해 모든 상태변수를 측정해야 한다는 문제점을 가지며 이 문제점은 측정 불가능한 상태변수를 포함한 계통, 매우 많은 상태변수를 가진 고차계통 및 대단위계통 등에 대한 가변구조제어기법의 적용을 불가능하게하는 요인이 되고 있다. 본절에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 대책으로서 최근 제안된 측정 입력에만 의해서 구동되는 동적스위칭평면과 출력궤환 스위칭 제어입력을 포함한 출력궤환 가변구조제어계를 고려한다.

먼저 출력궤환 가변구조제어계의 설계를 위해 식 (2.1)의 선형 시불변계를 고려한다.

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

위에서 $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^q$, $f \in R^1$ 는 각각 상태, 입력, 출력 및 외란벡터이다.

전개의 편이상 식 (2.1)의 계는 완전가제어, 완전가관측이라 가정하며, 파라미터 섭동과 외란을 함께 처리하기 위해 다음을 정의한다.

$$Hw = \Delta Ax + \Delta Bu + Ef \quad (2.2)$$

이제 식 (2.1)은 식 (2.3)으로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Hw \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.1. 동적스위칭평면

식 (2.3)에서 $Hw=0$ 일때 출력궤환 가변구조제어계를 위한 동적 스위칭평면은 식 (2.4)의 형태로 정의될 수 있다.

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

위에서 $DeRm$ 은 $s(x)$ 에 수렴하도록 설계되어야 하며 이 경우 z 는 식 (2.5)를 만족하는 a 차원의 벡터로서 정상상태에서 $z=Tx$ 를 만족한다.

$$\frac{(n-q)m}{q^{m-1}} \leq a \leq m(r-1), \quad r \text{은 } (A, C) \text{의 가관측지수} \quad (2.5)$$

$D(y, z)$ 가 $s(x)$ 에 점근적으로 수렴하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} LC + QT &= P \\ TA - JC &= FT \\ G &= TB \\ Re[\lambda_i(F)] &\ll 0 \quad (i=1, 2, \dots, a) \end{aligned} \quad (2.6)$$

과도기간 중의 편차를 고려하기 위해 $e=Tx-z$ 를 정의하면 e 는 식 (2.7)에 의해 지배된다.

$$\dot{e} = Fe, \quad e(0) = Tx(0) - z(0) \quad (2.7)$$

식 (2.6)을 만족하는 동적스위칭평면 파라미터의 결정 알고리즘은 참고문헌 [6], [7] 등에 상세히 수록되어있다.

2.2. 출력제한 스위칭제어입력

2.2.1 \dot{y} -cell 접근법

본절에서는 식 (2.4)에 기술된 동적스위칭평면과 함께 출력제한 가변구조제어계를 구성할 수 있는 다음 형태의 출력제한 스위칭제어입력을 고려한다.

$$u = -(PB)^{-1} [\dot{y}_y + \dot{y}_z] \quad (2.8)$$

위에서 \dot{y}_y, \dot{y}_z 는 각각 $(m, q), (m, a)$ 차원의 스위칭이득행렬로서 각 요소는 식 (2.9), 식 (2.10)으로 표현된다.

$$\dot{y}_y(i, j) = \begin{cases} \dot{y}_y(i, j), d_{iyj} > 0 \\ \dot{y}_y(i, j), d_{iyj} < 0 \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, q) \quad (2.9)$$

$$\dot{y}_z(i, j) = \begin{cases} \dot{y}_z(i, j), d_{izj} > 0 \\ \dot{y}_z(i, j), d_{izj} < 0 \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, a) \quad (2.10)$$

$Hw=0$ 를 가정한 식 (2.3)의 프로세스와 식 (2.4)의 스위칭평면 및 식 (2.8)의 스위칭입력으로 구성된 출력제한 가변구조제어계에 대하여 슬라이딩모드가 존재하기 위한 스위칭이득조건은 다음 정리에 기술한 바와 같다.

$$\langle \text{정리1} \rangle \quad \begin{aligned} k_y C &= PA - QFT \\ k_z &= QF \end{aligned} \quad (2.11)$$

를 만족하는 해(또는 근사해) k_y, k_z 가 존재하고 \dot{y}_y 및 \dot{y}_z 가 다음 조건을 만족하면

$$\begin{cases} \dot{y}_y(i, j) > k_y(i, j) \\ \dot{y}_y(i, j) < k_y(i, j) \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, q) \quad (2.13)$$

$$\begin{cases} \dot{y}_z(i, j) > k_z(i, j) \\ \dot{y}_z(i, j) < k_z(i, j) \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, a) \quad (2.14)$$

식 (2.3), 식 (2.4) 및 식 (2.8)로 구성된 출력제한 가변구조제어계는 $Hw=0$ 인 경우 슬라이딩모드의 존재조건

$$d_i d_i < 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (2.15)$$

를 만족한다.

<증명> 먼저 $D(y, z)$ 를 구하고 식 (2.6)의 점근적 일치조건을 도입하여 정리하면

$$D(y, z) = (k_y - \dot{y}_y)y + (k_z - \dot{y}_z)z \quad (2.16)$$

가 얻어지고 슬라이딩모드의 존재조건인 식 (2.15)의 좌변을 얻기 위해 식 (2.16)으로부터 d_i 의 표현을 구하면 아래와 같다.

$$d_i = \sum_{j=1}^q (k_y(i, j) - \dot{y}_y(i, j))y_j + \sum_{k=1}^a (k_z(i, k) - \dot{y}_z(i, k))z_k$$

따라서 $d_i d_i$ 는 식 (2.17)로 구해진다.

$$d_i d_i = \sum_{j=1}^q (k_y(i, j) - \dot{y}_y(i, j))y_j d_i + \sum_{k=1}^a (k_z(i, k) - \dot{y}_z(i, k))z_k d_i \quad (2.17)$$

위식에 식 (2.9), 식 (2.13) 및 식 (2.10), 식 (2.14)를 적용하면

$$d_i d_i < 0 \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

위에서 식 (2.11), 식 (2.12)의 해가 존재하지 않는 경우에는 식 (2.18)로 주어진 근사적 조건을 만족하는 k_y, k_z 를 사용할 수 있다.

