

## 전력계통의 미소신호안정도에 미치는 제어기의 영향에 관한 연구

권세혁 · 김덕영  
고려대학교 전기공학과

### A Study on the Effect of Controllers in Small Signal Stability of Power Systems

Sae Hyuk Kwon and Deok Young Kim  
Korea University, Electrical Engineering

#### 요 약

본 논문은 전력계통의 안정도에 미치는 제어장치들의 영향과 안정도 개선에 대해 연구하였다. 제어 장치로는 여자기와 전력계통안정기(PSS) 그리고 무효전력보상기(SVC)를 일기무한모선계통에 설치하고, 이때의 상태행렬의 구조를 제시하였다. 상태행렬의 구조식과 고유치, 고유벡터로부터 제동이 불량한 고유치에 대한 감도계수를 구하여 각 제어기별로 중요진동모드에 대한 영향을 수치적으로 나타내었다. 또한 계통의 운용조건을 달리하여 계통변화에 따라 제어장치들이 안정도에 미치는 영향을 관찰하였다. 계통의 안정도를 개선시키기 위해서 제어기정수의 일차고유치감도계수를 선형계획법인 심플렉스법에 적용하여 제어기정수의 최적화를 수행하였다. 이때 일차고유치감도계수만으로 최적화를 하는데 따른 문제점을 해결하기 위해 각 제어기정수의 변화폭을 좁게 설정하고, 각 반복계산마다 전단계에서 구한 최적 정수값을 제어기정수의 변화범위를 달리하여 다시 최적화하는 방법을 사용하였다.

**Abstract**—The effect of controllers-Exciter, Power System Stabilizer, and Static Var Compensator-in one machine infinite bus system is investigated in this paper. The structure of generator state matrix with controllers is represented, while the Static Var Compensator is installed in generator terminal bus. Eigenvalue analysis is performed and the effects of controllers to the dominant eigenvalue in one machine infinite bus system are represented by first order eigenvalue sensitivity coefficients while the operating conditions of the system are varied. Optimization of controller parameters using first order eigenvalue sensitivity coefficients is performed by the Simplex Method. It is proved that exciter control is the most efficient method to improve stability of the system and the effect of Static Var Compensator is small, in the case of one machine infinite bus system.

#### 1. 서 론

전력수요가 지속적으로 증가함에 따라 전력계통 또한 복잡화·대규모화 되어가고 있으며 전력공급의 신뢰성과 고품질에 대한 사회적요구 또한 높아지고 있다. 동기발전기의 안정도 문제는 전력계통운용에서 가장 핵심적인 부분으로 인식되고 있으며, 계통에 가해지는 외란의 종류에 따라 과도안정도와 미소신호안정도로 분류할 수

있다. 과도안정도는 지락고장, 선로차단 등과 같은 급작스런 큰 외란에 대한 계통의 안정도를 말하며, 미소신호 안정도는 부하의 변동이나 일일 계통운용 등과 같이 서서히 변하는 작은 외란에 대한 계통의 안정도를 의미한다. 두가지 해석방법 모두에 있어 안정도해석의 목적은 외란에 의해 발생한 진동이 감소하여, 계통이 원래의 운전상태로 회복될 수 있는가를 판별하는데 있다.

미소신호안정도의 해석방법으로는 계통상태행렬을

구성하고 상태변수별로 모든 고유치를 구하는 고유치해석법이 가장 일반적인 방법이며, 고유치뿐만 아니라 각 상태변수들의 참여정도를 나타내는 고유벡터와 상태행렬의 구조로부터 감도계산을 위한 감도행렬을 구하는 등의 많은 정보를 얻을 수 있다.<sup>12)</sup>

본 논문은 전력계통의 안정도에 미치는 제어장치들의 영향을 살펴보기 위해 발전기와 제어장치들의 상태행렬 구조를 제시하고, 상태행렬의 구조와 고유치, 고유벡터로부터 고유치감도계수를 구하여 계통조건의 변화에 따라 각 제어장치별로 안정도에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 또한 고유치감도계수를 선형계획법인 심플렉스법에 적용하여 제어기정수의 최적화를 수행하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2-1. 계통의 모델링

#### 2-1-1. 발전기의 모델링

발전기만을 모델링하는 경우에는 발전기권선의 전압 방정식, 발전기-터빈계통의 동요방정식을 선형화하여 상태방정식의 형태로 나타낸다. 일반적으로 계통해석의 정도에 따라 모델링의 종류를 달리하며, 가장 상세한 모델인 상세모델로 발전기를 나타낼 경우의 계통상태행렬의 구조는 참고문헌 [4]에서 제시하였다.

본 연구에서 사용한 일기무한모션계통은 한 발전기가 대규모 전력계통에 연결되어 있는 경우에 발전기의 안정도 및 제어기설계 등의 연구에 유용한 모델이다.

