

실계통 PSS 정수 튜닝기법에 관한 연구

신정훈*, 김태균*, 윤용범* · 김동준**, 문영환**
 *한국전력공사 전력연구원 · **한국전기연구소

A Study on the Tuning method of PSS Control Parameters

Jeong Hoon Shin*, Tae Kyun Kim*, Yong Beum Yoon* · Dong Joon Kim**, Young Hwan Moon**
 *KEPRI · **KERI

Abstract - This paper presents the basic tuning method for PSS control parameters. This method includes the phase compensation and root-locus based gain tuning for one machine with infinite bus system. At the tuning condition and least stable condition, the effect of gain tuning is also discussed.

1. 서 론

전력계통에서 발생하는 동요모드를 안정화 시키기 위한 전력계통 안정화장치(이하, PSS)의 튜닝방법은 현재까지 중요한 연구주제로 되어 오고 있다. PSS를 실 계통에 적용하는데 있어 중요한 두 가지 튜닝 방법은 PSS의 위상보상과 이득결정을 하는데 있다. 위상보상은, 발전기, 여자시스템 그리고 전력계통을 통해서 발생하는 위상지연을 PSS가 보상하도록 하여 PSS와 연결된 여자시스템, 발전기 그리고 전력계통 루프가 발전기의 속도 위상과 동일한 전기적 토오르크를 제공하도록 하는 것이다. 반면에 PSS의 이득 결정 방법은 댐핑 토오르크를 뿜 수 있으면 가장 크게 제공하면서 다른 모드들에 악영향을 주지 않도록 하는 데 있다. 최적으로 결정된 PSS 정수는 PSS가 미소신호 안정도 향상에 가장 크게 기여하여야 하고, 큰 외란시 과도 안정도에 적어도 악 영향을 주지 않도록 해야 한다.

2. 실계통 PSS 튜닝기술

2.1 PSS 정수 튜닝 일반

계통에서 나타나는 동요는 여러 개의 동요 모드가 복잡하게 뒤섞여서 나타나며 안정된 계통인 경우 이러한 동요는 계통이 가지고 있는 댐핑에 따라 감소하는 정도가 다르다. 발전기는 동요 발생시 지역모드와 광역모드를 동시에 경험하게 된다. 따라서 튜닝이 잘된 PSS는 지역모드와 광역모드를 동시에 감쇠시킬 수 있어야 한다. 이 경우 지역모드의 댐핑은 계통에 나타날 수 있는 모든 부하조건과 계통조건을 고려하여 최대한으로 제공되도록 하면서, 광역모드의 댐핑에 대해서도 충분히 기여하도록 정수 값을 튜닝한다. PSS의 주된 기능은 과도안정도와는 상관없이 정상상태에서 미소신호 동요를 억제하는 것이지만, 전력계통에서 단락사고 같은 큰 외란에 대해서 최소한 과도 안정도를 저하시키지 않거나 과도 안정도 향상을 도모할 수 있어야 한다. 사실, PSS는 단락사고에 대해서 발전기의 최대 제자전압(ceiling voltage)을 너무 일찍 끌어 내림으로써 과도 안정도에 악 영향을 종종 끼친다. 과도 안정도에 악 영향을 끼치지 않기 위해서 단락사고 발생시 너무 이르게 제자전압이 떨어지지 않도록 하는 장치를 부가하거나, PSS의 최대 출력값을 정격의 10% 이내로 제한하고, 최소 리미터값을 최대 리미터값 보다 적게 설정하는 방법들이 사용되고 있다.

