

전력 계통 안정화를 위한 파라미터 최적화 알고리즘

A Parameter Optimization Algorithm for Power System Stabilization

郭 魯 洪* · 文 永 鉉**
(No-Hong Kwak · Young-Hyun Moon)

요 약

본 연구에서는 전력계통의 안정도 향상을 위한 파라미터 최적화 기법을 연구하였으며 파라미터 감도의 간편한 계산을 위하여 새로운 기법을 도입하였고 이에 의거 효율적인 파라미터 최적화 알고리즘을 제시하였다. 전력계통에서는 모든 교란에 대해서 여자기, 조속기 등의 동특성 수행상태를 비선형 방정식으로 나타낼 수 있으며 교란이 미소할 시 비선형 미분 방정식을 선형화한 후 계통의 파라미터로써 시스템 행렬을 구성하여 상태방정식으로 나타낼 수 있어 계통운전에 대한 목적함수는 최적 제어 가정하에서 파라미터와 초기상태의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 발전기 제어부 파라미터에 대한 목적함수의 감도계산이 가능하며 이에 의거하여 파라미터 최적값을 체계적으로 탐색하는 효율적인 파라미터 최적화 알고리즘을 제시하였다.

Abstract- This paper describes an efficient parameter optimization algorithm by calculating sensitivity function for power system stabilization. In power system, the dynamic performance of exciter, governor etc. following a disturbance can be presented by a nonlinear differential equation. Since a nonlinear equation can be linearized for small disturbances, the state equation is expressed by a system matrix with system parameters. The objective function for power system operation will be related to the system parameter and the initial state at the optimal control condition for control or stabilization. The object function sensitivity to the system parameter can be considered to be effective in selecting the optimal parameter of the system.

*正 會 員 : 韓國電力技術研究院 研究員 · 工博
 **正 會 員 : 延世大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博
 接受日字 : 1990年 2月 16日
 1次修正 : 1990年 7月 25日

1. 서 론

전력 계통에서는 갑작스런 부하 변화나 발전기,

송전 선로에서의 고장 발생으로 인하여 계통 교란이 빈번히 발생하여도 전력 계통 운전은 이러한 외란을 극복하고 수요에 따른 전력 공급을 원활히 수행할 수 있어야 하므로 전력 계통의 안정도 문제는 계통의 계획 및 운용에 있어서 중요한 과제로 대두되고 있다.

계통이 정상 운전 작은 교란이 발생하여도 제어 장치의 동작으로 진동의 신속한 감쇠가 계통 안정도 향상을 위한 문제로 제기되는 동태 안정도에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다.

Hanson[1] 등은 전력 계통의 동특성 응답을 개선하기 위하여 조속기, 전압 조정기 등 발전기 제어부의 이득상수를 조정하여 계통의 안정도 향상에 기여를 하였다, 시행착오법으로 이득상수를 구하여 발전기를 제어하였기에 체계적인 접근방법을 제시하지 못하였다.

Demello[2]는 전력 계통 안정화 장치(power system stabilizer ; pss)의 새로운 개념 도입으로 안정도 문제의 체계적인 해를 구하는 방법을 제시하였으나 이는 1기 무한 모션 계통에서의 접근방법이었다.

그 후 Fleming, et al[3], Gooi, et al[4], Lefebvre[5] 등은 전력 계통 안정화 장치의 최적 설치 후보지 선정과 최적 파라미터 선정 문제에 관한 연구가 활발히 진행되었으나 Doi, et al[6], Abdalla[7] 등은 다기 계통에서 pss에 관한 종합설계 이론을 확립하였다.

Vournous[8] 등은 제어부 변수에 대한 고유치 감도를 계산한 후 최적의 제어기를 설계하여 계통의 안정화를 시도하였으나 이는 최적 파라미터를 구하기 위하여 경사법을 사용하였기에 국부 최적 파라미터를 얻는데 그쳤다.

본 연구에서는 동태 안정도를 증진시키기 위하여 기존 방법과는 달리 각 발전기 제어부 파라미터(여자기, 조속기의 이득상수 및 시정수)에 대한 목적 함수 감도를 계산하여 최소의 감도를 나타낼 때의 파라미터를 최적값으로 선정하는 방법을 제시한다.

제시된 방법을 간단한 모델에 적용하기 위하여 1기 무한 계통에서 제어기의 최적 파라미터를 구하고, 실제 계통에 적용 가능성을 검토하기 위하여 다기계통 모델에서 제어기의 최적 파라미터를 구한다. 이때 모델의 비선형 상태방정식을 운전점에서 선형화하여 고유치를 계산하고 이로부터 계통의 동태 안정도 향상 정도를 판정하는 방법을 제시한다.

2. 목적 함수 감도를 이용한 최적 파라미터 선정

일반적으로 제어계통에서의 목적 함수는 주어진 프랜트의 수학적 모델에서 시스템 파라미터 제어 변수가 변화하면 이에 따라 변하게 된다. 계획 제어 계통에서 제어 법칙의 변화는 제어기 파라미터의 변화로 볼 수 있다. 최적화는 제어변수로 목적 함수를 최소화함으로써 이루어지기 때문에 제어기 파라미터 변화에 대한 목적 함수 감도가 최소값을 가져야 한다. 그러므로 목적 함수 감도를 통하여 최적 파라미터를 선정하면 미소 교란시 크게 영향을 받지 않는 시스템을 설계할 수 있다.

2.1 목적 함수 감도 정의

제어 계통의 최적 파라미터 선정을 위한 이론 고찰을 위하여 다음 식으로 주어지는 일반적인 제어 시스템을 고려 한다. [9], [10]

$$\dot{x}(t) = f(x(t), \alpha, t, u(t)) \quad (1)$$

여기서 x : n 차원의 상태 벡터

u : m 차원의 제어 벡터

α : 시스템 파라미터

위의 제어 계통에 대한 목적 함수는 일반적으로 다음과 같이 주어진다.

$$J = G[x(t_f), t_f] + \int_{t_0}^{t_f} L(x, t, \alpha, u) dt \quad (2)$$

여기서 $G = 1/2 x^T(t_f) S x(t_f)$

$L = 1/2 (x^T Q x + u^T R U)$

S, Q : 대칭 준정치 하중 행렬

R : 대칭 정치 하중 행렬

위 계통에서 파라미터 α 가 주어지면 식(2)의 목적 함수는 시스템의 초기상태 x_0 , 파라미터 α 및 시스템 동작 구간 $[t_0, t_f]$ 에 의하여 결정되며, 이때 목적함수는 $J(x_0, t_0, t_f, \alpha, u_0)$ 로 나타낼 수 있다.