$$k_y C + k_z T = PA \quad (2.18)$$

위 조건을 만족하는 이득 k_y, k_z 를 사용하는 경우 $\dot{D}(y, z)$ 는 다음으로 된다.

$$\dot{D}(y, z) = (k_y - \dot{y}_y)y + (k_z - \dot{y}_z)z - Q \exp(Ft)e(0) \quad (2.19)$$

식 (2.19)에서 편차 $e(0)$ 의 항은 행렬 F 의 고유치를 적절히 선정함으로써 급속히 감소시킬 수 있으므로 슬라이딩모드의 발생여부에 큰 영향을 주지는 않는다. 그러나 이 과도편차는 상태궤적이 슬라이딩평면에 도달하는데 소요되는 도달시간을 증가시키는 요인이 될 수 있으며, 따라서 식 (2.18)의 해(근사해)를 사용할 경우에는 도달시간의 감소를 위하여 다음과 같이 수정된 스위칭이득을 사용함이 바람직하다.

$$\begin{cases} \dot{y}_{zm}(i, j) = \dot{y}_z(i, j) + \delta_{ij} \\ \dot{y}_{zm}(i, j) = \dot{y}_z(i, j) - \delta_{ij} \end{cases} \quad (2.20)$$

2.2.2 동가제어 접근법

다음으로 식 (2.4)와 함께 출력제한 가변구조제어계를 실현시켜주는 다른 형태의 출력제한 제어입력은 식 (2.21)과 같다.

$$u = -(PB)^{-1} [k_y y + k_z z] - k_d (PB)^{-1} \frac{D}{\|D\|} \quad (\text{단, } k_d > 0) \quad (2.21)$$

식 (2.21)에서 k_y, k_z 가 식 (2.11), 식 (2.12)를 만족하도록 결정되면 $Hw=0$ 인 경우 식 (2.3), 식 (2.4) 및 식 (2.21)로 구성된 출력제한 가변구조제어계는 식 (2.4)의 스위칭평면에서 슬라이딩모드의 발생을 보장한다. 이 제어입력의 타당성은 참고문헌 [7]에 상세히 기록되어있다.

3. 강인한 출력제한 가변구조제어계의 설계기법

3.1 강인성 설계문제의 설정

2절에 기술된 기본적 출력제한 가변구조제어계는 모두 $Hw=0$ 라는 가정하에 기술된 것이므로 외란 및 파라미터 변화가 투입된 경우 직접적 적용이 불가능하다. 그 배경은 $Hw \neq 0$ 인 경우 동적스위칭평면의 특성을 고찰함으로써 간단히 이해될 수 있다.

먼저 $Hw \neq 0$ 인 경우에 대하여 식 (2.4)의 동적스위칭평면 방정식의 변수 z 와 Tx 의 편차를 구한 결과는 식 (3.1)과 같다.

$$\dot{e} = Fe + THw \quad (3.1)$$

위식과 식 (2.6)의 조건을 이용하면 $D(y, z)$ 는 다음으로 구해진다.

$$D(y, z) = Ly + Qz = Px + QF^{-1}THw - Q \exp(Ft)e(0) \quad (3.2)$$

식 (3.2)는 식 (2.3), 식 (2.4) 및 식 (2.8) 또는 식 (2.21)로 이루어진 출력제한 가변구조제어계가 $D^T D < 0$ 을 만족하여 $D=0$ 이 될

성된다 하더라도 외란이나 파라미터의 변화에 의한 영향으로 인하여 스위칭평면 자체가 변동됨으로서 특정 상태변수의 편기현상을 피할 수 없음을 의미한다. 따라서 일단 슬라이딩모드가 발생하면 모든 상태가 목표치에 도달하도록 외란 및 파라미터 변화의 영향을 고려한 동적스위칭평면과 함께 같은 상황에서 슬라이딩모드의 발생을 보장할 수 있는 출력제한 스위칭제어입력이 제안되어야 한다.

이러한 강인성설계는 가변구조제어가 서어보제어기법으로서 각 장을 받은 가장 큰 이유가 외란 및 파라미터 변화에 대한 강인성을 고려할때 새로 제안된 출력제한 가변구조제어계의 실질적 적용을 위해 우선적으로 해결되어야 할 문제라 하겠다.

3.2. 외란 모델링 및 확대계통의 구성

외란 모델링기법은 계통에 투입될 수 있는 미지의 외란이나 파라미터변동 등의 영향을 제거 또는 이용하기 위하여 제어기 설계, 관측자 설계 등에 자주 사용되며 대상 외란의 개략적 파형 정보만으로 외란 처리를 가능하게 해 주는 효과적인 기법이다.

먼저 w 의 각 요소 w_i 에 대한 모델은 식 (3.3a)과 같이 선정될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_i &= M_i \eta_i \\ w_i &= N_i \eta_i \quad (i = 1, 2, \dots, l) \end{aligned} \quad (3.3a)$$

외란벡터 전체에 대한 모델은 식 (3.3a)를 결합한 것으로 식 (3.3b)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= M \eta \\ w &= N \eta \end{aligned} \quad (3.3b)$$

위에서

$$\begin{aligned} M &= \text{Block diag}(M_1, M_2, \dots, M_l) \\ N &= \text{Block diag}(N_1, N_2, \dots, N_l) \end{aligned}$$

이며 η 의 차원과 M_i (M), N_i (N)는 외란 및 파라미터 변화의 정보 (예상되는 파형)에 의해 쉽게 결정될 수 있다[8][9].

식 (3.3a)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 (2.3)의 외란벡터를 식 (3.3)의 동태방정식으로 모델링하여 다시 식 (2.3)과 결합시킨 것이다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_a &= A_a x_a + B_a u \\ y &= C_a x_a \end{aligned} \quad (3.4)$$

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

$$A_a = \begin{bmatrix} A & HN \\ 0 & M \end{bmatrix} \quad B_a = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \quad C_a = [C \ 0] \quad (3.5)$$

이다.

