

## 최적 파라미터를 이용한 전력계통 안정화에 관한 연구

문 양 현 확 노 흥  
연 세 대 확 고 전 가 공 학 과

# A Study on Power System Stabilization by using Parameter Optimization

Young-Hyun Moon  
Yonsei University

No-Hong Kwak  
Yonsei University

**Abstract** - This study presents a methodology to choose the optimal parameter of controller by using the performance index sensitivity. The proposed method is to select the controller parameter to have the minimum sensitivity. It is shown that the optimal parameter proves the effectiveness in the dynamic stability of power system.

## 1. 서론

전력 계통은 감자스런 부하 변화나 송전선로에서의 고장 발생으로 인하여 계통교란이 빈번히 발생할 때도 불구하고 수요에 따른 전력을 원활히 공급하기 위하여 전력계통의 안정도 향상 문제는 계통구성을 복잡화에 따라 더욱 중요한 문제로 대두되고 있다. Hanson[1] 등은 시행 착오법(trial and error)에 의하여 조속기와 전압의 조정가의 이득을 조절하여 계통의 안정도를 향상시켰으며, deMello[2] 등은 계통 안정도의 문제 해결을 위하여 전력계통 안정화 장치(pss)의 새로운 개념을 도입한 이래 Chow[3] 등은 극점지정 및 보상기 설계 방법으로 PSS의 상수 조정과 최적 설치 장소를 선택하였다. Vournous[4]는 동적 안정도를 향상시키기 위하여 제어기 변수에 대한 고유치 감도를 계산하여 평가함수를 최적화하는 경사도법을 이용하였는데, 이는 파라미터의 제약 조건 때문에 국부 최적 파라미터를 얻는 결점이 있다. 본 논문에서는 계통의 안정도를 확대화시키기 위해서 선형 레귤레이터에 의한 제어기 변수(조속기, 여사기 등의 이득상수, 시정수)의 평가 함수 감도를 계산하여 파라미터 변화에 대하여 안정적 시스템을 설계하는데 그 목적이 있다. 즉, 최적 평가 함수의 감도가 zero에 가까운 값을 갖도록 파라미터를 선택하여 전력계통을 안정시키는 방법을 제시한다.

## 2. 평가 합수의 감도 계산

## 2.1 평가 합수 갑도의 기본 원리

제어계통 파라미터에 대한 평가 함수 감도는 다음과 같이 구해진다. [5]

제어 개봉은 다음과 같은 일반식으로 나타낸다.

$$X(t) = f(X, \alpha, U, t) \quad (1)$$

여기서  $X$  : 상태 벡터  
 $U$  : 제어 벡터  
 $\alpha$  : 계통의 파라미터

개봉의 최적화는 제어백터  $U$  를 구하여 다음의 평가 함수를 최소화하는 것이다.

$$J = \frac{1}{2} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (2)$$

식(2)에서 파라미터  $\alpha_0$  가  $\alpha$ 로 변화하면 빙가함수도  
비하게 된다. 즉,

$$\Delta J \equiv J(x, \alpha_1, t_1) - J(x_0, \alpha_0, t_0)$$

$$\text{if } \frac{\partial J}{\partial \alpha} \Delta \alpha = J_\alpha \Delta \alpha \quad (3)$$

식(3)에서  $J = \frac{\Delta J}{\Delta \alpha}$  를 평가함수 감도라 한다.

식(2)로 부터 Hamilton-Jacobi 방정식을 다음과 같이 구한다.

$$\frac{\partial J}{\partial t} = - H(X, \frac{\partial J}{\partial X}, \alpha, \alpha_0, t) \quad (4)$$

$$H = \frac{\partial J}{\partial X} f(X, \alpha, t, \alpha_0) + L(X, t, \alpha, \alpha_0) \quad (5)$$

$$L(X, t, \alpha, \sigma_0) = \frac{1}{2}(X^T Q X + U^T R U) \quad (6)$$

식(5)를 파라미터  $\alpha$ 로 미분하면 다음식을 얻는다.