그러나 목적함수 계산을 간편하게 하기 위해서 목적함수의 파라미터를 줄이는 것이 바람직하며 본 논문에서는 최종시간을 $t_f = \infty$ 로 취함으로써 다음 규약을 사용하고자 한다. 즉 $J(x_0, t, \alpha, u)$ 는 파라미터 α 와 입력 u 가 주어졌을 때 초기치 x_0 를 시작하여 시구간 $[t, \infty]$ 에서 목적함수를 나타낸다.

$$J(x, t, \alpha, u) = G(x(\infty), \infty) + \int_t^{\infty} L(x, t, \alpha, u) dt \quad (3)$$

위의 정의를 사용하면 파라미터 변화량에 대한 목적함수의 변화는 다음과 같다.

$$\Delta J = J(x_o, t_o, \alpha_o, \dot{u}_o) - J(x_o, t_o, \alpha, u_o) \tag{4}$$

$$\Delta J = \frac{\partial J}{\partial \alpha} \Delta \alpha = J_\alpha \Delta \alpha \tag{5}$$

윗 식으로 부터 목적 함수 감도는 다음과 같다.

$$J_\alpha = \frac{\Delta J}{\Delta \alpha} \tag{6}$$

2.2 최적 파라미터 선정

목적 함수의 감도는 최적화 문제를 해결하기 위하여 해밀턴 - 자코비 방정식에 의해서 계산될 수 있다. [10], [11]

식 (3)을 시간 t 로 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{j}(x, t, \alpha, u) = -L(x, t, \alpha, u) \tag{7}$$

한편 식(7)은 x, t 의 함수이므로 다음 식으로 나타낸다.

$$\dot{j} = \frac{\partial J}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial J}{\partial t} \tag{8}$$

식(7)과 식(8)은 동식이므로 다음과 같다.

$$\frac{\partial J}{\partial x} \dot{x} + \frac{\partial J}{\partial t} = -L(x, t, \alpha, u) \tag{9}$$

$$\frac{\partial J}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} \dot{x} - L(x, t, \alpha, u) \tag{10}$$

식(10)에서 우변이 Hamiltonian함수로 정의된다. 즉

$$H(x, \frac{\partial J}{\partial x}, \alpha, u, t) = \frac{\partial J}{\partial x} \dot{x} + L(x, t, \alpha, u) \tag{11}$$

식(6)에서 정의한 목적 함수 감도를 이용하고 식(11)을 α 로 편미분하면 다음과 같은 Hamilton-Jacobian를 얻는다.

$$\begin{aligned} H_{\alpha_k}(x, \frac{\partial J}{\partial x}, \alpha, u, t) &= \frac{\partial}{\partial \alpha_k} \left(\frac{\partial J}{\partial x} \right) \dot{x} \\ &+ \frac{\partial J}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \alpha_k} \dot{x} + \frac{\partial L}{\partial \alpha_k}(x, t, \alpha, u) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial J}{\partial \alpha_k} \right) f(x, t, \alpha, u) \\ &+ \frac{\partial J}{\partial x} \frac{\partial f(x, t, \alpha, u)}{\partial \alpha_k} \\ &+ \frac{\partial L(x, t, \alpha, u)}{\partial \alpha_k} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} J_{\alpha_k}(x, t, \alpha, u) f(x, t, \alpha, u) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{\partial J}{\partial x} \frac{\partial f(x, t, \alpha, u)}{\partial \alpha_k} \\ &+ \frac{\partial L(x, t, \alpha, u)}{\partial \alpha_k} \end{aligned} \tag{12}$$

식(10)와 식(12)으로 부터 Hamilton-Jacobian을 사용함으로써 목적함수 감도에 관한 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\partial J_{\alpha_k}}{\partial t} = -H_{\alpha_k}(x, \frac{\partial J_{\alpha_k}}{\partial x}, \alpha, u, t) \tag{13}$$

목적 함수 감도를 구하기 위하여 식(13)의 복잡한 Hamilton-Jacobian 방정식을 풀어야 하므로, 이 문제점을 해결하기 위하여 다음과 같은 선형 상태 방정식을 갖는 프랜트를 고려해 보자.

$$\dot{x}(t) = A(\alpha)x + B(\alpha)u \tag{14}$$

이 때에 목적 함수는 다음과 같다.

$$J = 1/2 x^T(t_f) S x(t_f) + 1/2 \int_t^{t_f} [x(0)^T Q x(0) + u^T(0) R u(0)] dt \tag{15}$$

먼저 시간 t_o 에서 파라미터 α 는 α_o 이므로 프랜트 행렬 $A(\alpha_o) = A_o, B(\alpha_o) = B_o$ 라 하자. 최적 제어 벡터를 갖기 위하여 다음과 같은 Riccati 방정식을 얻는다.

$$\dot{K}_o + A_o^T K_o + K_o A_o - K_o B_o R_o^{-1} B_o^T K_o + Q_o = 0 \tag{16}$$

식(16)에서 K_o 를 구하면 제어벡터는 다음과 같다.

$$U_o^* = -R_o^{-1} B_o^T K_o x \tag{17}$$

그러므로 α_o 에서 목적 함수는 다음과 같다.

$$J_o = 1/2 x^T(0) K_o x(0) \tag{18}$$

다음 파라미터 α_o 가 $\Delta \alpha$ 만큼 변화하면 $\alpha = \alpha_o + \Delta \alpha$ 이며 행렬 A 은 $A(\alpha_o)$ 에서 $A(\alpha_k)$ 로, 행렬 B 도 $B(\alpha_o)$ 에서 $B(\alpha_k)$ 로 변한다. 제한 이득 상수 K 로 시스템의 상태 방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A(\alpha_k) - B(\alpha_k)R^{-1}B^TK)x \\ &= Fx \\ &= f(x, t, \alpha, u) \end{aligned} \tag{19}$$

윗식에서 시구간 $[t_o, t_f]$ 을 $[t, \infty]$ 를 취하고 변환된 파라미터로 목적함수를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J &= 1/2 \int_t^{\infty} (x^T Q x + U^T R U) dt \\ &= 1/2 \int_t^{\infty} (x^T \bar{Q} x) dt \end{aligned} \tag{20}$$

$$\text{단 } \tilde{Q} = KBR^{-1}RR^{-1}B^TK + Q$$

여기서 위의 목적 함수의 적분결과가 다음과 같이 표시될 수 있다고 가정하자 [11]

$$J(x, t, \alpha, u) = 1/2x^TKx \quad (21)$$

최적 제어 $u^*(t)$ 를 구하기 위한 다음 Hamilton-Jacobi-Bellman 방정식

$$0 = J_t^*(x(t), t) + H(x(t), u^*(x(t), J_x^*, t), J_x^*, t) \text{ 과}$$

식(14)에서 다음 식을 얻는다.

$$J_t^* + 1/2x^TQx - 1/2J_x^{*T}BR^{-1}B^TJ_x^* + J_x^{*T}AX = 0 \quad (22)$$

식(19)과 식(22)에서 특별한 형태의 Riccati 방정식을 얻는다.

$$\dot{K} + KA + A^TK + \tilde{Q} = 0 \quad (23)$$

여기서 $\tilde{Q} = KBR^{-1}RR^{-1}B^TK + Q$

식(12), 식(19)-식(23)로 부터 다음 같이 Hamilton-Jacobi 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_{\alpha_k}}{\partial t} &= -H_{\alpha_k} \\ &= -\frac{\partial J_{\alpha_k}}{\partial x}Fx - \frac{1}{2}x^T \left[\frac{\partial F^T}{\partial \alpha_k}K + K\frac{\partial F}{\partial \alpha_k} + \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial \alpha_k} \right] x \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 식(24)의 해를 Lyapunov 해의 형태로 다음과 같이 가정한다. [12]

$$J_{\alpha_k} = 1/2x^TP_{\alpha_k}x \quad (25)$$

식(25)을 식(24)에 대입하면 P 는 다음 식에서 해를 찾을 수 있다.

