

# 궤도민감도 분석에 기반하여 복입력 전력시스템 안정화 장치(Dual-Input PSS)의 비선형 파라미터 최적화 기법

論 文

57-6-2

## Optimal Tuning of Nonlinear Parameters of a Dual-Input Power System Stabilizer Based on Analysis of Trajectory Sensitivities

白承默\* · 朴正旭†  
(Seung-Mook Baek · Jung-Wook Park)

**Abstract** - This paper focuses on optimal tuning of nonlinear parameters of a dual-input power system stabilizer (dual-input PSS), which can improve the system damping performance immediately following a large disturbance. Until recently, various PSS models have developed to bring stability and reliability to power systems, and some of these models are used in industry applications. However, due to non-smooth nonlinearities from the interaction between linear parameters (gains and time constants of linear controllers) and nonlinear parameters (saturation output limits), the output limit parameters cannot be determined by the conventional tuning methods based on linear analysis. Only ad hoc tuning procedures ('trial and error' approach) have been used. Therefore, the steepest descent method is applied to implement the optimal tuning of the nonlinear parameters of the dual-input PSS. The gradient required in this optimization technique can be computed from trajectory sensitivities in hybrid system modeling with the differential-algebraic-impulsive-switched (DAIS) structure. The optimal output limits of the dual-input PSS are evaluated by time-domain simulation in both a single machine infinite bus (SMIB) system and a multi-machine power system in comparison with those of a single-input PSS.

**Key Words** : Hybrid System, Nonlinearity, Parameter Optimization, Power System Stabilizer, Trajectory Sensitivities

### 1. 서 론

최근 전력시장의 개편과 전력수요의 급증에 따라 전력계통은 점차 광대역 운전점에서 동작하게 되고 이에 따라 성능이 좋은 제어기에 대한 필요성이 증가되고 있다. 전력시스템 안정화 장치(PSS, 이하 PSS)는 정상상태 미소 외란시의 전력계통의 저주파 댐핑을 강화하는 중요한 제어기로서 2차적으로는 큰 상정사고가 발생하였을 때 전력계통에 저주파 댐핑을 향상시키는 역할을 하게 된다. 최근까지 미소 외란시 안정도 향상을 위한 다양한 모델의 PSS가 연구 및 개발 되었으며 일부의 PSS 모델은 현재 상용화되고 있다. 하지만 그 동안 다양한 PSS 모델이 제시되었음에도 불구하고 큰 상정사고시 효과적인 댐핑을 보장하는 PSS 모델들에 대한 연구가 보고 되지 않고 있다. 따라서 이번 논문에서는 전력계통의 안정성을 확보하고 효율성의 증가를 위해 복입력 PSS(dual-input PSS) 모델에 최적화 기법을 적용하여 실제 전력계통 모델링에 대한 시뮬레이션을 통해 기본적인 모델인 단입력 PSS (single-input PSS) 모델과 성능을 비교하고자 한다.

PSS의 동적 특성은 선형 파라미터(위상보상기의 시정수

와 이득)와 비평활, 비선형 특성을 보이는 제한적 파라미터(출력 리미터)에 영향을 받는다. 정상상태의 미소 외란시의 효율적으로 댐핑을 향상시키는 선형 파라미터의 적절한 값은 소신호 분석을 통한 기존의 튜닝 방법 [1][2][3][4]에 의해 결정될 수 있다. 그러나 이러한 분석은 소신호 조건에서만 성립하므로, 갑작스런 큰 외란이 시스템에 가해져 PSS의 출력신호가 리미터에 의해 제한되는 경우, 선형 파라미터 튜닝만으로 좋은 댐핑 성능을 보장할 수 없게 된다. 왜냐하면 리미터에 의해 출력신호가 제한되는 경우에는 이득과 같은 선형 파라미터의 증가만으로 전체 출력신호의 변화에 큰 영향을 주지 못하기 때문이다. 한편, PSS의 출력 리미터(선형 분석으로 해석이 불가능한)에 대한 적절한 튜닝은 큰 외란이 가해졌을 때, 선형 파라미터의 한계를 극복하고 시스템의 댐핑을 더욱 향상시킬 수 있는 해결책을 제시해 준다. 다시 말해서, 큰 상정사고에 대해서는 기존의 이득값 및 시정수와 같은 선형 파라미터의 튜닝보다 리미터에 대한 최적 튜닝이 각속도 및 단자 전압의 과도 안정도를 유지하는데 효과적이다.

한편, 하이브리드시스템은 최근 들어 많은 물리적 시스템(연속적 다이내믹, 이산사건의 다이내믹, 스위치 동작, 점프 현상이 혼합되어 있는 시스템)의 연구에서 주목을 받고 새로운 제어 기법이다[5][6]. 제어기의 신호가 정상상태를 지속하다가 운전점의 변화나 큰 상정사고와 같은 외란이 발생하는 상황에서 PSS의 리미터는 하이브리드 시스템의 범주에 속하게 된다. 즉, 발전기의 여자기의 보정신호로 입력되는 PSS의 출력신호는 출력 리미터의 스위칭 역할에 의해 비선

† 교신저자, 正會員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 助教授 · 工博  
E-mail : jungpark@yonsei.ac.kr

\* 學生會員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 工學博士課程  
接受日字 : 2007年 12月 28日  
最終完了 : 2008年 5月 16日

형 특성을 갖는 보정신호를 만들어 낸다. 이와 같이, PSS는 위상보상기와 같은 선형 제어기와 출력 리미터의 비선형 제어기의 상호작용에 의해 보정신호를 출력함으로써 전형적인 하이브리드 시스템에 속하게 된다.

이번 논문에서는 DAIS(differential-algebraic-impulsive-switched) 구조[7]의 하이브리드 시스템으로 전력계통을 모델링하여 수학적이고 체계적인 방법으로 복입력 PSS의 출력 리미터값을 최적화하고자 한다. 최적화 기법에 사용되는 1차 도함수는 DAIS 구조로 모델링된 전력계통에서 목적함수에 대한 비선형 파라미터의 궤도민감도(trjectory sensitivities)를 분석함으로써 계산할 수가 있다. 최적화 방안을 통한 복입력 PSS의 출력 리미터의 성능을 1기 무한모선 시스템 및 다기 계통(4기 6모선 시스템)에 적용하여 평가할 것이며, 다른 PSS 모델(단입력 PSS)에 최적화 방안을 적용한 사례와 비교, 분석을 통해서 그 신뢰도를 보장받을 것이다.

## 2. 하이브리드 시스템 모델링

### 2.1 하이브리드 시스템 모델링

앞서 언급한 것과 같이 하이브리드 시스템은 선형 및 비선형 특성이 복합적으로 나타나는 시스템을 의미한다. 즉, 선형 및 비선형 특성을 일관된 모델링 기법으로 구현하여 그 상호작용에 대한 해석을 가능하게 하는 시스템이다. 특히, 전력계통을 모델링한 하이브리드 시스템은 다음과 같은 선형 및 비선형 특성 그리고 이산적인 스위칭 사건이 복합적으로 상호작용을 하는 시스템을 말한다.

- 연속적인, 이산적인 상태변수
- 연속적인 동적 특성
- 이산사건과 트리거
- 사건에 따른 이산적인 상태변수의 변화에 대한 도식화

위에 제시된 특성을 포함하는 대표적인 하이브리드 시스템은 하이브리드 동적 시스템을  $H = [Q, \Sigma, A, G]$ 로 정의한 참고문헌 [8]에 제시되어 있다.

- $Q$ 는 이산변수의 집합이다.
- $\Sigma = \{\Sigma_q\}_{q \in Q}$ 는 동적 시스템을 나타내는  $\Sigma_q = [X_q, \Gamma_q, f_q]$ 의 집합을 나타내며, 여기서  $X_q$ 는  $\Sigma_q$ 의 연속 상태 공간을 위상적인 공간으로 표현한 것을 말하며,  $\Gamma_q$ 는 상태의 변화를 집합적으로 표현한 것이며,  $f_q$ 는 연속변수의 동적특성을 표현한다.
- $A = \{A_q\}_{q \in Q}$ ,  $A_q \subset X_q$ 는 각각의  $q \in Q$ 에 대해서, 트리거 스위칭이 일어날 경우 자동적으로 스위칭 되는 이산변수 및 사건에 대한 집합을 표현한다.
- $G = \{G_q\}_{q \in Q}$ , 여기서  $G_q: A_q \rightarrow S = \cup_{q \in Q} (X_q \times \{q\})$ 는 자동적인 스위칭 변환 동작을 나타낸다. 따라서  $H$ 의 하이브리드 상태공간은  $S$ 에 의해서 범위가 주어진다.

위에 제시된 모델은 일반적인 하이브리드 시스템을 나타내고 있으며, 이번 연구에서 적용하려는 수치적 최적화 방법

을 적용하기 위한 모델링에는 적합하지 않다. 왜냐하면 이번 연구에서 하이브리드 시스템 모델링을 사용하는 목적은 최적화 알고리즘에 필요한 1차 도함수를 보다 쉽고 정확하게 계산하는 것이기 때문이다. [7]에서 제시된 DAIS 구조로 모델링된 하이브리드 시스템은 하이브리드 시스템의 일반적인 조건 및 동작 특성을 나타내며 다음 절에서 설명되는 궤도민감도 분석을 통해 1차 도함수를 계산하는데 더욱 효과적이다.

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, y) \quad (1)$$

$$0 = g(\underline{x}, y) \quad (2)$$

$$0 = \begin{cases} g^{(i-)}(\underline{x}, y) & y_{d,i} < 0, \\ g^{(i+)}(\underline{x}, y) & y_{d,i} > 0, \end{cases} \quad i = 1, \dots, d \quad (3)$$

$$\underline{x}^+ = \underline{h}_j(\underline{x}^-, y^-) \quad y_{e,j} = 0, \quad j \in \{1, \dots, e\} \quad (4)$$

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x \\ z \\ \lambda \end{bmatrix}, \quad \underline{f} = \begin{bmatrix} f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{h}_j = \begin{bmatrix} x \\ h_j \\ \lambda \end{bmatrix},$$

$$\underline{x} \in X \subseteq \mathbb{R}^n, y \in Y \subseteq \mathbb{R}^m, z \in Z \subseteq \mathbb{R}^l, \lambda \in L \subseteq \mathbb{R}^p,$$

- $x$ ; 전력각, 각속도, 자속과 같은 연속 변수
- $z$ ; 변압기 탭의 위치와 같은 이산 변수
- $y$ ; 단자전압, 단자각과 같은 대수적 변수
- $\lambda$ ; 변압기 리액턴스, 제어기 이득값, 스위칭 시간, 리미터 값과 같은 파라미터

식 (1)에 있는 미분함수  $\underline{f}$ 는 사건으로부터 상수값을 유지하는  $z$ 와  $\lambda$ 가 포함되어 있으며  $\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, y)$  형태로 구성된 함수이다. 마찬가지로, 식 (4)에 있는 리셋 함수  $\underline{h}_j$ 는 리셋 사건에서  $x$ 와  $\lambda$ 가 상수값을 유지하는 것을 나타낸다. 그러나 동적 변수  $z$ 는  $z^+ = \underline{h}_j(\underline{x}^-, y^-)$  ( $\underline{x}^+$ 는  $\underline{x}$ 의 사건 이후의 값을 나타내며,  $\underline{x}^-$ 와  $y^-$ 는  $\underline{x}$ 와  $y$ 의 사건 이전의 값을 나타낸다) 함수에 따라서 새로운 값으로 변화가 된다. 식 (2)에서,  $g$  함수는 식 (3)의  $y_d$ 의 부호에 따라  $g^{(i-)}$ 에서  $g^{(i+)}$ 로 변하는 함수로서 시스템이 동작하는 과정에서  $y_d$ 의 부호가 변할 때, 이산적인 스위칭 현상이 발생하는 조건이 되는 함수이다.