3.3 강인한 출력제한 가변구조제어계를 위한 동적스위칭평면

기본적 출력제한 가변구조제어계의 적용상 문제점은 외란 및 파라미터 변화가 투입된 경우 슬라이딩모드가 발생하더라도 특정 상태변수의 편기현상을 피할 수 없다는 점이다. 따라서 강인한 출력제한 가변구조제어계는 외란의 존재에도 불구하고 슬라이딩모드에서 모든 상태가 원점에 도달하도록 설계되어야 한다. 이를 위해서는 동적스위칭평면 자체가 외란 및 파라미터 변화로 인하여 변형되지 않도록 설계되어야 한다.

먼저 기준 스위칭평면을 식 (2.4)로 선정하고 이를 다음과 같이 확대계통의 파라미터로 표현한다.

$$D^r(x) = P x = [P'0]x_a = P_a x_a \quad (3.6)$$

강인한 출력제한 가변구조제어계를 위한 동적스위칭평면은 식 (3.7)과 같은 동태방정식으로 정의될 수 있으며

$$\begin{aligned} D_a(y, z_a) &= L_a y + Q_a z_a \\ \dot{z}_a &= F_a z_a + J_a y + G_a u \end{aligned} \quad (3.7)$$

위에서 z_a 는 점근적으로 $T_a x_a$ 에 수렴하는 a_a 차원의 벡터로서 a_a 는 식 (3.8)을 만족한다.

$$\frac{(n+k-q)m}{q+m-1} \leq a_a \leq m(r_a-1) \quad \text{단 } r_a \text{는 } (A_a, C_a) \text{의 가관측지수} \quad (3.8)$$

식 (3.7)의 각 파라미터는 다음 조건을 만족하도록 결정되며

$$L_a C_a + Q_a T_a = P_a \quad (3.9a)$$

$$T_a A_a - J_a C_a = F_a T_a \quad (3.9b)$$

$$G_a = T_a B_a \quad (3.9c)$$

$$\text{Re}[\lambda_i(F_a)] \ll 0 \quad (i=1, 2, \dots, a_a) \quad (3.9d)$$

이 경우 정상상태에서는 $D_a = D^r(z_a = T_a x_a)$ 가 성립되고 과도기간 중의 편차 $e_a = T_a x_a - z_a$ 는 식 (3.10)에 의해 지배된다.

$$\dot{e}_a = F_a e_a, \quad e_a(0) = T_a x_a(0) - z_a(0) \quad (3.10)$$

식 (3.9)의 조건은 식 (3.5)를 도입함으로써 식 (2.3), 식 (3.3)의 파라미터로 표현될 수 있다.

$$L_a C + Q_a T_{a1} = P, \quad Q_a T_{a2} = 0, \quad (T_{a2} = 0) \quad (3.11a)$$

$$T_{a1} A - J_a C = F_a T_{a1} \quad (3.11b)$$

$$G_a = T_{a1} B \quad (3.11c)$$

위에서 $T_a = [T_{a1} \ T_{a2}]$, $T_{a1} \in R(\alpha, n)$, $T_{a2} \in R(\alpha, k)$ 이다. 식 (3.9) 또는 식 (3.11)을 만족하는 식 (3.7)의 동적스위칭평면 파라미터의 결정은 다양하게 제안된 범함수 관측자 설계알고리즘에 의해 수행될 수 있다[10].

3.4 출력제한 스위칭제어입력의 설계

3.4.1 \tilde{r} -cell 접근법

3.3절에서 설계된 동적스위칭평면과 함께 강인한 출력제한 가변구조제어계를 구성할 수 있는 한가지 출력제한 스위칭제어입력을 식 (3.12)로 선정한다.

$$u = -(PB)^{-1}[\tilde{r}y + \tilde{r}z_a + v] \quad (3.12)$$

위에서 $\tilde{r}y$, $\tilde{r}z_a$ 는 각각 (m, q) , (m, a_a) 차원의 스위칭이득행렬로서 제어계 동작중 각 요소는 d_{ij} 의 부호에 따라 식 (3.13), (3.14)와 같이 선택된다.

$$\tilde{r}y(i, j) = \begin{cases} \tilde{r}y(i, j), & d_{ij} > 0 \\ \tilde{r}y(i, j), & d_{ij} < 0 \quad (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, q) \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\tilde{r}z_a(i, j) = \begin{cases} \tilde{r}z_a(i, j), & d_{i2a_j} > 0 \\ \tilde{r}z_a(i, j), & d_{i2a_j} < 0 \quad (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, a_a) \end{cases} \quad (3.14)$$

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

식 (2.3)의 프로세스, 식 (3.7)의 동적스위칭평면과 식 (3.12)의 출력제한 스위칭제어입력으로 구성된 출력제한 가변구조제어계에서 슬라이딩모드의 존재가 보장되기 위한 각 스위칭이득의 결정조건은 다음 정리에 기술한 바와 같다.

$$\langle \text{정리} \rangle \quad K_y C = PA - Q_a F_a T_{a1} \quad (3.15a)$$

$$K_{z_a} = Q_a F_a \quad (3.15b)$$

를 만족하는 K_y , K_{z_a} 가 존재하는 경우 출력제한 가변구조제어계에서 슬라이딩모드의 존재를 보장하는 이득은 다음 조건을 만족한다.

$$\begin{cases} \tilde{r}y(i, j) > K_y(i, j) \\ \tilde{r}y(i, j) < K_y(i, j) \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, q) \quad (3.16)$$

$$\begin{cases} \tilde{r}z_a(i, j) > K_{z_a}(i, j) \\ \tilde{r}z_a(i, j) < K_{z_a}(i, j) \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, a_a) \quad (3.17)$$

$$v_i = \begin{cases} \dot{v}_i > (LCH)_{iW_{\max}}, & d_{ai} > 0 \\ \dot{v}_i < (LCH)_{iW_{\min}}, & d_{ai} < 0 \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (3.18)$$

<증명> 먼저 \dot{D}_a 를 구하면

$$\dot{D}_a = L_a C \dot{x} + Q_a \dot{z}_a = L_a C(Ax + Bu + Hw) + Q_a(F_a z_a + J_a y + G_a u)$$

으로 되고 위식에 식 (3.9), 식 (3.11)의 점근적 일치조건을 대입하고 정리하면 식 (3.19)가 얻어진다.

