

PSS 파라미터 최적화 및 최적위치선정에 관한 연구

Optimization of PSS Parameters and Identification of Optimum Site for PSS Applications

朴 永 文* · 鄭 正 源**
(Young-Moon Park · Jung-Won Jung)

Abstract- This paper presents a new algorithm to select optimal parameters and location of power system stabilizer(PSS). A new performance measure, which evaluates the share of a particular mode among state responses, is introduced. The gradient of the performance measure with respect to PSS parameters is derived in an explicit form, so optimal parameters of PSS can be obtained by the steepest descent method. The machine, with which it is most probable to reduce the performance measure, is identified as the optimum site for PSS application.

1. 서 론

전력계통의 저주파진동을 억제하고 안정도를 향상시키기 위해서 전력계통안정화장치(power system stabilizer : PSS)가 도입된 이래 이의 설계 또는 파라미터의 적정치를 결정하기 위한 연구가 진행되어 오고 있다. [1, 2, 3, 4, 5] 또한, 모든 발전기에 PSS를 설치하는 것은 불필요할 뿐만 아니라 비경제적이기 때문에 [6], PSS를 설치할 경우 가장 안정도가 향상될 수 있는 발전기를 찾는 PSS 최적위치선정에 대해서도 최근에 많이 관심이 되고 있다. [5, 6, 7, 8]

PSS 파라미터 선정에 관한 연구의 대부분은 [1, 2, 4, 5] deMello와 Concordia의 연구 [9]에 기초를 두고 있는데, 이들은 위상보상을 통하여 저주파영역에서의 제동 토크를 증대시키도록 PSS의 파라미터를 결정하는 것을 기본개념으로 하고 있다. 그러나 이 방법은 고차의 PSS 파라미터 선정에는 적용하기 힘들다. 선형최적제어 이론을 이용한 PSS의 설계방법을 제안한 것 [3]도 있으나 설치하고자 할 PSS의 파라미터를 결정하는 문제에는 적용할 수 없다.

PSS의 최적위치선정에 관한 연구로는, 각 발전기의 동요방정식에 제동성분(damping term)을 두고 이들이 전체계통의 고유치에 미치는 영향으로 최적위치를 선정하는 방법 [4, 5]과 계통행렬의 대각성분이 고유치에 미치는 영향을 반영한 participation factor를 이용한 방법 [8], 그리고

*正 會 員 : 서울대 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 **正 會 員 : 韓國電力公社 電力經濟研究室 勤務
 接受日字 : 1991年 3月 15日
 1次修正 : 1991年 4月 25日

coherency기법을 이용하여 우선 PSS를 설치할 coherent group을 찾고 다음에 그 group내에서 PSS를 설치할 발전기를 찾는 방법[7]등이 제안되어 있다. 이들 방법에서는 통상 고유치가 가장 큰 저제동 mode를 가장 문제가 되는 mode로 보고 있으나, 반드시 가장 큰 고유치에 대응하는 mode가 계통에 가장 큰 영향을 미치는 것은 아니다.

본 논문에서는 상태변수에 대한 각 mode의 영향을 정량화한 이차형태의 목적함수(quadratic performance measrue)를 정의하고 이를 이용하여 PSS의 최적위치 및 PSS파라미터의 최적치를 결정하는 방법을 제시한다.

2. PSS의 최적 파라미터 선정

본 논문에서는 PSS의 최적 파라미터를 선정하는 문제를 다음과 같은 파라미터최적화문제로서 다루고자 한다.