PSS를 튜닝을 행함에 있어서, 어떤 부하조건에서 그리고 어떤 계통조건에서 튜닝해야 하는가는 동요가 발생시

PSS를 최고의 성능을 발휘하도록 하는데 있어 매우 중요하다. 일반적으로 튜닝조건에 대해서 혼동하기 쉬운 것은 전력계통이 본질적으로 가지고 있는 댐핑 성분이 가장 적은 운전조건에서 PSS를 튜닝하는 것이 가장 좋은 PSS 튜닝조건(tuning condition)이라고 생각하는 것이다. 그러나 이것은 잘못된 인식이다. PSS 튜닝은 전력계통이 가장 이득이 큰 강건한 운전조건에서 행해져야 한다. 전력계통이 강건한 경우는 송전선로의 임피던스가 적고 발전기의 송전출력이 크며 진상으로 운전될 때이다. 이때의 운전조건에서는 계통-발전기-여자기(이하, PGE 함수 혹은 PGE)의 이득이 가장 크게 되고 PGE 함수의 위상지연이 가장 클 조건이 된다. PGE의 이득이 가장 큰 운전조건에서 튜닝된 PSS는 어떤 운전조건에서도 불안정을 초래하지 않고 시스템을 안정하게 운전할 수 있게 한다. PSS가 적응제어를 하지 않는 한, 한번 튜닝된 PSS의 정수들은 계통의 운전조건에 대해서 변화지 않기 때문에 가장 불안한 경계조건에서 행해져야 한다.

가장 불안정하게 될 수 있는(least stable condition) 운전조건에서 PSS를 튜닝하는 경우 PGE함수 이득이 시스템이 가장 강건한 경우의 PGE 함수 이득보다 작게 되므로, 이경우의 PSS 이득결정은 상대적으로 크게 된다. 따라서 이 운전조건에서는 가장 불안정하게 될 수 있는 운전조건에서의 PSS이득과 PGE함수 이득의 곱(총 시스템 이득)은 계통이 불안정하게 되는 최대 한계 이득보다는 작으나 운전조건이 변하여 PGE가 이득이 점점 증가하는 경우, PGE이득에 비례하여 총 이득도 증가하게 된다. 가장 이득이 큰 운전조건에서는 PGE함수의 이득은 최대로 되고 PGE함수 이득과 PSS 이득의 곱은 가장 최대로 되어 최대 한계 이득보다 더 커져 불안정할 수 있다. 그러나 PGE 이득이 가장 큰 튜닝조건에서 PSS 이득을 튜닝하는 경우는 PGE함수의 이득이 이 운전점에서 가장 큰 값이므로, PGE 함수 이득과 PSS이득의 곱은 최대 한계 이득보다 작게 되며, 전력계통 운전조건이 어떻게 변하더라도 PGE함수의 이득은 이 튜닝조건보다는 항상 작으므로, PSS 이득과 PGE 함수 이득의 곱은 시스템이 불안정해지는 최대 한계이득을 결코 넘지 않는다.

2.2 PSS의 위상보상

2.2.1 튜닝의 개념(Tuning Concept)

앞에서 살펴 본 바와 같이 PSS 튜닝조건은 가장 큰 이득과 가장 큰 위상지연이 되는 조건이 전력계통이 강건하고 중부하로 운전되는 경우이다. 이 같은 튜닝조건에서 결정된 PSS는 가장 취약한 조건인 약 계통이고 중부하로 운전되는 운전조건에 대해서도 안정되게 운전될 뿐 아니라 기타 다른 운전조건에 대해서도 잘 동작하게 된다. 본 절에서는 1기 무한 모선 계통에 대해서 PSS위상 회로의 정수 결정에 대해서 살펴본다.