$$\dot{D}_a = (PA - Q_a F_a T_{a1})x + PBu + Q_a F_a z_a + L_a CHw \quad (3.19)$$

이 식에 식 (3.12)과 식 (3.15)을 대입하면 식 (3.20)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{D}_a &= k_y y + k_{z_a} z_a + L_a CHw - \dot{y}y - \dot{z}_a z_a - v \\ &= (k_y - \dot{y}y)y + (k_{z_a} - \dot{z}_a z_a)z_a + (L_a CHw - v) \end{aligned} \quad (3.20)$$

슬라이딩모드의 존재조건 $D_a^T \dot{D}_a < 0$ 또는 $d_{ai} \dot{d}_{ai} < 0$ ($i=1, 2, \dots, m$) 일때 존재하므로 이를 검증하기 위해 d_{ai} 만을 표현한 결과는 식 (3.21)과 같다

$$\begin{aligned} d_{ai} &= \sum_{j=1}^q (k_y(i, j) - \dot{y}y(i, j))y_j + \sum_{j=1}^{q_a} (k_{z_a}(i, j) - \dot{z}_a z_a(i, j))z_{aj} \\ &\quad + (L_a CH)_{iW} - v_i \end{aligned} \quad (3.21)$$

여기에 d_{ai} 를 곱하면 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} d_{ai} \dot{d}_{ai} &= \sum_{j=1}^q (k_y(i, j) - \dot{y}y(i, j))y_j d_{ai} \\ &\quad + \sum_{j=1}^{q_a} (k_{z_a}(i, j) - \dot{z}_a z_a(i, j))z_{aj} d_{ai} + d_{ai}[(L_a CH)_{iW} - v_i] \end{aligned} \quad (3.22)$$

식 (3.22)에 식 (3.13), 식 (3.14), 식 (3.16), 식 (3.17) 및 식 (3.18)를 대입하면 각 항이 부의 값으로 되고 따라서 $d_{ai} \dot{d}_{ai} < 0$ ($i=1, 2, \dots, m$)이 항상 성립한다. ■

위의 정리에서 식 (3.15)의 해가 존재하지 않는 경우에는 다음 식을 만족하는 k_y, k_{z_a} 를 사용할 수 있다.

$$k_y C + k_{z_a} T_{a1} = PA \quad (3.23)$$

식 (3.23)의 해(또는 근사해)는 z_a 와 $T_a x_a$ 의 과도편차의 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 (3.24)와 같이 수정함으로써 보완될 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{z}_{za}^+(i, j) = \dot{z}_{za}^-(i, j) + \delta_{ij} \\ \dot{z}_{za}^-(i, j) = \dot{z}_{za}^+(i, j) - \delta_{ij} \end{cases} \quad (3.24)$$

3.4.2 동적제어 접근법

본절에서는 다음 형태의 출력궤환 제어입력을 강인성 출력궤환 가변구조제어기에 도입한다.

$$u = -(PB)^{-1} [k_y y + k_{z_a} z_a] - k_d (PB)^{-1} \text{sign}(D_a) \quad (3.25)$$

위에서 k_d 는 m 차원의 상수이득벡터로서 $k_{di} > 0$ ($i=1, 2, \dots, m$)을 만족한다. 식 (2.1) 또는 식 (2.3)과 식 (3.7)의 스위칭평면 및 식 (3.25)의 제어입력으로 구성된 출력궤환 가변구조제어기가 슬라이딩모드의 발생을 보장하기 위한 조건을 아래 정리에 기술했다.

<정리> 식 (3.25)의 이득 k_y, k_{z_a} 및 k_d 가 다음 식을 만족하면 식 (2.1), 식 (3.7) 및 식 (3.25)로 구성된 출력궤환 가변구조제어기는 식 (3.7)의 스위칭평면에서 슬라이딩모드를 발생한다.

$$k_y C = PA - Q_a F_a T_{a1} \quad (3.26a)$$

$$k_{z_a} = Q_a F_a \quad (3.26b)$$

$$k_d > |(L_a CH)_{iW} \max|, \text{ 단, } (L_a CH)_i \text{는 } L_a CH \text{의 } i\text{-번째 행} \quad (3.26c)$$

<증명> 먼저 $\dot{D}_a(y, z_a)$ 를 구하고 식 (3.9), 식 (3.11)의 조건을

도입하면

$$\dot{D}_a(y, z_a) = (PA - Q_a F_a T_{a1})x + PBu + Q_a F_a z_a + L_a CHw \quad (3.27a)$$

로 되고 여기에 식 (3.25)를 대입한 다음 식 (3.26)의 이득조건을 대입하면 식 (3.27b)가 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{D}_a(y, z_a) &= (PA - Q_a F_a T_{a1})x + Q_a F_a z_a + L_a CHw - [k_y y + k_{z_a} z_a] - k_d \text{sign}(D_a) \\ &= L_a CHw - k_d \text{sign}(D_a) \end{aligned} \quad (3.27b)$$

이제 슬라이딩모드의 존재조건 $D_a^T \dot{D}_a < 0$ 는 $d_{ai} \dot{d}_{ai} < 0$ ($i=1, 2, \dots, m$) 일때 만족되므로 이를 검증하기 위해 $d_{ai} \dot{d}_{ai}$ 를 구하면

$$d_{ai} \dot{d}_{ai} = d_{ai} [(L_a CH)_{iW} - k_d \text{sign}(d_{ai})] \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (3.28)$$

위식에 식 (3.26)의 조건을 대입하면 $d_{ai} \dot{d}_{ai} < 0$ ($i=1, 2, \dots, m$)이 성립한다. ■

위 정리의 이득조건 식 (3.26)은 완전한 조건이다. 그러나 이 조건을 만족하는 k_y, k_{z_a} 는 많은 경우에 존재하지 않으며 이러한 경우에는 편차 $e_a = T_a x_a - z_a$ 의 영향을 고려하지 않는 식 (3.23)의 근사적 조건을 만족하는 이득을 취할 수 있다. 식 (3.23)의 해를 이용할 경우에는 과도기간 중 편차 e_a 의 영향을 보상하기 위하여 k_{di} 를 다음 형태의 시변이득으로 취함이 바람직하다.