#### 2-1-2. 여자기의 모델링

여자는 발전기 단자전압을 제어하는 장치로 발전기의 안정도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Fig. 1은 가장 널리 쓰이는 여자기중의 하나인 IEEE Type 1 여자기의 블록선도이다.<sup>13)</sup>

Fig. 1에서 다음과 같은 상태행렬 표현식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \tau_E \dot{E}_{FD} \\ \tau_R \dot{V}_1 \\ \tau_F \dot{V}_3 \\ \tau_A \dot{V}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\dot{S}_E + K_E) & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -\omega_R K_F (\dot{S}_E + K_E) & 0 & -1 & \omega_R K_F / \tau_E \\ 0 & -K_A & -K_A & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{FD} \\ V_1 \\ V_3 \\ V_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_R |V_i| \\ 0 \\ K_A (V_{REF} + V_S) \end{bmatrix} \quad (1)$$

일기무한모션 계통에서 발전기 단자전압은 다음과 같다.<sup>14)</sup>

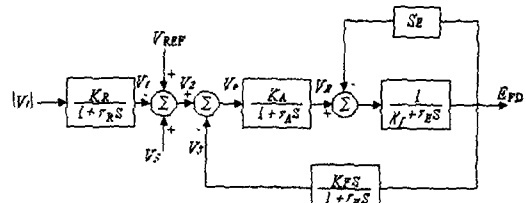


Fig. 1. Block diagram of IEEE Type 1 Exciter.

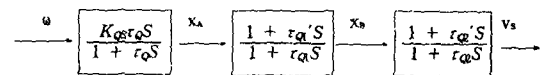


Fig. 2. Block diagram of Power System Stabilizer.

$$u_d = d\omega_d + q\omega_v$$

$$v_d = -\sqrt{3} V_{\infty 0} \delta + R_c i_d + L_c \dot{i}_d + \omega_0 L_c i_q + i_{q0} L_c \omega$$

$$v_q = -\sqrt{3} V_{\infty 0} \delta + R_c i_q + L_c \dot{i}_q - \omega_0 L_c i_d - i_{d0} L_c \omega$$

$$\text{단, } d\omega = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_{d0}}{V_{\infty 0}}, \quad q\omega = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_{q0}}{V_{\infty 0}}$$

#### 2-1-3. 전력계통안정기(PSS)의 모델링

반도체소자를 내장하고 있는 고속여자계통을 채용하는 것이 일반화되면서 계통의 과도안정도는 개선되었으나 미소신호안정도의 관점에서 계통특성에 악영향을 미친다는 것이 잘 알려져있다.<sup>15)</sup> 이 경우 전력계통안정기 (Power System Stabilizer: PSS)를 여자계통내에 추가하여 이득과 위상을 보상하게 되며, 입력신호는 계통의 주 파수편차( $\Delta f$ ), 각속도편차( $\Delta \omega$ ), 유효전력편차( $\Delta P$ )를 사용한다. 본 논문에서는 발전기의 각속도편차를 입력으로 하는 PSS에 대해 살펴보았다.

Fig. 2와 식 (3)에 PSS의 물력선도와 상태행렬식을 나타내었다.<sup>16)</sup>

$$\begin{aligned} w &\rightarrow \left[ \frac{K_{QS} \tau_Q S}{1 + \tau_Q S} \right] X_A \rightarrow \left[ \frac{1 + \tau_{Q1}' S}{1 + \tau_{Q1} S} \right] X_B \rightarrow \left[ \frac{1 + \tau_{Q2}' S}{1 + \tau_{Q2} S} \right] V_S, \\ \begin{bmatrix} \tau_Q \dot{X}_A \\ \tau_{Q1} \dot{X}_B \\ \tau_{Q2} \dot{V}_S \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ (1 - \frac{\tau_{Q1}'}{\tau_Q}) & -1 & 0 \\ \frac{\tau_{Q2}'}{\tau_{Q1}} (1 - \frac{\tau_{Q1}'}{\tau_Q}) & (1 - \frac{\tau_{Q2}'}{\tau_{Q1}}) & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ V_S \end{bmatrix} \\ &+ \dot{\omega} \begin{bmatrix} K_{QS} \\ K_{QS} \tau_{Q1}' \\ K_{QS} \frac{\tau_{Q1}' \tau_{Q2}'}{\tau_{Q1}} \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

#### 2-1-4. 무효전력보상기(SVC)의 모델링

무효전력보상기(Static Var Compensator: SVC)는 발전기단자를 포함한 일반모선에서 전압제어를 목적으로 사용되며, 무효전력원의 공급뿐만 아니라 안정도측면에서 계통의 계동특성을 증가시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같은 간략화한 모델을 사용하였으며, 일기무한모선계통에서 발전기단자에 설치되어 있는 것으로 가정하였다<sup>9)</sup>.