$$H_{\alpha} = \frac{\partial J_{\alpha}}{\partial x} f + \frac{\partial J}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial \alpha} + \frac{\partial L}{\partial \alpha} \quad (7)$$

## 2.2 석현 레귤레이터를 이용한 평가합수 감도 계산

제어 개봉의 상태 방정식 식(1)은 다음과 같다.

$$\dot{x} = A(\alpha)x + B(\alpha)U \quad (8)$$

식(8)에서 초기 파라미터  $\alpha$  시 깨환 이들을 Riccati 방정식으로부터 구한 후, 파라미터가  $\alpha$ 에서  $\alpha$ 로 변하게 되면 A, B로 변하게 된다. 즉,

$$\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}(\alpha) - \mathbf{B}(\alpha) \mathbf{R}_0^{-1} \mathbf{B}_0 \mathbf{M}_0) \mathbf{X} \stackrel{(9)}{=} \mathbf{F} \mathbf{X}$$

식(9)의 평가 함수의 해는 다음과 같다.

$$J(\mathbf{X}, \alpha, t) = \frac{1}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{M} \mathbf{X} \quad (10)$$

식(10)과 식(4)로부터 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\dot{\mathbf{M}} + \mathbf{F}^T \mathbf{M} + \mathbf{M} \mathbf{F} + \mathbf{Q} = 0 \quad (11)$$

식(10)의  $\alpha$ 에 대한 평가함수  $J_\alpha$ 는 다음과 같다고 하면

$$J_\alpha = \frac{1}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{P} \mathbf{X} \quad (12)$$

식(12)를 식(5)에 대입하면 다음식을 얻는다.

$$\dot{\mathbf{P}} + \mathbf{F}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{F} + \mathbf{Q}^* = 0 \quad (13)$$

$$\text{여기서 } \mathbf{Q}^* = \left[ \frac{\partial \mathbf{F}^T}{\partial \alpha} \mathbf{M} + \mathbf{M} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \alpha} + \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \alpha} \right] \quad (14)$$

### 3. 모델 선정

제어기에 대한 평가 함수의 감도로 최적 파라미터를 구하기 위하여, 발전기의 가계방정식, 전기 방정식, 전동 방정식 및 조속기, 여자기동을 고려한 모델을 선정하여 다음과 같은 상태 방정식을 얻는다.[6]

$$\dot{B}'_q = -\frac{1}{K_3 T_{dq}} B'_q - \frac{K_4}{T_{dq}} \delta + \frac{1}{T_{dq}} E_{FD} \quad (15)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{2H} \omega + \frac{1}{2H} P_m - \frac{1}{2H} P_e \quad (16)$$

$$\dot{\delta} = 2\pi f_0 \omega \quad (17)$$

$$\dot{V}_R = \frac{K_E K_B}{T_R} E'_q + \frac{K_E K_B}{T_R} \delta - \frac{1}{T_R} V_R \quad (18)$$

$$\dot{V}_{GI} = -\left( \frac{1}{T_F} + \frac{K_E K_A K_X}{T_F T_X} \right) V_{GI} - \frac{K_F (1+K_X S_F)}{T_F T_X} E_{FD} + \frac{K_E K_X K_A}{T_F T_X} Q_V \quad (19)$$

$$\dot{V}_A = \frac{1}{T_A} V_r - \frac{1}{T_A} V_{GI} - \frac{1}{T_A} V_A \quad (20)$$

$$\dot{E}_{FD} = -\frac{K_A K_X}{T_X} V_{GI} - \frac{1+K_X S_F}{T_X} E_{FD} + \frac{K_A K_X}{T_X} Q_V \quad (21)$$

$$\dot{P}_m = -\frac{1}{T_T} P_m + \frac{1}{T_T} X_{GV} \quad (22)$$

$$\dot{X}_{GV} = -\frac{1}{R T_{GV}} X_{GV} + \frac{1}{T_{GV}} P_e \quad (23)$$

식(15) ~ (23)에서 제어 변수를 제어 변수를  $Q_V$ ,  $X_{GV}$ 로 하여, 여자기, 여자기 전동방자 회로, 조속기의 이득 상수와 시정수에 대한 평가함수의 감도  $\partial J / \partial \alpha$ 를 계산하여,  $\partial J / \partial \alpha$  값이 최소값을 가질 때의  $\alpha$  값을 택한다. 파라미터  $\alpha$ 를 결정하는 최적화 알고리즘은 위와 같다.