그리고 위와 같은 특성에 따라 시스템의 흐름도(system flows)  $\phi$ 는 다음과 같이 정의된다. 시스템의 흐름도는 앞서 설명한  $\underline{x}$ (선형 및 비선형 상태변수를 포함하는 변수)와  $y$ 를 통해서 나타내고자 하는 함수를 의미하며, 또한 비선형 시스템을 최적화할 때 정의되는 목적함수  $J$ 를 시스템의 흐

를도를 통해서 정의할 수 있다.

$$\phi(\underline{x}_0, t) = \begin{bmatrix} \phi_x(\underline{x}_0, t) \\ \phi_y(\underline{x}_0, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{x}(t) \\ \underline{y}(t) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

DAIS 모델에 대한 더욱 일반적이고 세세한 설명과 수식적 함수는 하이브리드 시스템에 대한 예제를 통해서 [7]에 설명되어 있다.

### 2.2 궤도 민감도 계산

위에서 정의된 시스템의 흐름도 (5)는 시스템의 파라미터의 변화나 초기값의 변화에 따라 다른 값을 갖게 된다. 이러한 변화는 시스템의 궤도민감도에 대한 정보를 제공하여 준다. 다시 말해서, 하이브리드 시스템 모델링을 통해 선형 또는 비선형 파라미터의 미소 변화에 대한 목적함수의 궤도민감도를 계산할 수 있으며, 이 궤도민감도가 1차 도함수 벡터(gradient vector)를 의미한다. 시스템의 상태변수뿐만 아니라 파라미터도 포함 가능한 변수  $x_0, y$ 에 대한 궤도민감도는 테일러 급수를 이용하여 (6)과 (7)과 같이 표현된다.

$$\Delta \underline{x}(t) = \Delta \phi_x(\underline{x}_0, t) \approx \frac{\partial \phi_x(\underline{x}_0, t)}{\partial \underline{x}_0} \Delta \underline{x}_0 \equiv \Gamma_{x_0}(t) \Delta \underline{x}_0 \quad (6)$$

$$\Delta \underline{y}(t) = \Delta \phi_y(\underline{x}_0, t) \approx \frac{\partial \phi_y(\underline{x}_0, t)}{\partial \underline{x}_0} \Delta \underline{x}_0 \equiv \Gamma_y(t) \Delta \underline{x}_0 \quad (7)$$

여기서  $\Gamma_{x_0} \in R^{n \times n}$ 와  $\Gamma_y \in R^{m \times n}$ 는 궤도민감도를 나타내는 행렬로서 각 변수에 대한 편미분 정보를 포함하고 있다. 실제로 궤도민감도 (6)과 (7)을 계산하는 것은 계산 비용(computational cost) 면에서 복잡한 계산을 요구하지만, 이번 모델에서는 사다리꼴 적분 근사법(trapezoidal integration)에 의해서 궤도민감도를 계산하므로 현실적으로 계산에 대한 비용은 문제가 되지 않는다.

### 2.3 최대 경사법(steepest descent method)을 이용한 최적화 방법

최대 경사법은 수치적 최적화 기법 중에 가장 간단한 알고리즘이다[9]. 하지만, 수렴 속도가 매우 느리다는 단점을 가지고 있다. 따라서 더욱 빠른 수렴성을 갖는 최적화 알고리즘(예를 들어, BFGS 알고리즘이나 Newton의 방법)을 적용하여 최적화 문제를 풀 수도 있으나, 4절의 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있는 것과 같이 최대 경사법만으로도 빠른 수렴성을 가지므로 다른 최적화 방법에 비해 효율성에서 문제가 되지 않으며, 또한 궤도 민감도를 통해 계산된 1차 도함수만으로 간단히 구현될 수 있기 때문에 이번 연구에서는

최대 경사법을 최적화 기법으로 선정하였다.

목적함수  $J$ 에 대한 기울기는 목적함수  $J$ 의 값이 가장 빠르게 커지는 방향에 대한 정보를 제공해 준다. 따라서 목적함수  $J$ 의 최소값을 구하는 이번 연구의 경우, 기울기의 반대 방향으로 파라미터를 업데이트하여야 한다. 최대 경사법을 적용하기 위해 다음 과정에서 보는 것과 같이 수렴 범위를 결정하고 그 범위를 만족할 때까지 파라미터는 업데이트 된다.

#### Algorithm: Steepest Descent Method

주어진 초기값  $\underline{x}_0, N$  (반복한 회수),  $\varepsilon$  (사용자가 정의한 수렴 범위),  $k > 0$ ;

**while** ( $k < N$ ) **or** ( $f_{tol}(S_C) > \varepsilon$ )

    기울기 정보를 계산  $p_k = -\nabla J(\underline{x}_k)$ .

    파라미터 업데이트  $\underline{x}_{k+1} = \underline{x}_k + \alpha_k p_k$  (where  $\alpha_k$  is the step length.)

$k = k + 1$ ;

**end (while)**

이번 연구에서 사용하는 수렴 범위(stopping criteria)를 정하기 위해 최대 상관 변화값( $S_C$ )을 사용하였으며 그에 대한 수식은 (8)에 주어졌다.

$$S_C = \left\| \frac{\lambda_{k+1} - \lambda_k}{\lambda_{k+1}} \right\|_{\infty}. \quad (8)$$

### 3. 발전기 및 PSS 모델에 적용

#### 3.1 6차 동기발전기의 하이브리드시스템 모델링

그림 1은 전력계통에서 제어기의 특성을 파악하기 위한 기본 모델인 1기 무한모선 계통을 나타낸다. 그림 1에서 발전기(G)에는 2축( $d-q$ ) 각각에 2개의 감쇠권선을 갖고 있는 6차 모델을 적용하였다[10]. 이 모델에 대한 발전기 파라미터 및 전송선로에 대한 데이터는 참고문헌 [10]에 제시되어 있다. PSS 제어기를 포함한 전압조정기/여자기 모델을 그림 1에서와 같이 발전기(G)에 연결하였다.

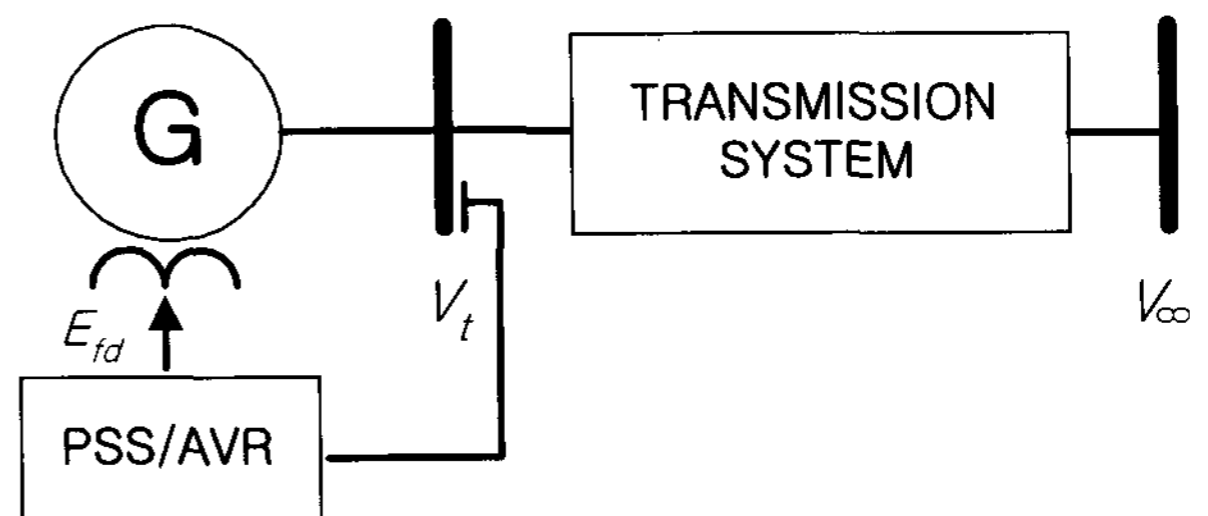


그림 1 1기 무한모선 계통

Fig. 1 Single machine infinite bus (SMIB) system

그림 2는 이번 연구에서 최적화 기법을 적용할 복입력 PSS 모델에 대한 다이어그램이며 전압조정기/여자기에 보정신호( $V_{PSS}$ )를 인가하고 있다. 복입력 PSS 모델은 전력계통에서 저주파 댐핑을 대표하는 신호인 각속도 차이( $\Delta\omega$ ) 및 유효전력의 차이( $\Delta P$ )를 입력으로 사용하여  $V_{PSS}$ 를 출력한다. 이 보정신호가 전력계통의 저주파 댐핑 향상에 중요한 역할을 하며, 그에 따라 PSS의 파라미터 최적화는 전력계통의 안정도 향상을 위해 결정적인 역할을 하게 된다. 이에 반해, 그림 3에 보이는 단입력 PSS는 각속도 차이( $\Delta\omega$ )를 입력으로 받아 전압조정기/여자기에 보정신호( $V_{PSS}$ )를 인가한다. 이 두 모델은 PSS의 가장 대표적인 모델로서 두 모델에 대한 최적화 방안의 적용 및 비교는 PSS의 모델 및 파라미터를 선정하는데 중요한 역할을 한다.