목적함수 : $J(f)$

제약조건 : $dx/dt = A(f)x$ (1)

여기서, f : PSS파라미터 벡터

$A(f)$: 선형화된 전력계통의 시스템 행렬

본 논문에서의 목적함수는 각 mode의 상태변수에 대한 영향을 정량화하기 위해서 상태변수에 포함된 각 mode가 나타내는 궤적의 포락선을 제공하여 적분한 것으로 정의하였다. 이 것은 아래에서 기술한 것 처럼 고유치 및 고유벡터로 표현되는데, 고유치 및 고유벡터는 시스템행렬에 의해 결정되고 PSS 파라미터가 시스템행렬에 포함되어 있으므로 목적함수는 PSS 파라미터에 대한 목적함수의 경사벡터를 유도해 냄으로써 최대경사법을 적용하여 최적 파라미터를 선정하고자 하는 것이 본 논문의 이 주제에 대한 접근 방법이다.

2.1 목적함수의 정의

PSS가 포함된 전력계통을 선형화하면 다음 식과 같이 시스템행렬에 PSS의 파라미터가 포함된 모형을 얻을 수 있다.

$dx/dt = A(f)x$ (2)

$x(0) = x_0$

여기서, f : 파라미터 벡터

상태변수 x 의 시간응답은 시스템행렬 A 의 고유치 및 고유벡터로 표현될 수 있다.

$x(t) = \sum(q_j, x_0)p_j \exp(\lambda_j t)$ (3)

여기서, λ_j : j 번째 고유치

p_j, q_j : 우측고유벡터, 좌측고유벡터

상태변수 x 의 j 번째 mode성분벡터를 x_j 라고 하면, 이것은 다음과 같이 표현 된다.

$x_j = (q_j, x_0) p_j \exp(\lambda_j t)$ (4)

A 는 실제수행렬이므로 고유치 λ_j 가 복소수이면 반드시 λ_j 의 공액인 λ_j^* 도 고유치가 되고, λ_j^* 에 대응하는 고유벡터 또한 λ_j 에 대응하는 고유벡터의 공액으로 표현될 수 있다. 상태변수 i 요소의 j 번째 mode성분은 ① λ_j 가 복소수일 때 그 공액성분과 결합되어 다음으로 표시되고,

$\frac{1}{2}[(q_j, x_0)p_{ij} \exp(\lambda_j t) + (q_j^*, x_0)p_{i^*j^*} \exp(\lambda_j^* t)] = |(q_j, x_0)p_{ij}| \exp(\sigma_j t) \cos[\omega t + \arg(q_j, x_0) + \arg(p_{ij})]$ (5)

② λ_j 가 실수일 때는

$(q_j, x_0)p_{ij} \exp(\lambda_j t)$ (6)

여기서, p_{ij} : j 번째 우측고유벡터 p_j 의 i 번째 요소

로 표시된다. 그러므로 x 의 i 번째 mode성분이 나타내는 궤적의 포락선(envelop)을 제공한 것은, x_j 의 i 번째 요소를 $x_{j,i}$ 라고 두면 $x_{j,i}, x_{j,i}^*$ 로 표현된다.

또한, 상태변수의 모든 요소에 포함된 j mode성분의 포락선제공의 가중합은 다음으로 주어진다.

$x_j^T M_j x_j^* = (q_j, x_0) p_j^T M_j p_j^* (q_j^*, x_0) \exp(2\sigma_j t)$ (7)

여기서, M_j : 상태변수 각요소 대 한 j mode성분의 가중행렬

따라서, 본 논문에서 제안한, j mode에 대한 목적함수는 j mode가 나타내는 궤적의 포락선 제공의 면적으로서 다음으로 표현된다.

$J_j = \int_0^T x_j^T M_j x_j^* dt = \int_0^T \exp(2\sigma_j t) dt (q_j, x_0) p_j^T M_j p_j^* (q_j^*, x_0) = \frac{\exp(2\sigma_j T) - 1}{2\sigma_j} (q_j, x_0) p_j^T M_j p_j^* (q_j^*, x_0)$ (8)

J_j 가 클수록 해당 mode가 상태변수에 큰 영향을 미치는 것이 된다. 모든 mode를 대상으로 할 때는 목적함수를 다음으로 두면 된다.

$$J = \sum J_j \tag{9}$$

전력계통의 동태적 특성을 표시하는 비선형미분방정식을 선형화하면 선형화 시스템행렬에는 PSS 파라미터가 포함된다. 고유치 및 고유벡터는 시스템행렬에 의해 결정되므로 결국 고유치 및 고유벡터는 PSS 파라미터에 영향을 받게되며, 위에서 정의한 목적함수는 PSS 파라미터의 함수가 된다. 결국 PSS 파라미터의 최적화 문제는 (1) 식과 같이 표시될 수 있다.