$$\dot{P}_{\alpha_k} + F^TP_{\alpha_k} + P_{\alpha_k}F + Q^* = 0 \quad (26)$$

여기서

$$Q^* = \frac{\partial F^T}{\partial \alpha_k}K + K\frac{\partial F}{\partial \alpha_k} + \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial \alpha_k} \quad (27)$$

식(25)는 파라미터 변화에 대한 목적 함수의 변화를 나타내므로 이 감도 값이 최소값을 가질 때 식(26)에서 구한 파라미터값으로써 최적 파라미터 값을 설정한다. 즉 파라미터 최적화 문제는 파라미터 함수인 목적함수를 최소로 하는 파라미터 값을 찾는 데 있으므로 목적함수 감도 J_{α_k} 의 값이 영이거나 영에 가까운 값을 가지면 목적함수가 최소 값을 갖기 위한 필요조건을 만족하므로 식(25)에서 J_{α_k} 가 영이 되는 조건을 만족시킬 수 있는 α_k 를 식(26)에 의거 반복계산하는 알고리즘을 개발하였다.

위에서 개발된 알고리즘의 적용방법은 다음과 같다. 먼저 구하고자 하는 파라미터 α 가 k 개의 파라미터를 개별적으로 구한다. 계산된 k 개의 최적 파라미터를 이용하여 처음부터 다시 계산한 결과, k 개의 파라미터 α 가 모두 최적일때 $\alpha_k(k=1, \dots, n)$ 를 최적파라미터로 선정하는 방법이 있다. 이는 개별적으로 파라미터를 구하면 구하고자 하는 파라미터가 적을 경우에는 파라미터간 연계성이 적으나 파라미터 수가 많고 시스템이 큰 경우에는 구하고자 하는 파라미터만의 증분으로 계산되므로 국부최적파라미터일 수도 있고, 각 파라미터 계산 시마다 식(21)과 (25)을 계산하여야 하므로 계산 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 개선하기 위하여 각 스텝마다 구하고자 하는 전 파라미터의 증분을 동시에 주어 계산하는 방법이 있다.

이는 각 파라미터 증분은 m_k, J_{α_k} 로서 앞과정에서 구한 감도와 임의의 상수 m_k 값을 조절하여 증분을 주어 계산하는 방법이다. 여기서 m_k 을 미소값으로 주면 증분 $\Delta\alpha_k$ 값이 작은 값을 갖게 되어, 정확한 최적파라미터를 구할 수 있으나 수렴이 늦어지므로 계산시간을 많이 요한다. 그러나 m_k 를 큰 값으로 주면 수렴은 좋으나 구하고자 하는 파라미터가 값이 상당히 증가되어 이득상수는 시스템 특정범주외의 값을 갖게 되거나 시정수는 음의 값을 나타낼 수도 있다. 그러므로 파라미터 특성에 맞는 제약조건과 계산된 J_{α_k} 을 보고 이 값에 가까운 값의 역수로 m_k 정하여 증분을 계산하면 구하고자 하는 파라미터 $\alpha_k(k=1, \dots, n)$ 간의 연계성을 파악할 수 있고 또한 계산시간도 줄일 수 있으므로 본 논문에서는 후자의 경우를 이용하고자 한다.

이에 대한 최적 파라미터 계산 알고리즘은 다음과 같다.

- i) 구하고자 하는 파라미터 초기치 $\alpha_{10}, \alpha_{20}, \dots, \alpha_{k0}$ 를 $\alpha_{11} = \alpha_{10}, \alpha_{k1} = \alpha_{k0}$ 로 정한다.
- ii) 식(19)에서 A, B 를 구한다.
- iii) Riccati 방정식에서 K 를 구한다.
- iv) 식(27)에서 Q^* 를 구하여 식(26)에서 P_{α_k} 를 구한다. ($k=1, \dots, n$)
- v) P_{α_k} 를 식(25)에 대입하며 J_{α_k} 를 계산한다. 만약 모든 $J_{\alpha_k} < \epsilon$ 이면 α 값을 출력하고 계산을 종료하며, 그렇지 않으면 vi) 과정으로 가서 증분 $\Delta\alpha$ 를 계산한다.
- vi) 스텝 v)에서 $\Delta\alpha_k^{(n)} = m_k^{(n)}J_{\alpha_k}^{(n-1)}$ 로 하여 ($n-1$)번째에서 구한 감도 J_{α_k} 값과 임의의 스칼라 양 m_k 로서 α_k 값이 효과적인 수렴성을 갖도록 m_k 를 조절하여 각 파라미터 증분

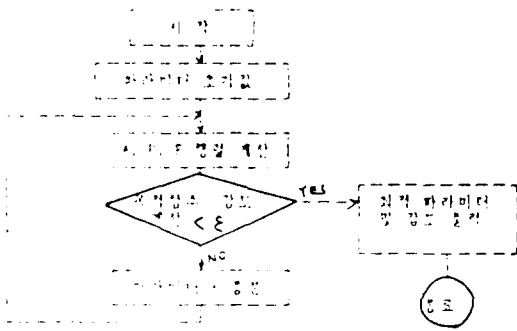


그림 1 파라미터 최적화를 위한 흐름도
 Fig. 1 The flow chart for parameter optimization

$\Delta\alpha_k$ 를 계산한 후 $\alpha_k = \alpha_{k0} + \Delta\alpha_k (k=1, \dots, n)$ 계산하여 i) ~ v) 과정을 반복수행하고 전파라미터의 수렴성을 동시에 관찰한다. 이에 대한 흐름도는 그림 1과 같다.

이와 같이 제시된 알고리즘을 전력계통에 적용하기 위한 방안을 언급한다. 계통에서 부하를 이상적으로 본다면 순간적으로 발생하는 미소동요로 인한 전압과 주파수의 변동은 허용범위내에서 유지되어야 하며, 또한 큰 사고 발생시에도 발전기는 동기화를 회복할 수 있어야 한다. 이러한 모든 교란에 대해서 전력 계통의 동특성 수행 상태는 비선형 미분방정 식으로 나타낼 수 있다. 그러나 교란의 크기가 미소할시 식(1)과 같은 비선형 미분 방정식을 선형화한 후 계통의 파라미터로써 시스템 행렬을 구성하여 상태 방정식으로 나타낼 수 있으므로 계통의 파라미터가 포함된 목적함수를 선정할수 있다. 이때 파라미터 값이 변하면 시스템 행렬이 변하고 또한 시스템 고유치도 변하게 된다. 그러므로 파라미터 변화를 통하여 계통의 응답특성을 개선할 수 있으므로 전력계통의 수학적 모델을 선형화된 상태방정식으로 나타내어 제시된 알고리즘을 적용하면 제어기의 파라미터 최적화가 전력계통 안정화에 효과적인 한 방법임을 입증하고자 한다.