### 4. 다기 계통에서의 동태 안정도 해석

동태 안정도라 함은 계통의 지정된 운전점에서 제어 계통의 동특성이 계통에 항상 발생하는 미소 교란에 대하여 항상 안정성을 유지할 수 있는지를 판정하는

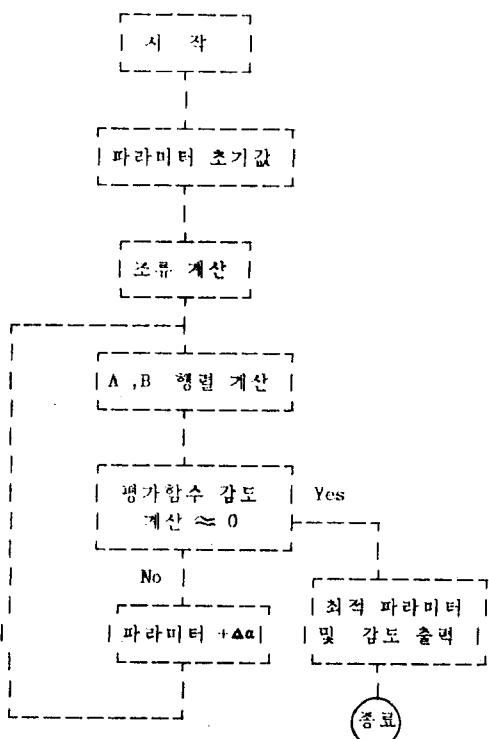


그림 1. 최적화 흐름도  
Fig. 1. Optimization flow chart

것이다. 즉, 계통이 동적 불안정 상태에 있다면 이것은 운전점이 불안전 평형점으로 되어있기 때문에 계통에 조그만 교란이 발생하였다 하면 교란의 크기가 아무리 적을지라도 계통은 불안정 상태로 가게 되는 것을 의미하며, 반대로 계통이 동적 안정 상태에 있다면 이것은 운전점이 안정 평형점으로 일정크기 이하의 미소교란에 대해서 계통이 항상 안전하게 운전될 수 있음을 의미한다. 따라서 동태 안정도는 운전점 부근에서 미소변화를 고찰함으로써 해석될 수 있으며, 다음의 선형화 기법에 의한 안정도 판별법이 일반적으로 사용되고 있다.

계통의 상태 방정식이 비선형 방정식으로 다음과 같이 주어진다고 하자.

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{V}, t) \quad (24)$$

여기서  $\mathbf{X}$  : 상태 벡터  
 $\mathbf{U}$  : 제어 벡터  
 $\mathbf{V}$  : 외란 벡터

그리고 운전점이  $X_0, U_0$ 이고 평형을 이루었다고 하면  $\dot{\mathbf{X}} = f(X_0, U_0, V_0, t) = 0$  이므로 운전점 부근에서 다음과 같이 주어진다고 하자.

$$\Delta \dot{\mathbf{X}} = A \Delta \mathbf{X} + B \Delta \mathbf{U} + \Gamma \Delta \mathbf{V} \quad (25)$$

여기서  $\Delta X = X - X_0$

$\Delta U = U - U_0$

(26)

(27)

$$\Lambda = \frac{\partial f(X, U, V, t)}{\partial X}$$
(28)

$$B = \frac{\partial f(X, U, V, t)}{\partial U}$$
(29)

$$\Gamma = \frac{\partial f(X, U, V, t)}{\partial V}$$
(30)

전력 계통 동태 안정도에서는 제어 계통의 품복성을 고려해야 하므로 제어 입력  $U(t)$ 는 다음과 같이 최적 제어한다고 가정한다.