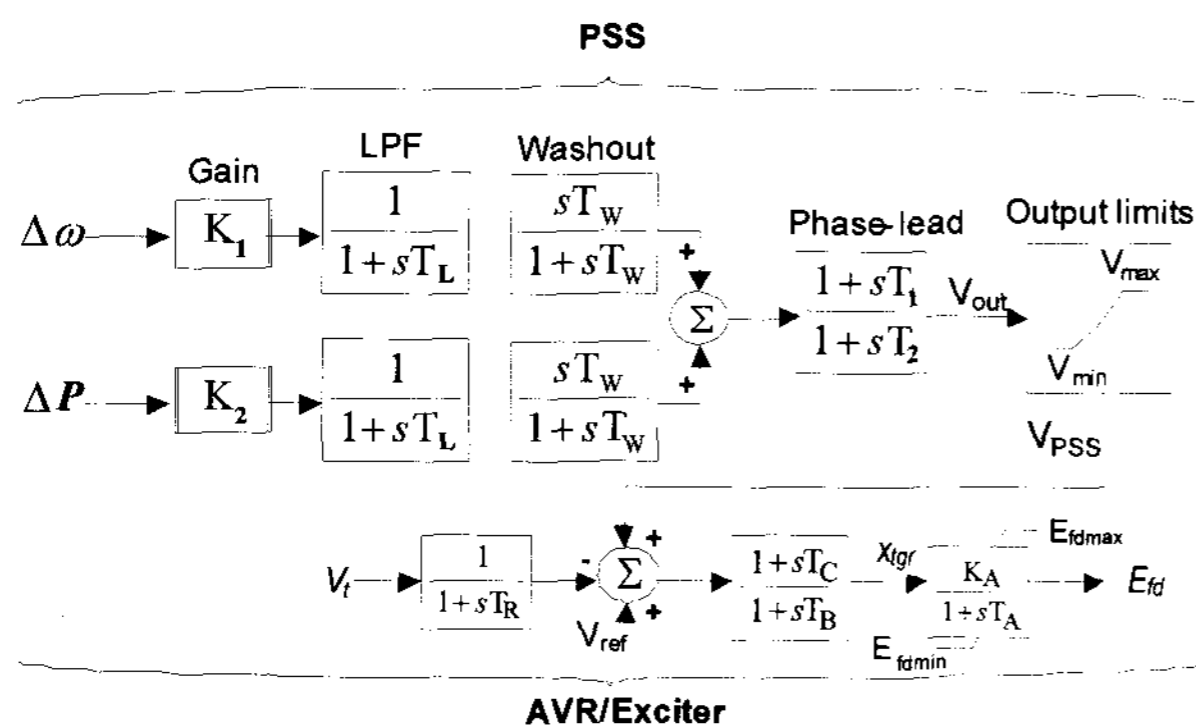


그림 2 복입력 PSS와 전압조정기/여자기(AVR/Exciter) 모델  
Fig. 2 Dual-input PSS and AVR/Exciter

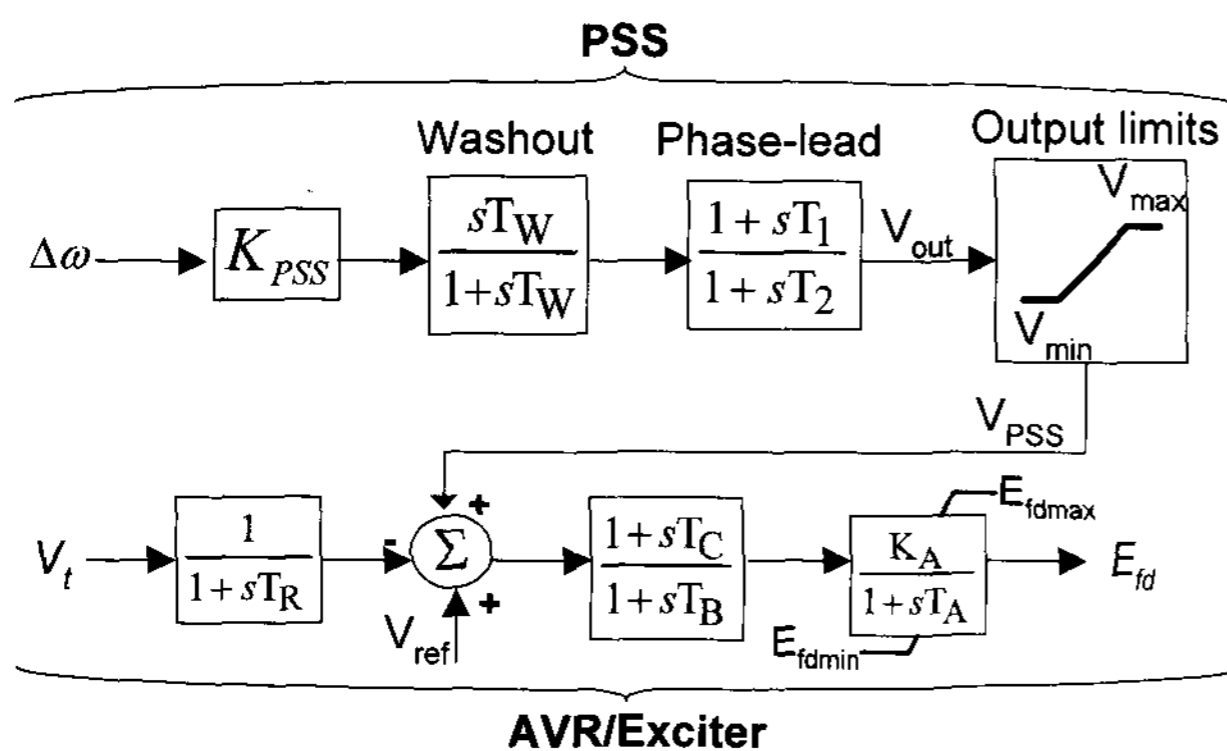


그림 3 단입력 PSS와 전압조정기/여자기(AVR/Exciter) 모델  
Fig. 3 Single-input PSS and AVR/Exciter

본 논문에서 목표를 하고 있는 대상은 앞서 언급한 것과 같이 PSS의 비선형 파라미터( $V_{max}$ 와  $V_{min}$ )이다. 따라서 이득값과 시정수와 같은 선형 파라미터는 기존의 연구에서 제시된 선정 기준을 따랐다. 이득값 선정의 경우 그림 2의  $K_1$ 과  $K_{PSS}$ 는 2의 값을 사용하였으며, pu 단위로 보았을 경우, 각속도( $\omega$ )가 유효전력( $P$ )의 변화량이 비슷한 수준을 보이므로 균형을 맞추기 위해서  $K_2$ 의 값도  $K_1$ 과 같이 2의 값을 사용하였다. 시정수 선정의 경우, 일반적으로 전력계통의 저주파 신호의 대역은 0.8-2.0Hz로서 그림 2의 저주파 대역 필터(LPF)에서 사용되는 시정수  $T_L$ 은 0.01의 값을 사용하였

으며, 그림 2와 3에서 고주파 대역 필터 역할을 하는 제어기(Washout)는 신호의 DC 요소를 제거하기 위해서 시정수  $T_W$ 는 10의 값을 사용하였다. 또한, 위상제어기(Phase-lead)의 경우는  $T_1$ 은 5,  $T_2$ 는 0.05의 값을 사용하였다.

PSS와 전압조정기/여자기를 포함한 전력계통을 식 (1)~(4)를 이용하여 DAIS 구조의 하이브리드 시스템으로 모델링을 수행한다. 그 중에 식 (9)과 (10)는 그림 2와 3에서 PSS의 출력 리미터와 여자기의 출력리미터를 각각 하이브리드 시스템으로 모델링한 수식을 의미한다. 시스템에 동작 범위가 크게 변하거나 외란이 가해졌을 때, 각각의 제어기에는 입력( $\Delta\omega$ ,  $\Delta P$ 와  $V_t$ )의 큰 변화 때문에 선형제어기의 출력값(그림 2와 3에서  $V_{out}$ )은 출력 리미터의 리미터값에 따라 제한된다. 이 때, 비선형의 이산사건이 발생하게 되며, 하이브리드 시스템 모델링 하에서 식 (9)과 (10)에서와 같이 각 조건에 해당하는 신호를 출력하게 되어 선형 및 비선형 특성이 포함된 시스템을 이산사건이 발생하거나 하지 않는 경우에도 일관되게 모델링할 수 있게 된다.

$$y_1 = V_{max} - V_{out};$$

$$y_2 = V_{out} - V_{min};$$

$$0 = \begin{cases} g_1^{(-)}(x, y) = V_{PSS} - V_{max} & y_1 < 0, \\ g_1^{(-)}(x, y) = V_{PSS} - V_{min} & y_2 < 0, \\ g_1^{(+)}(x, y) = g_2^{(+)}(x, y) = V_{PSS} - V_{out} & y_1 > 0, y_2 > 0. \end{cases}$$

(9)

$$y_3 = E_{fdmax} - E_{fd}; \quad y_4(\text{upper limits switch}): (+ \text{ when } y_3 < 0)$$

$$y_5 = E_{fd} - E_{fdmin}; \quad y_6(\text{lower limits switch}): (+ \text{ when } y_5 < 0)$$

$$0 = \begin{cases} g_3^{(-)}(x, y) = y_4 - 1 & y_3 < 0, \\ g_4^{(-)}(x, y) = E_{fd} - E_{fdmax} & y_3 < 0, \\ g_5^{(-)}(x, y) = y_6 - 1 & y_5 < 0, \\ g_6^{(-)}(x, y) = E_{fd} - E_{fdmin} & y_5 < 0, \\ g_3^{(+)}(x, y) = g_5^{(+)}(x, y) = y_4 = y_6 & y_3 > 0, y_5 > 0, \\ g_4^{(+)}(x, y) = g_6^{(+)}(x, y) = K_A \cdot x_{trg} - E_{fd} & y_3 > 0, y_5 > 0. \end{cases}$$

(10)

### 3.2 목적함수의 정의 및 레도민감도 계산

비선형 최적화 문제를 풀기 위해서는 목적함수  $J$ 가 정의되어야 한다. 식 (11)에서와 같이 일반적으로 목적함수의 최소값을 갖게하는 파라미터를 선정하는 최적화 문제는 식 (12)의 제한조건 하에서 식 (13)와 같이 표현될 수 있다. 이와 같은 기본적인 비선형 최적화 문제에 대한 접근 방법을 통해 PSS의 비선형 파라미터의 최적화 방안을 도모하고자 한다.

$$\min_{\lambda, t_f} J(x, y, \lambda, t_f)$$

(11)

$$\text{subject to } \begin{bmatrix} \underline{x}(t) \\ \underline{y}(t) \end{bmatrix} = \phi(\underline{x}_0, t), \text{ where } \underline{x} \in S \text{ (constraint set)} \quad (12)$$

$$\mathbf{J} = \phi(\underline{x}(t_f), \underline{y}(t_f), \lambda, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} \psi(\underline{x}(t), \underline{y}(t), \lambda, t) dt, \quad (13)$$

여기서  $\lambda$ 는 식 (13)에 있는 목적함수  $\mathbf{J}$ 가 최소값을 갖게 하기 위해서 업데이트 되는 파라미터(이번연구에서 PSS의 출력 리미터 값)이며,  $t_f$ 는 시뮬레이션의 최종 시간을 의미한다. PSS 제어기 튜닝의 목적은 전력계통의 댐핑을 증진시키며, 가능한 빠른 시간 내에 외란 후의 안정도를 보장하는 것이다. 따라서 전력계통의 저주파 댐핑의 대표적인 요소는 각속도 차이( $\Delta\omega$ )와 단자전압 차이( $\Delta V_t$ )이므로, 이에 대한 분석은 계통의 댐핑 향상과 안정도 보장의 좋은 지표가 된다[4]. 그러므로 식 (13)에 정의된 목적함수  $\mathbf{J}$ 는 다음과 같이 어떤 특정 최종시간에 대해서 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\mathbf{J}(\lambda) = \int_{t_0}^{t_f} \left( \begin{bmatrix} \omega(\lambda, t) - \omega^s \\ V_t(\lambda, t) - V_t^s \end{bmatrix}^T \mathbf{V} \begin{bmatrix} \omega(\lambda, t) - \omega^s \\ V_t(\lambda, t) - V_t^s \end{bmatrix} \right) dt, \quad (14)$$

여기서  $\mathbf{V}$ 는 가중치 행렬이며,  $\omega^s$ 와  $V_t^s$ 는 외란 전후의  $\omega$ 와  $V_t$ 의 정상상태의 값이다. 특히, 가중치 행렬  $\mathbf{V}$ 의 대각 요소는 각속도와 단자전압의 상충적 성향에 대해 균형을 고려하여 결정되어진다.