2.2 PSS파라미터에 대한 목적함수의 경사벡터

최대경사법을 이용하여 PSS 파라미터의 최적치를 구하기 위해서는 PSS 파라미터에 대한 목적함수의 경사벡터를 알아야 한다. 이 절에서는 앞에서 정의한 목적함수의 PSS 파라미터에 대한 경사벡터를 유도한다.

목적함수 J_j 로 두어도 일반성을 잃지 않으므로 여기에서는 J_j 의 경사벡터를 구하기로 한다. 목적함수 J_j 의 정의식에서 ΔJ_j 는 다음으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \Delta J_j = & \frac{\exp(2\sigma_j T) - 1}{2\sigma_j} (q_j \ x_0) (\Delta p_j^i) M_j p_j^* (q_j^* \ x_0) \\ & + \frac{\exp(2\sigma_j T) - 1}{2\sigma_j} (q_j \ x_0) p_j^i M_j (\Delta p_j^*) (q_j^* \ x_0) \\ & + \frac{\exp(2\sigma_j T) - 1}{2\sigma_j} (\Delta q_j \ x_0) p_j^i M_j p_j^* (q_j^* \ x_0) \\ & + \frac{\exp(2\sigma_j T) - 1}{2\sigma_j} (q_j \ x_0) p_j^i M_j p_j^* (\Delta q_j^* \ x_0) \\ & + \frac{2\sigma_j T \exp(2\sigma_j T) - \exp(2\sigma_j T) + 1}{2\sigma_j^2} \\ & \Delta\sigma_j (q_j \ x_0) p_j^i M_j p_j^* (p_j^* \ x_0) \end{aligned} \tag{10}$$

여기서, Δp_j , Δq_j 및 $\Delta\sigma_j$ 는 각각 다음으로 주어진다. [10]

$$\Delta p_j = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \frac{q_k \Delta A p_k}{\lambda_j - \lambda_k} p_k = PL_j Q \Delta A p_j \tag{11}$$

$$\Delta q_j = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \frac{q_j \Delta A p_k}{\lambda_j - \lambda_k} q_k = q_j \Delta A PL_j Q \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_j = & (\Delta\lambda_j + \Delta\lambda_j^*) / 2 \\ = & (q_j \Delta A p_j + q_j^* \Delta A p_j^*) / 2 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } L_j = & \text{diag}[1/(\lambda_j - \lambda_1), \dots, 1/(\lambda_j - \lambda_{j-1}), \\ & 0, 1/(\lambda_j - \lambda_{j+1}), \dots, 1/(\lambda_j - \lambda_n)] \\ P = & [p_1, \dots, p_n] \\ Q = & [q_1^t, \dots, q_n^t]^t \end{aligned}$$

(11)-(13)식을 (10)식에 대입하여 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \Delta J_j = & 2\text{Re trace} \left(\frac{\exp(2\sigma_j T) - 1}{2\sigma_j} \Delta A^t Q^t L_j P^t \right. \\ & \left. M p_j^* (q_j^* \ x_0) (q_j \ x_0) p_j^t \right) \\ & + 2\text{Re trace} \left(\frac{\exp(2\sigma_j T) - 1}{2\sigma_j} \Delta A^t q_j^t p_j^i M p_j^* \right. \\ & \left. (q_j^* \ x_0) x_0^t Q^t L_j P^t \right) \\ & + 2\text{Re trace} \left(\frac{\exp 2\sigma_j T \exp(2\sigma_j T) - \exp(2\sigma_j T) + 1}{4\sigma_j^2} \right. \\ & \left. \Delta A^t q_j^t (q_j \ x_0) p_j^i M_j p_j^* (q_j^* \ x_0) p_j^t \right) \end{aligned} \tag{14}$$

