

# PSS 정수 튜닝을 위한 전력시스템 미소신호 안정도 해석 프로그램

論 文
52A-5-1

## Computer Analysis Program of Small-Signal Stability of Power System for Tuning PSS's Parameters

金東俊\* · 文英煥\*\* · 許眞\*\*\* · 申政勳<sup>§</sup> · 金泰均<sup>§§</sup> · 秋鎭夫<sup>§§§</sup>

(Dong-Joon Kim · Young-Hwan Moon · Jin Hur · Jeong-Hoon Shin · Tae-Kyun Kim · Jin-Boo Choo)

**Abstract** - This paper describes a novel approach for performing eigenvalue analysis and frequency domain analysis of multi-machine power system. The salient feature of this approach is a direct approach for constructing the state matrix equations of linearized power systems about its operating point using modular technique. These state matrix equations are then used to obtain eigenvalues and mode shapes of the system, and frequency response, or Bode, plots of selected transfer functions. The proposed program provides a flexible tool for systematic analyses of tuning PSS's parameters. The paper also presents its application to the analyses of a single-machine infinite bus system and two-area system with 4 machines.

**Key Words** : eigenvalue analysis, frequency domain analysis, modular technique, PSS tuning

### 1. 서 론

최근 전력 시스템의 안전한 운전은 환경 문제와 경제성에 의한 송전선로 설치 제한, 급격한 부하증가에 의한 계통의 중부하 운전, 그리고 앞으로 예견되는 전력 시스템 구조개편 후의 효율적인 전력운용의 필요성에 의해서 점점 성능이 우수한 제어기에 의존하고 있다. 전력 시스템에서 가장 고전적이고 중요한 보조 제어기 중 하나는 대형 동기기의 제어 시스템인 전력 시스템 안정화 장치(Power System Stabilizer, 이하 PSS)이다. 전력 시스템 안정도 향상을 위해서는 이 PSS의 제어정수 튜닝이 신뢰도 있고 강건해야 하며 성능이 우수하게 튜닝되어야 한다. 그러나, PSS 위상보상 정수 튜닝은 계통-발전기-여자기(Power-Generator-Excitation, 이하 PGE)에서 발생하는 위상지연을 보상해야 하나 PGE 위상지연은 운전 조건에 따라 변화하기 때문에 튜닝이 쉽지 않고, PSS 이득 결정도 PSS 성능이 최대로 발휘하도록 해야 하지만 여자기의 제어모드의 댐핑을 나쁘게 하는 효과 때문에 이득 결정에 제약은 받는다[1][2][3]. 따라서, 이러한 점들을 고려해서 실계통 적용을 위하여 PSS 제어정수를 적절히 튜닝할 수 있는 프로그램이 요구된다.

PSS 제어정수 튜닝을 위해서 일반적으로 사용하는 선형화 모델은 저차의 1기 무한모선 계통이다[4]. 그러나 이러한 간

단한 모델은 PSS 개념을 이해하고 고찰하기에는 적당하나, 실계통에 투입될 PSS 정수를 튜닝하는 데는 부족한 점이 많다. 지역 모드(Local Mode)만 고려하여 PSS를 튜닝 하더라도, 실계통을 단지 1기 무한 모선으로 모델링하는 것은 어려운 경우가 있다. 발전소로부터 송출하는 전력은 다중 송전선로를 통해서 나갈 수 있고, 경우에 따라서는 근접한 발전기들까지 포함하여 모델링 할 필요가 있다. 또한 실계통 여자 시스템은 간단한 모델뿐만 아니라 복잡하고 다양한 모델이 있으며, 동기기 모델은 댐핑 권선과 포화에 의한 안정도 효과가 달라지기 때문에 상세 모델이 필요하다. 이와 같은 이유로 본 논문은 국내에서 사용하는 상용 시간영역 해석 프로그램과 입력 데이터를 병용할 수 있고 실계통 투입 PSS 제어정수 튜닝을 효율적으로 수행할 수 있는 중소규모 전력 시스템 미소신호 안정도 컴퓨터 해석 프로그램(PoWeR STABlizer, 이하 PWRSTAB)을 개발하였다.