$$k_d(t) = k_{dmin} + (k_{dmax} - k_{dmin}) \exp(\lambda t) \quad (3.29)$$

조건식 식(3.26) 또는 식 (3.23)을 만족하는 이득을 가진 식 (3.25)의 제어입력은 단순히 측정출력과 동적스위칭평면 정보 z_a 의 선형결합이므로 제어계 차수를 증가시키지 않고 간단히 구해 지지만 해(이득)의 존재조건이 비교적 까다롭고 외란 및 파라미터변화에 대한 강인성을 보장하기 위한 k_{di} 결정에 외란 및 파라미터변화에 대한 정보가 요구된다는 점 (후자는 일반적인 상태궤환 가변구조제어계에서도 필요한 정보이므로 제안된 출력궤환 가변구조제어계에서 발생한 문제는 아니지만)에서 다소의 개선 또는 일반화가 필요하다. 이러한 문제점은 다음의 동적제어기를 도입함으로써 해결할 수 있다.

3.4.3 동적제어기에 의한 동가제어 접근법

위에서 언급한 바와 같이 식 (3.26a), 식 (3.26b) 또는 식 (3.23)의 해(근사해 포함)가 존재하지 않는 경우, 외란 및 파라미터변화의 크기에 대한 정보가 없는 경우 및 식 (3.26c)를 만족하는 k_d 가 너무 큰 경우 등에 적용할 수 있는 매우 효과적인 기법은 동가제어입력을 포함한 식 (3.30)의 정확한 제어입력의 추정기능을 가진 동적제어기를 도입하는 것이다.

$$u = -(PB)^{-1} [(PA - Q_a F_a T_{a1})x + L_a CHw + Q_a F_a z_a] - k_d (PB)^{-1} \text{sign}(D_a) \quad (3.30)$$

위에서 z_a 는 동적스위칭평면 정보로서 이미 계산된 값이므로 동적제어기에 의해 추정될 함수는 식 (3.31)로 선정할 수 있다.

$$u_{xw} = (PA - Q_a F_a T_{a1})x + L_a CHw \quad (3.31)$$

동적제어기는 동적스위칭함수와 같은 형태의 동태방정식으로 다음과 같이 표현될 수 있으며

$$\begin{aligned} \dot{u}_{xw} &= L_u y + Q_u z_u \\ \dot{z}_u &= F_u z_u + J_u y + G_u u \end{aligned} \quad (3.32)$$

u_{xw} 와 \dot{u}_{xw} 의 점근적 일치조건은 식 (3.33)으로 주어진다.

$$L_u C_a + Q_u T_u = [(PA - Q_a F_a T_{a1}) ; L_a CHN] \quad (3.33a)$$

$$T_u A_a - J_u C_a = F_u T_u \quad (3.33b)$$

$$G_u = T_u B_a \quad (3.33c)$$

$$\text{Re}[\lambda_i(F_u)] \ll 0 \quad (i=1, 2, \dots, a_u) \quad (3.33d)$$

위에서 a_u 는 z_u 의 차원이다.

만일 z_u 의 차원(a_u)이 큰 경우에는 이를 감소시키기 위하여 동적스위칭평면 방정식의 변수 z_a 를 측정변수로 간주하여 식

(3.34)로 확대한다.

$$\dot{C} = \begin{bmatrix} C_a \\ T_a \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

이 경우 $[A_a, \dot{C}]$ 쌍의 가관측지수는 $(n+k)/\text{rank}(\dot{C})$ 정도이므로 z_u 의 차원도 작아진다. \dot{C} 를 사용할 경우 주의해야 할 사항은 과도기간 중 $e_a = T_a x_a - z_a$ 가 존재한다는 점이다. 따라서 이 경우에도 빠른 시간내에 $z_a = T_a x_a$ 가 달성되도록 F_a 의 고유치를 비교적 큰 부의 실수로 선정함이 바람직하다.

식 (3.33)이 만족되도록 식 (3.32)의 파라미터행렬이 결정되면

$$\dot{u}_{xw}(t) = u_{xw}(t), \quad \forall t > t_0$$

인 t_0 가 존재하고 따라서 \dot{u}_{xw} 를 포함한 식 (3.35)의 출력궤환 제어입력은 결국 식 (3.30)에 수렴한다.

$$u = -(PB)^{-1}[\dot{u}_{xw} + Q_a F_a z_a] - k_d(PB)^{-1} \text{sign}(D_a) \quad (3.35)$$

식 (3.33), 식 (3.35)로 구성된 동적제어기는 전체 제어계의 차수를 다소 증가시키는 단점이 있지만 출력궤환이득의 결정이 곤란한 경우에 강인한 출력궤환 가변구조제어계를 실현해주는 수단을 제공한다. 또한 이 제어기는 외란 및 파라미터변화와의 영향을 보상하기 위한 입력성분을 직접 추정하기 때문에 외란에 대한 정보가 요구되지 않을 뿐 아니라 이들을 보상하기 위해 정상 상태에서도 비교적 큰 스위칭이득이 요구되는 일반적 경우(상태궤환 가변구조제어계)와는 달리 외란보상을 위한 별도의 입력 또는 이득의 변경을 고려할 필요가 없고 따라서 매우 작은 스위칭이득(k_d)에 의해 슬라이딩모드를 유지할 수 있다는 장점을 가진다.

3.5 슬라이딩모드에서의 제어계특성과 강인성조건

이제까지 강인한 출력궤환 가변구조제어계를 위한 동적스위칭 평면 및 출력궤환 스위칭제어입력을 제안하고 그 설계과정을 제시했다. 따라서 강인한 출력궤환 가변구조제어계가 외란 및 파라미터 변화의 발생에도 불구하고 슬라이딩모드를 발생함은 명백하다. 그러나 출력궤환 가변구조제어계의 특성을 좌우하는 매우 중요한 사항은 슬라이딩모드에서 과연 $D_a=0$ 가 궁극적으로 $D_r=Px=0$ 를 의미하는가의 여부와 제안된 강인한 출력궤환 가변구조제어계가 강인성을 보장하기 위한 조건은 무엇인가 하는 것이다.