위에서 정의된 목적함수  $\mathbf{J}$ 를 식 (5)에서 정의된 것과 같이 시스템 흐름도로 가정하게 되면, DAIS 구조의 하이브리드 시스템의 모델링 하에서 식 (6)과 (7)에 의해 궤도민감도를 구할 수 있게 된다. 그 값은 다음과 같이 정의되며 2.3절에서 언급한 것과 같이 최대경사법에서 사용되는 1차 도함수로서 사용될 수 있다.

$$\nabla \mathbf{J} = \Gamma_{\underline{x}_{\text{cost}}} (t_f). \quad (15)$$

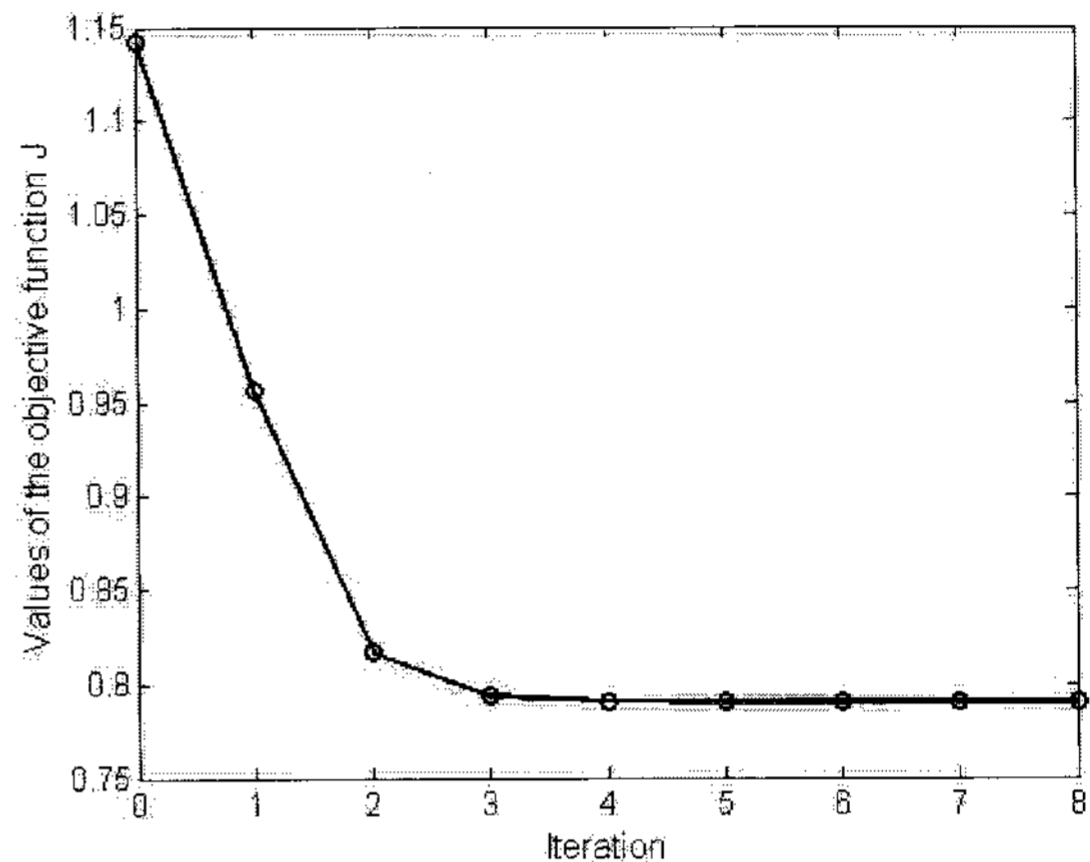
#### 4. 시뮬레이션 결과

##### 4.1 1기 무한모선 시스템에 적용한 사례

그림 1의 1기 무한모선 시스템에 그림 2와 3의 PSS 모델을 각각 장착하여 최적화 방법을 적용했을 때 목적함수  $\mathbf{J}$ 의 변화는 그림 4에 나타나 있다. 상정사고가 발생했을 경우 최적화된 PSS 제어기의 저주파 댐핑 향상을 확인하기 위하여 그림 1의 1기 무한모선 시스템이 정상상태를 유지하다 0.05초에 상정사고가 발생하는 것으로 가정하였다. 상정사고는 단락 임피던스 0.05 pu인 3상 단락이 200 ms 동안 단자전압에 가해진 것을 가정하였으며, 시뮬레이션은 5초 동안 실행하였다.

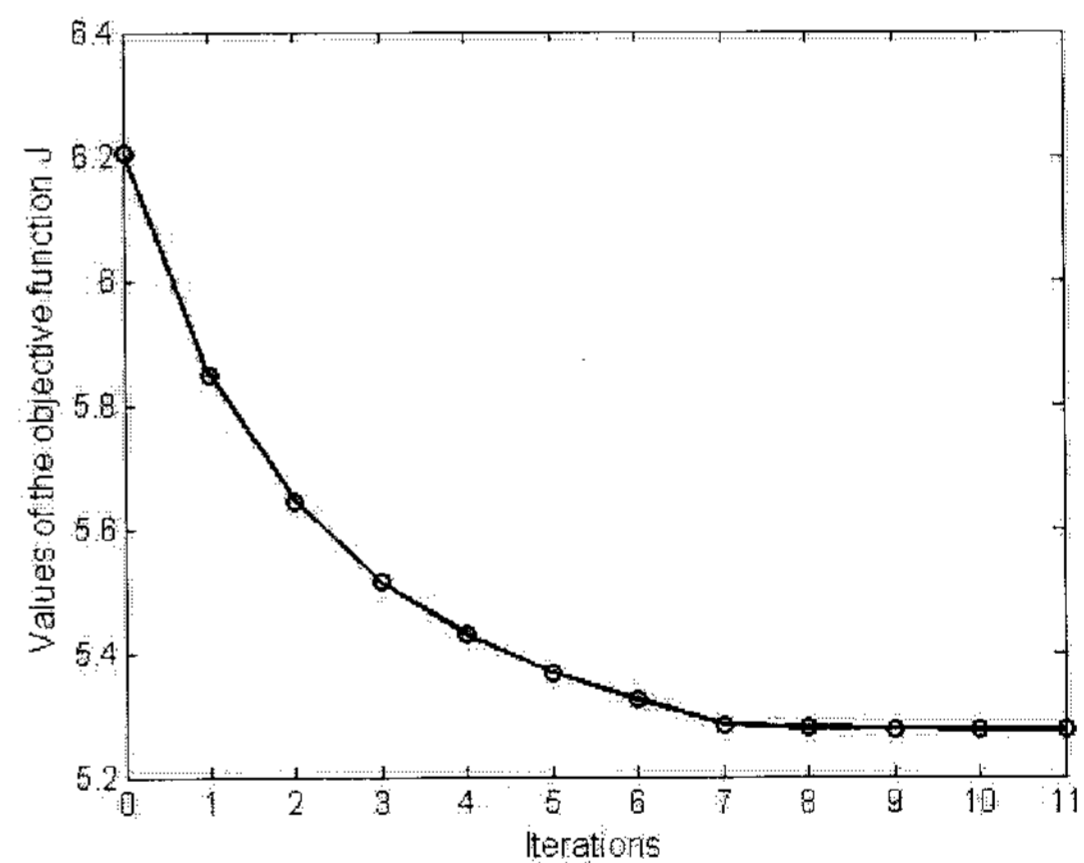
그림 4에서 볼 수 있는 것과 같이 최적화 기법을 복입력 PSS 모델에 적용하였을 경우, 단입력 PSS 모델보다 더 빠

른 수렴속도를 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한, 앞서 식 (14)에서 정의한 목적함수는 PSS 모델의 변수나 파라미터가 이용된 것이 아니라 발전기의 상태변수인 각속도와 단자전압이 이용되었다. 즉, 복입력 PSS 모델에 최적화 기법을 적용하였을 경우, 목적함수의 수렴속도가 빠를 뿐 아니라 목적함수의 절대값 자체가 작다는 것(복입력 PSS의 경우 0.790 값을 갖는데 반해 단입력 PSS의 경우 5.275의 값을 갖는다)은 시스템이 보다 향상된 댐핑을 보인다는 것을 간접적으로 나타내고 있는 것이다.