사용된 PSS의 입력신호는 발전기 축 속도이고 모델링

된 발전기는 대형 화력 발전기 모델이다. 운전중인 발전기의 부하조건과 계통조건은 앞서 말한 강계통이고 중부하로 운전되는 튜닝조건으로서 아래와 같으며, 그림 2.1은 PSS가 없는 경우에 송전선로의 임피던스를 변화시킬 때, PGE함수의 이득과 위상지연을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 송전선로 임피던스가 작을수록 PGE함수의 이득이 크며 또한 위상지연도 크게 나타남을 알 수 있다. 마찬가지로, 발전기 출력이 증가할수록 PGE함수의 이득은 커지고 위상지연도 크게 나타난다.

$$P+jQ = 1.0 + j 0.0, X_e = 20\%, TGR = 20, H = 5.0$$

발전기를 축 속도를 입력으로 하는 PSS의 전달함수는 아래와 같이 Lead-Lag 위상 보상 회로. 이득 K_s , washout 회로 그리고 입력신호의 노이즈를 없애는 필터함수로 구성된다.

$$PSS_w(s) = K_s \frac{T_w s(1+sT_1)(1+T_3)}{1+T_w s(1+sT_2)(1+sT_4)} FILT(s)$$

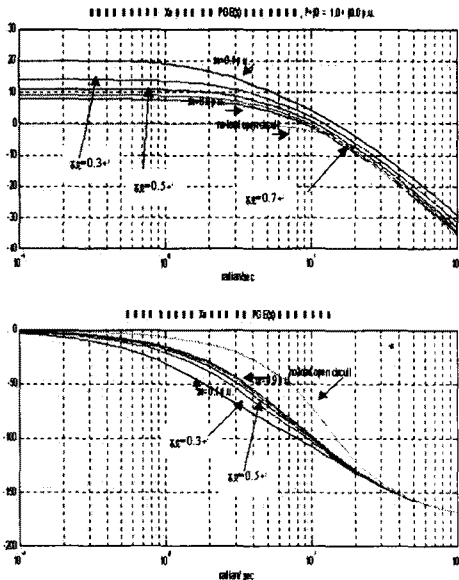


그림 2.1 송전선로 임피던스 변화에 대한 위상지연과 이득

여기서 사용된 필터는 2차 지연 특성을 가지며, 특성근은 $17.5 \pm j16$ 이다. 이 필터는 축진동 억제필터로써 3.5Hz까지의 축진동을 억제하며 3.0Hz이내의 주파수에서는 위상지연이 될 수 있는 한 작게 설계된 회로이다. 위의 PSS 전달함수에서 washout 시정수는 10sec로 가정한다. 이 시정수가 작을수록 지역모드의 댐핑에 더 효과가 있으며 큰 시정수 일 때는 광역모드에 효과가 더 잘 나타난다. 따라서 설정된 washout 시정수 값이 크므로 washout 회로에 의한 지역모드의 영향은 없다. 2단의 lead/lag 위상 보상 회로 시정수는 모두 동일 하게 설정하고, lead 시정수와 lag 시정수의 비율을 10:1로 가정한다. 그리고, 하나의 정수, 보상중심 주파수 f_c 를 아래와 같이 정의한다.

$$f_c = 1/2\pi \sqrt{T_1 T_2} = \frac{\sqrt{10}}{2\pi} T_1$$

2.2.2 위상보상(Phase Compensation)

PSS에 의한 PGE 함수의 위상지연에 대한 위상보상은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\bar{P}(j\omega) = PGE(j\omega)PSS_w(j\omega) = P(\omega)\angle\phi_p(\omega)$$

이상적인 위상보상은 모든 주파수대에서 $\phi_p = 0$ 인 경우가 되도록 보상하는 것이다. 즉 PGE함수의 위상지연을 PSS가 완전히 보상하여 댐핑 토오르크만 제공하는 것이다. 그러나 계통의 부하조건과 계통조건에 따라 PGE함수의 위상지연이 그때마다 다르기 때문에 이것은 불가능하다. 앞에서 언급했듯이 한번 설정된 PSS의 위상보상과 이득상수의 정수값은 계통의 운전조건이 어떻게 바뀌든지 간에 변하지 않고 일정한 위상특성과 이득특성을 갖는다. PSS함수 특성은 이와 같이 일정한 반면 PGE함수의 특성은 계통운전 조건에 따라 변화하고, 이러한 특징을 인식한다는 것은 PSS 정수 튜닝에 있어 매우 중요하다.

