

A Study on the Power System Stabilizer Design using Object-Oriented Method

朴志皓* · 白榮植**
(Ji-Ho Park · Young-Sik Baek)

Abstract - In this paper, we have designed power system stabilizer (PSS) using object-oriented method. There are several types of power system stabilizer. A proportional-integral(PI) controller is very simple for practical implementation. Therefore it has been widely employed by the industry. The methods of obtaining the gains(K_i, K_p) of PI controller are root-locus method and sub-optimal regulator approach. But these methods are cannot be applicable to nonlinear system and faulted power system. So we proposed a new method which can be applied to nonlinear system by numerical analysis method. The method of dynamic system simulation by numerical method is very difficult and complex. We proposed flexible simultaion method for complex power system analysis using object-oriented programming(OOP) and applied to PI controller design.

Key Words : Power system stabilizer, PI controller, object-oriented programming, flexible method

1. 서 론

전력계통의 안정화 장치(PSS)에 관한 연구는 그 중요성이 인정된 이후 1960년대 중반부터 국내외적으로 활발히 연구되고 있다. 보상회로를 사용하여 안정기 변수를 결정하는 방법을 시작으로 하여 최적화 기법의 적용, 고유치 조정방법, 퍼지이론을 적용한 방법, 슬라이딩모드 제어방법, H_2/H_∞ 이론을 적용한 방법 등의 제어기법에 대해서 이론적으로 검토되고 수행되었다. 이들 방법은 대부분이 최신 제어이론에 근본하고 있으며, 따라서 시스템의 모델링이 본 기법들의 정확성에 큰 영향을 미친다. 그러나 전력계통은 매우 복잡하고 방대하므로 최적제어 이론에 의한 디자인은 한계가 있다. 또한 발전기로 이루어진 시스템은 비선형 시스템이며, 비선형 시스템의 정확한 제어에 관한 이론은 아직까지 확립되어 있지 못한 상태이다. 본 연구는 이러한 복잡한 시스템을 다룰 수 있는, 기존기법과는 전혀 다른 방법에 대한 연구이다. 기존의 방법중 최적 제어이론을 이용해 상태 변수를 제어하는 방법을 적용한 선형 최적 안정화 장치와 준 최적 레귤레이터[1]를 이용한 안정화 장치가 있는데, 선형 최적 안정화 장치(linear optimal PSS)는 성능과 안정성이 뛰어나지만, 모든 상태 변수를 관측하여 제어해야 하기 때문에 실제 상황에 적용하기가 난해하다. 이런 단점을 보완하여 현실성을 고려하여 설계한 것이 준 최적 레귤레이터(suboptimal regulator)를 이용한 비례적분 안정화 장치(proportional-integral PSS, PI PSS)인데, 선형 최적 안정화

장치보다는 성능과 안정성이 떨어지지만, 비례적분 제어기는 현재 산업공정의 제어기로 널리 사용되고 있고 간단하기 때문에, 실제로 구현하기가 쉽다. 따라서 본 연구에서는 제어기의 형태를 PI PSS 와 같은 구조로 설계하였다.

본 논문에서는 비례적분 안정화 장치의 최적의 계수를 구하기 위한 새로운 방법을 제시한다. 이 방법은 객체지향적 해석기법을 적용한 것으로써 시스템의 모델의 변화에 상관없이 적용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있으며, 실제 발전기에 더욱 가까운 비선형 시스템에 대해서도 해석이 가능한 방법이다. 그리고 차단기의 동작과 같이 실제 시스템의 운용상에서 생기는 시스템의 변화에 대한 고려도 가능하게 되었다. 따라서 본 방법은 최적제어 이론을 적용시 고려가 불가능한 시스템의 해석 및 PSS 최적화 계수를 구할 수 있게 되었다는 데에 그 의의가 있다.

또한 본 방법은 FACTS 설비와 같이 발전기의 안정 운전에 관여하는 다른 제어장치들의 영향까지 다룰 수 있는 가능성을 제시하였다.