3. 안정도 해석을 위한 발전기 수학적 모델

다기 계통에 대한 안정도 해석은 발전기의 돌극성을 고려할 때 직축회축에 대한 전류 및 리액턴스를 고려해야 하므로 티보-발전기계를 나타내는 수식이 복잡하게 된다. 이때 발전기의 출력, 여자 계통등은 비선형을 포함하고 있으므로, 계통

시뮬레이션을 정밀하게 할 것인지 거시적 관점에서 근사적으로 할 것인지에 따라 다양한 모델이 개발되어 왔다.

본 연구에서는 거시적 관점에서 발전기의 돌극성을 고려할 수 있는 주파수 제어계의 조속기-터빈 계통, 전압제어계의 여자기 계통 및 동기 발전기 계통등으로 구성하며, 이를 종합하면 다음과 같은 블록선도를 얻을 수 있다 [13~15].

본 연구에서 모델계통의 블록선도로부터 상태변수를 발전기 유기전압 E_q' , 각속도 ω , 부하각 δ , 변성기 및 정류기 전압 V_R , 여자기 전압 E_{fd} , 여자기 진동방지회로 전압 V_{gff} , 증폭기 전압 V_A , 기계 입력 P_m , 조속기 벨브위치 X_{gv} 로 정한다. 또한 제어 입력을 기준 전압 Q_v 와 조속기의 변속기 위치 P_C 이며, 부하변화는 P_e 로 상태 방정식을 유도하면 다음과 같다. (단위 : PU)

$$\dot{E}_q' = -(1/K_3 T_{do}')E_q' - (K_4/T_{do}')\delta + (1/T_{do}')E_{fd} \tag{28}$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H}(P_m - D\omega) - \frac{1}{2H}P_e \tag{29}$$

$$\delta = 2\pi f_0 \omega \tag{30}$$

$$\dot{V}_R = -\frac{K_6 K_R}{T_R}E_q' + \frac{K_5 K_R}{T_R}\delta - \frac{1}{T_R}V_R \tag{31}$$

$$\dot{V}_{gff} = -\frac{1}{T_F}V_{gff} + \frac{K_F}{T_F T_E}V_A - \frac{K_F(S_E + K_E)}{T_F T_E}E_{fd} \tag{32}$$

$$\dot{V}_A = (K_A/T_A)V_R - (K_A/T_A)V_{gff} - (1/T_A)V_A + (K_A/T_A)Q_v \tag{33}$$

$$\dot{E}_{fd} = (1/T_E)V_A - [(S_E + K_E)/T_E]E_{fd} \tag{34}$$

$$\dot{P}_m = -(1/T_t)P_m + (1/T_t)X_{gv} \tag{35}$$

$$\dot{X}_{gv} = -\frac{1}{R}X_{gv} - \frac{1}{T_{gv}}X_{gv} + \frac{1}{T_{gv}}P_e \tag{36}$$

4. 동태안정도 해석 알고리즘

서론에서 언급한 바와같이 동태 안정도라 함은 계통의 지정된 운전점에서 제어 계통의 동특성이 계통에 항시 발생하는 미소 교란에 대하여 항상 안정성을 유지할 수 있는지를 판정하는 것이다. 즉, 계통이 동적 불안정 상태에 있다면 이것은 운전점이 불안전 평형점으로 되기 때문에 계통에 조그만 교란이 발생하였다 하면 교란의 크기가 아무리 작을지라도 계통은 불안정 상태로 가게 되는 것을 의미하며, 반대로 계통이 동적 안정 상태에 있다면 이것은 운전점이 안정 평형점으로 일정 크기 이하의 미소교란에 대해서는 계통이 항상 안정

하게 운전될 수 있음을 의미한다. 따라서 동태안정도는 운전점 부근에서 미소 변화를 고찰함으로써 해석될 수 있으며, 다음의 선형화 기법에 의한 안정도 판정법이 사용되고 있다. [16], [17].

계통의 상태 방정식이 비선형 방정식으로 다음과 같이 주어진다 고 하자

$$\dot{x} = f(x, u, v, t) \quad (37)$$

여기서 x : 상태 벡터

u : 제어 벡터

v : 교란 벡터

그리고, 운전점이 x^0, u^0 이고 평형을 이루었다고 하면,

$$\dot{x} = f(x^0, u^0, v, t) \text{이므로}$$

운전점 부근에서 다음과 같이 선형화 할 수 있다.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u + \Gamma \Delta v \quad (38)$$

여기서 $\Delta x = x - x^0$

$$\Delta u = u - u^0$$

$$A(t) = \frac{\partial f(x, u, v, t)}{\partial x} \quad (39)$$

$$B(t) = \frac{\partial f(x, u, v, t)}{\partial u} \quad (40)$$

$$\Gamma(t) = \frac{\partial f(x, u, v, t)}{\partial v} \quad (41)$$

전력 계통 동태 안정도에서는 제어 대상 계통의 동특성을 고려해야 하므로 제어 입력 $u(t)$ 는 다음과 같이 최적제어를 한다고 가정한다.

$$U(t) = K(t) x(t) \quad (42)$$

여기서 K : 제환 이득

한편 전력 계통에서는 시스템 파라미터를 시불변으로 볼 수 있으며, 식 (42)을 사용하면, 식 (38)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta \dot{x} = (A + BK) \Delta x + \Gamma \Delta v \quad (43)$$

즉, 동태 안정도는 식(43)의 미소 변화 상태 방정식이 안정된 특성을 갖는가를 판정하는 문제로 귀착되며, 이것은 $(A+BK)$ 의 고유치에 의하여 안정도 판정이 가능하다.

이상을 다기 계통의 동태 안정도 판정 문제에 적용하기 위하여 식 (43)에 주어진 발전기에 대한 상태 방정식을 운전점 부근에서 선형화하면, 다음과 같은 상태 변수 미소 변화에 대한 방정식을 얻는다.

$$\Delta \dot{x}_i = A_i \Delta x_i + B_i \Delta u_i + \Gamma \Delta P_{e_i} \quad (44)$$

$$\text{여기서 } \Delta x_i = [\Delta E_{q_i}, W_i, \dots, \Delta P_{m_i}, \Delta x_{gvi}] \quad (45)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

$$\Delta u_i = [\Delta Q_{v_i}, \Delta P_{c_i}] \quad (46)$$

$$P_{e_i} = P_{e_i}[E_{q_i}^0, \delta^0] - P_{e_i}[E_{q_i}^0, \delta^0] \quad (47)$$

그러면, 다기계통에 대한 선형화 상태 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{x} = \hat{A}x + \Gamma V \quad (48)$$

여기서 $x = [x_1^T, x_2^T, \dots, x_N^T]$

식(44)와 식(45)을 이용하면 \hat{A} 행렬을 구성할 수 있고 \hat{A} 의 차원은 식(28)~(36)의 상태 방정식으로 부터 $(9N) \times (9N)$ 이 된다. 행렬 \hat{A} 에 대한 고유치는 IMSL프로그램을 이용하여 구하였으며 고유치 실수부를 관찰하는 모델 계통의 동태 안정

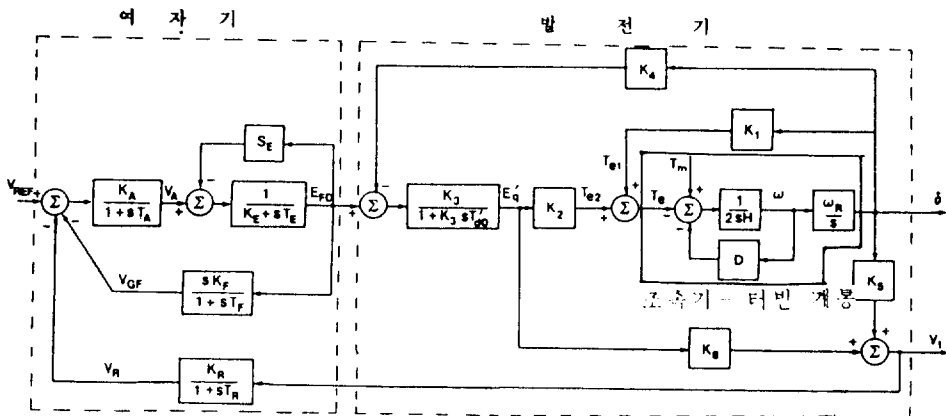


그림 2 발전기의 블록선도
Fig. 2 Block diagram of generator

도 분석 결과는 다음 장에서 언급한다.