그림 2.2는 PSS가 PGE를 위상보상을 아래와 같은 위상 보상 중심 주파수를 가지고 있을 때의 위상 특성과 PSS가 없는 경우의 PGE함수의 위상지연 특성이다.

1. $f_c = 1.0\text{Hz}$ ($T_1 = 0.5 \text{ sec}$)
2. $f_c = 2\text{Hz}$ ($T_1 = 0.25 \text{ sec}$)
3. $f_c = 3.4\text{Hz}$ ($T_1 = 0.15 \text{ sec}$)
4. $f_c = 5.0\text{Hz}$ ($T_1 = 0.10 \text{ sec}$)
5. $f_c = 10\text{Hz}$ ($T_1 = 0.05 \text{ sec}$)
6. PSS가 없는 경우의 PGE(s)함수의 위상지연

그림 2.2의 위상특성 1은 5 rad/sec까지 위상보상이 과보상됨을 보여준다 ($\phi_p > 0$). 보상된 위상이 과보상되는 댐핑 토오르크에는 양의 토오르크를 제공하여 안정도에 향상을 도모하지만, 동기화 토오르크에 대해서는 이 주파수 영역에서 음의 토오르크를 제공하여 안정도를 떨어뜨린다. 그림 2.2의 위상특성 2부터 5는 위상보상 중심주파수가 클수록 위상지연이 더 큼을 보여 준다. 위상특성 6은 PSS로 위상보상이 안된 PGE함수 자체의 위상특성을 나타낸다.

보상된 위상지연이 -90 이내 ($\phi_p > -90$) 에 있는 주파수 영역에서는 양의 댐핑 토오르크를 제공한다. 예를 들면, 보상된 위상지연 특성 5는 주파수 9rad/sec까지 양의 댐핑 토오르크를 제공하는 반면 위상특성 2는 거의 20 rad/sec 까지 제곱함을 알 수 있다. 넓은 영역의 주파수대에서 댐핑 토오르크를 제공하도록 PSS 위상보상을 하는 것이 하나의 좋은 튜닝 판별법이 될 수 있다. PSS가 부착된 발전기의 지역모드가 7rad/sec (1.1Hz)라고 가정하면 그림 2.56에서 지역모드에 가장 좋은 위상특성을 보여 주는 것은 위상 특성 2가 된다. 지역 모드 7rad/sec에서 이 보상된 주파수의 지연은 다른 위상특성에 비해서 가장 적은 20 정도이다. 따라서 위상특성 2가 가장 큰 댐핑 토오르크를 제공하는 경우임을 알 수 있다. 또한 위상특성 2는 광역모드의 주파수대에서도 위상지연이 상대적으로 다른 특성들에 비해 아주 적어 광역모드에도 크게 기여함을 알 수 있다. 전체적으로 살펴 봤을 때 위상특성 2가 가장 원하고자 하는 보상된 위상지연 주파수 특성이다.

이득이 증가할 때 고유치의 이동경로는 지역모드 주파수에서의 위상으로 결정된다. 지역모드의 주파수가 7rad/sec (1.1 Hz)일 때 완전하게 위상이 보상이 될 경우는 지역모드 주파수에서 $\phi_L = 0.0$ 이다. 이때는 순수한 댐핑 성분만 적용되어 고유값은 지역모드 주파수 변화 없이 왼쪽으로 이동하게 된다. 위상지연이 존재하는 경우, 지역모드 주파수 증분은 댐핑의 증분에 비례하여 아래와 같이 증가한다.

$$\Delta\omega_L = -\tan\phi_L \Delta\sigma_L$$

여기서,

ω_L = 지역모드 주파수 (rad/sec)

σ_L = 지역모드 감쇠율 (decay rate, sec)

L = 안정화 장치에 의한 변화량

지역모드에서 $\phi_L = -45.0$ 인 경우는 댐핑이 증분하는 율과 똑같이 지역모드 주파수 증분은 증가하고, $\phi_L = -90.0$ 인 경우는 댐핑 변화는 없으나 지역모드 주파수는 증가하고 그 이상인 경우는 댐핑을 해치면서 주파수는 증가하게 된다.