먼저 $D_a=0$ 의 의미를 고찰하기 위해 D_a 를 전개하면

$$D_a = L_a y + Q_a z_a = (L_a C_a + Q_a T_a) x_a - Q_a e_a \quad (3.36)$$

으로 되고 여기에 식 (3.9), 식 (3.11)의 점근적 일치조건을 도입하면 다음 식이 얻어진다.

$$D_a = P x - Q \exp[F_a t] e_a(0), \quad e_a(0) = T_a x_a(0) - z_a(0) \quad (3.37)$$

따라서 D_a 는 점근적으로 $D_r(x)$ 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 정상상태에서 영의 값을 가지지 않을 수도 있다는 점이다. 이 문제는 슬라이딩모드에서의 계통특성을 나타내는 동가제어계를 고찰해야만 확인될 수 있다.

동가제어계를 구하기 위하여 동가제어입력을 구한 결과는 식 (3.38)과 같고

$$u_{eq} = -(PB)^{-1}[P A x - Q_a F_a e_a + L_a C w] \quad (3.38)$$

이를 원래의 계통방정식인 식 (2.3)에 대입하면 다음의 동가제어계가 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{e}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I - B(PB)^{-1}P]A & B(PB)^{-1}Q_a F_a \\ 0 & F_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ e_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [I - B(PB)^{-1}L_a C]H \\ 0 \end{bmatrix} w \quad (3.39)$$

위에서 외란항은 점근적 일치조건에 의해

$$[I - B(PB)^{-1}L_a C]H = [I - B(PB)^{-1}P]H \quad (3.40)$$

으로 되며 따라서 식 (3.39)는 식 (3.41)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{e}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I - B(PB)^{-1}P]A & B(PB)^{-1}Q_a F_a \\ 0 & F_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ e_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [I - B(PB)^{-1}P]H \\ 0 \end{bmatrix} w \quad (3.41)$$

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

정리 강인한 출력궤환 가변구조제어계의 강인성조건

식 (2.1) 또는 식 (2.3)의 프로세스, 식 (3.7)의 동적스위칭 평면 및 식 (3.12) 또는 식 (3.25)의 출력궤환 스위칭제어입력으로 구성된 강인한 출력궤환 가변구조제어계가 슬라이딩모드에서 상태변수가 외란 및 파라미터 변화에 무관하게 슬라이딩운동을 하여 정상상태에서 영으로 되기 위한 조건은

$$[I - B(PB)^{-1}P]H = 0 \quad (3.42)$$

이다.

<증명> 위의 전개과정에서 명백함

위의 불변성조건은 $RS(H) \subset RS[B]$ (단, RS 는 Range Space)와 동등하며 이 강인성조건과 관련된 매우 중요한 사실은 식 (3.42)의 조건이 일반적인 상태궤환 가변구조제어계에서의 강인성조건과 동일하다는 것이다. 따라서 본 논문에서 제안된 강인한 출력궤환 가변구조제어계는 제한된 소수의 입력력 정보만에 의해 구동될 때도 불구하고 상태변수궤환을 전제한 가변구조제어계와 같은 강인성을 가진다.

참고적으로 동적제어기를 포함한 강인한 출력궤환 가변구조제어계에 대한 동가제어계의 방정식을 식 (3.43)에 기술하였다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{e}_a \\ \dot{e}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I - B(PB)^{-1}P]A & B(PB)^{-1}Q_a F_a & B(PB)^{-1}Q_u \\ 0 & F_a & 0 \\ 0 & 0 & F_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ e_a \\ e_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [I - B(PB)^{-1}P]H \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w \quad (3.43)$$

위에서 e_a, e_u 등의 편차는 F_a, F_u 의 고유치를 비교적 큰 부의 실수로 선정함으로써 짧은 과도기간 후 영에 수렴하므로 강인성 조건에 영향을 주지 않는다. 식 (3.41), 식 (3.43) 등은 동적스위칭 평면 및 동적제어기 설계시 F_a, F_u 및 $[I - B(PB)^{-1}P]A$ 의 고유치들이 시분리성질(multi time scale property)을 갖도록 선정함이 바람직함을 시사해주며 이러한 선택은 설계경험에 비추어 제어계 성능 특히 과도특성에 상당한 효과가 있음을 밝혀둔다.

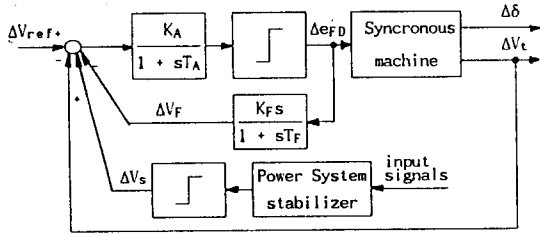
4. 수치예

4.1 무한모선에 연결된 단일 동기발전기[11]

지금까지 논의된 강인한 출력궤환 가변구조제어의 타당성을 입증하기 위하여 무한모선에 연결된 단일 동기발전기에서의 전력계통 안정화기(PSS: power system stabilizer) 설계문제를 고려한다. 사용된 모델은 여자기(exciter), 전압조정기(voltage regulator)와 안정화기(stabilizer)를 갖는 그림 4.1, 그림 4.2와 같은 선형화된 모델이다.