2. 발전계통(Generating system)의 해석기법

본 논문에서는 안정화장치의 최적 계수를 구하기 위한 방법으로 기존의 해석적인 방법을 이용하지 않고, 수치적인 해석방법을 이용한다. 그러나 이 방법도 시스템의 변화에 따른 해석의 어려움이 있다. 실제로 발전기의 모델은 여러 가지가 존재하고 이의 부속장치도 여러 모델이 존재한다. 따라서 이들이 상호 결합된 시스템을 효과적으로 해석하는데는 어려움이 있고, 기존의 프로그램 방식으로는 시스템의 다양한 변화에 유연하게 대처할 수 없게된다. 이미 개발된 동적 시스템의 해석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 방법[2,3]을 이용하여 이러한 문제점을 해결하였다. 이 방법은 시스템의 변화에 유연하게 대처할 수 있도록, 디지털 컴퓨터로 아날로그 컴퓨터를 구현한 것이다. 즉 미리 만들어진 기본소자들을 상호 연결하는 방식을 채택한다. 이것을 디지털

* 正 會 員 : 慶北大 大學院 電氣工學科 博士課程 修了

** 正 會 員 : 慶北大 電子電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1998년 9월 29일

最終完了 : 1999년 5월 6일

비례 적분 전력계통 안정화 장치(PI PSS)의 전달 함수는 다음 식으로 나타낸다.

$$G(s) = \frac{u(s)}{\Delta\omega(s)} = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right) \quad (2)$$

여기서 K_P 는 비례기의 이득이고, K_I 는 적분기의 이득이다. PI PSS를 블록 다이어그램으로 나타내면 그림 4로 표현된다.

3.2 PI PSS의 최적계수 설정방법

2절에서 설명한 해석기법을 이용하여 만든 시뮬레이터가 ODCS(Object-oriented Digital Computer Simulator)[2,3]이다. 이것을 PI 제어기의 최적의 계수를 구하는데 사용한다. 제한한 방법은 각주파수(ω)의 저주파 진동을 최소화하기 위해 $|\Delta\omega(t)|$ 의 면적을 직접 구하고, 이 면적을 최소화하는 K_P, K_I 를 conjugate gradient method[5]를 이용하여 수치적인 방법으로 결정한다. 임의의 K_P, K_I 에 대하여 $t = 0$ 에서 $t = \infty$ 까지 $|\Delta\omega(t)|$ 의 면적을 S 라고 한다면, S 는 다음과 같다.

$$S = \int_0^{\infty} |\Delta\omega(t)| dt \quad (3)$$

이 방법은 실제 시스템의 모델과 제어 상황의 변화를 직접 계산에 반영할 수가 있기 때문에 발전기의 비선형성과 복잡성을 직접 반영할 수가 있다. 면적 S 는 K_P, K_I 의 변화에 따라 달라지므로 최소화하려는 목적함수를 다음과 같이 설정한다.

$$\min S(\mathbf{K}) = \int_0^{\infty} |\Delta\omega(t)| dt \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{K} = [K_P \ K_I]^T$ 이다.

그림 5는 식(4)에 Conjugate gradient method를 적용하는 과정을 나타낸다.

- a. Set $n=0$, Calculate $S(\mathbf{K}^0)$
Where \mathbf{K}^0 is starting point
- b. Set $j=0$, $\mathbf{K}^j = \mathbf{K}^n$, calculate $\nabla S(\mathbf{K}^j)$
Set the current descent direction $\mathbf{s}^j = -\nabla S(\mathbf{K}^j)$
- c. Find λ^j which satisfies,
 $S(\mathbf{K}^j + \lambda^j \mathbf{s}^j) = \min_{\lambda} S(\mathbf{K}^j + \lambda \mathbf{s}^j)$
- d. Compute the current descent step
 $\Delta \mathbf{K}^j = \lambda^j \mathbf{s}^j$ and set $\mathbf{K}^{j+1} = \mathbf{K}^j + \Delta \mathbf{K}^j$
Calculate $\nabla S(\mathbf{K}^{j+1})$
and set $\mathbf{s}^{j+1} = -\nabla S(\mathbf{K}^{j+1}) + \alpha^j \mathbf{s}^j$
where $\alpha^j = \frac{\|\nabla S(\mathbf{K}^{j+1})\|^2}{\|\nabla S(\mathbf{K}^j)\|^2}$
Find λ^{j+1} which satisfies,
 $S(\mathbf{K}^{j+1} + \lambda^{j+1} \mathbf{s}^{j+1}) = \min_{\lambda} S(\mathbf{K}^{j+1} + \lambda \mathbf{s}^{j+1})$
Set $\mathbf{K}^{n+1} = \mathbf{K}^{j+1} + \lambda^{j+1} \mathbf{s}^{j+1}$
- e. If $S(\mathbf{K}^n) - S(\mathbf{K}^{n+1}) < \epsilon_1$ and $\|\Delta \mathbf{K}^n\| < \epsilon_2$, terminate
else $n=n+1$, go to step b