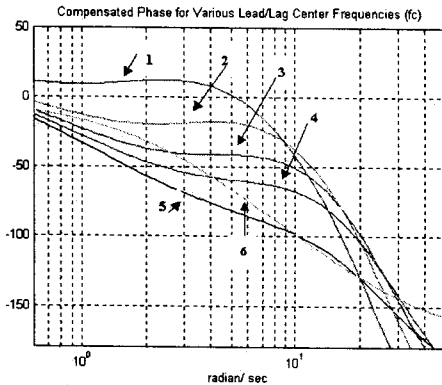


그림 2.2 보상된 위상 특성들 (1-5)과 PGE(s) 함수의 위상지연 (6)

2.3 Root Locus를 이용한 PSS의 이득결정

2.3.1 튜닝조건에서의 이득결정

그림 2.3, 2.4는 각기 다른 위상보상 중간 주파수 f_c 에서 이득 상수 Ks 가 증가시 고유값의 이동 경로를 보여준다. 여러 개의 고유치가 있지만 여기서는 단지 PSS에 관련된 지역모드와 제어모드 (혹 여자기 모드)만을 나타냈다. 튜닝조건은 앞서 설명한 가장 PGE 함수가 가장 이득이 크고 위상지연이 많은 전력계통이 강 계통이고 중부하이버제로 역할각을 갖는 조건이다.

그림 2.3은 $T1 = 0.5$ 이고 f_c 가 1.0Hz 인 경우 Ks 가 증가시 고유치의 궤적을 보여준다. Ks 가 증가시 지역모드 주파수는 크게 변하지 않고 고유치의 실수부가 왼쪽으로 이동하므로 댐핑이 좋아짐을 알 수 있다. 그러나, PSS 이득이 증가할수록 제어모드의 고유치는 우측으로 이동하여 불안정으로 향하게 된다. 따라서 여기서의 최적 PSS 이득 상수 결정은 제어모드도 안정되게 하면서 지역모드도 안정하게 하는 최적의 PSS 이득으로 결정하는 것이다. 이때의 이득 결정은 지역모드의 댐핑률과 제어모드의 댐핑률이 같게 하는 이득, 즉 댐핑 각(angle)이 같은 점에서 결정된 PSS 이득값으로 결정한다. 고유값, 댐핑률 그리고 댐핑각과의 관계는 아래와 같다.

$$\lambda = \sigma \pm j\omega$$

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}$$

$$\theta = \cos^{-1} \zeta$$

그림 2.3에서 결정된 PSS 이득은 약 3.0 p.u.(per unit) 정도이고, 이 값은 제어모드가 불안정해지는 이득 값 약 10 p.u.에 대해서 3분의 1이다.

그림 2.4는 $T1 = 0.25$ 인 경우로써, 앞의 경우와 비슷한 고유값 궤적을 보여주나 이득은 앞의 경우보다 더 크게 결

정될 수 있다. 앞의 경우와 같이 제어모드와 지역모드의 댐핑률이 같은 점에서 PSS 이득을 결정하면 약 15 p.u. 정도가 된다. 이 결정된 값 15 p.u.는 제어모드가 불안정해지는 값 약 50 p.u.에 대해서 3분의 1정도이다. 결정된 PSS 이득이 불안정해지는 값의 3분의 1이라는 사실은 주목할 만 하다.