$U(t) = K(t) X(t)$  (31)

여기서  $K$ : 최적 제어 이득

앞에서 언급한 방법으로 파라미터의 최적값을 대입하여 식 (31)을 이용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$\dot{X} = (A + BK) \Delta X + \Gamma \Delta V$  (32)

즉, 동태 안정도는 식 (32)의 미소 변화 상태 방정식이 안정된 특성을 갖는가를 판정하는 문제로 귀착되며 이것은 행렬  $(A + BK)$ 의 고유치에 의하여 안정도 판정이 가능하다.

이상을 다기 계통의 동태 안정도 판정 문제에 적용하기 위하여 식 (32)에 주어진 발전기  $i$ 에 대한 상태 방정식을 운전점 부근에서 선형화하면 다음과 같은 상태 변수 미소 변화에 대한 방정식을 얻는다.

$\dot{X}_i = A_i \Delta X_i + B_i \Delta U_i + \Gamma_i \Delta P_{ei}$  (33)

여기서,

$\Delta X_i = [\Delta R_i, \Delta W_i, \Delta \delta_i, \dots, \Delta m_i, \Delta X_{gv_i}]$  (34)

$\Delta U_i = [\Delta Q_i, \Delta X_{gv_i}]$  (35)

$\Delta P_{ei} = P_{ei}(R_i, \delta) - P_{ei}(R_i, \delta)$  (36)

그러면 다기 계통에 대한 선형화 상태 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$\dot{X} = \hat{A} X + \Gamma V$  (37)

여기서,  $X = [X_1^t, X_2^t, \dots, X_n^t]$  (38)

위 상태 방정식에서 식 (33)을 이용하면 행렬  $\hat{A}$ 를 구성할 수 있다.

이 행렬  $\hat{A}$ 의 차원이  $9N \times 9N$ 이다.

행렬  $\hat{A}$ 에 대한 고유치는 IMSL program package 를 이용하여 구할 수 있다.

## 5. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 고찰

안정도 향상 효과를 고찰하기 위해서는 실제봉을 직접 모델링하여 컴퓨터 시뮬레이션하면 가장 확실한 결론을 얻을 수 있을 것이다. 그러나 다기 계통 안정도 시뮬레이션 결과 분석이 복잡하기 때문에 3기 계통에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 모델 개봉으로는 각각 부성의 다른 3개의 발전기로 구성된 그림과 같은 3기 모델로 선정하였다. 3개의 발전기 중 발전기-1은 톤류형의 수차 발전기이고, 발전기-2, 3은 비동기형의 터빈 발전기이다.

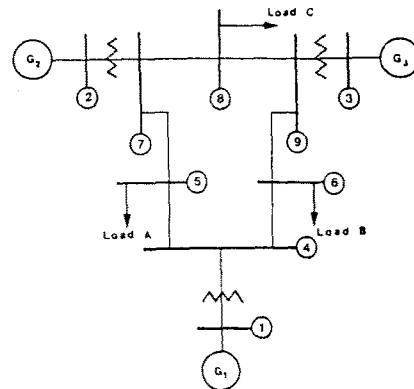


그림 2. 9-보선 계통 모델

Fig. 2. Nine-bus power system model

3기 모델에 제어 변수에 대한 평가함수 감도를 구해보면 다음과 같다.

표 1. 최적 파라미터 및 평가함수 감도

Table 1. Optimal parameter and performance function sensitivity

발전기 (G1)	초기치	최적치	감도
$K_e$   -0.02   -7.0E-03   5.802E-09			
$T_e$   0.1   8.5E-01   5.746E-07			
$T_{gv}$   30   180   1.64E-09			
$R_{eq}$   0.05   1.05   7.77E-10			
$K_f$   0.1   3.6E-02   4.12E-06			
$T_f$   1.0   1.1   3.607E-06			

발전기 (G2)	초기치	최적치	감도
$K_e$   -0.0505   -5.55E-02   3.146E-05			
$T_e$   0.56   1.11E-01   1.972E-05			
$T_{gv}$   0.083   3.000E-03   2.999E-02			
$R_{eq}$   0.05   1.05   3.764E-04			
$K_f$   0.091   1.23E-01   5.070E-03			
$T_f$   0.35   3.0E-01   5.659E-02			