Fig. 3에서 다음의 관계식을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} v_d &= L_B \dot{i}_{Bd} + \omega L_B i_{Bq} \\ v_q &= L_B \dot{i}_{Bq} - \omega L_B i_{Bd} \\ K_r(\Delta I_{REF} - \Delta V_t) &= \Delta B_L + T_r \Delta \dot{B}_L \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 동작점에 대해 선형화하고 발전기 단자전압 식인 (2)식으로 치환한 후의 SVC 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_{B0} \dot{i}_{Bd} &\approx -L_d \dot{i}_d - KM_F \dot{i}_F - KM_D \dot{i}_D - r_d \dot{i}_d - \omega_0 L_q i_q \\ &\quad - \omega_0 KM_Q i_Q - (\lambda_{q0} + L_{B0} i_{Bq0}) \omega - \omega_0 L_{B0} i_{Bq} \\ &\quad - \frac{\omega_0 i_{Bq0}}{B_0^2} B_L \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} L_{B0} \dot{i}_{Bq} &= -L_q \dot{i}_q - KM_Q \dot{i}_Q + \omega_0 L_d \dot{i}_d + \omega_0 KM_F i_F \\ &\quad + \omega_0 KM_D i_D - r_q \dot{i}_q + (\lambda_{d0} + L_{B0} i_{Bd0}) \omega \\ &\quad + \omega_0 L_{B0} i_{Bd} + \frac{\omega_0 i_{Bd0}}{B_0^2} B_L \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{T_r}{K_r} \dot{B}_L &= -\omega_1 \dot{i}_d - \omega_2 \dot{i}_F - \omega_3 \dot{i}_D - \omega_4 \dot{i}_q - \omega_5 \dot{i}_Q - z_1 \dot{i}_d - z_2 \dot{i}_F \\ &\quad - z_3 \dot{i}_D + z_4 i_q + z_5 i_Q - z_6 \omega - \frac{1}{K_r} B_L \end{aligned} \quad (7)$$

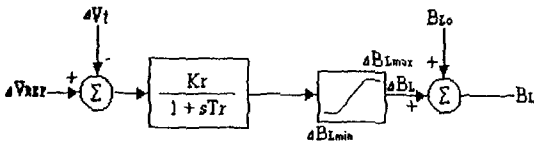


Fig. 3. Block diagram of Static Var Compensator.

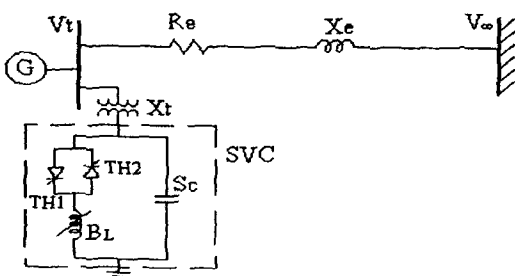


Fig. 4. System diagram of one machine infinite bus system.

$$\begin{aligned} \text{단, } L_B &= X_T - \frac{1}{B_C + B_L} & B_0 &= B_C + B_{L0} \\ B_L &= B_{L0} + \Delta B_L & L_{B0} &= X_T - \frac{1}{B_0} \\ z_1 &= -d_o r + q_o L_d & w_1 &= -d_o L_d \\ z_2 &= q_o \omega_o KM_F & w_2 &= -d_o KM_F \\ z_3 &= q_o \omega_o KM_D & w_3 &= -d_o KM_D \\ z_4 &= -d_o \omega_o L_q & w_4 &= -q_o L_q \\ z_5 &= -d_o \omega_o KM_Q & w_5 &= -q_o KM_Q \\ z_6 &= -d_o \lambda_{q0} + q_o \lambda_{d0} \end{aligned}$$

2-1-5. 계통상태행렬 구성

SVC의 상태방정식을 발전기 및 제어장치의 상태행렬과 결합하기 위해 Fig. 4에서 다음과 같은 전류관계식을 사용한다.

$$\begin{aligned} i_{Bd} &= i_d - i_{Bd} \\ i_{Bq} &= i_q - i_{Bq} \end{aligned} \quad (8)$$

단,  $i_d, i_q$  : 송전선에 흐르는 전류

$i_{Bd}, i_{Bq}$  : SVC에 흐르는 전류

$i_q, i_d$  : 발전기 단자전류

상태방정식의 일반형태를 다음과 같이 나타내면, 발전기와 제어장치를 포함한 상태행렬은 다음과 같은 행렬연산으로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} M \dot{X} &= -KX + U \\ \dot{X} &= -M^{-1} KX + M^{-1} U \\ &= AX + BU \end{aligned} \quad (9)$$