그림 5 식 (4)에 적용된 Fletcher-Reeves의 Conjugate gradient 방법
Fig. 5 Conjugate gradient method of Fletcher-Reeves applied to Eq. (4)

그림 5의 각 단계의 기울기 값은 ODCS를 이용하여 수치적인 방법으로 구할 수 있다. 그리고 최적의 λ 값은 피보나치(Fibonacci) 탐색알고리즘을 적용하여 구한다. 시스템의 변화에 상관없이 식(3)을 ODCS를 이용하여 구할 수 있으므로 수치적인 방법의 최적화가 가능하다.

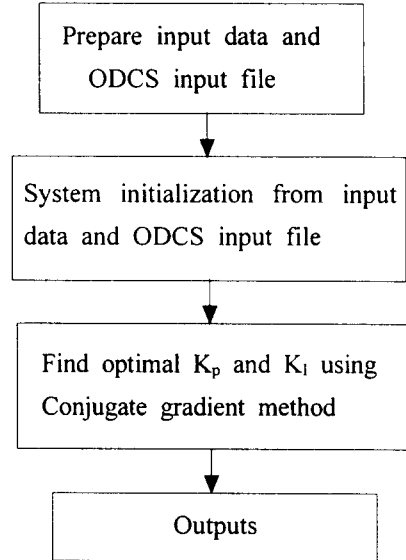


그림 6 최적의 K_P 와 K_I 를 구하기 위한 계산 흐름도

Fig. 6 Flow chart of calculation to find optimal K_P and K_I

그림 6은 최적의 K_P, K_I 를 찾기 위한 전체의 연산순서를 나타낸 것인데, 계산을 위해서는 입력데이터 파일과 시스템의 모델링을 ODCS 입력파일로 작성하는 것이 필요하다. 예로서 그림 1의 시스템을 ODCS로 시뮬레이션하기 위한 입력파일은 그림 7과 같다.

| | | | |
|--------------|------------------|--------|------------|
| INTEGRATOR | VF | END | |
| GAIN | G1[1/T] G2[-R/T] | END | |
| SUMMATION | SUM1 | END | |
| ODCSFUNCTION | gftn | END | |
| CONNECTION | | | |
| NAME | ID | IN_NUM | IN_OBJ |
| VF | I | 1 | G1 |
| G1 | G | 1 | SUM1 |
| SUM1 | S | 3 | BUF1 G2 VF |
| G2 | G | 1 | gftn |
| gftn | F | 1 | VF |
| END | | | |

그림 7 그림 1에 대한 ODCS 입력 파일의 예
Fig. 7 The example of ODCS input file for fig. 1

입력파일들로부터 시스템의 초기화시키고 시스템의 모델링을 이진트리로 구성할 수 있고, 이들을 상호 연결하면 전체시스템

의 모델링이 완성된다. 완성된 이진트리를 이용하여 식 (3)를 구할 수 있고, 최적화 알고리즘을 적용가능하다.

4. 모의 전력계통에의 적용

4.1 동기발전기 모델의 선정

본 논문에서 사용한 전력계통 모델은 전력계통 안정화 장치의 설계에 일반적으로 사용되는 1기 무한대 모선이다. 우선 1기 무한대 모선의 단순화된 선형모델[6]에 대하여 최적해를 구하고, 이 결과를 기존의 방법으로 구한 결과와 비교한다. 그리고 비선형 모델에 대해서도 최적해를 구할 수 있음을 보인다. 그림 8은 모의실험에 사용한 1기 무한대모선 시스템이다.