발전기(G3)	초기치	최적치	감도
$K_e$	-0.0601	-6.51E-02	3.013E-06
$T_o$	0.67	1.45E-01	1.307E-04
$T_{gv}$	0.083	3.0 E-03	5.840E-04
$R_{eg}$	0.05	5.05	1.73 E-06
$K_f$	0.108	1.88E-01	1.315E-04
$T_f$	0.35	4.99E-02	9.796E-04

감도를 계산한 결과 여자기의 이득 상수는 돌곡형의 경우 감소하였으나 비돌곡형의 경우 증가하였고 시정수는 각 발전소마다 다르게 변화하였으며 조속기 시정수는 돌곡형 발전기의 경우 증가하였으나, 비돌곡형에서 감소하였다. 두르프(Droop)는 모두 증가하였다. 여자기 전동방지 회로의 상수는 여자기의 이득상수, 시정수의 값의 크기에 따라 다르게 나타났다. 또한 여자기 이득상수와 조속기 이득상수(두르프)의 감도가 가장 민감함을 알 수 있다.

표 2. 초기치 일 때 고유치

Table 2. Eigenvalues at initial parameter

Eigenvalues		
$\lambda_1 = -976.4$	$\lambda_2 = -911.0$	$\lambda_3 = -778.8$
$\lambda_4 = -49.94$	$\lambda_5 = -49.93$	$\lambda_6 = -49.88$
$\lambda_7 = -28.02$	$\lambda_8 = -23.53$	$\lambda_9 = -19.15$
$\lambda_{10} = -16.69$	$\lambda_{11} = -16.67$	$\lambda_{12} = -16.67$
$\lambda_{13} = -4.658 - j0.47$	$\lambda_{14} = -4.658 + j0.470$	
$\lambda_{15} = -4.546$	$\lambda_{16} = -3.056$	$\lambda_{17} = -3.042$
$\lambda_{18} = -1.091$	$\lambda_{19} = -0.480$	$\lambda_{20} = -0.464$
$\lambda_{21} = -0.352$	$\lambda_{22} = -0.343$	$\lambda_{23} = -0.280$
$\lambda_{24} = -0.133$	$\lambda_{25} = 0.000$	$\lambda_{26} = 0.000$
$\lambda_{27} = 0.000$		

표 3. 최적치 일 때 고유치

Table 3. Eigenvalues at optimal parameter

Eigenvalues		
$\lambda_1 = -976.4$	$\lambda_2 = -911.0$	$\lambda_3 = -778.8$
$\lambda_4 = -49.94$	$\lambda_5 = -49.93$	$\lambda_6 = -49.88$
$\lambda_7 = -28.02$	$\lambda_8 = -23.53$	$\lambda_9 = -19.17$
$\lambda_{10} = -16.69$	$\lambda_{11} = -16.67$	$\lambda_{12} = -16.67$
$\lambda_{13} = -4.658 - j0.47$	$\lambda_{14} = -4.657 + j0.471$	
$\lambda_{15} = -4.545$	$\lambda_{16} = -3.057$	$\lambda_{17} = -3.042$
$\lambda_{18} = -1.092$	$\lambda_{19} = -0.356$	
$\lambda_{20} = -2.266 - j6.31$	$\lambda_{21} = -2.265 + j6.31$	
$\lambda_{22} = -0.231 - j10.17$	$\lambda_{23} = -0.231 + j10.17$	
$\lambda_{24} = -0.214$	$\lambda_{25} = -0.166 - j4.894$	
$\lambda_{26} = -0.170 + j4.894$	$\lambda_{27} = -0.133$	

## 6. 결론

본 연구에서는 평가함수의 감도를 계산하여 돌곡형,

비돌곡형 발전 제어기의 최적 파라미터 (여자기, 조속기 등 시정수 및 이득상수)를 구하였으며, 다기 계통에 적용한 결과 계통의 동적 안정도를 향상시켰다. 제시된 방법에 대한 계산 시간의 단축 기법을 개발하여, 플랜트의 최적 파라미터도 구하면 이상적인 시정수, 이득상수를 갖는 모델을 설계할 수 있으리라 생각된다.