단,  $X = [i_d, i_F, i_D, i_q, i_Q, \omega, \delta, E_{FD}, V_1, V_3, V_R, X_A, X_B, V_S, i_{Bd}, i_{Bq}, B_L]$

2-2. 고유치감도계수

계통의 안정도를 개선하기 위해서는 특정 계통정수값을 미소변화시켰을 때 계동이 불량한 중요진동모드에 가장 큰 영향을 미치는 계통정수를 알아야 한다. 고유치감도계수는 계통정수에 대한 고유치의 편미분으로 정의되며, 본 연구에서는 중요진동모드에 미치는 제어기의 영향과 제어기정수의 최적화에 고유치감도계수를 사용하고자 한다.

2-2-1. 일차 고유치감도계수

$i$ 번째 고유치의 일차고유치감도계수에 대한 표현식은 다음과 같다<sup>9)</sup>.

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha_j} = \frac{\left[ \left( \frac{\partial A}{\partial \alpha_j} \right) V_p, W_i \right]}{[V_p, W_i]} \quad (10)$$

- 단,  $\lambda_i$ :  $i$ 번째 진동모드
- $\alpha_j$ : 제어기  $j$ 번째 정수
- $V_i$ :  $\lambda_i$ 의 우 고유벡터
- $W_i$ :  $\lambda_i$ 의 좌 고유벡터

식 (10)에서  $\partial A/\partial \alpha_j$ 는 감도행렬이라하며, 상태행렬을 제어기정수에 대해 편미분한 형태이다. 식 (9)에서처럼 상태행렬이 행렬연산으로 표현되는 경우 다음과 같이 감도행렬을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial A}{\partial \alpha_j} = \frac{\partial (M^{-1}K)}{\partial \alpha_j} = -M^{-1} \frac{\partial M}{\partial \alpha_j} M^{-1}K + M^{-1} \frac{\partial K}{\partial \alpha_j} \quad (11)$$

### 2-3. 제어기정수의 최적화

제어기정수의 최적화에는 다음과 같은 방법을 사용한다. 상태행렬의 표현식으로부터 제어기정수에 대한 고유치 일차감도계수를 구하고, 이를 선형계획법인 심플렉스법에 적용하여 제어기정수의 최적해를 구한다.

#### 2-3-1. 목적함수

제어기정수가  $\Delta \alpha_j$ 만큼 변화하였을 때의 추정된 고유치에 대한 표현식은 다음과 같다.

$$\lambda_i = \lambda_{i(0)} + \sum_j \frac{\partial \lambda_{i(0)}}{\partial \alpha_j} \Delta \alpha_j \quad (12)$$

본 연구에서는 전체 고유치중에서 개선시키고자 하는 중요진동모드의 고유치변화분의 실수부를 목적함수로 하고 이를 최소화하는 방법을 사용하였다.

$$\text{Minimize } \left\{ F = \sum_d \sum_j \text{Re} \left[ \frac{\partial \lambda_d}{\partial \alpha_j} \Delta \alpha_j \right] \right\} \quad (13)$$

- 단,  $\lambda_d$ : 중요진동모드
- $\alpha_j$ : 제어기  $j$ 번째 정수

#### 2-3-2. 제약식

중요진동모드에 대한 제어기정수의 최적화에 다음과 같이 두개의 제약식을 사용하였다.

##### (1) 제어기정수의 변화범위에 대한 제약식

제어기정수의 변화범위가 큰경우 일차 고유치 감도계수만을 사용해서 최적해를 구하면 고유치의 추정치와 상태행렬의 고유치 사이에 오차가 크게 발생하게되어 최적해를 구할 수 없게 된다. 따라서 각 반복계산마다 제어기정수의 변화폭을 전체 변화가능 범위의  $\pm 10\%$ 로 하여 오차가 적도록 하였다. 두 번째 반복계산시에는 각 제어기정수마다 첫 번째의 계산결과를 기준으로 다시 전체 변화가능 범위의  $\pm 10\%$  내에서 최적화를 수행하도록 하였다.

$$-\frac{1}{10} (\alpha_j^{\max} - \alpha_j^{\min}) \leq \Delta \alpha_j \leq \frac{1}{10} (\alpha_j^{\max} - \alpha_j^{\min}) \quad (14)$$

- 단,  $\Delta \alpha_j$ : 제어기  $j$ 번째 정수의 변화범위
- $\alpha_j^{\max}$ : 제어기  $j$ 번째 정수의 최대값
- $\alpha_j^{\min}$ : 제어기  $j$ 번째 정수의 최소값

