

가변구조 안정화 장치를 사용한 전력계통 안정화에 관한 연구

鄭在吉·金廷河·姜東求
中央大學校 電氣工學科

A study on power system stabilization using Variable Structure Stabilizer

Jai-Kil Chung · Jung-Ha Kim · Dong-Gu Kang
Dept. of Electrical Eng. Chung-Ang University

ABSTRACT

A technique for power system stabilization is presented using the variable structure control theory. The selection problem of the proper switching vector is very important subject for a design of the variable structure controller.

In this paper, the switching vector is selected by desired eigenvalues allocation, and these desired eigenvalues are determined by eigenvalue assignment.

Simulation results show that eigenvalue allocation variable structure stabilizer yields better dynamic performance than the others (conventional PSS, optimal linear stabilizer) and is robust to wide variations of the system parameters.

제 1 장 서 론

전력계통 안정화 장치에 가변구조 제어기법을 적용하고 [4][5] 그 기법으로써 고유치 배치에 의하여 스위칭 평면을 결정하되 적정 고유치를 다시 고유치 배치기법을 사용하여 체계적으로 찾으며 절환이득도 제약조건을 고려하여 찾는 새로운 고유치 배치 가변구조 여자제어 방법을 제안한다.

또한 본 논문에서는 PSS에 관한 가변구조 제어기법과 제어 효과를 비교하기 위하여 우선 전력계통에서의 외란이나 운용조건 변화에도 불구하고 출력궤환을 이용하여 발전기의 단자전압을 안정하게 유지하기 위한 PSS의 각종 여자제어 기법들(위상보상기법, 선형최적제어기법)을 기술한다.[1][2][3]

다음 상기 여자제어 기법과 고유치 배치에 의한 가변 구조 제어기법을 1기-무한대 모델계통에 적용하여 제시한 방법이 그 제어효과 및 동적 응답 특성이 우수함을 보인다. 또한 계통 파라미터의 증감에 따른 감도분석을 통하여 계통 파라미터의 변화에 아주 강인하다는 것을 입증한다.

제 2 장 저주파 진동에 관한 동태모델

최근 전력계통의 과도 안정도 향상을 위하여 동기 발전기의 초속용 여자방식이 널리 채택되고 있으며 대규모 전력계통의 경우 계통 조작등의 미소한 외란에 의한 대책이 요구되고 있다. 저주파 진동에 관한 동기 발전기 및 전압 제어계의 대표적인 선형화 동태모델을 블록선도로 표시하면 그림1과 같으며 이 모델을

$[\Delta V_t, \Delta \omega, \Delta T_e, \Delta E_{FD}, \Delta V_r]^T$ 의 상태변수로 표시하면 계통행렬 A는 식(1)과 같이 표시된다.

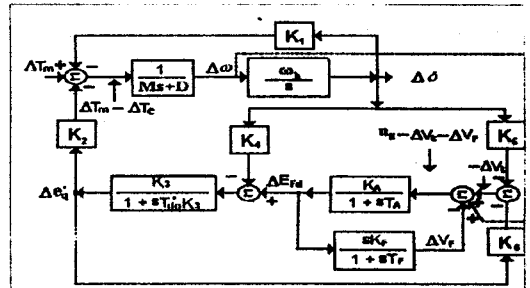


그림 1 저주파 진동에 관한 발전기 제어계 동태모델
Fig. 1 Dynamic Model of Generator control system for low-frequency oscillation.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{K_1}{KT_\delta K_2} (K_2 K_3 K_4 - K_1) K_{\mu\omega} - \frac{K_1}{KT_\delta K_2} (K_2 K_4 K_6 - K_5) & \frac{K_1}{T_\delta} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{M} \\ \frac{K_2}{KT_\delta K_2} (K_2 K_3 K_4 - K_1) K_{\mu\omega} - \frac{K_2}{KT_\delta K_2} (K_2 K_4 K_6 - K_5) & \frac{K_2}{T_\delta} & 0 \\ -\frac{K_3}{T_A} & 0 & 0 \\ -\frac{K_4 K_7}{T_r T_A} & 0 & 0 \\ & -\frac{1}{T_A} & -\frac{K_8}{T_A} \\ & -\frac{K_9}{T_r T_A} & -\frac{K_4 K_7 + T_A}{T_A T_r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $K = K_1 K_4 - K_2 K_5$

제 3 장 선형 최적 궤환제어 최적화 기법

선형 최적 궤환제어 설계에 관한 알고리즘을 들면 다음과 같다.