개발된 PSS 튜닝 프로그램은 고유치 해석과 주파수 응답 특성을 해석할 수 있는 기능을 구비하고 있다. 고유치 해석은 주어진 다이나믹 모델과 네트워크에 대해서 모두 직접 선형화된 시스템 행렬로부터 계산되어 진다. 주파수 해석 기능은 PGE에서 발생하는 위상지연을 PSS가 위상 보상을 했을 때의 보드선도를 보여 줄 수 있다. 구현된 주파수 응답특성은 문헌[1][2][3]의 튜닝기법이 적용될 수 있도록 한 것이다. 본 논문에서는 튜닝 기법에 대한 설명은 본 논문의 범위에 벗어나므로 자세한 설명은 생략한다.

튜닝 알고리즘에 사용된 제안된 전체 시스템 행렬 구성은 모듈화 기법이 적용되어 모선 전압과 위상을 극좌표로 사용하는 발전시스템 행렬, 네트워크 행렬, 그리고 인터페이스 행렬을 통하여 구성된다. 기존의 발전 시스템 정식화에서는 기기 모선 전압을 직각 좌표계를 사용하여 송전계통을 인터페이스화하도록 구성된다[6][9]. 발전 시스템 정식화에 있어 기기

\* 正會員 : 韓國電氣研究院, 前任研究員  
 \*\* 正會員 : 韓國電氣研究院, 責任研究員 · 工博  
 \*\*\* 正會員 : 韓國電氣研究院, 研究員  
 § 正會員 : 韓國電力研究院, 前任研究員  
 §§ 正會員 : 韓國電力研究院, 前任研究員 · 工博  
 §§§ 正會員 : 韓國電力研究院, 首席研究員 · 工博  
 接受日字 : 2002년 2월 19일  
 最終完了 : 2003년 3월 6일

단자 전압을 극좌표를 사용함으로써 얻는 이점은 극좌표계로 수렴되는 조류계산 전압 크기와 위상결과를 변환 없이 그대로 사용할 수 있고, 특히 여자시스템의 기기 단자전압 절대치 변수를 연결하는데 매우 편리한 장점이 있다.

PWRSTAB 프로그램의 주요 특징은 전력 시스템의 네트워크와 발전 플랜트를 직접 선형화하여 행렬들을 구성했기 때문에 정확한 주파수 응답 해석과 고유치 해석이 가능하고, 모듈러 기법이 적용되어 전력 시스템의 다양한 여자 시스템이나 조속기·터빈 같은 필요한 모델을 쉽게 프로그램에 추가 또는 수정할 수 있는 유연성에 있으며, 500차 이하의 어떠한 전력 시스템 입력 데이터에 대해서도 분석할 수 있는 일반성에 그 특징이 있다. 또한, 사용자가 편리하게 실계통 PSS 제어 정수를 튜닝할 수 있도록 그래픽 사용자 인터페이스(Graphic User Interface, 이하 GUI) 환경이 제공된다.

## 2. 모델 정식화

### 2.1. 모듈러 기법을 적용한 발전 플랜트 모델 정식화

다기계통 미소신호 안정도 해석을 위해서는 먼저 발전 플랜트를 선형화해야 한다. 발전 플랜트는 발전기와 여자시스템을 포함하는 발전 시스템, 조속기·터빈 시스템, 그리고 PSS와 같은 기타 보조 제어기로 구성된다. 개발된 PWRSTAB 프로그램은 선형화된 디바이스 모델들을 모듈화하여, 새로운 모델들을 쉽게 프로그램에 추가될 수 있도록 하였다. 동기기나 다양한 여자 시스템 같은 디바이스에 대한 모델 선형화에 대해서는 뒤에서 자세히 설명한다. 식 (1)~(3)은 발전 플랜트 'i'에 대한 선형화된 모델을 나타낸다.