(a) 복입력 PSS의 경우

(a) A case of the dual-input PSS



(b) 단입력 PSS의 경우

(b) A case of the single-input PSS

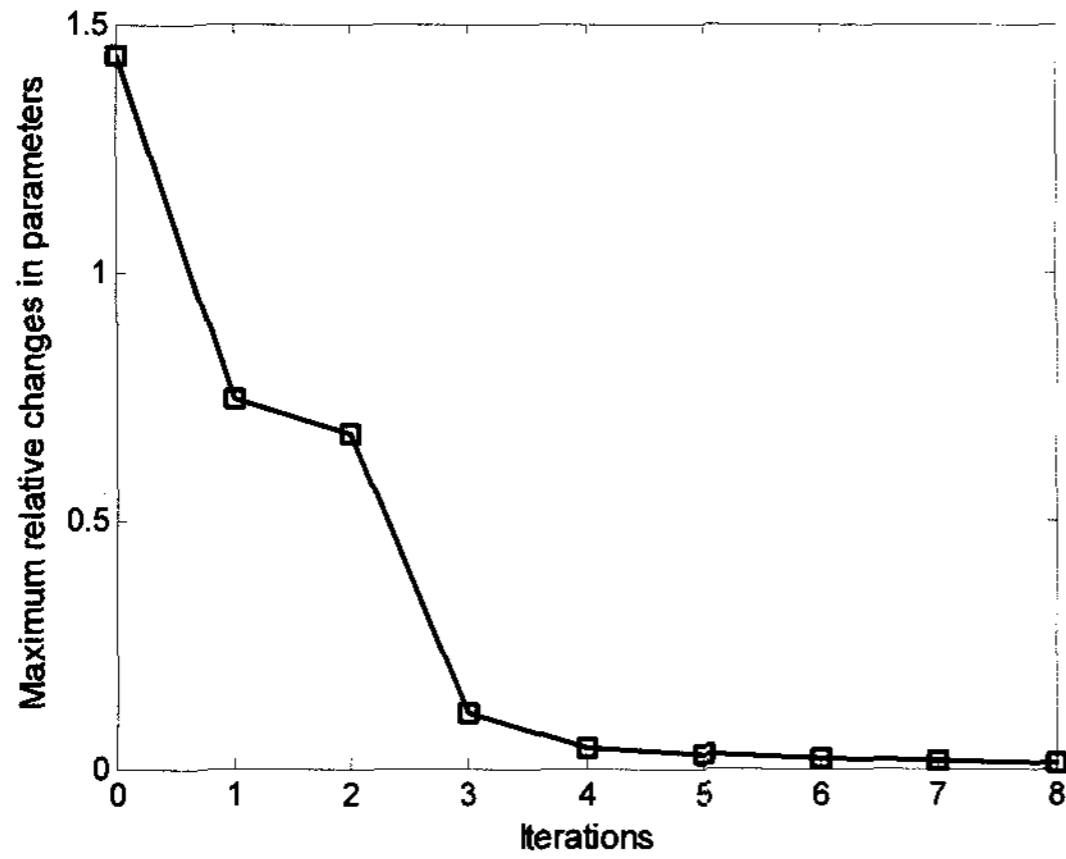
그림 4 목적함수 J의 변화값

Fig. 4 Values of the objective function J variations

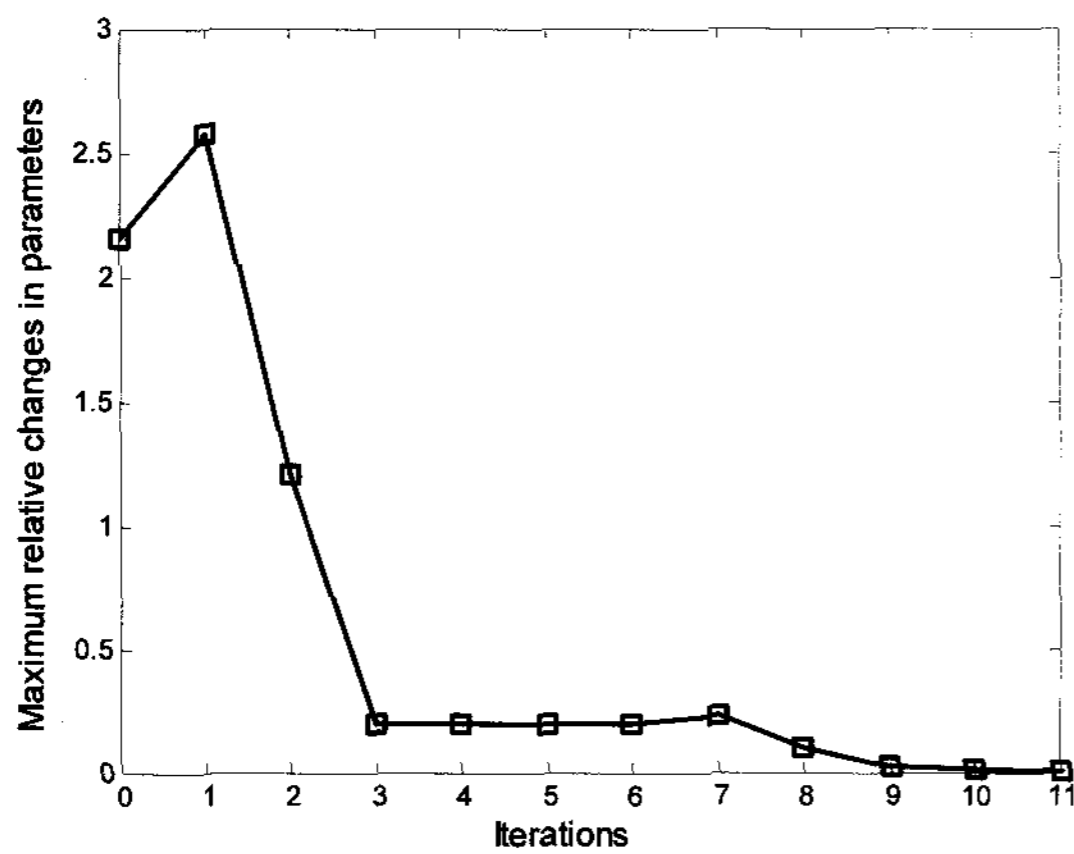
또한 그림 5는 식 (8)에서 정의된 것과 같이 수렴성을 판단하는 척도로 사용된 파라미터의 최대 상관 변화값을 나타내고 있다. 최대 상관 변화값에서 확인할 수 있는 것과 같이 복입력 PSS의 경우 파라미터의 6번째의 업데이트만에서의 수렴함을 확인할 수 있다. 이것은 그림 5(b)에 나타나는 단입력 PSS의 경우와 비교하였을 때, 매우 빠른 수렴성을 나타냄을 확인할 수 있다.

그림 5에서와 같이 PSS의 출력 리미터값은 복입력 PSS의 경우 8번째만에, 단입력 PSS의 경우 11번째만에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 각각 같은 초기값([0.1 -0.1])을 사

용하였으며, 최적화 방법을 통해 최종적으로 선정된 출력 리미터값은 표 1에서와 같다. 복입력 PSS와 단입력 PSS의 경우 공통적인 면은 리미터의 양수값은 변화량이 적는데 반해 리미터의 음수값은 그 변화량이 크다는 것이다. 이것은 음의 리미터값이 목적함수  $J$ 에 대해 큰 민감도를 갖게 되어 그에 따라 큰 변화량을 갖는 것을 확인할 수 있다.



(a) 복입력 PSS의 경우  
(a) A case of the dual-input PSS



(b) 단입력 PSS의 경우  
(b) A case of the single-input PSS

그림 5 최대상관 변화값(SC)의 변화  
Fig. 5 Variations of the maximum relative changes

표 1 1기 무한모션에서 PSS의 출력 리미터값의 초기값과 최적값  
Table 1 The initial and optimal values of the saturation limiters of PSS in SMIB system

PSS 리미터 값	초기값		최적값	
	$V_{max}$	$V_{min}$	$V_{max}$	$V_{min}$
단입력 PSS	0.1	-0.1	0.1105	-0.3365
복입력 PSS	0.1	-0.1	0.1466	-0.3981

본 연구에서 제시된 최적화 알고리즘을 통해 각각의 PSS의 최적값을 이용하여 1기 무한모션 시스템에 적용하여 그 성능을 비교하였다. 그림 6에서 8은 표 1에서 제시된 초기

값을 사용했을 때와 비교하여 각각의 PSS 모델의 최적값이 댐핑 향상에 영향을 주는 정도를 보여주고 있다. 그림에서 보여지는 것과 같이 초기값을 이용했을 경우보다 최적화된 단입력 PSS 모델을 이용했을 경우 댐핑이 향상되는 것을 확인할 수 있으며, 또한 최적화된 복입력 PSS 모델은 최적화된 단입력 PSS 모델보다 더 큰 댐핑 향상을 보이는 것을 확인할 수가 있다.

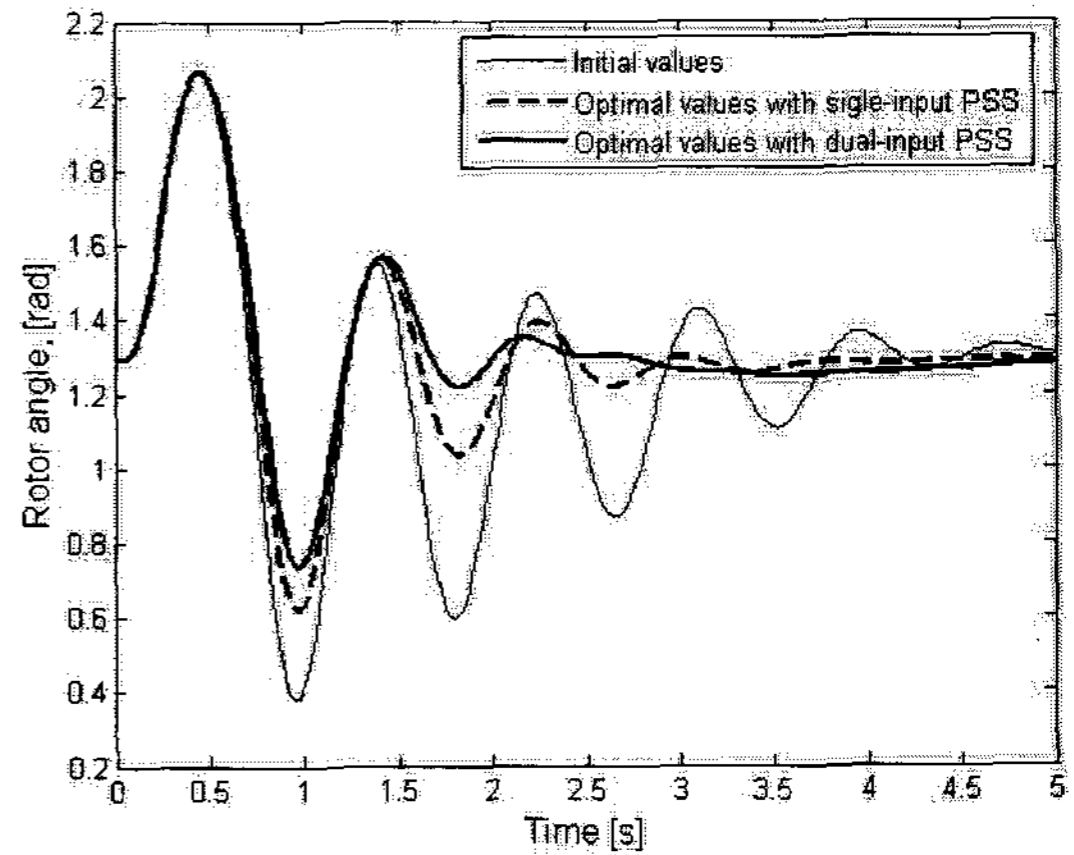


그림 6 발전기 전력각 [rad]  
Fig. 6 Generator rotor angle response [rad]

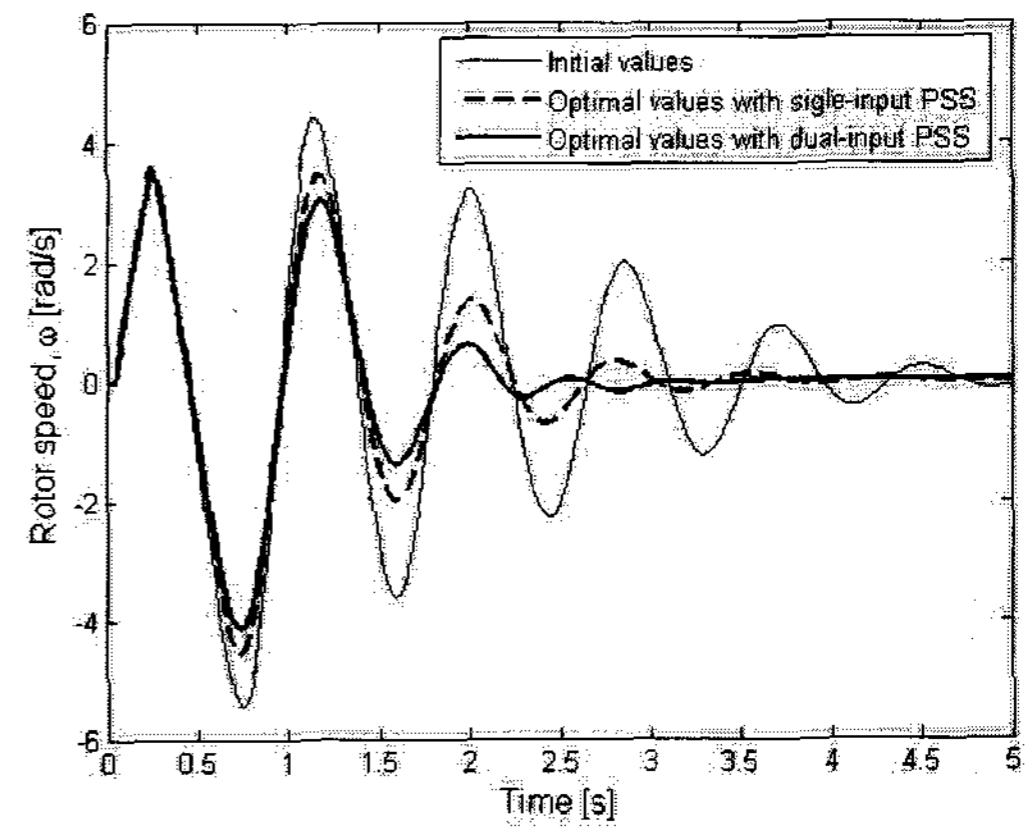


그림 7 발전기 각속도 [rad/s]  
Fig. 7 Generator speed response [rad/s]