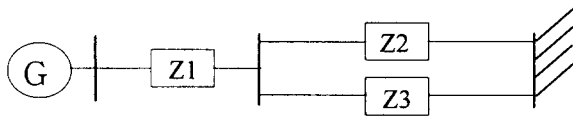


그림 8 1기 무한대 모선 계통
Fig. 8 A single machine connected to infinite bus

4.1.1 선형모델

그림 9는 1기 무한대 모선의 단순화된 선형모델의 블록선도이고, 표 1은 모의실험에 사용한 시스템 파라미터들이다.

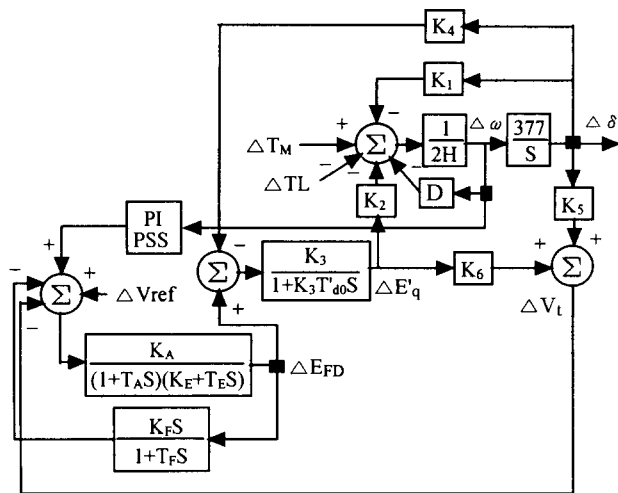
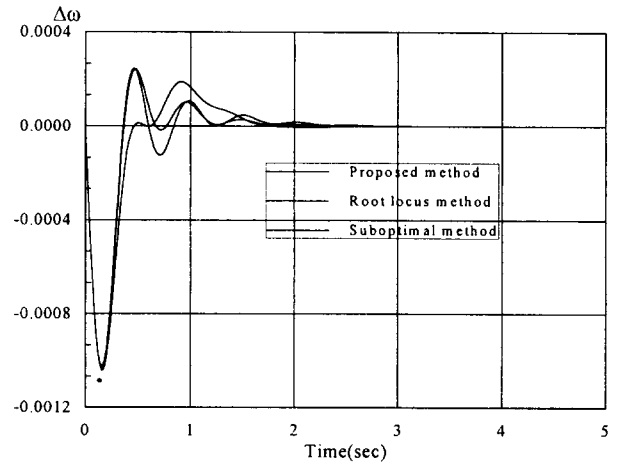


그림 9 1기 무한대 모선의 단순화된 선형모델
Fig. 9 The simplified linear model of one machine connected to an infinite bus

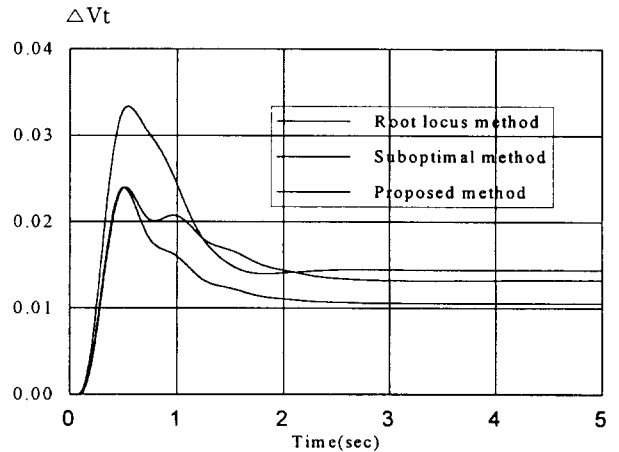
표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

| Generator | | | | Exciter | | Line | |
|----------------|--------|------------------|-------|----------------|-------|----------------|-----------|
| K ₁ | 1.4479 | M | 4.74 | K _A | 400 | Z ₁ | j0.2 |
| K ₂ | 1.3174 | D | 0 | T _A | 0.05 | | |
| K ₃ | 0.3072 | T' _{d0} | 5.9 | T _F | 1.0 | Z ₂ | 0.04+j0.4 |
| K ₄ | 1.8050 | T' _{d0} | 0.075 | K _E | -0.17 | | |
| K ₅ | 0.0294 | x' _d | 0.245 | T _E | 0.95 | Z ₃ | 0.04+j0.4 |
| K ₆ | 0.5257 | x _q | 1.64 | K _F | 0.025 | | |
| H | 2.37 | x _d | 1.7 | | | | |

시스템의 모의 조건은 부하토크 ΔT_L 를 0.05pu 크기의 계단 함수로 임의로 감소시키는 것이다. 기존의 방법[1]으로 구한 최적해는 근계적을 사용한 방법에서는 $K_p=-29, K_i=-0.23$ 이고 준최적 레귤레이터를 사용한 결과는 $K_p=-19.24, K_i=-0.219$ 이다. 제안한 방법을 사용한 결과는 $K_p=-21.8, K_i=-0.19$ 이다.