(1) 전력계통의 적절한 선형모델을 선정하고 식(2)형식의 상태방정식을 형성한다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2)$$

(2) 고유치 이동기법에 의해 성능지수의 가중행렬 Q 및 R을 선정한다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T Q x + u^T R u] dt \quad (3)$$

(3) 상태 및 co-state 시스템 행렬 M을 구성한다.

$$M = \begin{bmatrix} A & -S \\ -Q & -A^T \end{bmatrix} \quad S = BR^{-1}B^T$$

고유치 및 고유벡터를 계산한다.

$$A = \begin{bmatrix} A^- \\ A^+ \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 \\ X_3 & X_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(4) Riccati 행렬 P 및 제어 조작량 Bu를 산출한다.

$$P = [X_2] [X_1]^{-1}, \quad B \cdot u = -S \cdot Px \quad (5)$$

(5) 선형제어계를 포함한 계통의 고유치를 구한다.

$$\dot{x} = Ax + Bu = (A - SP)x \quad (6)$$

제 4 장 가변구조 제어 안정화 장치

4.1 가변구조 제어 안정화 장치의 원리

가변구조 제어는 선형 최적제어 이론에 기초를 두고 있으며 이 가변구조제의 이론을 적용하기 위하여 먼저 제어대상계통을 식(2)와 같이 상태방정식으로 표시하는데, 이 경우, 제어벡터 u 는 다음과 같이 된다.

$$u = -\Psi^T x = -\sum_{i=1}^n \psi_i x_i \quad (7)$$

여기서,

$$\psi_i = \begin{cases} \alpha_i & \text{if } x_i > 0 \\ \beta_i & \text{if } x_i < 0 \end{cases}$$

또한, S는 다음과 같이 정의되는 함수이다.

$$S(x) = C^T x = 0 \quad (8)$$

여기서 C는 $C = [c_1, c_2, \dots, c_n]^T$ 인 스윙칭 벡터이다.

이러한 시스템이 형성되기 위해서는 물리적인 제약조건을 만족하는 바람직한 슬라이딩 모드가 형성되어야 하고 스윙칭선의 각 점에서 슬라이딩 모드가 존재해야 하며 계의 상태를 나타내는 표시점이 스윙칭선을 향해서 이동해야 된다.

그런데, 이는 스윙칭 평면위에 슬라이딩 모드가 존재하기 위한 필요 충분조건인 다음식을 만족하면 된다.

$$\lim_{s \rightarrow -0} \dot{S} > 0 \quad \lim_{s \rightarrow +0} \dot{S} < 0 \quad (9)$$

그리고, 스윙칭선을 위한 케환이득은 스윙칭평면위에 슬라이딩 모드가 존재하기 위한 필요 충분조건인 식(9)로부터 다음과 같은 부등식 제약조건이 성립한다.

$$\alpha_i > \frac{-C^T a^j}{\sum_{i=1}^n C_i b_i} \quad \beta_i < \frac{-C^T a^j}{\sum_{i=1}^n C_i b_i} \quad (10)$$

여기서, a^j 는 시스템 행렬 A의 j번째 열이다.

4.2 적정 고유치 선정에 의한 가변구조 안정화 장치 설계
두개의 시스템을 분리하기 위하여 M의 마지막 열의 요소를 제외한 나머지 열들이 벡터B에 직교하도록 좌표변환 M을 식(11)과 같이 정의하면 식(12) (13)이 성립한다.

$$Z = Mx \quad (11)$$

$$MB = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\dot{Z} = MAM^{-1}Z + MBu \quad (13)$$

식(12)를 이용하여 식(13)을 두 개의 부분계통에 의한 행렬로 표현하면 식(14)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_1 \\ \dots \\ \dot{Z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ \dots & \dots \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ \dots \\ Z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (14)$$

식(14)에서 첫 제행의 부분행렬 방정식으로 나타내면 식(15)와 같고 이를 위상평면으로 표현하면 식(16)과 같다.

$$\dot{Z}_1 = A_{11}Z_1 + A_{12}Z_2 \quad (15)$$

$$S(Z) = C_{11}Z_1 + C_{12}Z_2 = 0 \quad (16)$$

식(8)에 변환행렬 $M^{-1}Z$ 을 대입하면 $S = C^T x = C^T M^{-1}Z$ 이므로 식(16)과 비교하여 식(17)이 성립한다.

$$[C_{11} \ C_{12}] = C^T M^{-1}, \quad C^T = [C_{11}, C_{12}] M \quad (17)$$

제어벡터 Z_2 는 식(16)으로 부터 결정되며 식(18)과 같이 표시된다.

$$Z_2 = -C_{12}^{-1} C_{11} Z_1 \quad (18)$$

C_{12} 는 일반성을 잃어버리지 않는 범위 내에서 단위행렬로 가정된다. ($C_{12} = I$). 따라서 식(17)과 식(18)은 식(19)와 식(20)으로 변환된다.

$$Z_2 = -C_{11} Z_1 \quad (19)$$

$$C^T = [C_{11}, I] M \quad (20)$$

이제 C_{11} 의 값을 결정하면 되는데 이는 고유치 배치에 의해서 구해질 수 있다.