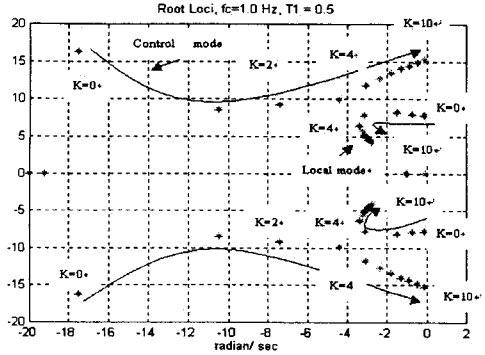


그림 2.3 이득 상수 K 변화에 대한 지역모드와 여자기모드 궤적 ($T1 = T3 = 0.5, T2 = T4 = 0.05$)

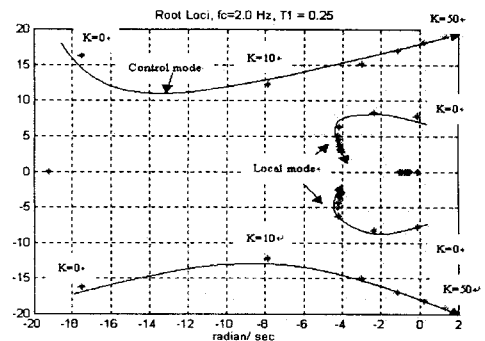


그림 2.4 이득 상수 K 변화에 대한 지역모드와 여자기모드 궤적 ($T1 = T3 = 0.25, T2 = T4 = 0.025$)

2.3.2 안정도 여유가 적은 운전조건에서의 이득결정

본 절에서는 앞에서 기술한 튜닝조건에서 결정된 PSS 이득과 안정도 여유가 가장 적은 운전점에서 PSS 이득을 결정할 경우의 PSS 이득에 대해서, 안정도 관점에서 어떠한 관계가 있는지 살펴본다. 가장 안정도 여유가 적은 운전 조건은 가장 시스템 댐핑이 적게 되는 운전조건이다. 이러한 운전조건은 시스템이 약소하고 중부하로 운전되며 역률이 지상이고 나쁠 때이다. 상정된 운전조건은 아래와 같다.

$$P + jQ = 1.0 + j 0.4, X_e = 0.8$$

그림 2.5는 $T1 = 0.5$ 인 경우의 근 궤적을 보여준다. 앞에서 PSS 이득결정 방법과 같이 이득을 결정하면, 이득은 약 10 p.u. 가 되며, 이 값은 제어모드가 불안정해지는 값 약 30 p.u.에 대해서 3분의 1정도다. 결정된 약 10 p.u. 값은 앞의 튜닝조건에서 결정된 값, 3.0 p.u.보다 크고 제어모드가 불안정해지는 값과 같다. 이와 같이, 만약 가장 안정도 여유가 없는 운전조건에서 이득을 10 p.u.로 결정하고, 앞의 튜닝 조건인 PGE 함수가 이득이 크고 위상지연이 큰 지역에서 운전하게 되면 불안정하게 되어 버린다.

그림 2.6은 $T1 = 0.25$ 로서, 결정된 이득은 약 30 p.u. 정도이고 앞에서 결정된 값 15 p.u. 보다 크게 결정되었음

을 알 수 있다. 이렇게 크게 결정된 값은 앞서의 튜닝조건에서는 불안정하게 되는 값으로 될 수 있음을 나타낸다.

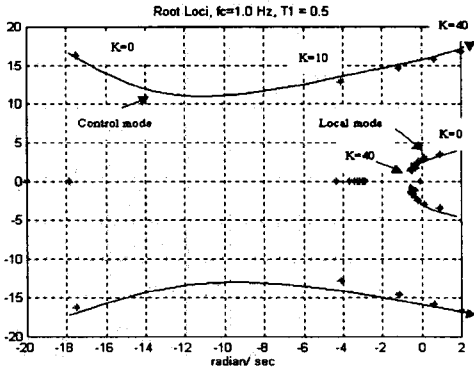


그림 2.5 이득 상수 K 변화에 대한 지역모드와 여자기모드 궤적 (T1=T3=0.5, T2=T4=0.05)