5. 컴퓨터 해석 및 결과 고찰

목적함수 감도를 이용한 발전기 제어기의 최적 파라미터 선정으로 전력계통 안정화 해석을 위하여 그림 3과 같이 부하 모션전압과 위상각이 일정한 1기 무한 모선의 간단한 모델과 그림 4와 같은 실제계의 적용 가능성을 검토하기 위한 다기 계통 모델을 통하여 검토한다.

1기 무한 모션계통에서는 제어기인 조속기의 최적 파라미터 값을, 다기계통에서는 여자기와 조속기의 최적 파라미터를 구하여 각 계통 모델에서의 동태안정도 증진효과를 검토한다.

5.1 1기 무한 모션 계통

그림 3과 같이 1기 무한 모선의 모의 전력 계통을 구성하여 목적함수 감도에 의한 최적 파라미터

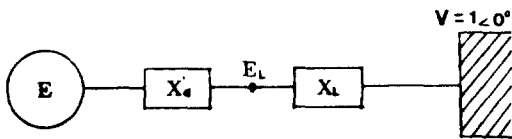


그림 3 1기 무한 모션 계통도
Fig. 3 A schematic diagram of the one machine -infinite bus power system

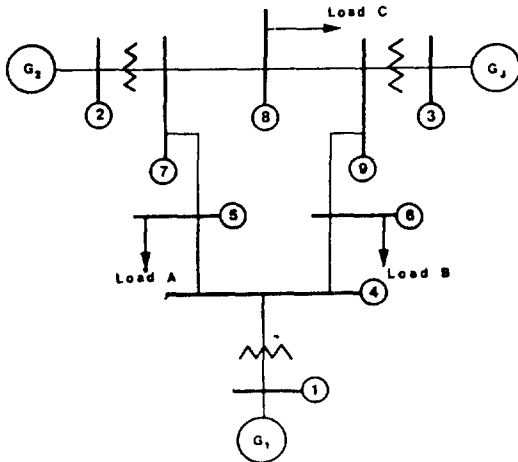


그림 4 9-모션 계통모델
Fig. 4 9-bus system model

를 구하고 계통의 동태 안정도 향상 효과를 검토한다.

상기 모델로 부터 운전점에서 선형화된 계통의 상태 방정식은 발전기전압(E_q'), 부하각(δ), 각속도(w), 터빈 및 조속기를 상태 변수로 설정하여 시스템을 구성한다. [부록 1참조]

여기서 계산을 간단하게 하기 위하여 발전기와 전력선의 저항은 무시하였으며, 이때 발전기 및 계통의 각 파라미터는 표 1과 같다. [13].

식(20)에서 목적함수를 구성하고 식(25)-식(27)로 부터 목적함수 감도를 계산하여 감도가 최소일 때 제어기인 조속기 시정수와 이득상수의 최적값을 구하면 표 2와 같다. 이 최적파라미터를 구하는 과정 중 리카티 방정식 해는 고유벡터를 이용

표 1 계통 파라미터

Table 1 System parameter

파라미터명	파라미터값	파라미터명	파라미터값
H	0.02pu	Tgv	1.0sec
D	0.02pu	Reg	1.0pu
Xd	0.6 pu	Tt	0.2sec
Xq	0.3 pu	V	1.0pu
Xl	0.6 pu	Ang	0.0rad
Td	5.0 pu	Eo	1.6667pu
$E1$	1.0 pu	δo	1.286rad
$\delta 1$	0.6431 rad		

표 2 1기 계통의 제어기 파라미터 값 및 감도

Table 2 One-machine system controller parameter value and sensitivity

파라미터	초기치	최적치	감도
시정수 (Tgv)	1.0	2.0075	$4.894733 \times E-3$
이득상수 (Reg)	1.0	5.5000	$4.736990 \times E-4$

표 3 시스템 행렬 고유치

Table 3 System matrix eigenvalues

초기치시 고유치	최적치시 고유치
$\lambda_1 = -.32303E+01 + j .00000E+00$	$\lambda_1 = -.20448E+01 + j .00000E+00$
$\lambda_2 = -.57921E+00 + j .00000E+00$	$\lambda_2 = -.47295E+00 + j .00000E+00$
$\lambda_3 = -.21651E+00 + j .00000E+00$	$\lambda_3 = -.22475E+00 + j .00000E+00$
$\lambda_4 = .38905E+00 - j .67443E+01$	$\lambda_4 = -.27068E-02 - j .65214E+01$
$\lambda_5 = .38905E+00 + j .67443E+01$	$\lambda_5 = -.27068E-02 + j .65214E+01$

한 matrix quadratic solution의 알고리즘을 이용하였으며 Lyapunov방정식 해는 Bingulac의 해법을 이용하였다. [18]

제어기 파라미터가 초기치일 때와 제시된 알고리즘으로 부터 구한 최적치일 때의 시스템 고유치는 표 3과 같다. 이는 IMSL 프로그램 EVCGR Subroutine을 이용하였다.

여기서 초기치일 때는 시스템 고유치의 2개의 양의 실수부를 나타내나, 최적파라미터일 때는 고유치가 모두 음이 되었다. 그러므로 목적 함수 감도를 통한 제어기의 최적 파라미터 설정은 간략한 모델인 1기 무한 계통에서 계통의 안정도를 크게 향상시켰으며, 이를 실제계통 적용가능성을 검토하기 위하여 다기 계통 모델을 통하여 고찰한다.

5.2 다기 계통

전력 계통에서 안정도 향상 효과를 고찰하기 위해서는 실제계통을 직접 모델링하여 컴퓨터 시뮬레이션하면 가장 정확한 결론을 얻을 수 있을 것이다. 그러나 다기 계통 안정도 시뮬레이션은 발전

기 수가 증가하면 계산시간이 크게 증가하여 시뮬레이션 결과 분석이 복잡하기 때문에 본연구에서는 다기 계통에 대한 안정도를 비교적 간단명료하게 파악할 수 있도록 3기 계통에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 모델 계통으로는 각각 특성이 다른 3개의 발전기로 구성된 그림 4와 같은 3기 계통 모델을 선정하였다.