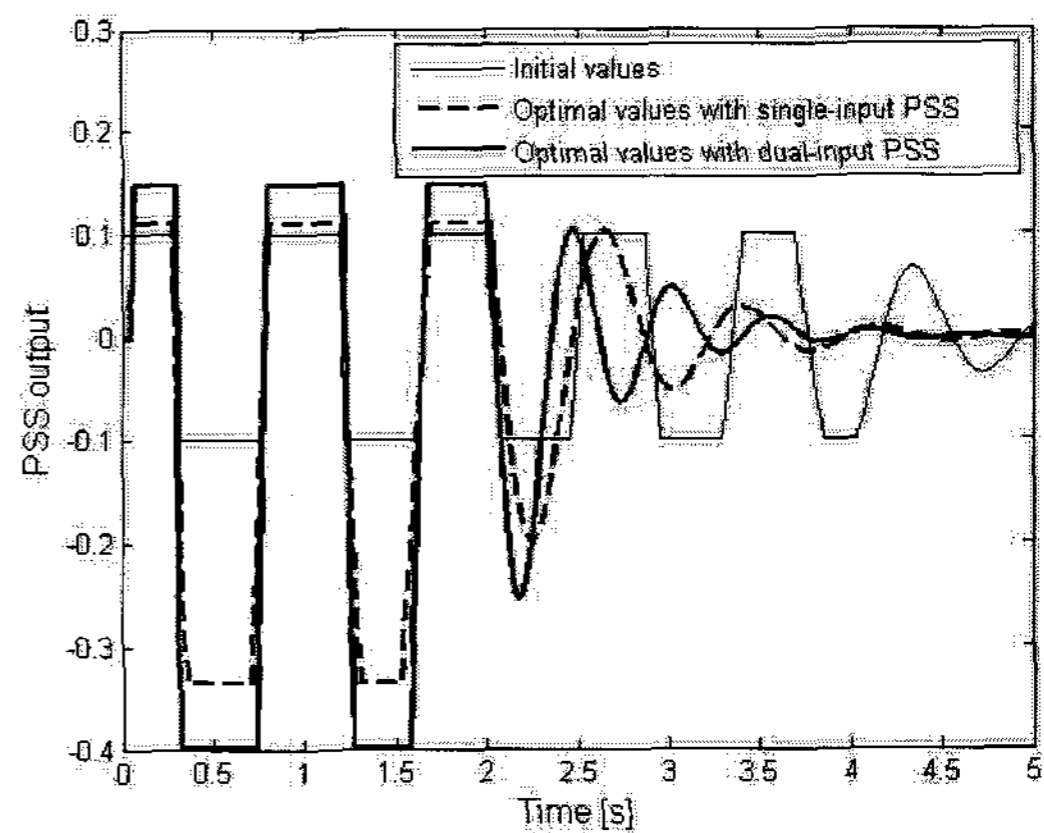


그림 8 PSS 출력 응답  
Fig. 8 PSS output response

특히, 그림 8에서 보이는 PSS 출력 응답은 출력신호가 리미터에 제한되었을 경우 발생하는 이산적인 사건을 통해 선형 제어기 부분과 비선형 제어기 부분의 상호복합된 하이브리드 시스템 모델링의 비선형적 특성을 나타내고 있다. 또한, 그림 8에서와 같이 PSS의 출력신호가 리미터에 제한되기 때문에 이득값( $K_1$ ,  $K_2$  혹은  $K_{PSS}$ )과 같은 선형 파라미터를 증가시켜도 리미터를 통과한 출력신호에는 큰 변화를 가져올 수 없게 된다. 따라서 큰 상정사고가 발생하였을 경우에는 리미터의 값을 최적화 하는 것이 댐핑 강화에 더욱 효과적이다.

한편 PSS의 리미터는 일반적으로 발전기의 단자전압이 정상상태의 15%를 넘지 않도록 설계되어야 한다[1]. 그림 9에서 점선은 단자전압에 대한 15%를 초과하는 상한선을 의미한다. 그림 9에서 알 수 있듯이 최적화된 복입력 PSS는 단자전압의 상한기준을 만족할 뿐만 아니라 2번째 진동 이후에 거의 수렴하는 특성을 보이므로 과도 안정도 면에서 초기값을 적용했을 때 보다 효과적이라는 것을 확인할 수 있다.

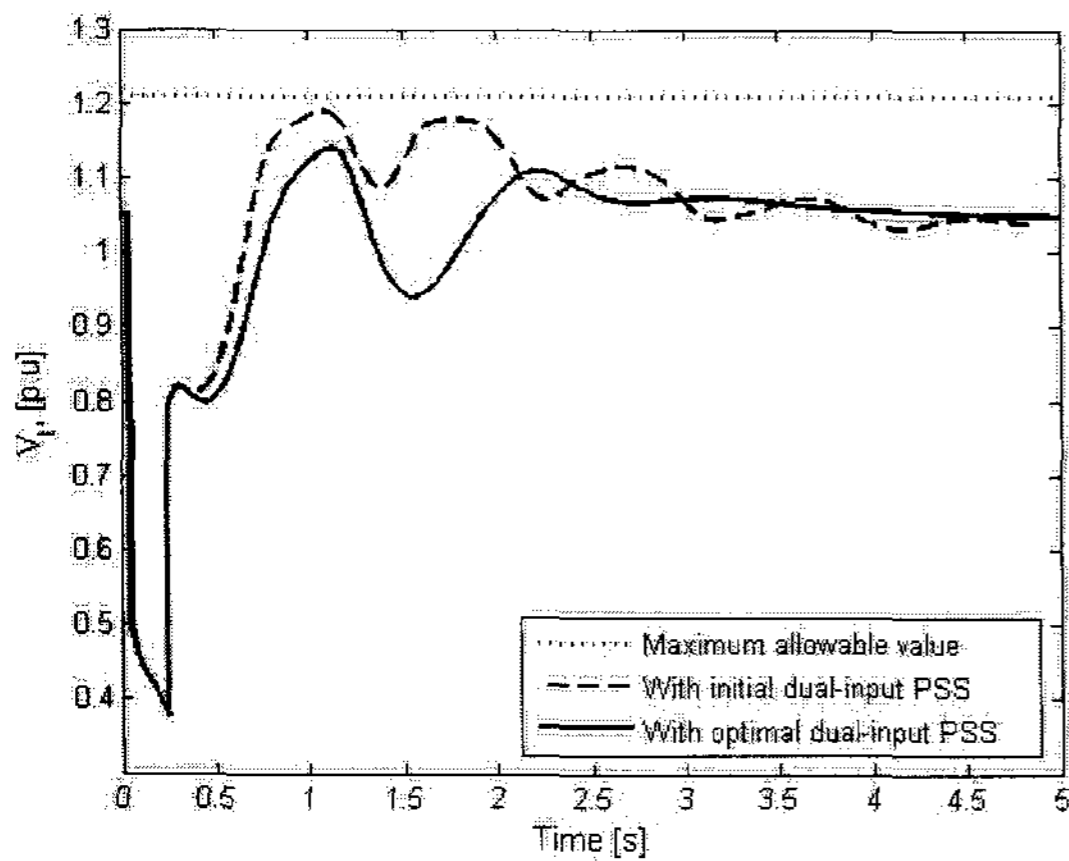


그림 9 발전기의 단자전압 응답 [pu]  
Fig. 9 Terminal voltage response of the generator [pu]