(a) Time response of $\Delta \omega$



(b) Time response of ΔV_t

그림 10 부하토크 변화에 대한 시간응답
Fig. 10 Time response to a step change in ΔT_L with PI PSS

그림 10은 부하토크의 변화에 대한 각주파수와 단자전압 변위의 시간응답을 나타낸 것이다. 제안한 방법의 결과의 overshoot 이 준최적 레귤레이터의 결과와 거의 같고 나머지 부분에서는 더 나은 응답을 나타냄을 알 수 있다. 시간 0초에서 5초까지의 응답의 면적의 크기를 구해보면 제안한 방법은 $S=0.313 \times 10^{-3}$, 근계적법은 $S=0.3523 \times 10^{-3}$ 이고 준최적 레귤레이터는 $S=0.328 \times 10^{-3}$ 이다. 면적 S를 한번 구하는데 걸리는 CPU 시간은 썬 워크스테이션 Enterprise 3000에서 약 1.38초이다. 분계쿠타 4차 적분방법을 기준한 오일러 적분방법의 계산 결과의 상대오차는 0.13%이내이다. 한번의 면적계산의 누적오차는 다음 면적계산에 전혀 영향을 미치지 않는다. 선형시스템의 경우 제안한 방법으로도 기존의 방법보다 좀더 우수한 응답을 구할 수 있음을 보였다.

4.1.2 비선형모델

본 논문에서 제안한 방법은 선형 시스템 뿐 아니라 비선형시스템에도 그대로 적용할 수 있다. 4.1.1절에서 선형화하기 이전의 비선형시스템은 아래 식과 같다.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M}(T_M - D\omega - (E'_q I_q - (x_q - x'_d)I_d I_q)) \quad (5)$$

$$\delta = \omega - 1 \quad (6)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{d0}}(E_{FD} - E) \quad (7)$$

$$E = E'_q + (x'_d - x_d)I_d \quad (8)$$

선로의 임피던스를 $R_e + jX_e$ 라 하면 선로전류는

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & X_e + x_q \\ -X_e - x'_d & R_e \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_\infty \sin(\delta - \alpha) \\ E'_q - V_\infty \cos(\delta - \alpha) \end{bmatrix} \quad (9)$$

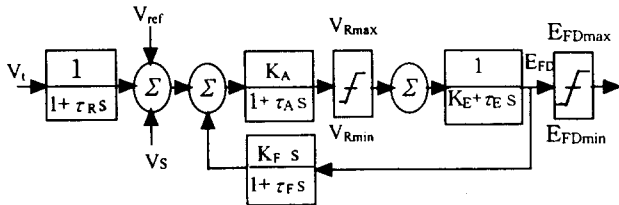


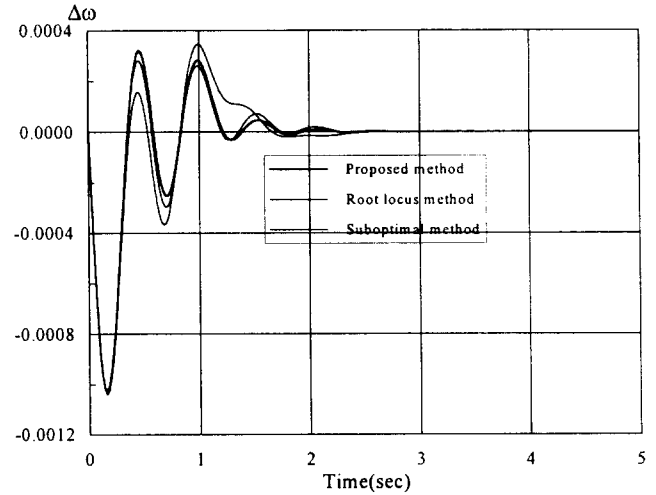
그림 11 IEEE type1 여자 시스템
Fig. 11 IEEE type1 excitation system