##### (2) 전체 진동모드에 대한 제약식

특정 진동모드에 대한 제어기정수의 감도계수를 사용하여 최적해를 구하는 경우 특정 진동모드의 제동은 개선이 되더라도 다른 진동모드가 불안정해지는 현상이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 계통의 전체고유치에 대해 고유치의 변화를 고려한 고유치의 추정치가 복소평면의 안정영역에 존재하도록 제약식을 사용하였다.

$$\sigma_1 = \text{Re} \left[ \lambda_{1(0)} + \sum_j \left( \frac{\partial \lambda_1}{\partial \alpha_j} \Delta \alpha_j \right) \right] \leq 0 \quad (15)$$

$$\sigma_n = \text{Re} \left[ \lambda_{n(0)} + \sum_j \left( \frac{\partial \lambda_n}{\partial \alpha_j} \Delta \alpha_j \right) \right] \leq 0$$

제어기정수 최적화과정의 전체적인 흐름도는 Fig. 5와 같다.

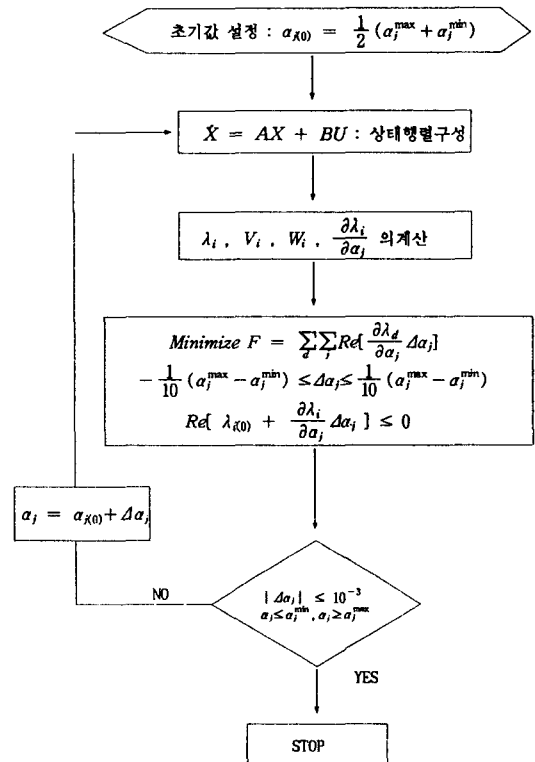


Fig. 5. Flow chart of the optimization process.

### 3. 사례연구

#### 3-1. 계통해석

일기무한모선계통에서 제어장치들이 계통안정도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 다음과 같은 일반적인 계통운용조건을 가정하였다.

유효전력 0.9 pu, 역률 0.85 지상인 경우

계통해석에 사용한 발전기와 송전선 정수는 참고문헌 [1]의 것을 사용하였으며 여자기와 PSS 그리고 SVC의 정수는 다음과 같다.

• 여자기 정수

$$\begin{aligned} \tau_f &= 0.01 \text{ sec} & \tau_E &= 0.5 \text{ sec} & \tau_A &= 0.05 \text{ sec} \\ \tau_f &= 0.715 \text{ sec} & K_R &= 1.0 & K_E &= -0.05 \\ K_A &= 40 & K_F &= 0.4 \end{aligned}$$

• PSS정수

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 7.5 \text{ sec} & \tau_{01} &= \tau_{01}' = 0.5 \text{ sec} \\ \tau_{02} &= 0.0227 \text{ sec} & \tau_{02}' &= 0.568 \text{ sec} & K_{08} &= 10.0 \end{aligned}$$

• SVC정수

$$\begin{aligned} X_T &= 0.08 \text{ pu} & K_i &= 50 & T_i &= 0.15 \text{ sec} \\ B_c &= 0.325 \text{ pu} & B_{LO} &= -0.3 \text{ pu} \end{aligned}$$

위의 제어기정수를 사용한 계통해석 결과는 다음과 같다. Table 1에서 미소신호안정도상에서 문제가 되는 전기기계적 진동모드는 1.48 Hz의 주파수값을 갖는 12, 13번째 진동모드이며 다른 진동모드에 비해 SPR값이 큰 것을 알 수 있다. 진폭감쇠비(Successive Peak Ratio: SPR)는 진동모드의 감쇠정도를 나타내는 지수로서, 일반적으로 0.8 이상의 값을 갖는 경우 관심대상이 되는 중요진동모드로 취급하게 되며 다음과 같이 나타난다<sup>2)</sup>.

$$\text{진폭감쇠비(SPR)} = \exp\left(\frac{2\pi\alpha}{|\beta|}\right)$$

여기서,  $\alpha$ 는 고유치의 실수부  
 $\beta$ 는 고유치의 허수부

#### 3-2. 일차고유치감도계수

발전기에 여자기, PSS, SVC가 설치된 경우에 각 제어기의 정수들이 미치는 영향을 일차고유치 감도계수를 사용하여 나타내었다.