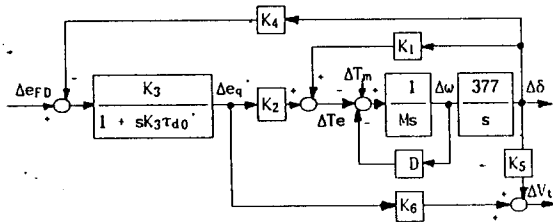
이 모델에서 상태변수를 $x = [\Delta V_s \ \Delta \omega \ \Delta T_e \ \Delta e_{FD} \ \Delta V_r]^T$, 제어입력을 $u = [\Delta V_s]$ 로 선정하고 다음의 파라미터를 이용하면

$K_1 = 0.55$	$K_A = 130$	$D = 0$
$K_2 = 1.16$	$T_A = 0.05$	$e_{FD, MAX} = 7.3$
$K_3 = 0.66$	$T_{do} = 7.76$	$e_{FD, MIN} = -7.3$
$K_4 = 0.67$	$M = 9.26$	$u_{MAX} = 0.12$



- V_{ref} reference input voltage
- V_t terminal voltage
- e_{FD} equivalent excitation voltage
- V_F stabilizing transformer voltage
- V_S stabilizer output
- δ torque angle
- ω angular velocity
- K_A voltage regulator gain
- T_A voltage regulator time constant
- K_F stabilizing transformer gain
- T_F stabilizing transformer time constant

그림 4.1 여자기와 안정화기를 갖는 동기기의 선형모델



- e_q q-axis component of voltage behind transient reactance
- T_e energy conversion torque
- T_m mechanical input
- K_1-K_6 constants of the linearized model of synchronous machine
- T_{d0} d-axis transient open circuit time constant
- M inertia coefficient, $M = 2H$
- D damping coefficient

그림 4.2 동기기 모델

$$K_5 = -0.09 \quad K_F = 0.03 \quad u_{MIN} = -0.12$$

$$K_6 = 0.82 \quad T_F = 1.0$$

다음과 같은 형태의 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.0108 & -33.93 & -0.1305 & 0.1057 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.108 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0153 & 207.35 & -0.1846 & 0.1495 & 0 & 0 \\ -2600 & 0 & 0 & -20 & -2600 & 0 \\ -78 & 0 & 0 & -0.6 & -79 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2600 \\ 78 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

여기서 모델링 오차가 포함되어 실제 운전중에 K_F/T_F 가 50% 변화되었다고 가정하면 상태방정식은 식 (2.3)의 형태가 되며, 이때

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

또한 기존 스위칭 평면은 동기시스템의 극점이 -1116.5, -4.2217±j3.0345, -1에 있도록 선정된 다음과 같은 참고문헌

[11]의 스위칭평면을 사용하며

$$s = Px$$

$$P = [310 \quad -17500 \quad 6.1 \quad 0.0473 \quad -0.578]$$

제한된 강인한 출력궤환 가변구조제어기를 이용한 전력계통 안정화 기와의 비교를 위한 기존의 속도신호를 이용한 전력계통 안정화기를 다음처럼 사용한다[12].

$$\frac{u(s)}{\omega(s)} = \frac{75s(1 + 0.125s)^2}{(1 + 3s)(1 + 0.05s)^2}$$

4.2 확장모델 수립과 동적스위칭평면 설계

강인한 출력궤환 가변구조제어기를 이용한 전력계통 안정화기 설계의 첫단계는 외란 모델링과 확장모델의 수립이다. 이 경우 외란 모델의 파라미터는 $M=[0]$, $N=[1]$ 이 되며 확장모델은 다음과 같이 구해진다.

$$A_a = \begin{bmatrix} -0.0108 & -33.93 & -0.1305 & 0.1057 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.108 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0153 & 207.35 & -0.1846 & 0.1495 & 0 & 0 \\ -2600 & 0 & 0 & -20 & -2600 & 0 \\ -78 & 0 & 0 & -0.6 & -79 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_a = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2600 \\ 78 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$P_a = [310 \quad -17500 \quad 6.1 \quad 0.0473 \quad -0.578 \quad 0]$$

동적스위칭평면 방정식의 고유치를 -100으로 선정하고 식 (3.9)의 조건을 만족하도록 식 (3.7)의 동적 스위칭평면 파라미터를 구한 결과는 다음과 같다.

$$F_a = [-100], \quad G_a = [122.98], \quad Q_a = [1]$$

$$J_a = [-1444.1312 \quad -176.9911 \quad -1594.9733 \quad -122.98]$$

$$L_a = [323.2154 \quad -17526.8546 \quad 22.0675 \quad -0.578]$$

$$T_a = [-13.2154 \quad 26.8546 \quad -15.9675 \quad 0.0473 \quad 0 \quad 0]$$

4.3 스위칭제어입력의 설계

강인한 출력궤환 가변구조제어기를 이용한 전력계통 안정화기를 위한 출력궤환 스위칭제어입력은 식 (3.12)의 형태이며 스위칭이득은 식 (3.13), 식 (3.14) 및 식 (3.15)를 만족하도록 선정되어야 한다. 그러나 이 수치에의 계통은 식 (3.15)의 조건을 만족시키지 못하므로 식 (3.23)으로 부터 구해진 다음의 근사해를 이용하여 식 (3.16) 및 식 (3.17)을 만족하도록 스위칭이득을 설정하였으며

$$[k_y] = [9160.9786 \quad -28034.5257 \quad 13015.4237 \quad -77.318]$$

$$[k_z] = [699.3605]$$

외란보상을 위한 v_i 는 다음의 $L_a C H v_{max}$ 를 참조하여 선정하였다.

$$L_a C H v_{max} = [0.289]$$

4.4 시뮬레이션 결과 및 검토

시뮬레이션은 K_F/T_F 의 50% 변화에 대한 제한된 강인한 출력궤환 가변구조제어기를 이용한 전력계통 안정화기(ROFVSCS-PSS)와 기존의 속도 신호를 이용한 전력계통 안정화기(Conventional PSS) 및 파라미터 변화가 없다고 가정하고 설계된 출력궤환 가변구조제어기를 이용한 안정화기(OFVSCS-PSS)에 대해 수행되었다.

그림 1, 그림 2, 그림 3은 각각의 안정화기에 대한 $\Delta\delta$, ΔV_t , $\Delta\omega$ 의 시간궤적을 나타낸 것이며 그림 4는 동적스위칭평면의 시간궤적을 비교한 결과이다.

각각의 상태궤적은 기존의 속도신호를 이용한 안정화기보다 제안된 강인한 출력궤환 가변구조제어기를 이용한 전력계통 안정화기가 훨씬 우월한 성능을 갖음을 보여주고 있다. 그림 4의 동적 스위칭평면의 시간궤적은 출력궤환 가변구조제어기를 이용한 전

력계통 안정화기의 경우에 스위칭 평면이 영에 수렴하지 못하고 영주위를 계속 진동하는 반면 강인한 출력제한 가변구조제어계를 이용한 전력계통 안정화기는 짧은 reaching phase 이후에 영에 수렴하는 것을 보여주고 있다.