이들 3개의 발전기 중 발전기 -1(G_1)은 돌극형의 수차 발전기이고, 발전기 -2, 3(G_2, G_3)은 비돌극형의 터빈 발전기이며, 3개의 부하 모선(부하 A, B, C)을 갖는 9개 모선의 모델 계통이다.

계통 해석에 필요한 자료로서 각 발전기의 시스템 파라미터 값은 부록 실제계통과 Aderson 이 제시한 데이터를 이용하였으며 시스템 베이스(100 MVA)로 변환시킨 값으로서 단위는 [PU]이다. [13], [19]

5.2.1 발전기 제어부의 최적 파라미터 값 선정

계통의 최적화는 제어 변수로 목적함수를 최소화함으로써 이루어지기 때문에 제어기 파라미터

표 4 발전기-1(G_1)의 파라미터 값
Table 4 The parameter value of the generator-1

파라미터명	적요	초기치	최적치	감도
여자기 이득상수 (Ke)		-0.020	$3.0000E-1$	$9.2270E-8$
여자기 시정수 (Te)		0.100	$1.0450E-1$	$9.1979E-7$
조속기 시정수 (Tgv)		0.830	$3.5500E-1$	$2.8113E-14$
조속기 이득상수 (Reg)		0.050	$6.7500E-2$	$9.8893E-12$

표 5 발전기-2(G_2)의 파라미터 값
Table 5 The parameter value of the generator-2

파라미터명	적요	초기치	최적치	감도
여자기 이득상수 (Ke)		-0.0505	$3.4495E+0$	$1.2862E-8$
여자기 시정수 (Te)		0.5600	$9.9999E-3$	$1.1745E-6$
조속기 이득상수 (Reg)		0.0500	$5.0000E-3$	$2.5102E-6$
조속기 시정수 (Tgv)		0.0830	$3.0000E-3$	$2.5084E-7$

표 6 발전기-3(G_3)의 파라미터 값
Table 6 The parameter value of the generator-3

파라미터명	적요	초기치	최적치	감도
여자기 이득상수 (Ke)		-0.0601	$2.1890E+0$	$1.1881E-6$
여자기 시정수 (Te)		0.6700	$5.2000E-1$	$9.7574E-6$
조속기 이득상수 (Reg)		0.0500	$5.0000E-3$	$2.0697E-6$
조속기 시정수 (Tgv)		0.8300	$3.0000E-3$	$1.2000E-7$

변화에 대한 목적함수 감도가 최소값을 가져야 한다. 그러므로 발전기 제어부 즉 여자기, 조속기의 이득상수, 시정수에 대한 목적함수 감도와 파라미터 값을 얻을 수 있으며 이때 목적함수 감도가 최소값을 가질 때 파라미터 값은 표 4, 5, 6과 같다.

위와 같이 선정된 조속기와 여자기의 최적 파라미터가 불안정한 계통의 진동 모드를 안정하게 하여 대기 계통에서의 동태 안정도가 향상되어 전력 계통 안정화에 기여되었는지를 다음 절에서 검토한다.

5.2.2 여자 계통을 무시한 간략화된 모델에서의 동태안정도 시뮬레이션

동태 안정도를 해석하기 위해서는 시스템의 선형화 상태 방정식(48)의 계수 행렬 A의 고유치를 계산해야 하며, 여기서 행렬 A의 차원이 커지면 고유치의 계산이 매우 복잡하고 어려워진다.

그림 4에 주어진 3기 모델계통에서 여자 계통을 무시함으로써 계통을 최대한 간략화시킨 모델에 대한 시뮬레이션과 여자계통을 고려한 모델에 대한 시뮬레이션으로 나누어 행하였으며 각 경우에 대하여 초기치의 파라미터 값을 가질 때의 동태 안정도와 최적 파라미터값을 가질 때의 동태 안정도를 비교, 분석하였다.

먼저 발전기에서 여자 계통을 무시하고 간략화된 모델에서 초기치일 때와 최적치일 때의 행렬 A₀, A를 구성하여 각 행렬에 대한 고유치를 계산함으로써 동태 안정도 향상 효과를 분석하였다. 이때의 각 행렬의 차원이 (15×15)으로써 표 7과 같이 고유치를 나타낸다.

이는 불안정 운전점에 대한 선형화 상태 방정식의 행렬 A₀의 고유치로 영을 갖는 고유치가 존재하여 모델계통이 불안정함을 나타냈다.

그러나 최적 파라미터 값일 경우 A에 대한 고유치는 다음의 표 8과 같으며 이 때는 모든 고유치가 음의 실수부를 나타내어 계통이 안정화 되는 것을 보임으로써 안정도를 향상시킬수 있었다.

5.2.3 여자 계통을 고려한 동태 안정도 시뮬레이션

여자계통을 고려한 경우에 대해서는 계통이 복잡한 관계로 불안정 시스템을 안정화 시킬 수 있는 예를 실제로 들기가 곤란하다. 따라서 최적 제환 이득을 통한 시스템은 항상 동적 안정도를 유지할 수 있게 설계되어 있기 때문에 초기치 파라미터를 갖는 운전점에서 행렬 A₀의 고유치와 최적 파라미터를 갖는 A의 고유치를 비교하였다.

안정 운전점을 모델 계통의 정상상태로 취하고

표 7 초기치 파라미터일 때 행렬 A₀의 고유치

Table 7 The matrix A₀ eigenvalue at initial parameter

고	유	치
$\lambda_1 = -12.3816 + j$		$.0000$
$\lambda_3 = -3.0106 + j$		$.0000$
$\lambda_5 = -.7951 + j$		1.6907
$\lambda_7 = -.7951 + j$		1.6907
$\lambda_9 = -.3309 + j$		$.0000$
$\lambda_{11} = -.0591 - j$		1.4002
$\lambda_{13} = .0000 + j$		$.0000$
$\lambda_{15} = .0000 + j$		$.0000$
		$\lambda_2 = -12.3816 + j$
		$.0000$
		$\lambda_4 = -.7951 - j$
		1.6907
		$\lambda_6 = -.7951 - j$
		1.6907
		$\lambda_8 = -.3701 + j$
		$.0000$
		$\lambda_{10} = .1331 + j$
		$.0000$
		$\lambda_{12} = .0591 + j$
		1.4002
		$\lambda_{14} = .0000 + j$
		$.0000$

표 8 최적 파라미터시 행렬 A의 고유치

Table 8 The matrix A eigenvalue at optimal parameter

고	유	치
$\lambda_1 = -372.7584 + j$		$.0000$
$\lambda_3 = -3.1444 - j$		$.8001$
$\lambda_5 = -1.6920 - j$		5.4693
$\lambda_7 = -1.6915 - j$		5.4705
$\lambda_9 = -1.1751 - j$		2.5834
$\lambda_{11} = .9376 + j$		$.0000$
$\lambda_{13} = .3702 + j$		$.0000$
$\lambda_{15} = .1331 + j$		$.0000$
		$\lambda_2 = -372.7557 + j$
		$.0000$
		$\lambda_4 = -3.1444 + j$
		$.8001$
		$\lambda_6 = -1.6920 + j$
		5.4693
		$\lambda_8 = -1.6915 + j$
		5.4705
		$\lambda_{10} = -1.1751 + j$
		2.5834
		$\lambda_{12} = .9215 + j$
		$.0000$
		$\lambda_{14} = .3286 + j$
		$.0000$

행렬 A 를 구성하였으며 초기치 파라미터를 갖는 행렬 A_0 에 대한 고유치는 다음의 표 9와 같이 모두 음의 실수부를 갖는다.