식 (14)에 Kleinmann의 Lemma[11]를 적용하면, 목적함수의 시스템행렬에 대한 gradient를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \partial J / \partial A = & \text{Re} \left[\frac{\exp(2\sigma_j T) - 1}{\sigma_j} ((PL_j Q)^t M_j p_j^* p_j^t (q_j \ x_0) (q_j^* \ x_0) \right. \\ & \left. + (p_j^i M_j p_j^*) (q_j^* \ x_0) p_j^i x_0^t (PL_j Q)^t) \right] \\ & + \text{Re} \left[\frac{2\sigma_j T \exp(2\sigma_j T) - \exp(2\sigma_j T) + 1}{2\sigma_j^2} (p_j^i M_j p_j^*) \right. \\ & \left. (q_j \ x_0) (q_j^* \ x_0) (q_j^i p_j^t) \right] \end{aligned} \tag{15}$$

$\partial J / \partial A$ 로 부터 목적함수의 PSS 파라미터에 대한 gradient를 구하면 다음과 같다.

$$\partial J / \partial f = \sum_k \sum_l \nabla_{f a_{kl}} [\partial J / \partial A]_{kl} \tag{16}$$

여기서, $\nabla_{f a_{kl}}$: 시스템행렬의 (k, l) 요소인 a_{kl} 의 PSS 파라미터에 대한 경사벡터
 $[\partial J / \partial A]_{kl}$: $\partial J / \partial A$ 의 (k, l) 요소

2.3 PSS파라미터의 최적치 선정

앞에서 구한 목적함수의 PSS 파라미터에 대한 경사벡터를 사용하여, (1)식으로 표현된 파라미터 최적화문제에 최대경사법을 적용하면 PSS 파라미터의 최적치를 구할 수 있다. 여기서, 최대경사법의 적용과정에 있어서는 PSS 파라미터 개선의 매 단계마다 시스템행렬에 대한 고유치 및 고유벡터의 정보를 필요로 한다. 그러나 시스템행렬에 대한 고유치 및 고유벡터의 계산은 많은 시간을 요구하게 되는데, 이는 (11)~(13)식으로 표현된 고유치 및 고유벡터의 감도해석으로써 해결할 수 있다. 본 논문의 PSS 파라미터 최적화의 알고리즘은 그림 1과 같다.

3. PSS의 최적위치 선정

어느 발전기에 PSS를 설치한다는 것은 여자의 출력을 통해 그 발전기의 전기적 출력 중 제동성분을 증가시킨다는 것을 의미한다. 따라서 PSS의 영향을 포함한 발전기의 동요방정식은 다음으로 둘 수 있다.

$$d\omega/dt = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e - D\omega - K\omega) \quad (17)$$

여기서 $K\omega$ 는 PSS에 의한 제동성분을 뜻하는데 이 항의 추가에 따른 계통 안정도의 향상효과는 앞 절에서 정의한 목적함수로써 표현할 수 있다. 따라서 이 항의 추가에 의해 목적함수가 감소되는 정도로서 계통안정도 향상효과를 판정할 수 있다. 그러나 K 가 크다고 해서 목적함수가 반드시 감소하는 것은 아니기 때문에, PSS 설치에 의한 계통 안정도의 향상효과를 나타내는 지수(I)를 K 가 계동계수의 일반적인 범위내에서 움직일 때 가장 낮은 목적함수로 정의한다.