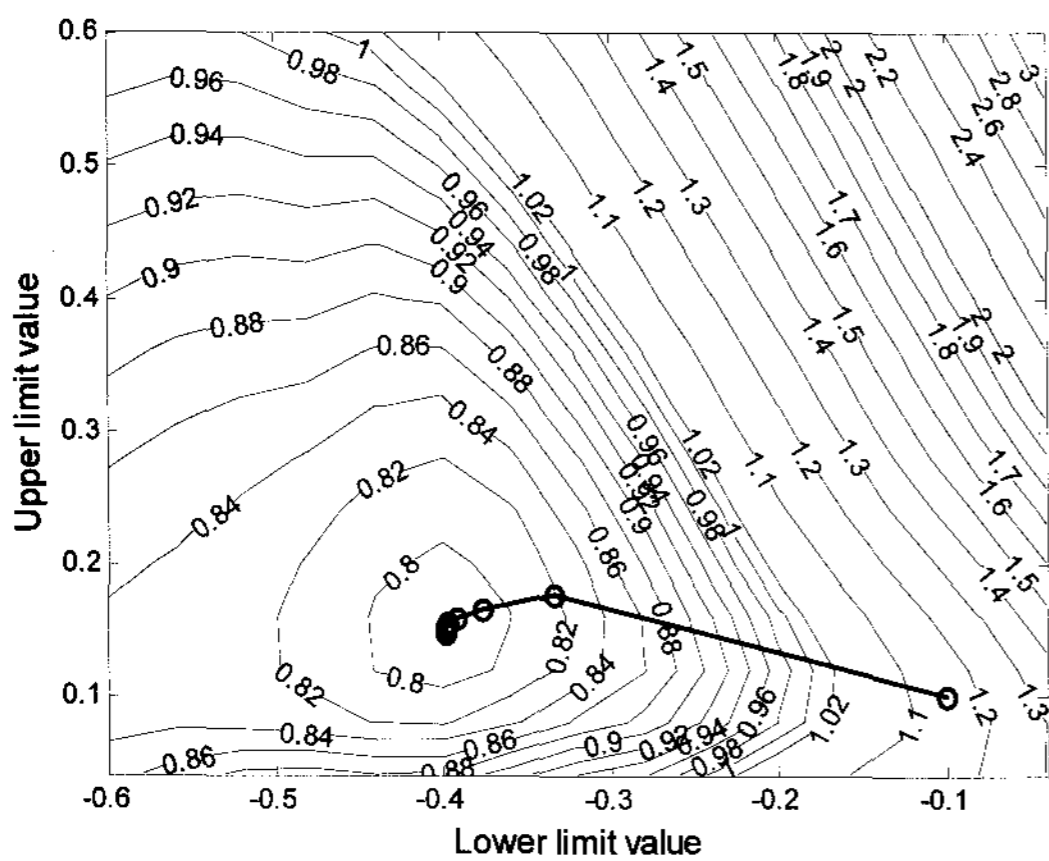


그림 10 복입력 PSS에 대한 그래프 해법  
Fig. 10 Graphical solution with the dual-input PSS

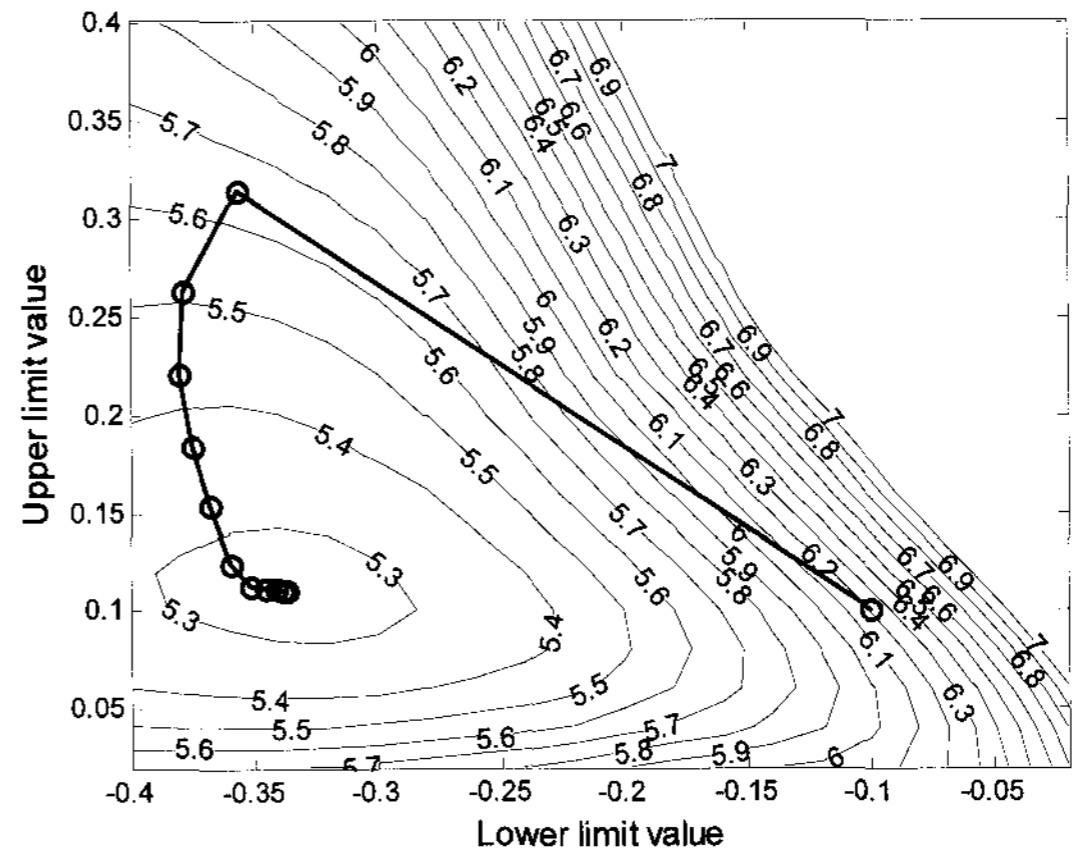


그림 11 단입력 PSS에 대한 그래프 해법  
Fig. 11 Graphical solution with the single-input PSS

한편, 위의 결과만을 바탕으로  $V_{max}$  값을 더욱 높이거나  $V_{min}$  값을 더 낮추는 것이 댐핑 향상에 효과적일 것이라는 추측은 직관적으로 합당할 수도 있으나 임의로 파라미터를 선정하는 것은 응답특성을 향상시키는 방향과 꼭 일치하지 않는다는 것을 알아둘 필요가 있다. 이와 같은 의문점을 해결하고 위에서 각각의 경우에 구한 최적값이 실제 광역 최적값임을 확인하기 위해 그래프 해법(graphical solution)[11]을 적용하였다. 그림 10과 11은 복입력 PSS 모델과 단입력 PSS 모델에 대한 그래프 해법을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 사용한 알고리즘을 통해 두 가지의 경우(복입력 PSS와 단입력 PSS에 최적화 방법을 적용한 경우) 모두 가능한 해(feasible solution)의 범위 내에서 광역 최적값을 찾아가는 것을 확인할 수 있다. 즉, 그림 10과 11은 앞서 구한 최적값을 조금씩 변화시켜도 더 좋은 댐핑 효과를 얻을 수 없음을 확인시켜 주고 있다.

4.2 다기 계통(4기 6모선 시스템)에 적용한 사례

이번 사례에서는 그림 12에서와 같이 다기 계통(4기 6모선 시스템)에 4.1절에서 제시한 최적화 방법을 적용하였다. 4기 6모선 시스템에 대한 자세한 데이터는 참고문헌 [4]에 주어져 있다. 각 발전기 모델들은 참고문헌 [10]에서와 같이 4차의 시스템으로 모델링되었으며, 모든 발전기 모델은 복입력 PSS를 포함하고 있다.

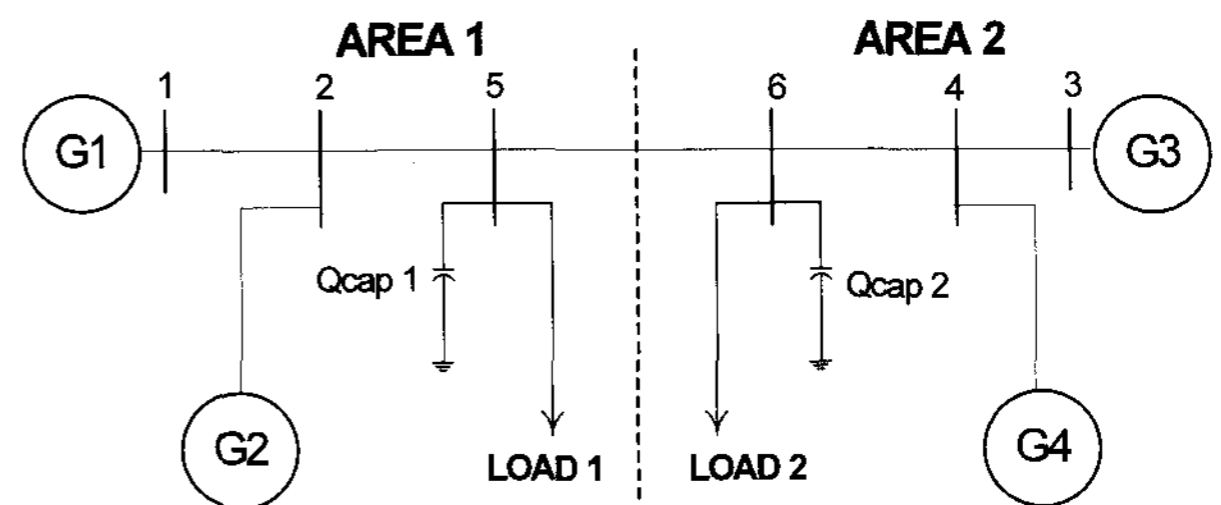


그림 12 다기 계통 (4기 6모선 시스템)  
Fig. 12 Multi-machine power system (four-machine 6-bus system)

그림 12와 같은 다기 계통의 각 지역에서 각각 다른 외란이 발생하여도 효과적으로 댐핑을 향상시키는 최적 리미터 값을 선정하기 위해서 식 (14)에서 정의된 목적함수  $J$ 는 식 (16)에서와 같이 수정되어야 한다. 식 (16)에서 목적함수  $J_{total}$ 은 복잡한 전력 계통을 서로간의 상호작용이 큰 곳을 지역 단위( $N$  개의 지역)로 나눈 후, 각 지역의 대표 모선에 3상 단락을 인가시켰을 때의 목적함수들의 합으로 정의된다. 즉, 전력 계통에서 외란이 발생할 수 있는 지역들에 대한 저주파 댐핑 정보를 모두 포함하는 목적함수  $J_{total}$ 을 정의함으로써 다양한 지역에 대한 외란에도 댐핑을 강화할 수 있는 강인한 PSS를 설계할 수 있다. 본 사례에서는 목적함수  $J_{total}$ 를 계산하기 위해 그림 12의 지역 1과 지역 2의 대표 모선을 각각 5번과 6번 모선으로 정의하였다.

$$J_{total} = J_1(\lambda) + J_2(\lambda) + \dots + J_N(\lambda) = \sum_{j=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^n \int_{t_0}^{t_f} \left[ \begin{matrix} \omega_i(\lambda, t) - \omega_i^s \\ V_{i,j}(\lambda, t) - V_{i,j}^s \end{matrix} \right]^T \mathbf{V} \left[ \begin{matrix} \omega_i(\lambda, t) - \omega_i^s \\ V_{i,j}(\lambda, t) - V_{i,j}^s \end{matrix} \right] dt \right\}, \quad (16)$$

여기서  $N$ 은 전력 계통에서 지역의 개수,  $n$ 은 계통 내의 총 발전기의 개수,  $\mathbf{V}$ 는 (14)에서와 같은 가중치 행렬을 의미한다.

4.1절에서와 같이 4개의 발전기에 대한 PSS의 최적화를 위해 케도민감도 분석을 통한 최대경사법 알고리즘이 적용되었다. 이번 사례에서는 단일력 PSS에 대한 시뮬레이션을 제외하고 복입력 PSS의 초기값과 그에 대한 최적값만을 비교하였으며 그 결과는 표 2에 주어져 있다.

표 2 4기 6모선 시스템에서 PSS의 출력 리미터값의 초기값과 최적값

Table 2 The initial and optimal values of the saturation limiters of PSS in a 4-machine 6-bus system

복입력 PSS의 리미터 값	초기값		최적값	
	$V_{max}$	$V_{min}$	$V_{max}$	$V_{min}$
G1	0.05	-0.05	0.0412	-0.1423
G2	0.05	-0.05	0.1488	-0.1221
G3	0.1	-0.1	0.0767	-0.1856
G4	0.1	-0.1	0.0877	-0.2996

최적화 기법을 적용한 결과 전력계통의 댐핑 정도를 확인하기 위해서, 각 지역의 5번 및 6번 모선에 3상 단락을 인가하였다. 그림 13은 5번 모선에 4.1절에서와 같은 3상 단락이 인가되었을 때의 지역 1에서의 각속도의 차이의 변화를 보여주고 있다. 또한 그림 14는 6번 모선에 3상 단락이 인가되었을 때의 지역 2의 각속도 차이를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 표 2에 제시된 PSS 리미터의 최적값은 초기값을 사용했을 때보다 첫 번째 진동에서부터 향상

된 댐핑을 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 두 경우 모두 외란이 어느 지역에서 발생하더라도 첫 번째 진동에서부터 보다 향상된 댐핑을 나타내므로 최적화된 PSS는 전력계통에 높은 안정성과 신뢰성 및 강인성을 보장한다는 것을 확인할 수 있다.