그림 11은 모의에 사용한 IEEE type1 여자 시스템이다. 식 (5)~(9)와 그림 11은 ODCS로 쉽게 모델링되고, 그림 6의 과정을 그대로 적용하면 해를 구할 수 있다. 비교 대상인 근궤적법과 준최적 레귤레이터를 사용한 방법의 K_p, K_i 는 선형모델과 같다. 선형모델을 사용한 제어기의 이득 설정시 문제점은 시스템의 비선형성을 바로 반영하지 못한다는 것이다. 시스템의 비선형 소자가 많을수록 또한 외란이 크질 수록 좋은 응답을 얻을 수 없다. 비선형모델에서 여자시스템의 AVR(Automatic voltage regulator)출력단의 제한기와 여자의 출력단의 제한기의 제한폭에 따라 비선형성이 클 수도 있고 작을 수도 있다. 선형화된 모델을 이용하여 설계하는 기법들은 이러한 제한을 반영하지 못한다. 그러나 본 논문에서 제시한 방법은 이것을 반영할 수 있다. 선형시스템과 같은 모의 조건하에서 표 2의 두 가지 사례에 대하여 모의하였다.

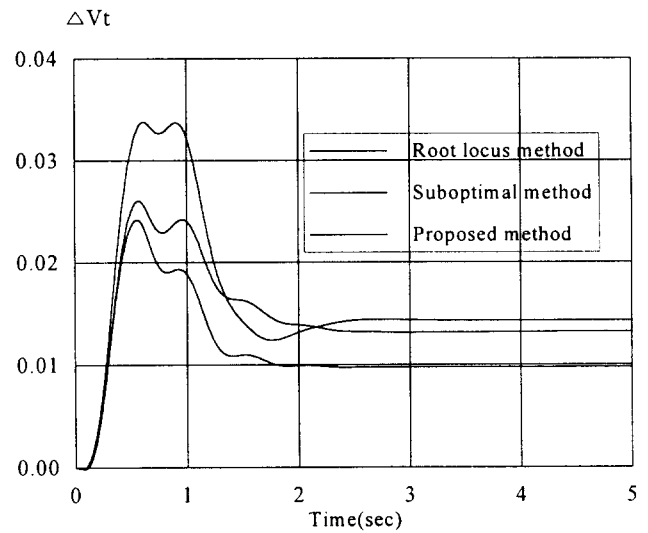
표 2 두개의 모의 사례
Table 2 Two simulation cases

| CASE1 | | CASE2 | |
|-------------|------|-------------|----|
| E_{FDmax} | 4.5 | E_{FDmax} | 3 |
| E_{FDmin} | -4.5 | E_{FDmin} | -3 |
| V_{Rmax} | 4.5 | V_{Rmax} | 3 |
| V_{Rmin} | -4.5 | V_{Rmin} | -3 |

표 2의 사례1은 여자기와 AVR모두 최대, 최소의 제한폭의 차가 9pu인데 실제 모의결과 제한기에서 제한되는 시간영역이 매우 좁다. 즉 모의하는 전 시간영역에서 제한기가 비선형 소자로서 영향을 거의 미치지 않는다. 그림 12은 사례 1의 모의 결과인데 제안한 방법의 결과($K_p=19.99, K_i=0.18, S=0.3938 \times 10^{-3}$)와 준최적 레귤레이터의 결과($S=0.3967 \times 10^{-3}$)가 거의 같음을 알 수 있다.