$$I = \min_{K_{min} \leq K \leq K_{max}} J(K) \quad (18)$$

위에서 정의한 I 값이 가장 낮은 발전기에 PSS를

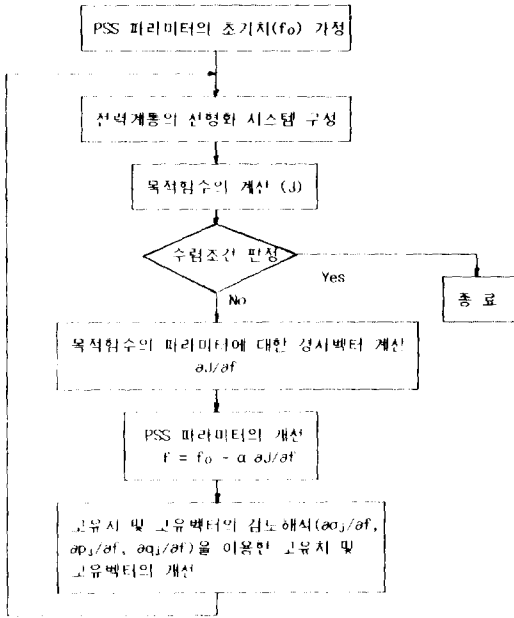


그림 1 PSS파라미터의 최적치 계산 흐름도
 Fig. 1 Flow Chart of the Optimization Procedure of PSS Parameters

표 1 모의계통의 선로정수
 Table 1 Line Data of the Study System

선로 번호		선로 impedance		half line charging susceptance (p.u.)	tap setting
		R(p.u.)	X(p.u.)		
1	2	0.01938	0.05917	0.0264	—
2	3	0.04669	0.19797	0.0219	—
2	4	0.05811	0.17632	0.0187	—
1	5	0.05403	0.22304	0.0246	—
2	5	0.05695	0.17388	0.0170	—
3	4	0.06701	0.17103	0.0173	—
4	5	0.01335	0.04211	0.0064	—
5	6	0.00000	0.25202	0.0000	0.9320
4	7	0.00000	0.20912	0.0000	0.9780
7	8	0.00000	0.17615	0.0000	—
4	9	0.00000	0.55618	0.0000	0.9690
7	9	0.00000	0.11001	0.0000	—
9	10	0.03181	0.08450	0.0000	—
6	11	0.09498	0.19890	0.0000	—
6	12	0.12291	0.25581	0.0000	—
6	13	0.06615	0.13027	0.0000	—
9	14	0.12711	0.27038	0.0000	—
10	11	0.08205	0.19207	0.0000	—
12	13	0.22092	0.19988	0.0000	—
13	14	0.17093	0.34802	0.0000	—

표 2 모의계통의 모선자료
Table 2 Bus Data of the Study System

모선 번호	전압		부하(MW)		발전(MW)	
	V	θ (deg.)	P_L	Q_L	P_G	Q_G
1	1.09000	0.000	0.000	0.000	197.270	16.975
2	1.07000	-3.6678	40.000	12.000	90.000	46.912
3	1.05000	-10.0733	160.000	30.000	95.000	58.573
4	1.01115	-8.8354	110.000	20.000	0.000	0.000
5	1.01566	-7.5978	40.000	15.000	0.000	0.000
6	1.04000	-10.8116	40.000	18.000	95.000	41.839
7	1.02267	-7.2434	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.07000	1.0868	0.000	0.000	90.000	35.302
9	0.99782	-11.9402	45.000	27.000	0.000	0.000
10	0.98145	-13.0035	21.000	12.000	0.000	0.000
11	0.98324	-13.5915	35.000	10.000	0.000	0.000
12	0.99990	-12.3257	13.000	8.000	0.000	0.000
13	0.99496	-12.4756	24.000	11.000	0.000	0.000
14	0.95312	-13.8086	25.000	15.000	0.000	0.000

9번 모선에 0.19(p.u.)의 shunt capacitor

설치하는 것이 계통의 안정도를 가장 향상시킬 수 있다. 이렇게 선택된 발전기에 대해서 앞 절에서 제시한 방법에 의해 PSS 파라미터를 결정하면 된다. 만일에 제동성분이 더 필요하다면 나머지 발전기에 대해서도 같은 방법으로 최적위치를 선정한다. 남은 발전기로서의 제동계수로 인한 목적함수 감소의 정도가 미미하다면 선택절차는 끝나게 되는 것이다.