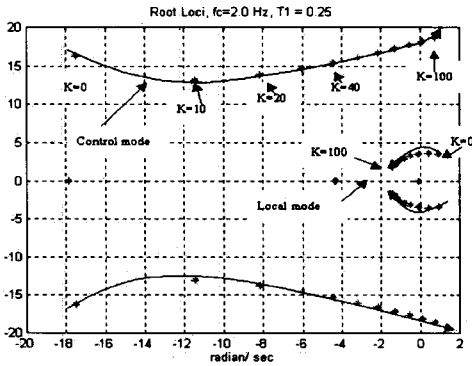


그림 2.6 이득 상수 K 변화에 대한 지역모드와 여자기모드 궤적 (T1=T3=0.25, T2=T4=0.025)

3. 결 론

본 논문에서는 1기 무한 모선 계통을 이용하여 발전기 축 속도를 입력으로 하는 PSS의 위상보상과 이득결정에 대해서 살펴봤다. 이때의 PSS 튜닝조건은 PGE함수의 이득이 가장 크고 위상지연이 큰 시스템이 강건하고 중부하로 운전하는 경우이다. 이와 같은 튜닝조건에서 튜닝할 경우 다양한 전력계통의 운전조건에 대해서도 안정하게 PSS를 동작시킬 수 있다. PSS의 위상보상과 근 제적을 이용한 이득결정에 대해서 요약하면 아래와 같다.

- 1) 보상된 위상에서 위상지연이 $\phi_p = -90^\circ$ 시의 주파수가 최대가 되게 위상정수를 결정한다.
- 2) 지역모드 주파수에서 보상된 위상지연은 45° 이하로 하며, 가능하면 20° 정도로 한다.
- 3) 광역모드에 대해서도 댐핑이 제공 되도록 정수를 결정한다.
- 4) 위상보상은 동기화 토오크를 손상하지 않는 부족보상으로 한다.
- 5) PSS 이득 K_S 는 시스템이 불안정하게 되는 이득의 3분의 1로 한다.

위의 결과는 1기 무한 모선 계통을 선형화 하여 얻은 결과이며, 다기 계통에도 적용할 수 있을 것이다. 그러나, 단

순한 1기 무한 계통으로 PSS의 개념과 튜닝방법을 이해하는데 도움을 주지만, 실 계통에 적용되는 PSS를 튜닝하기 위해서는 좀더 상세한 모델링과 다기 계통을 표현할 수 있는 프로그램이 요구된다고 할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] F.P de Mello and Concordia "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, April 1969, pp.316-329
- [2] E.V.Larsen and D.A.Swan, "Applying Power System Stabilizers : Parts I,II and III, IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-100,1981,pp3017-3046
- [3] P.Kundur, D.C.Lee, H.M. Zein, "Power system Stabilizers for Thermal Units : Analytical Techniques and On-site Validation, IEEE Trans. on PAS, Vol PAS-100, pp81-95, Tan 1981
- [4] P.Kundur, "Power System Stability and Control" McGraw-Hill, 1994, pp179-181
- [5] P.Kundur, M.Klemin, G.J.Rogers and M.S. Zywon, "Application of Power System Stabilizer for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans. Vol.PWRS-4, pp.614-626, May 1989
- [6] "Development of Power System Stabilizer for Generator Control System", Technical Memo TM.97EJ05.M1999.02, KEPRI, Jan. 1999
- [7] D.J.Kim, Y.H.Moon, T.K.Kim, J.H.Shin, "A Basic Study for Tuning Power System Stabilizer -PART I : Analyzing the Torque Characteristics of Power System Corresponding to Operating Conditions", Journal of KIEE Vol. 48, pp.1064-1072 Sep. 1999