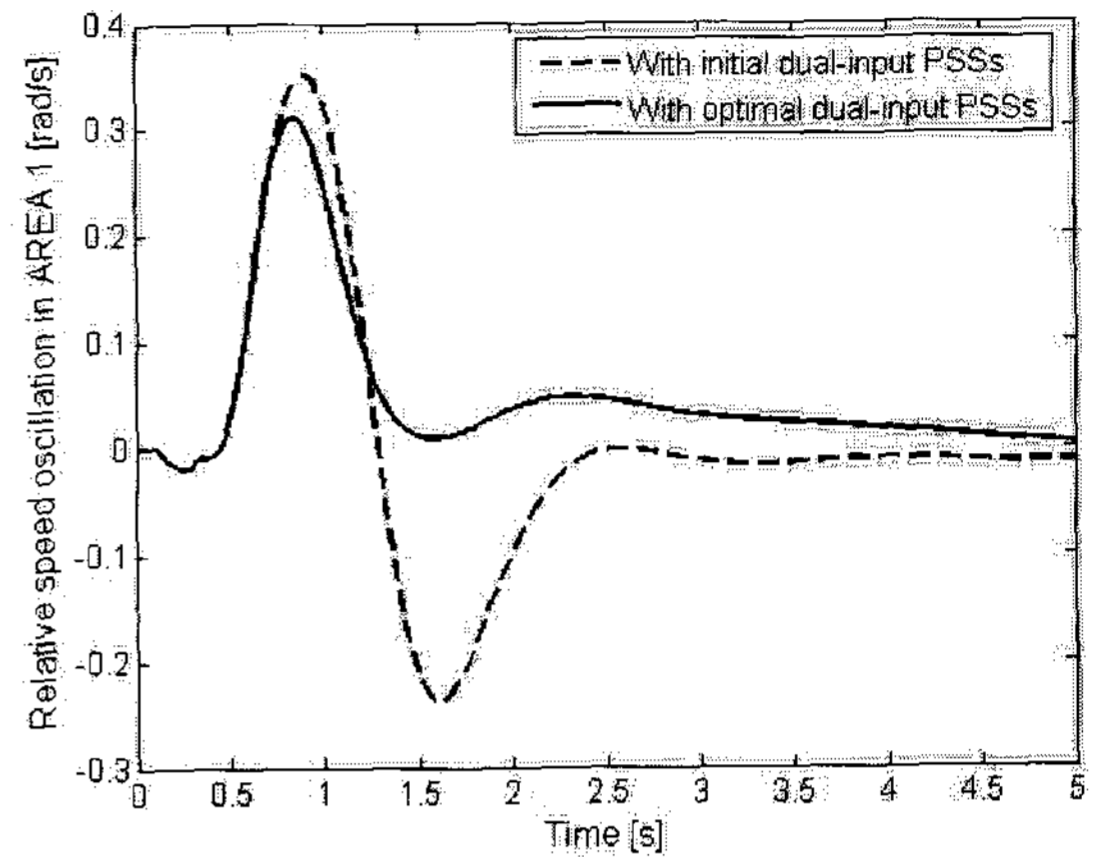


그림 13 지역 1에서 발전기의 각속도 차이( $\Delta\omega_1-\Delta\omega_2$ ) [rad/s]  
Fig. 13 Relative speed oscillations ( $\Delta\omega_1-\Delta\omega_2$ ) in AREA 1 [rad/s]

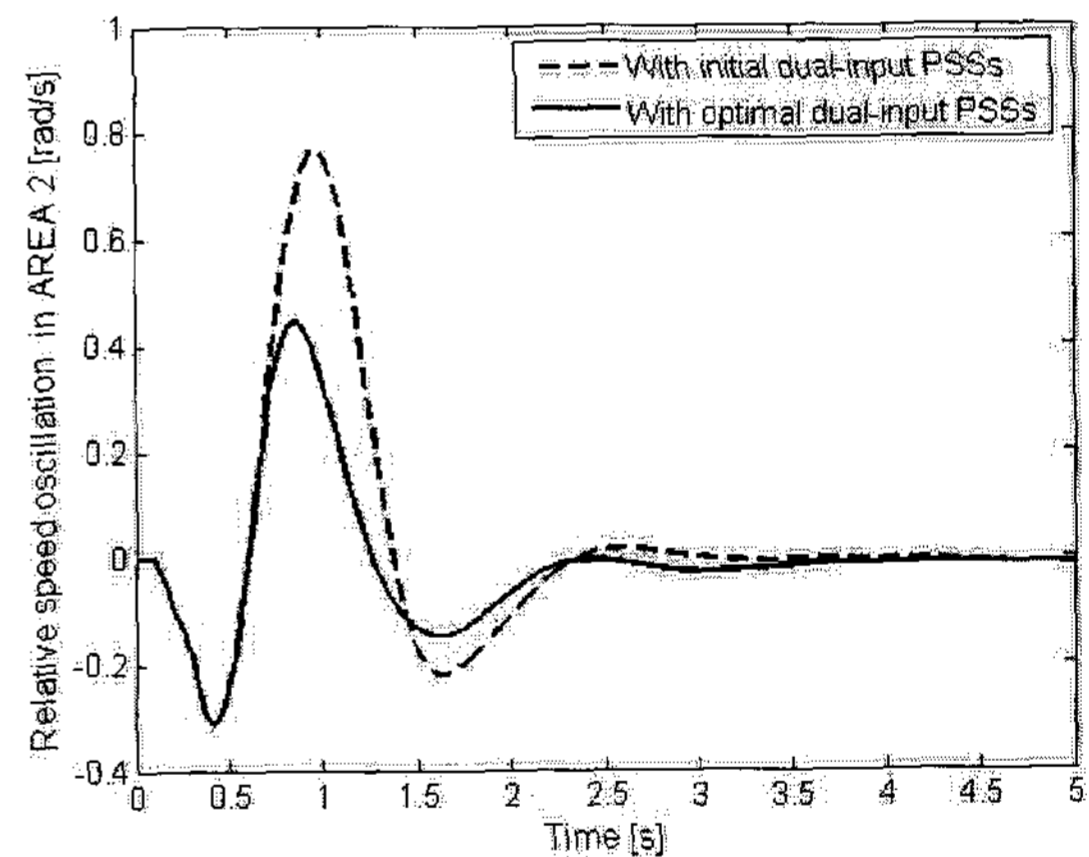


그림 14 지역 2에서 발전기의 각속도 차이( $\Delta\omega_3-\Delta\omega_4$ ) [rad/s]  
Fig. 14 Relative speed oscillations ( $\Delta\omega_3-\Delta\omega_4$ ) in AREA 2 [rad/s]

비록 이번 사례에서 구한 최적값이 1기 무한모선의 경우와 같이 광역 최적값임을 확인할 수는 없지만, 목적함수  $J$ 가 최소값을 갖는 파라미터를 구함으로써 최소한 지역 최적 조건(local optimal condition)을 만족하는 것을 확인할 수가 있다. 또한, 본 논문에서는 보다 복잡한 전력 계통에서의 지역을 나누는 방법과 대표 모선을 선택하는 기준에 대한 분석을 다루지는 않았으나, 본 논문에서 제시한 것과 같이 전력계통에 적절한 지역과 대표 모선을 선택한다면 어느 곳에 상정사고가 발생하여도 향상된 댐핑을 보이는 강인한 PSS의 설계를 가능할 것으로 보인다.



### 5. 결 론

본 논문에서는 복입력 및 단입력 전력시스템 안정화 장치(PSS)의 비선형 리미터에 수학적이고 체계적인 최적화 기법을 적용함으로써 큰 상정사고가 발생했을 경우 전력 계통의 저주파 댐핑 향상에 효과적인 모델을 선정하였다. PSS 리미터의 값은 비선형 파라미터로서 그 선정에 있어서 기존의 고유치 분석법을 적용할 수 없었으며, 단지 'trial and error' 기반의 *ad hoc* 방법 정도만이 쓰일 뿐이었다. 하지만 PSS의 리미터는 큰 상정사고 시 저주파 댐핑을 향상시키고 단자전압의 강하를 막아주는 중요한 요소이므로 파라미터의 선정에 있어서 체계적인 접근이 필요하였으며, 선형 및 비선형 파라미터의 복합적인 상호작용 특성을 갖는 PSS를 최적화하기 위해서 전력계통에 하이브리드 시스템 모델링을 적용하였다. 즉, DAIS(differential-algebraic-impulsive-switched) 구조의 하이브리드 시스템을 전력계통 모델링에 적용하여 목적함수  $J$ 에 대한 비선형 파라미터의 1차 도함수를 계산함으로써 PSS의 출력 리미터 값을 최적화하였다. 이 때, 사용된 1차 도함수는 하이브리드 시스템의 케도민감도 해석에 의해 계산되었으며, 그 1차 도함수를 비선형 시스템의 최적화를 위한 알고리즘(최대 경사법)에 적용하여 전력 계통의 댐핑 향상을 위한 광역 최적화를 달성하였다.

결국, 하이브리드 시스템 모델링에 기반하여 복입력 PSS와 단입력 PSS의 비선형 파라미터를 최적화함으로써 단입력 PSS 모델보다 복입력 PSS 모델이 최적화 기법을 적용하기에 효율적임과 동시에 전력계통의 저주파 댐핑 향상에 효과적임을 확인하였다. 또한, 본 논문에서 제안된 비선형 파라미터에 최적화 기법을 적용하여 최적 제어를 선정하는 방법은 전력계통에서 사용되는 PSS의 최적 선정뿐만 아니라, 산업 전반에 사용되는 비선형 특성을 갖는 제어기의 최적화 설계 및 적합한 모델 선정을 위한 새로운 방안이 될 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 서울시정개발연구원 2006년도 신기술연구개발 지원사업(과제번호:10988)으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

[1] P. Kundur, M. Klein, G.J. Rogers, and M.S. Zywno, "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability," IEEE Transactions on Power Systems, Vol.4, No.2, pp. 614-626, May 1989.  
 [2] M. Klein, G. J. Rogers, S. Moorthy, and P. Kundur, "Analytical Investigation of Factors Influencing Power System Stabilizers Performance", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, No. 3, pp. 382-388, September 1992.  
 [3] N. Martins and L. T. G. Lima, "Determination of Suitable Locations for Power System Stabilizers and Static VAR Compensators for Damping

Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems", in Proceeding of Power Industry Computer Application, pp.74-82, May 1989.

[4] Prabha Kundur, Power system stability and Control, EPRI Editors, McGraw-Hill, Inc. ISBN 0-07-035958-X, 1993.  
 [5] A. van der Schaft and H. Schumacher, An Introduction to Hybrid Dynamical Systems, Springer-Verlag, London, 2000.  
 [6] D. Liberzon, Switching in Systems and Control, Birkhauser, Boston, 2003.  
 [7] Ian A. Hiskens and M. A. Pai, "Trajectory Sensitivity Analysis of Hybrid Systems", IEEE Transactions on Circuits and Systems-Part I: Fundamental Theory and Applications, Vol.47, No.2, pp. 204-220, February 2000.  
 [8] M. S. Branicky, V. S. Borkar, and S. K. Mitter, "A unified framework for hybrid control: Model and optimal control theory", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 43, pp. 31-45, January 1998.  
 [9] J. Nocedal and S. J. Wright, ed., Numerical Optimization, Springer-Verlag, New York, 1999.  
 [10] P. W Sauer and M. A Pai, Power System Dynamics and Stability. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Wall, 1998.  
 [11] P. Venkataraman, Applied Optimization with MATLAB® Programming, Wiley-Interscience, 2001.

### 저 자 소 개



#### 백 승 묵 (白 承 默)

1979년 6월 6일생. 2006년 연세대 전기전자공학부 졸업. 2007년 동대학원 전기전자공학부 졸업(석사) 2007년~현재 동대학원 전기전자공학부 박사 과정  
 Tel : 02-2123-7839  
 E-mail : sm\_baek@yonsei.ac.kr



#### 박 정 옥 (朴 正 旭)

1973년 7월 18일생. 1999년 연세대 전기공학과 졸업. 2003년 미국 Georgia Institute of Technology 전기컴퓨터공학부 졸업(공학). 2003년~2004년 미국 University of Wisconsin-Madison 박사 후 전임연구원. 2004년~2005년 LG전자 전임연구원. 2005년~현재 연세대 전기전자공학부 조교수  
 Tel : 02-2123-5867  
 Fax : 02-313-2879  
 E-mail : jungpark@yonsei.ac.kr