4. 사례 연구

본 논문의 사례연구에 적용된 모의계통은 14모선 계통으로 그 구성은 그림 2와 같고, 선로정수 및 각 모선의 전압, 전력은 각각 표1과 표2에 표시되어 있다.

PSS를 설치할 발전기를 선택하기 위해서 3절에서 기술한 계통안정화 효과지수(제동계수를 변화시킨 경우의 목적함수의 최소화)를 계산한 결과는 표3과 같다. 이에 의하면 3번 또는 5번 발전기에 PSS를 설치하는 것이 효율적임을 알 수 있다.

표 3 각 발전기별 안정도향상 지수
Table 3 Index of the Stability Enhancement of Each Machine

발전기 번호	1	2	3	4	5
제동계수 변화에 따른 목적함수의 최소화(J)	1.9934	1.9935	1.9932	1.9938	1.9932

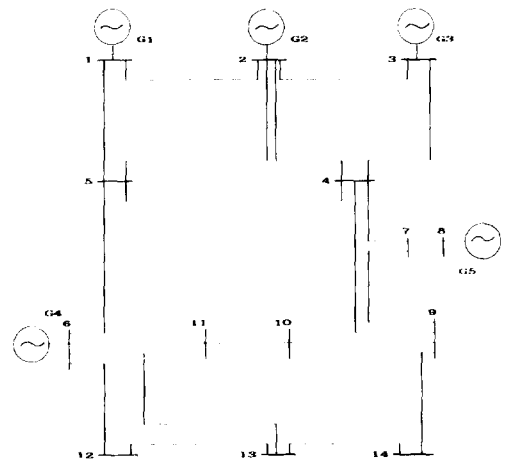


그림 2 모의계통 구성도
Fig. 2 Study System

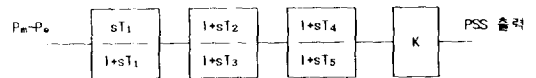


그림 3 PSS의 block diagram
Fig. 3 Block Diagram of the Installed PSS

여기에서는 3번 발전기를 대상으로 하여 PSS를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우에 대해 전력조류가 많이 흐르는 2-3선로를 0.2초간 개방한 후 재폐로 시킨 때의 동요상태를 비교하였다.