(a) Time response of $\Delta \omega$

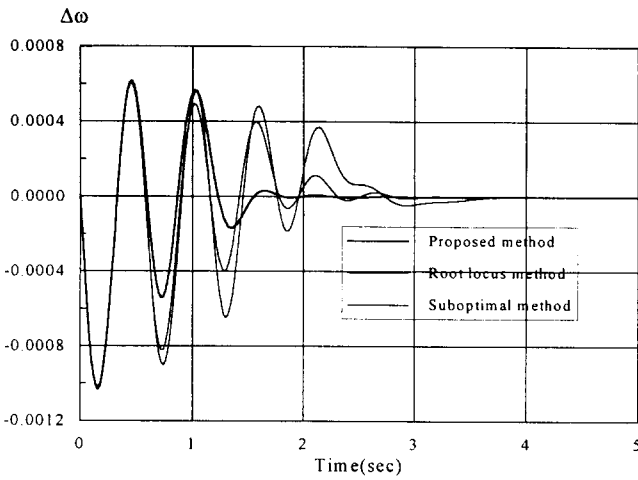


(b) Time response of ΔV_t

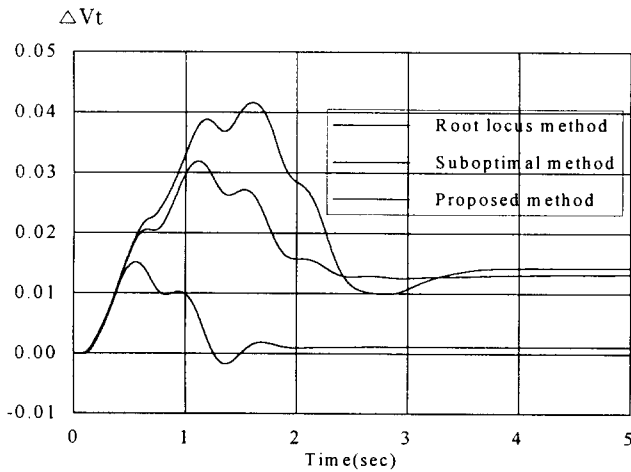
그림 12 사례1의 시간응답

Fig. 12 Time response of case1 with PI PSS

사례 2는 제한폭이 6pu인데 모의 결과 제한기가 비선형 소자로서 영향을 많이 미친다. 그림 13는 사례 2의 결과를 나타낸다. 제안한 방법의 결과($K_p=19.085, K_i=0.0302, S=0.5778 \times 10^{-3}$)가 다른 방법의 결과(근궤적법: $S=0.9728 \times 10^{-3}$, 준최적 레귤레이터: $S=0.7536 \times 10^{-3}$)보다 좋다는 것을 알 수 있다. 즉 최적의 계수를 구하는 과정에서 시스템의 비선형성이 충분히 반영됨을 알 수 있다.



