



$$\dot{X} = (A(\alpha) - B(\alpha) R_0^{-1} B_0 M_0) X \equiv F X \quad (9)$$

식(9)의 평가 함수의 해는 다음과 같다.

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

식(10)과 식(4)로부터 다음과 같은 식을 얻는다.

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

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

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

식(12)를 식(5)에 대입하면 다음식을 얻는다.

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

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

### 3. 모델 선정

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

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{K_3 T_{d0}} E'_q - \frac{K_4}{T_{d0}} \delta + \frac{1}{T_{d0}} E_{FD} \quad (15)$$

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

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

$$\dot{V}_R = \frac{K_R K_R}{T_R} E'_q + \frac{K_5 K_R}{T_R} \delta - \frac{1}{T_R} V_R \quad (18)$$

$$\dot{V}_{G1} = -\left( \frac{1}{T_F} + \frac{K_F K_A K_X}{T_F T_X} \right) V_{G1} - \frac{K_F (1 + K_X S_F)}{T_F T_X} E_{FD} + \frac{K_F K_X K_A}{T_F T_X} Q_v \quad (19)$$

$$\dot{V}_A = \frac{1}{T_A} V_R - \frac{1}{T_A} V_{G1} - \frac{1}{T_A} V_A \quad (20)$$

$$\dot{E}_{FD} = -\frac{K_A K_X}{T_X} V_{G1} - \frac{1 + K_X S_F}{T_X} E_{FD} + \frac{K_A K_X}{T_X} Q_v \quad (21)$$

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

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

식(15) - (23)에서 제어 변수를 제어 변수를  $Q_v$ ,  $X_{gv}$ 로 하여, 여자기, 여자기 진동방자 회로, 조속기의 이득 상수와 시정수에 대한 평가함수의 감도  $\partial J / \partial \alpha$ 를 계산하여,  $\partial J / \partial \alpha$  값이 최소값을 가질때의  $\alpha$  값을 택한다. 파라미터  $\alpha$ 를 결정하는 최적화 알고리즘은 위와 같다.

### 4. 대기 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

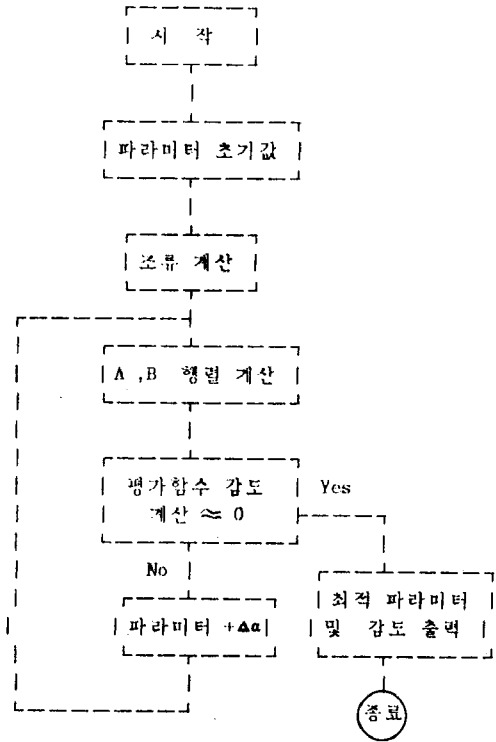


그림 1. 최적화 흐름도  
Fig. 1. Optimization flow chart

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 안정상태에 있다면 이것은 운전점이 안정 평형점으로 일정크기 이하의 미소교란에 대해서 계통이 항상 안정하게 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.

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

여기서  $X$  : 상태 변수  
 $U$  : 제어 벡터  
 $V$  : 외란 벡터

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

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

여기서  $\Delta X = X - X_0$  (26)  
 $\Delta U = U - U_0$  (27)

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

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

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

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

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

여기서  $K$  : 최적 궤환 이득

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

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

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.

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

여기서,

$$\Delta X_i = [\Delta R_{fi}, \Delta \omega_i, \Delta \delta_i, \dots, \Delta P_{mi}, \Delta X_{gvi}] \quad (34)$$

$$\Delta U_i = [\Delta Q_{vi}, \Delta X_{gvi}] \quad (35)$$

$$\Delta P_{ei} = P_{ei}(R_{fd}, \delta) - P_{ei}(R_{fd}, \delta) \quad (36)$$

그러면 다기 계통에 대한 선형화 상태 방정식은 다음과 같이 주어진다.

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

여기서,  $X = [X_1^T, X_2^T, \dots, X_n^T]^T$  (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 항상 효과를 고찰하기 위해서는 실제계를 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 계통으로는 각각 복성이 다른 3개의 발전기로 구성된 그림 2 과 같은 3기 모델로 선정하였다. 3개의 발전기 중 발전기-1은 돌극형의 수차 발전기이고, 발전기-2,3 은 비돌극형의 터빈 발전기이다.

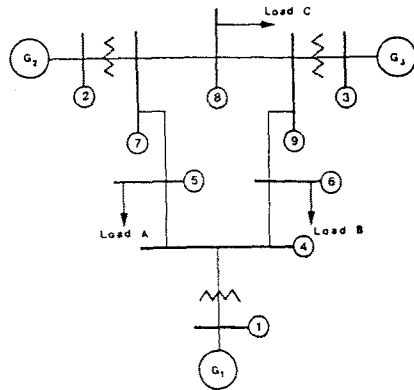


그림 2. 9-부선 계통 모델  
 Fig. 2. Nine-bus power system model

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	1.64 E-09
$R_{ep}$	0.05	1.05	7.77 E-10
$K_f$	0.1	3.6E-02	4.12 E-06
$T_f$	1.0	1.1	3.607E-06

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

발전기 (G3)	초기치	최적치	감도
$K_0$	-0.0601	-6.51E-02	3.013E-06
$T_0$	0.67	1.45E-01	1.307E-04
$T_{0v}$	0.083	3.0 E-03	5.840E-04
$R_{0g}$	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 돌극형의 경우 감소하였으나 비돌극형의 경우 증가하였고 시정수는 각 발전소마다 다르게 변화하였으며 조속기 시정수는 돌극형 발전기의 경우 증가하였으나, 비돌극형에서 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. 초기치일때 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. 최적치일때 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 돌극형,

비돌극형 발전 제어기의 최적 파라미터 (여자기, 조속기 등 시정수 및 이득상수)를 구하였으며, 대기 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
$K_f$	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
$X_e$	0.400 pu	0.400 pu	0.400 pu
$X_d$	0.146 pu	0.896 pu	1.343 pu
$X_q$	0.097 pu	0.865 pu	1.258 pu
$X_{dt}$	0.061 pu	0.120 pu	0.182 pu
$T_{dot}$	8.960 sec	6.000 sec	5.890 sec
$T_r$	0.060 sec	0.060 sec	0.060 sec
$T_e$	0.100 sec	0.565 sec	0.670 sec
$T_f$	1.000 sec	0.350 sec	0.350 sec
$T_a$	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 번호	전압 [pu]	위상각 [rad]	보선 번호	전압 [pu]	위상각 [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]	0.1040E+01	0.1025E+01	0.1205E+01
$\omega$ [rad/sec]	0.0000E+00	0.1019E+01	0.5154E+01
$\delta$ [rad]	0.0000E+00	0.1623E+00	0.8200E-01
Power[pu]	1.01+j0.03	1.63+j0.07	0.85-j0.11