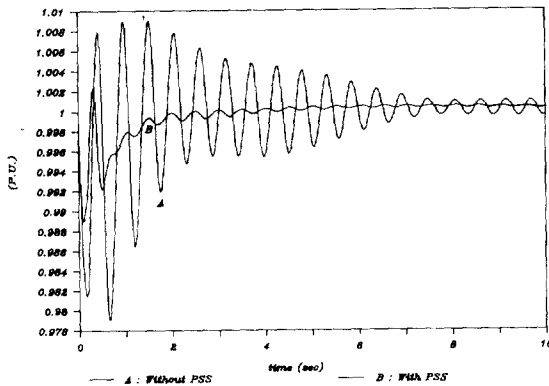


그림 4 3번 발전기의 회전자 각속도
Fig. 4 Rotor Speed of the 3rd Machine

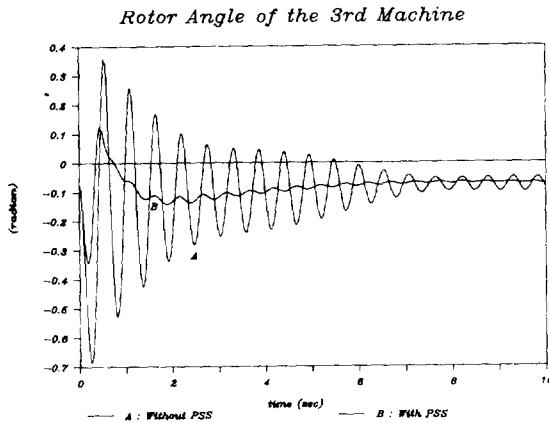


그림 5 3번 발전기의 회전자각
Fig. 5 Rotor Angle of the 3rd Machine

표 4 도출된 PSS파라미터의 최적치
Table 4 Obtained PSS Parameters

PSS 파라미터	최소치	최대치	최적치
T_1	0.2	30	1.05
T_2	0.2	30	20.08
T_3	0.2	30	19.96
T_4	0.2	30	20.08
T_5	0.2	30	19.96
K	0.5	50	2.53

PSS의 block diagram은 그림 3과 같고, 계산된 적정 파라미터는 표 4에 표시되어 있다. PSS설치 전후의 계통고장에 대한 3번 발전기의 회전자 각속도 및 회전자각의 응답은 각각 그림 4 및 5에 표

시되어 있다.

5. 결론

본 논문에서는 각 mode의 계통에 대한 영향을 평가할 수 있는 목적함수를 정의하고 이의 PSS 파라미터에 대한 경사벡터를 유도해냄으로써 최적화기법을 적용 PSS 파라미터의 최적치를 결정하는 방법을 제시하고, 또한 이 목적함수를 응용하여 PSS의 최적설치위치를 선정할 수 있는 방안을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 목적함수는 각 mode별로 계산되고 이것은 상태변수에 있어 이 mode가 차지하는 비중을 의미하기 때문에, 어느 mode가 계통에 가장 큰 영향을 미치는가를 알 수 있고, 필요에 의해서는 특정 mode의 영향을 선택적으로 억제 하도록 PSS의 파라미터를 결정할 수 있다. 최적화의 과정에 있어 PSS 파라미터의 변화에 따른 고유치 및 고유벡터의 계산에는 감도해석을 적용함으로써 계산 부담을 경감할 수 있다.

참고 문헌

- [1] F.P. de Mello, et al., "Coordinated Application of Stabilizers in Multimachine Power Systems," IEEE Trans. on PAS, Vol. 99, 1980
- [2] H.B. Gooi, et al., "Coordinated Multimachine Stabilizer Settings without Eigenvalue Drift," IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, 1981.
- [3] Y.N. Yu, Electric Power System Dynamics, Academic Press, 1983.
- [4] O.H. Abdalla, et al., "Coordinated Stabilization of a Multimachine Power System," IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, 1984.
- [5] N. Uchida, T. Nagao, Counter Measures for Power System Stability (Part 1)-Optimization of Location and Parameters of PSS-, CRIEPI Report NO. 183040, 1984.
- [6] A. Feliachi, "Optimal Siting of Power System Stabilizers," IEE Proc. C, Vol. 137, 1990.
- [7] A. Hiyama, "Coherency-based Identification of Optimum Site for Stabilizers Applications," IEE Proc. C, Vol. 130, 1983.

- [8] Y.Y. Hsu, C.L. Chen, "Identification of Optimum Location of Stabilizer Applications Using Participation Factors," IEE Proc. C, Vol. 137, 1990.
- [9] F.P. deMello, C. Concordia, "Concept of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control," IEE Trans. on PAS. Vol. 88, 1969.
- [10] T.R. Crosseley, et al., "Eigenvalue and Eigenvector Sensitivities in Linear System Theory," Int. J. Control. Vol. 10, 1969.
- [11] W.S. Levine, et al., "On the Determination of the Optimal Constant Output Feedback Gains for Linear Multivariable Systems," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-15, 1970.