(a) Time response of $\Delta\omega$



(b) Time response of ΔV_t

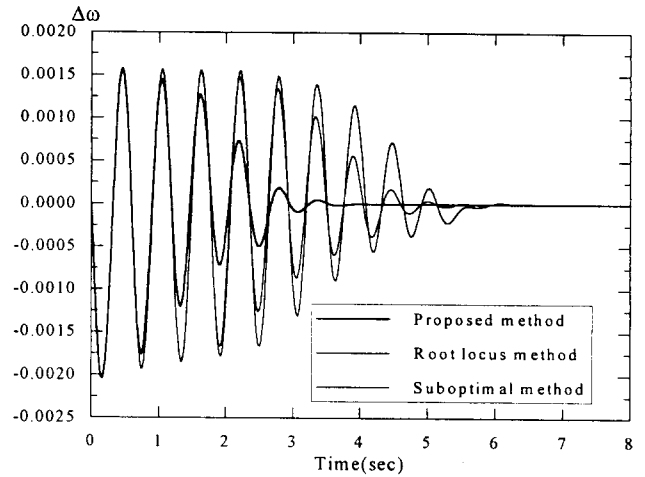
그림 13 사례2의 시간응답

Fig. 13 Time response of case2 with PI PSS

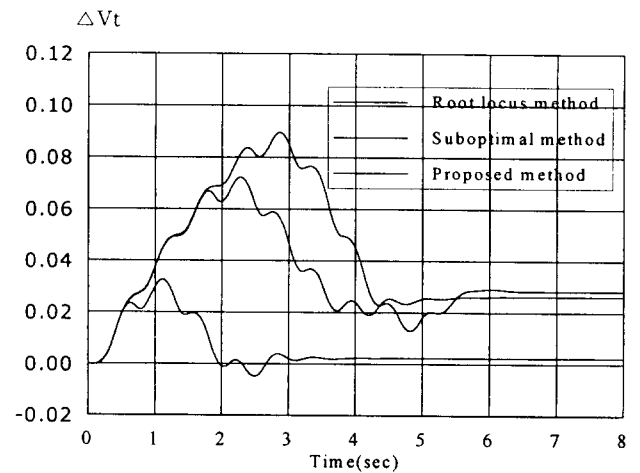
위의 K_p , K_i 값에 대하여 부하의 변동을 $\Delta T_L=0.1$ 로 했을 때의 사례 2의 응답은 그림 14과 같다. 제안한 방법의 응답이 선형기법의 응답들보다 더 안정된 응답임을 알 수 있다. 선형화된 시스템에서 구한 이득을 사용한 안정기는 외란이 큰 비선형 시스템의 응답을 크게 개선시키지 못한다. 비선형 시스템에서 비선형 소자의 영향을 그대로 반영할 수 있기 때문에 본 기법을 적용했을 때 더 나은 응답을 얻을 수 있는 이득을 설정할 수 있다.

5. 결론

본 논문은 객체지향기법을 적용한 시뮬레이터를 이용하여 비례적분 전력계통 안정화 장치의 최적이득을 설정하였다. 발전기의 저주파 진동의 억제에 위하여 시스템의 응답의 $|\Delta\omega|$ 이 시간 축과 이루는 면적을 최소화하도록 목적함수를 설정하고, 최적제어 기법에 의한 기존의 안정화 장치의 설계 방법과는 다른 직접 모델링 기법에 의한 설계 방법을 제시하였다. 선형시스템에 대해서는 기존의 방법보다 좀더 나은 시스템 응답을 얻는 이득을 구하였고, 기존의 방법을 적용할 수 없는 비선형 시스템에 대해서도 제안한 방법을 적용하여 이득을 구하였다. 또한 비선형 소자



(a) Time response of $\Delta\omega$



(b) Time response of ΔV_t

그림 14 부하토크가 10% 감소할때의 시간응답

Fig. 14 Time response of $\Delta T_L=0.1$ with PI PSS

의 영향이 큰 시스템에 대하여도 제안한 방법을 적용하여 기존의 방법으로 구한 이득보다 좀더 좋은 응답을 얻는 이득을 설정할 수 있음을 보였다. 본 논문에서 사용한 시뮬레이터는 이미 구성된 객체소자들의 연결로 시스템을 구성하므로 시스템의 변화에 유연하고 시스템의 제어 요소의 변화를 그대로 반영할 수 있다. 이 방법을 사용하면 FACTS와 같이 계통에 함께 연결되어 있는 다른 제어설비의 영향까지 고려할 수 있으며, 이것은 앞으로의 연구과제이다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음

참고 문헌

- [1] Y.Y. Hsu, C.Y. Hsu "Design of a Proportional-integral Power System Stabilizer" IEEE Trans. on Power Systems. Vol. PWR-1 No. 2, May. 1986, pp. 46-53
- [2] J.H. Park and Y.S. Baek, "Simulation of Electric machines

Using Object-Oriented Technique" 1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Milwaukee, Wis. May 18, 1997

- [3] J.H. Park and Y.S. Baek, "The Power System Stability Analysis Method Using Object-Oriented Programming" The International Conference on Electrical Engineering(ICEE '98), Kyungju, Korea, July, 1998. Vol. 2. pp. 285-288
- [4] Carrano, Helman, Veroff, Data Structures and Problem Solving with Turbo Pascal, The benjamin/Cumming Publishing Company, Inc. 1993. pp508-510
- [5] M.S. Bazaraa, H.D. Sherali, C.M. Shetty, Nonlinear Programming, John Wiley & Sons, Inc. 1993. pp. 272-274, 328-332
- [6] P.M. Anderson and A.A. Fouad, Power System Control and Stability, Iowa State University Press, 1977. pp. 327-333, pp.400-402
- [7] R.L. Burden, J.D. Faires, Numerical analysis, PWS-KENT Publishing Company. 1989.

저 자 소 개



박지호 (朴志皓)
 1991년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1996년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료
 Tel : 053-950-5602
 E-mail : pjh@palgong.kyungpook.ac.kr



백영식 (白榮植)
 1950년 7월 8일생. 1974년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1977년 명지대 공대 전기공학과 조교수. 현재 경북대 전자전기공학부 교수.
 Tel : 053-950-5602
 E-mail : ysbaek@bh.kyungpook.ac.kr