따라서 제안된 강인한 출력제한 가변구조제어계는 계통에 모델링 편차가 있는 경우, 실제동작시 파라미터 변화 또는 외란이 존재하는 경우에도 계통에 출력제한 가변구조제어계의 이론을 적용 가능하게 해주며, 이와 관련된 가장 큰 장점은 강인한 출력제한 가변구조제어계가 임출력정보 만에 의해 구동됨에도 불구하고 모든 상태변수의 추정을 전제로 설계된 기존의 상태제한 가변구조제어계와 거의 동등한 제어성능을 갖을 수 있다는 것이다.

5. 결 론

본 논문에서는 가변구조제어계의 실질적 적용과 관련된 가장 큰 문제점의 하나로 지적되고 있는 상태변수의 가용성에 대한 전제조건을 제거하기 위하여 참고문헌 [7]에서 제안된 출력제한 가변구조제어계에 도입할 수 있는 출력제한 스위칭제어입력을 제안하고 더불어 이 기법의 실질적 적용을 가능케 하기 위한 강인성 설계기법을 제시한 다음 실례로서 전력계통의 안정화기 설계에 도입함으로써 그 유용성을 입증하였다. 제안된 강인한 출력제한 가변구조제어계는 외란모델링기법에 근거하여 설계된 동적스위칭 평면과 출력제한 제어입력으로 구성되며 제어계 내의 모든 구성요소들은 측정 입력력 정보 만에 의해 구동된다. 이 강인한 출력제한 가변구조제어계의 제안과 관련된 매우 중요한 사항은 이 제어계가 소수의 측정 정보 만에 의해 구동됨에도 불구하고 모든 상태변수를 사용하는 기존의 상태제한 가변구조제어계에서의 강인성 조건인 RS[H]CRH[B]가 만족되는 한 외란 및 파라미터 변화에 대한 강인성을 가질 뿐만 아니라 슬라이딩모드에서의 도달시간이 상태제한 가변구조제어계의 경우보다 훨씬 짧도록 설계될 수 있다는 사실이다. 출력제한 가변구조제어계와 강인한 출력제한 가변구조제어계의 제안은 측정불가능한 변수를 포함한 계통, 매우 많은 상태변수를 포함한 고차계통 및 대규모계통 등과 같이 기존의 가변구조제어기법의 적용이 불가능한 많은 계통에 대한 가변구조제어를 가능케 해줌으로써 이 제어기법의 적용범위를 확대시켜주는 동시에 측정경비가 큰 상태변수를 갖는 계통에서 상태변수를 측정하지 않고도 고성능 가변구조제어계의 실현을 가능케 하는 수단을 제공함으로써 제어계의 실현 경비를 절감할 수 있다는 입장에서 매우 큰 의미를 갖는다.

참 고 문 헌

- [1] H. S. Ramirez and 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] K. K. D. Young, "Controller design for a manipulator using the theory of variable structure systems", IEEE Trans. sys. man, cybern., Vol. 8, No. 2, pp. 101-109, 1978.
- [3] V. I. Utkin, "Variable structure system - present and future", Automat. Remote control, Vol. 44, No. 9, pp.1105-1120, 1983.
- [4] R. A. Decarlo et. al., "Variable structure control of nonlinear multivariable system: A Tutorial", proc. IEEE, Vol. 76, pp.212-232, march 1988.
- [5] B. A. White, "Reduced order switching function in variable structure control system", IEE proc., Vol. 130, No. 2, pp. 33-40, 1983.
- [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, 1991.
- [7] K. S. Lee and 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 and 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.
- [10] P. Murdoch, "Observer design for a linear functional of state vector", IEEE Trans. automat. contr., Vol. AC-16, No.

3, pp. 308-310, June 1973.

[11] Wah-Chun Chan and Yuan-Yih Hsu, "An optimal variable structure stabilizer for power system stabilization", IEEE Trans. Power Apparatus and system, Vol. PAS-102, No. 6, pp. 1738-1746, June 1983.

[12] F. P. Demello and C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, pp. 316-329, April 1969.

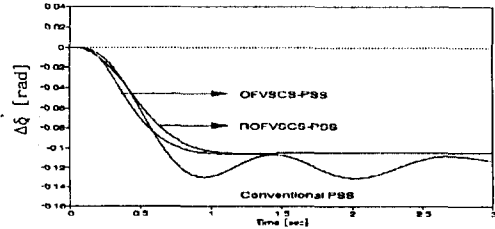


그림 1. $\Delta\delta$ 의 시간궤적

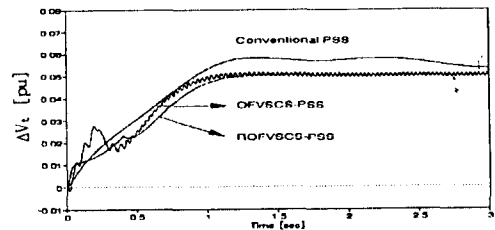


그림 2. ΔV_t 의 시간궤적

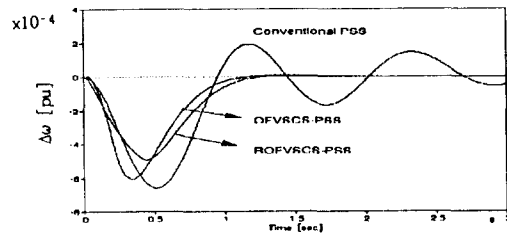


그림 3. $\Delta\omega$ 의 시간궤적

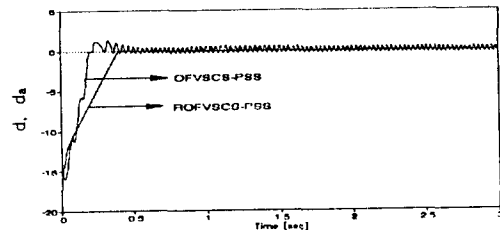


그림 4. 스위칭 평면의 시간궤적

본 연구는 한국전력공사 지원에 의하여 수행되었음