## REFERENCE

- [1] O.W. Hanson, et.al, "Influence of Excitation and Speed Control Parameters in Stabilizing Intersystems Oscillations", IEEE Trans. PAS-87, pp 1306 - 1311, May 1968.
- [2] F.P. deMello, et. al, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans., PAS-88, pp 316 - 329, April, 1969.
- [3] J.H. Chow, et. al, "Pole Placement Designs of Power System Stabilizers.", IEEE Trans., Vol 4, No.1, pp. 271 - 277, Feb, 1989.
- [4] C.D. Vournass, et.al, "Power System Stabilization Via Parameter Optimization - Application to the Hellenic Interconnected System ", IEEE Trans, Vol.PWRS-2, No.3, pp. 615 - 623, August, 1987.
- [5] S.C. Tripathy, et. al, "Optimisation of Load-Frequency Control Parameters For Power Systems With Reheat Steam Turbines And Governor Dead Band Nonlinearity ", IEEE Proc. Vol.12, pp 10 - 16, Jan, 1982.
- [6] P.M. Anderson, et. al, "Power System Control and Stability ", Iowa State University. Pren, 1977
- [7] Yao-nan Yu, "Electric Power System Dynamics ", Academic Pren , 1983

## 부록

## 1. 발전기 파라미터 값

항목	발전기 1	발전기 2	발전기 3
$MVA$	250 MVA	200 MVA	180 MVA
$R_g$	1.057 pu	1.050 pu	1.017 pu
$\delta$	0.040 rad	0.340 rad	0.220 rad
$\theta$	0.0 rad	0.162 rad	0.082 rad
$Xe$	0.400 pu	0.400 pu	0.400 pu
$Xd$	0.146 pu	0.896 pu	1.343 pu
$Xq$	0.097 pu	0.865 pu	1.258 pu
$Xdt$	0.061 pu	0.120 pu	0.182 pu
$Tdot$	8.960 sec	6.000 sec	5.890 sec
$Tr$	0.060 sec	0.060 sec	0.060 sec
$Te$	0.100 sec	0.565 sec	0.670 sec
$Tf$	1.000 sec	0.350 sec	0.350 sec
$Ta$	0.020 sec	0.200 sec	0.200 sec
$V$	1.040 pu	1.025 pu	1.026 pu

Se   0.300 pu   0.303 pu   0.360 pu
H   3.920 pu   3.940 pu   5.364 pu
D   2.00 pu   2.00 pu   2.00 pu
f   60 Hz   60 Hz   60 Hz
Kr   1.000 pu   1.000 pu   1.000 pu
Ka   100 pu   25 pu   25 pu
Kf   0.100 pu   0.091 pu   0.100 pu
Ke   -0.020 pu   -0.505 pu   -0.060 pu
Reg   0.050 pu   0.050 pu   0.050 pu
Tgv   30 sec   0.083 sec   0.083 sec
Tt   0.520 sec   0.200 sec   0.200 sec

## 3. 조류 계산 결과

보선   전압   위상각   보선   전압   위상각
번호   [pu]   [rad]   번호   [pu]   [rad]
1   1.0400   0.0000   6   0.9745   -0.19962
2   1.0061   0.1937   7   0.9965   -0.10441
3   1.0239   0.5557   8   0.9811   -0.15998
4   0.9949   -0.1529   9   1.0051   -0.14542
5   0.6554   -0.1984

## 2. 운전 조건

발전기- 1   발전기- 2   발전기- 3
EMF[pu]   0.1040B+01   0.1025B+01   0.1205B+01
ω[rad/sec]   0.0000B+00   0.1019B+01   0.5154B+01
δ[rad]   0.0000B+00   0.1623B+00   0.8200B-01
Power[pu]   1.01+j0.03   1.63+j0.07   0.85-j0.11