Fig. 4의 일기무한모선계통에 대해 일반적인 계통운영 조건인 경우와 과부하상태일때의 계통운영조건인 경우를 가정하였다. 발전기 및 제어기정수는 3-1절과 같다.

Table 1. The results of eigenvalue analysis.

Mode	Eigenvalue		SPR
	Real	Imaginary	
1	-6.00967	-377.99960	.90493
2	-6.00967	377.99960	
3	-11.07251	-375.74170	.83098
4	-11.07251	375.74170	
5	-100.00050	-	-
6	-43.55057	-40.60297	.00118
7	-43.55057	40.60297	
8	-10.83988	-28.56851	.09218
9	-10.83988	28.56851	
10	-39.64554	-	-
11	-42.93488	-	-
12	-0.18263	-9.31728	.88412
13	-0.18263	9.31728	
14	-2.00000	-	-
15	-0.39358	-0.47335	.00538
16	-0.39358	0.47335	
17	-0.13401	-	-

사례1: 유효전력 0.9 pu, 역률 0.85 지상인 경우

사례2: 유효전력 1.0 pu, 역률 0.70 지상인 경우

제어기정수중에서 여자기에서는  $K_i$ 와  $T_i$ 를 변화가능한 정수로 하였으며, PSS에서는  $K_p$ ,  $\tau_p$ ,  $\tau_{p1}$ ,  $\tau_{p1}'$ 를, SVC에서는  $K_i$ 과  $T_i$ 를 변화가능한 정수로 하였다.

일기무한모선계통에서 변화가능한 8개의 정수에 대한 일차고유치감도계수를 구한 결과는 Table 2와 같다.

표 2의 감도계수를 비교해 보면 여자기정수  $K_i$ 에 대한 감도계수값이 가장 큰 것을 알 수 있다. PSS정수중에서는  $K_p$ 가 큰값을 가지나 여자기와 비교해 보면 그 영향이 작은 것을 알 수 있고, SVC정수  $K_i$ 의 감도계수 값은 여자기나 PSS에 비해 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 즉 관심대상이 되는 전기기계적진동모드를 개선하기 위해서는 여자기정수  $K_i$ 를 제어하는 것이 가장 효과적이며, SVC정수를 제어하는 것은 큰 효과가 없음을 알 수 있다.

#### 3-3. 계통조건 변화에의한 제어기 감도계수의 변화

계통조건 변화에 따라 제어기가 안정도에 미치는 영

향을 살펴보기 위해 앞에서의 계통조건에 역률을 0.5이상에서 1.0까지 변화시켜 가면서 감도계수의 변화를 살펴보았다.

제어기정수별의 감도계수의 변화는 Fig. 6, 7과 같다. 그림에서 계통의 역률이 낮아질수록 여자기와 PSS정수의 감도계수는 작아지는 반면 SVC정수의 감도계수는 커지는 것을 알 수 있다. 즉 계통에서 지상부하가 차지하는 비중이 커질수록 SVC제어에 의한 진동모드의 개선효과는 증가하며, 여자기와 PSS에 의한 개선효과는 상대적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 SVC정수의 감도계수가 여자기와 PSS정수의 감도계수보다 상대적으로 크기가 작기 때문에 계통의 역률변화에 관계없이 여자기정수를 제어하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있고, SVC는 그 효과가 적은 것을 알 수 있다.

**3-4. 제어기정수의 최적화**

일기무한모션계통에서 발전기에 여자기와 PSS 그리고 SVC가 설치된 경우 각 제어기정수의 최적값을 구하였다. 최적화 방법으로는 관심대상이 되는 중요진동모드에 대한 일차고유치감도계수를 구하고 이를 선형계획법인 심플렉스법에 적용하여 각 제어기정수의 전체변화가능 범위내에서 최적값을 찾도록 하였다.

각 제어기정수중에서 변화가능한 8개의 정수에 대해 목적함수와 제약식을 구성하였다.

본 사례에서 사용한 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Min } \left\{ F = \frac{\partial \lambda_M}{\partial K_r} \Delta K_r + \frac{\partial \lambda_M}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial \lambda_M}{\partial K_{qs}} \Delta K_{qs} + \frac{\partial \lambda_M}{\partial T_q} \Delta T_q \right. \\ \left. + \frac{\partial \lambda_M}{\partial T_{q1}} \Delta T_{q1} + \frac{\partial \lambda_M}{\partial T_{q1'}} \Delta T_{q1'} + \frac{\partial \lambda_M}{\partial K_f} \Delta K_f + \frac{\partial \lambda_M}{\partial T_f} \Delta T_f \right\}$$

제약식으로는 2-3-2절의 제약식을 사용하였다.