식(15)를 canonical form으로 고치기 위하여 정칙변환행렬 T를 식(21)과 같이 정의하면 식(22)가 성립한다.

$$Z_1 = Ty \quad (21)$$

$$\dot{y} = T^{-1} A_{11} Ty + T^{-1} A_{12} Z_2 = F_0 y + G_0 Z_2 \quad (22)$$

식(22)는 canonical form으로 되어있고 제어입력으로 고려된 Z_2 는 다음과 같다.

$$Z_2 = -a y \quad (23)$$

$a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 으로 놓으면

$$a_i = \alpha_i^* - \alpha_i \quad (24)$$

여기서, α_i^* 는 적정고유치를 가진 특성방정식의 계수이고 α_i 는 슬라이딩 모드에서의 개루프 즉 A_{11} 의 특성방정식의 계수이다. 식(21)에 의해서 식(23)은 다음과 같이 된다.

$$Z_2 = -a T^{-1} Z_1 \quad (25)$$

식(25)를 식(19)와 비교하면 다음과 같이 C_{11} 을 얻을 수 있다.

$$C_{11} = a T^{-1} \quad (26)$$

4.3 고유치 배치에 의한 적정 고유치 선정

식(22)로부터 선형 최적 여자제어 에서와 같이 Hamiltonian 에너지 함수를 도입하여 확대 계통행렬로 나타내면 식(27)이 되고

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_0 & \frac{-1}{r} G_0 G_0^T \\ -q I_n & -F_0^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ k \end{bmatrix} \quad (27)$$

식(27)의 특성 방정식은 식(28) (29)과 같다.

$$\begin{vmatrix} \lambda I_n - F_0 & \frac{1}{r} G_0 G_0^T \\ q I_n & \lambda I_n + F_0^T \end{vmatrix} = 0 \quad (28)$$

$$w^n - (a_n^2 - 2a_{n-1})w^{n-1} + (a_{n-1}^2 - 2a_{n-2}a_n + 2a_{n-3})w^{n-2} + \dots + (-1)^n a_1^2 + \frac{q}{r} = 0 \quad (29)$$

식(29)의 고유치는 복소평면의 실수축 및 허수축에 관하여 대칭이고 ω 가 스칼라이므로 이 값을 변화시켜 복소평면내에서 고유치의 변화량을 조사함으로써 적정고유치를 선정한다.

제 5 장 사례연구

5.1 계산결과 및 검토

전력계통의 모델계통으로는 1기-무한대 모선 계통을 사용하였으며 발전기 제어계의 동태모델로는 그림 1을 사용하였다. 이 모델계통의 기기정수, 선로정수 및 초기운전상태를 표시하면 표 1과 같다.

표 1 기기 및 선로정수

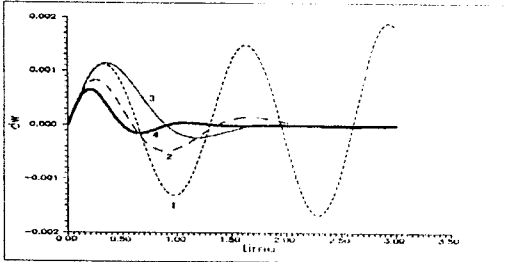
Table 1 System Parameters (단위)

발전기	$M = 9.26$ $T_{d0}' = 7.76$ $D = 0$ $x_d = 0.973$ $x_d' = 0.190$ $x_q = 0.55$
여자기	$K_A = 130$ $T_A = 0.05$ $E_{FDmax} = 7.3$ $E_{FDmin} = -7.3$
선로 및 부하	$R = -0.034$ $X = 0.994$ $G = 0.249$ $B = 0.262$
초기운전상태	$v_t = 1.05$ $P_a = 0.952$ $Q_a = 0.02$