또한 정상 운전 상태에서 최적 파라미터를 갖는 상태 방정식 행렬 A 의 고유치는 다음의 표 10과 같이 모두 음의 실수부를 갖는다.

이상과 같이 초기치 파라미터를 갖는 시스템의 행렬과 최적치 파라미터를 갖는 시스템 행렬의 고유치를 비교해보면 고유치의 실수부를 절대값이 상당히 커진 것을 알 수 있다. 따라서 고유치 실수부를 비교함으로써 제어부의 최적 파라미터를 갖는 발전기가 결과적으로 동태 안정도 향상에 상당한 효과가 있음을 알 수 있다.

5.3 결과 고찰

5.3.1 1기 무한 모선 계통

1기 무한 모선의 간단한 모델계통에서 제어기 시정수와 이득상수의 목적 함수 감도를 검토해 보면 이득상수 감도(4.894733 E-3)가 시정수 감도(4.736992 E-4)보다 훨씬 민감하므로 이득상수 조정이 계통 안정도 향상에 크게 기여됨을 알 수 있다. 이렇듯 목적 함수의 감도로 부터 제어기 파라미터가 시스템에 미치는 반응의 정도를 파악할 수 있다.

또한 최적제어기를 설계하여 시스템의 고유치를 비교한 결과 표 3과 같이 초기치 파라미터일 때는

표 9 초기치 파라미터일 때 행렬 A_0 의 고유치
Table 9 The matrix A_0 eigenvalue at intial parameter

고	유	치
λ_1	$= -13.6872 + j$	.0000
λ_3	$= -6.8065 - j$	6.1328
λ_5	$= -3.1354 - j$	2.2185
λ_7	$= -3.0777 - j$	2.0942
λ_9	$= -2.9589 + j$	.0000
λ_{11}	$= -2.8073 - j$	.6133
λ_{13}	$= -1.8897 + j$	.0000
λ_{15}	$= -1.5138 - j$	2.7852
λ_{17}	$= -1.5132 - j$	2.7861
λ_{19}	$= -1.1504 + j$	.0000
λ_{21}	$= -.9985 + j$	2.3971
λ_{23}	$= .7678 - j$	.0706
λ_{25}	$= .5460 + j$	.0000
λ_{27}	$= .3441 + j$	.0000
λ_2	$= -13.3862 + j$	.0000
λ_4	$= -6.8065 + j$	6.1328
λ_6	$= -3.1354 + j$	2.2185
λ_8	$= -3.0777 + j$	2.0942
λ_{10}	$= -2.9588 + j$	.0000
λ_{12}	$= -2.8073 + j$	.6133
λ_{14}	$= -1.5634 + j$	.0000
λ_{16}	$= -1.5138 + j$	2.7852
λ_{18}	$= -1.5132 + j$	2.7861
λ_{20}	$= -.9985 - j$	2.3971
λ_{22}	$= .8264 + j$	.0000
λ_{24}	$= .7678 + j$	.0706
λ_{26}	$= .4572 + j$	.0000

표 10 초기치 파라미터일 때 행렬 A 의 고유치
Table 10 The matrix A eigenvalue at intial parameter

고	유	치
λ_1	$= -380.5479 + j$	.0000
λ_3	$= -382.7556 + j$	.0000
λ_5	$= -4.9028 + j$	.0000
λ_7	$= -4.6895 + j$	2.7690
λ_9	$= -3.1443 + j$	.8001
λ_{11}	$= -1.9084 + j$	.0000
λ_{13}	$= -1.6920 - j$	5.4693
λ_{15}	$= -1.6919 - j$	5.4693
λ_{17}	$= -1.5810 + j$	.0000
λ_{19}	$= -1.1752 - j$	.0000
λ_{21}	$= -.9216 + j$	.0000
λ_{23}	$= .5128 - j$	.0951
λ_{25}	$= .5082 + j$	.0000
λ_{27}	$= .2858 + j$	.0000
λ_2	$= -372.7584 + j$	.0000
λ_4	$= -7.1848 + j$	.0000
λ_6	$= -4.6895 - j$	2.7690
λ_8	$= -3.1443 - j$	.8001
λ_{10}	$= -2.2939 + j$	.0000
λ_{12}	$= -1.8072 + j$	.0000
λ_{14}	$= -1.6920 + j$	5.4693
λ_{16}	$= -1.6919 + j$	5.4693
λ_{18}	$= -1.1953 - j$	.0000
λ_{20}	$= -1.1752 + j$	2.5834
λ_{22}	$= .8974 + j$	.0000
λ_{24}	$= .5128 + j$	.0951
λ_{26}	$= .4270 + j$	.0000

양의 실수부를 갖는 고유치가 존재하였으나, 최적치일 때는 고유치가 모두 음의 실수부를 나타내므로 제어능력이 향상되는 안정도가 크게 증진됨을 알 수 있다.

5.3.2. 다기 계통의 경우

제시된 알고리즘의 설계통에의 적용 가능성을 검토하기 위하여 3기 9모선에서 시뮬레이션한 결과 고찰은 다음과 같다.

1) 평가 함수 감도로 부터 최적 파라미터를 구하면 다음과 같은 현상을 관찰할 수 있다.

돌극기인 발전기-1 (G1)에서는 표 4와 같이 조속기 이득상수(9.8893E-12)와 시정수의 감도(2.8113 E-14)가 가장 민감함을 보인 반면에 여자기 감도는(이득상수감도: 9.22771E-8, 시정수감도: 9.1979E-7)덜 민감함을 보였다. 그러므로 돌극기에서는 큰 이득상수와 작은 시정수를 갖는 조속기가 여자기보다 돌극발전기 제어에 크게 기여함을 알 수 있었다.

또한 비돌극기인 발전기 -2, 3(G2, G3)에서는 표 5, 6에서와 같이 돌극기 발전기와는 달리 큰 이득상수 갖는 여자기와 작은 시정수를 갖는 조속기가 발전기 제어에 크게 기여함을 관찰하였다.

2) 목적 함수 감도로 부터 발전기 제어부의 최적 파라미터를 구하여 동적 안정도를 고찰하면 다음과 같다.

발전기 모델에서의 불안정 운전점에서 발전기가 운전될 때, 여자기를 고려하지 않은 간략화 모델에 대해서는 초기치 파라미터를 갖는 조속기만으로는 안정하게 제어할 수 없었으나, 최적 파라미터를 갖는 조속기로는 안정하게 운전됨을 보았다. 또한 미소 교란시 초기 파라미터를 갖는 여자기와 조속기로 운전할 때는 고유치가 모두 음의 실수부를 나타내어 발전기가 안정 상태에서 운전됨을 알 수 있었으며, 최적 파라미터일 때도 고유치가 모두 음의 실수부로 나타났다.