3-1절에서 변화가능한 제어기정수의 초기값은 Table 3과 같다.

각 계산단계별 정수값과 이를 이용하여 구한 중요모드의 고유치와 SPR값은 Table 4, 5와 같다. Table 4에서

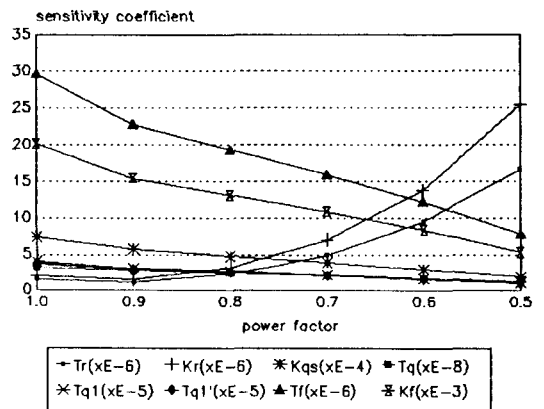


Fig. 6. Sensitivity coefficients of controller (P=0.9).

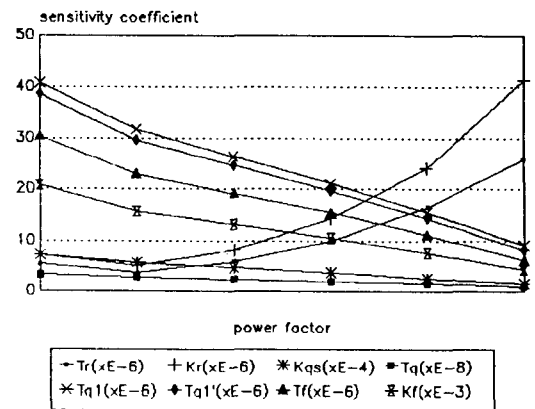


Fig. 7. Sensitivity coefficients of controller (P=1.0).

**Table 2. Sensitivity coefficients of controllers.**

Controller	Parameter	Eigenvalue Sensitivity	
		Case 1	Case 2
Exciter	Kf	$0.1423 \times 10^{-2}$	$0.1046 \times 10^{-2}$
	Tf	$0.2095 \times 10^{-5}$	$0.1533 \times 10^{-5}$
	Kqs	$0.5292 \times 10^{-4}$	$0.3718 \times 10^{-4}$
PSS	Tq	$0.2674 \times 10^{-8}$	$0.2036 \times 10^{-8}$
	Tq1	$0.2985 \times 10^{-5}$	$0.2110 \times 10^{-5}$
	Tq1'	$0.2780 \times 10^{-5}$	$0.1957 \times 10^{-5}$
SVC	Kr	$0.2207 \times 10^{-6}$	$0.1418 \times 10^{-5}$
	Tr	$0.1598 \times 10^{-6}$	$0.9949 \times 10^{-6}$

**Table 3. Initial values of controller parameters.**

Controller	SVC			PSS			Exciter	
	T <sub>r</sub>	K <sub>r</sub>	K <sub>qs</sub>	T <sub>q</sub>	T <sub>q1</sub>	T <sub>q1'</sub>	T <sub>f</sub>	K <sub>f</sub>
Initial Value	0.15	50	10	7.5	0.5	0.5	0.715	0.4

**Table 4. The change of controller parameters in optimization process.**

Controller		Iteration No.	Initial Value	1	2	3	4
SVC	$T_r$		0.15	0.25	0.15	0.05	0.08
	$K_r$		50	48	50	52	54
PSS	$K_{qs}$		10	8	6	4	6
	$T_q$		7.5	7.6	7.7	7.8	7.7
	$T_{ql}$		0.5	0.4	0.3	0.4	0.3
	$T_{ql}'$		0.5	0.4	0.5	0.4	0.5
Exciter	$T_r$		0.715	0.815	0.915	1.015	0.915
	$K_r$		0.4	0.1	0.05	0.03	0.03

**Table 5. The results of eigenvalue analysis in optimization process.**

Iteration		1	2	3	4
Eigenvalue	Real	-0.05927	-0.44970	-0.53203	-0.82898
	Imaginary	8.84417	8.21490	8.97241	8.18752
SPR		0.95877	0.70896	0.68896	0.52932

4회의 반복으로 최적정수값을 찾을 수 있었으며, 최적정수를 사용한 경우 중요진동모드의 SPR값은 0.52932로 계통의 초기동작조건일 때에 비해 안정도가 개선된 것을 알 수 있다.