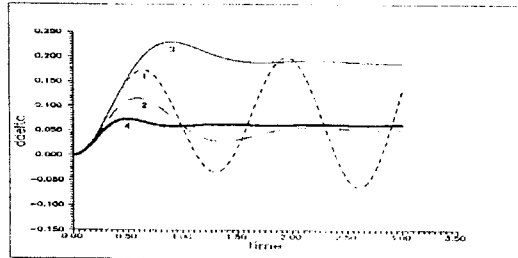
제어의 효과를 검토하기 위하여 모델 전력계통의 정상운전시 미소신호의란 ($\Delta T_m = 0.05p.u$)에 대한 계통의 동적응답특성을 대상으로 하였으며 제어 방법으로는 1) 보충적인 여자제어를 하지않을 경우 2) PSS에 의한 보충적인 보조제어를 행할 경우 3) 선형 최적여자 궤환제어를 행할 경우 4) 적정 고유치 배치에 의한 가변구조 제어를 행할 경우의 4가지 경우에 대하여 계통의 안정성 및 동적응답 특성을 비교 검토 하였다.

계통행렬 A의 상태변수벡터는

$[\Delta v_t, \Delta \omega, \Delta T_e, \Delta E_{FD}, \Delta V_F]^T$ 이고 이 계통의 동적응답을 표시하면 그림 2와 같다.



(a) 각속도 편차에 관한 응답
(a) Dynamic response for angular velocity deviation



(b) 위상차각 편차에 관한 응답
(b) Dynamic response for torque angle deviation

그림 2 정상운전시 미소신호 동적응답특성
Fig. 2 Dynamic responses characteristics for the normal operation

그림 2의 동적특성에서 알 수 있는 바와 같이 정상운전시 미소신호의란 동적응답특성이 종래의 전력계통 안정화 장치(PSS) 보다는 선형 최적 여자제어가 선형 최적 여자제어 보다는 고유치 배치 가변구조 제어가 우수함을 보인다.

5.2 감도 분석

고유치 배치 가변구조의 감도분석을 위하여 중요한 계통 파라미터중의 하나인 선로 리액턴스를 25% 가감하였을 경우 각속도에 대한 동적응답특성이 그림3에 나타나 있다.

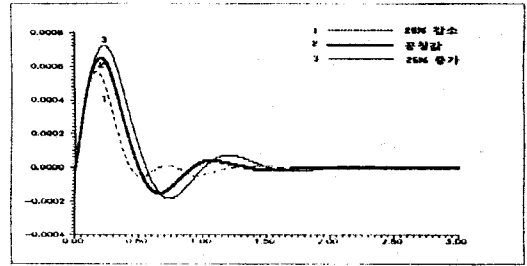


그림 3 고유치 배치 가변구조에서 선로 리액턴스 $\pm 25\%$ 변화에 대한 각속도 편차에 관한 응답

Fig. 3 Dynamic response for angular velocity deviation for $\pm 25\%$ change in line reactance with eigenvalue allocation variable structure.

제 6 장 결론

본 논문에서는 전력계통 안정화 장치에 부하 및 계통파라미터의 변화에 아주 강한 가변구조 제어기법을 적용하고 그 기법으로써 Q값을 필요로 하지않는 고유치 배치에 의하여 스위칭 평면을 결정하되 적정 고유치를 다시 고유치 배치기법을 사용하여 체계적으로 찾으며 절환이득도 제약조건을 고려하여 찾는 새로운 고유치 할당 가변구조 여자제어 방법을 제시하였다.

또한 제시한 방법을 1기-무한대 모델계통에 적용하여 제시한 방법이 그 제어효과 및 동적 응답 특성이 우수함을 보였으며 계통 파라미터의 변화에 아주 강인하다는 것을 선로 리액턴스를 25% 가감하였을 때의 각속도의 감도분석을 통하여 입증하였다.

참고 문헌

- [1] 정계길, "출력궤환에 의한 발전소 단자전압의 최적제어에 관한 연구", 한국전력공사, 1994.7
- [2] Yao-nan Yu, "Electric Power System Dynamics", Academic Press, 1983
- [3] H.A.M. Moussa, Y.N. Yu, "Optimal Power System Stabilization through Excitation and/or Governor Control", IEEE Trans. on PAS, Vol. 91, pp. 1166~1174 May/June 1972.
- [4] Chan, W.C., and Hsu, Y.Y. : "An optimal variable structure stabilizer for power system stabilization", IEEE Trans., 1983, PAS-102
- [5] Utkin, V.I.: "Sliding Modes in Control and Optimization", Springer-Verlag B.H 1992