그러나 최적칠 때는 고유치의 음의 실수부의 절대값이 증가되었으므로 안정도가 향상됨을 입증하였다. 이는 상태 방정식의 주요변수인 전압, 위상각, 기계출력 등의 동요를 빠른 속도로 감쇄시킬 수 있다는 것을 알 수 있으며 결과적으로 동태 안정도 향상에 상당한 효과가 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 모델계통에서 발전기 제어부(조속기, 여자기)파라미터에 대한 목적함수 감도계산

으로부터 최적 파라미터를 선정된 후 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 동태안정도를 향상시키는 방법을 제시하였다.

본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 동기 발전기의 동특성을 개선하기 위하여 목적 함수 감도로 부터 제어기의 최적 파라미터를 선정후 감도고찰로 계통의 응답특성을 파악할 수 있었고 전력계통 안정화에 유효한 정보를 알 수 있었다.
- (2) 1기 무한계통과 다기계통에서 제어기의 최적 파라미터를 선정하여 미소 교란시 시스템 기능을 안정하게 수행할 수 있는지를 시스템 비선형 방정식을 운전점에서 선형화하여 고유치로서 동태 안정도를 판정하는 방법을 제시하였다.

이렇듯 본 연구에서 제시된 방법은 전력 계통 동태안정도 향상에 중요한 자료로 제공될 것으로 본다.

참 고 문 헌

- [1] O.W. Hanson, C.J. Goodwin, P.L. Dandeno, "Influence of excitation and speed control parameters in stabilizing intersystems oscillations", IEEE Trans., PAS-87, pp. 1306-1311, May 1968
- [2] F.P. deMello, C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control", IEEE Trans., PAS-88, pp. 316-329, April 1969.
- [3] R.J. Fleming, M.A. Mohan, K. Parvatisam, "Selection of parameters of stabilizers in multimachine power systems", IEEE Trans, PAS-100, pp. 2329-2333, 1981
- [4] H.B. Gooi, E.F. Hill, M.A. Mobarak, D.H. Thorne, T.H. Lee, "Coordinated multimachine stabilizer settings without eigenvalue drift", IEEE Trans., PAS-100, pp. 3879-3887, Aug. 1981.
- [5] S. Lefebvre, "Tuning of stabilizers in multimachine power systems", IEEE Trans., PAS-102, pp. 290-299, Feb. 1983.
- [6] A. Doi, S. Abe, "Co-ordinated synthesis of power system stabilizers in multimachine power system", IEEE Trans., PAS-103, pp. 1473-1479, June 1984
- [7] O.H. Abdalla, S.A. Hansan, N.T. Tweig,

- “Coordinated stabilization of a multimachine power systems”, IEEE Trans., PAS-103, pp. 483-494, March 1984.
- [8] C.D. Vournous, B.C. Papadius, “Power system stabilization via parameter optimization application to the Hellenic interconnected system”, IEEE Trans, PWRs-2, No. 3 pp. 615-623, Aug., 1987
 - [9] A.P. Sage, C.C. White, III : Optimum systems control, second edition Prentice-Hall, Inc. 1977.
 - [10] M. Athans, P.L. Falb : Optimal control-An introduction to the theory and its application, Mcgrow-hill book company, 1966
 - [11] D.E. Kirk : Optimal control theory, an introduction. Prentice-Hall Inc, 1970
 - [12] D.P. Atherton : Stability of nonlinear systems, Research Studied Press, 1981
 - [13] P.M. Anderson, A.A. Fouad : Power system control and stability, The IOWA state University Press, IOWA. U.S.A. 1977
 - [14] O.I. Elgerd : Electric energy systems theory -an introduction, Mcgraw-hill book company, 1971
 - [15] Yao-nan Yu : Electric power system dynamics, Academic Press, 1983
 - [16] C.T. Chen : Linear system theory and design, CBS Colleague publishing, 1984
 - [17] R.E. Skilton : Dynamic system control-linear systems analysis and synthesis, John Wiley & Sons, 1988.
 - [18] S. Barnett : Matrices in control theory-with applications to linear programming, Van Nostrandre in hold company LONDON, 1971
 - [19] 한국전력공사 : 전력계통 운용자료집, 1987

부록 1 1기 무한 모선의 상태방정식

$$\begin{bmatrix} \dot{E}q' \\ \dot{w} \\ \dot{\delta} \\ \dot{P}m \\ \dot{X}gv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{K_3 T_{d0}'} & 0 & \frac{-K_4}{T_{d0}'} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{2H} & 0 & \frac{1}{2H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Tl} & \frac{1}{Tt} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{Tl} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RTgv} & 0 & 0 & -\frac{1}{Tgv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Eq' \\ w \\ \delta \\ Pm \\ Xgv \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{Tgv} \end{bmatrix} [Pc]$$

부록 2 각 발전기 시스템 파라미터

항 목	발 전 기 1	발 전 기 2	발 전 기 3
MVA	250 MVA	200 MVA	180 MVA
E_q'	1.057 pu	1.050 pu	1.017 pu
δ	0.040 rad	0.340 rad	0.220 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
S_e	0.300 pu	0.303 pu	0.360 pu
H	3.920 sec	3.940 sec	5.364 sec
D	0.008 pu	0.008 pu	0.008 pu
f	60 Hz	60 Hz	60 Hz
K_R	1.000 pu	1.000 pu	1.100 pu

K_A	100 pu	25 pu	25 pu
K_F	0.100 pu	0.091 pu	0.100 pu
K_E	-0.020 pu	-0.505 pu	-0.060 pu
R	0.050 pu	0.050 pu	0.050 pu
T_{gv}	0.830 sec	0.083 sec	0.083 sec
T_t	0.520 sec	0.200 sec	0.200 sec

부록 3 모델 계통 데이터

1) 선로 정수

연결모선	선로 임피던스	탭 비	선로용량
1-4	.00000+j .11840	1.00000	.00000
2-7	.00000+j .18230	1.00000	.00000
3-9	.00000+j .23990	1.00000	.00000
4-5	.01000+j .08500	1.00000	.17600
4-6	.01700+j .09200	1.00000	.15800
5-7	.03200+j .16100	1.00000	.30600
6-9	.03900+j .17000	1.00000	.35800
7-8	.08500+j .07200	1.00000	.14400
8-9	.01190+j .10080	1.00000	.20160

2) 모선 데이터

모선번호	모선전압	발전전력	부 하	무효전력하한, 상한
1	1.040+j .000	1.010+j .270	.000+j .000	.000 .000
2	1.012+j .166	1.630+j .067	.000+j .000	-.450 .550
3	1.022+j .084	.850+j-.109	.000+j .000	-.600 .400
4	1.025+j-.039	.000+j .000	.000+j .000	.000 .000
5	.994+j-.070	.000+j .000	1.250+j .500	.000 .000
6	1.010+j-.065	.000+j .000	.900+j .300	.000 .000
7	1.024+j .066	.000+j .000	.000+j .000	.000 .000
8	1.016+j .012	.000+j .000	1.000+j .350	.000 .000
9	1.031+j .036	.000+j .000	.000+j .000	.000 .000

부록 4 첨자기호

- d : 동기발전기의 직축성분
- q : 동기발전기의 횡축성분
- E : 여자기
- R : 정류기
- A : 증폭기

- gv : 조속기
- t : 과도상태
- dot : 직축 과도상태
- F : 안정화 회로