### 4. 결 론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 전력계통의 안정도에 미치는 제어장치들의 영향을 살펴보기 위한 전단계로 일기무한모션계통에 대해 여자기와 PSS 그리고 SVC를 포함하는 경우의 상태방정식을 제시하였다. 이때 SVC는 발전기단자에 설치하였다.
- 2) 계통안정도에 미치는 제어장치들의 영향을 관심대상이 되는 전기기계적 진동모드에 대한 각 제어기정수의 감도계수를 사용하여 수치적으로 비교하였다. 그 결과 계통안정도를 개선하기 위해서는 여자기정수를 조절하는 것이 가장 효과적이고, SVC는 상대적으로 영향이 작은 것을 알 수 있었다. 또한 계통의 역률이 낮아질수록 계통안정도에 미치는 SVC의 영향은 증가하는 반면에 여자기와 PSS의 영향은 감소하는 것을 보였다.
- 3) 계통의 안정도를 증가시키기 위한 각 제어기의 최적화를 위해 일차고유치감도계수를 선형계획법인 심플렉스법에 적용하였다. 감도계수의 일차식만을 사용하는데 따른 문제점을 해결하기 위해 각 제어기정수의 전체

변화가능 범위를 작은 구간으로 나누고 각 반복계산마다 상태행렬과 감도계수를 구하고, 전단계에서 구한 최적정수값을 제어기정수의 변화범위를 달리하여 다시 최적화하는 방법을 사용하였다.

4) 다기계통에 대해서도 계통운용조건 변화에 따른 발전기와 제어기들의 영향을 고유치감도계수를 사용하여 수치적으로 나타내고, 안정도에 미치는 영향이 가장 큰 발전기 및 제어기를 선별하여 최적화하는 연구가 필요하리라 생각된다.

### 사용기호

- $v_i$  : 발전기 단자전압
- $v_d, v_q$  : 발전기 단자전압의 d, q축 성분
- $v_{\infty d}, v_{\infty q}$  : 무한모션 전압의 d, q축 성분
- $R_e, L_e$  : 송전선의 임피던스
- $E_{fd}$  : 계자전압
- $\delta$  : 발전기의 위상각
- $\omega$  : 발전기 각속도
- $i_f$  : 계자전류
- $i_d, i_q$  : D, Q 제동권선의 전류
- $KM_d, KM_f, KM_o$  : 상호 리액턴스
- $\tau_E$  : 여자기 시정수
- $\tau_R$  : 전압조절기 입력필터 시정수

- $\tau_F$  : 전압조절기 안정화 회로 시정수
- $\tau_A$  : 전압조절기 시정수
- $S_E$  : 포화계수
- $K_A$  : 전압조절기 이득
- $K_E$  : 여자기 이득
- $K_F$  : 전압조절기 안정화 회로 이득
- $\tau_0$  : 리셋 시정수
- $\tau_{O1}, \tau_{O1'}$  : 1차 지상, 진상 시정수
- $\tau_{O2}, \tau_{O2'}$  : 2차 지상, 진상 시정수
- $K_{OS}$  : PSS 이득
- $V_S$  : 출력신호
- $\tau_r$  : 시정수
- $K_r$  : 이득
- $X_T$  : 변압기 리액턴스
- $L_B$  : 무효전력보상기 리액턴스
- $B_L, B_C$  : 무효전력보상기 서셉턴스

### 참고문헌

1. P.M. Anderson and A.A. Fouad: "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, Iowa, (1977).
2. P. Kundur: "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, (1994).
3. Billy. E. Gillett: "Introduction to Operations Research", McGRAW-HILL, (1976).
4. 권세혁, 송길영: "발전기-무한모선계통의 동태안정도 해석시 A행렬의 구조", 전기학회논문지, **39(1)**, 1-9, 1월 (1990).
5. M.A. Pai, K.R. Padiyar and P.S. Shetty: "Sensitivity based selection of control parameters for multi-machine power systems", IEEE PES Winter Meeting, New York, NY, February 3-8, (1980).
6. Yuan-Yih Hsu, Chuan-Sheng Liu, C.J. Lin, and C.T. Huang: "Application of Power System Stabilizers and Static Var Compensators on a Longitudinal Power System", IEEE Trans. on Power Systems, **3(4)**, 1464-1470, November (1988).
7. S. Arabi, G.J. Rogers, D.Y. Wong, P. Kundur, and M.G. Lauby: "Small Signal Stability Program Analysis of SVC and HVDC in AC Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, **6(3)**, 1147-1153, August (1991).
8. Chin-Hsing Cheng and Yuan-Yih Hsu: "Damping of Generator Oscillations Using An Adaptive Static Var Compensator", IEEE Trans. on Power Systems, **7(2)**, May (1992).
9. IEEE Special Stability Controls Working Group: "Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", IEEE Trans. on Power Systems, **9(1)**, 229-240, February (1994).