$$px_{gi} = A_{gi}x_{gi} + B_{gi}v_{ggi} + B_{ci}v_{ci} \quad (1)$$

$$i_{ggi} = C_{gi}x_{gi} - D_{gi}v_{ggi} \quad (2)$$

$$y_{ci} = C_{ci}x_{gi} + D_{ci}v_{ggi} + D_{ci}v_{ci} \quad (3)$$

여기서,  $p$ 는  $d/dt$ 를 나타내며, 미소 변화량 기호,  $\Delta$ 는 모든 상태변수 식에서 생략한다.  $x_{gi}$ 는 'i'발전 플랜트의 상태 변수를 나타낸다. 상태변수 순서는 동기기, 여자시스템, 조속기·터빈 시스템, 그리고 PSS나 기타 보조 제어기 순으로 구성된다. 식 (1)의 발전 플랜트 모델에서는 반드시 기기 모델이 포함되어야 한다. 그러나, 여자기 등 다른 모델들은 식 (1)에서 생략해도 계산하는데 큰 문제가 없다. 그리고 입력  $v_{ggi}$ 는 발전기 단자모선을 나타내며, 출력은  $i_{ggi}$ 와  $y_{ci}$ 로 표현되고 전자 출력은 발전기 단자전류를 나타내며, 후자 출력은 제어입력  $v_{ci}$ 에 대해서 발전 시스템에서의 관찰하고자 하는 출력변수를 나타내며, 이것은 PSS 정수 튜닝 시 주파수 응답 특성을 분석할 때 중요하게 사용된다.

발전기 단자전류는 각각의 기기 기준 좌표인  $d-q$  축으로,  $i_{gg} = [i_{gd}, i_{gq}]^t$  표현되고, 기기 단자전압은  $d-q$ 축에서 시스템 기준 좌표인  $R-I$  축으로 변환된 다음, 위상각과 전압절대치로 나타낸,  $v_{gg} = v_{\theta}V_i = [\theta, V_i]^t$  로 표현한다. 식 (1)의 입력 값인 발전기 단자전압을  $R-I$  축의 극 좌표로 사용함으로써, 여자시스템 모델이 발전 플랜트 모델에 추가 되었을 때 쉽게 상태변수를 연결할 수 있고, 모선 전압이 극 좌표계로 계산되

는 조류계산 결과를 바로 사용할 수 있다.

기기 단자전류는 네트워크 정식화에서 입력으로 사용되어, 발전기 단자전압을 출력으로 하는 네트워크 선형화 행렬을 유도하게 된다. 이와 같이 각각의 발전 플랜트의 모델 식이 완성되면, 한 개의 상태 방정식 형태로 통합될 수 있다:

$$px_g = A_g x_g + B_g v_{gg} + B_c v_c \quad (4)$$

$$i_{gg} = C_g x_g - D_g v_{gg} \quad (5)$$

$$y_c = C_c x_g + D_c v_{gg} + D_c v_c \quad (6)$$

여기서,  $x_g = [x_{g1}^t, \dots, x_{gn}^t]^t$ ,  $v_{gg} = [v_{gg1}^t, \dots, v_{ggn}^t]^t$ ,  $v_c = [v_{c1}^t, \dots, v_{cn}^t]^t$ ,  $i_{gg} = [i_{gg1}^t, \dots, i_{ggn}^t]^t$ , 그리고  $A_g \sim D_c$ 는 식 (1)~(3)에 대응되는 발전 플랜트의 행렬로써 블락 대칭 행렬로 구성된다.  $d-q$  축과  $R-I$  축 간의 변환식과 동기기의 모델 선형화에 대해서는 아래에서 자세히 설명한다.

### 2.2 네트워크 모델 정식화

송전선로의 선형화는 선로의 동적 응답이 포함되지 않은 정상 상태의 대수 방정식으로 나타내며, 이 정식화는 아래와 같다[6]:

$$\begin{bmatrix} i_{ng} \\ i_{nl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{gg} & Y_{gl} \\ Y_{lg} & Y_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ng} \\ v_{nl} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$i_{nl} = J_l v_{nl} \quad (8)$$

여기서,

$J_l$ : 비선형 부하모선의 선형화 계수

$i_{ng}, v_{ng}$ : 발전기모선의 단자전압과 전류 변수,

$$i_{ng} = [i_{ng1}^t, \dots, i_{ngn}^t]^t, v_{ng} = [v_{ng1}^t, \dots, v_{ngn}^t]^t$$

$i_{nl}, v_{nl}$ : 부하모선의 단자전압과 전류 변수,

$$i_{nl} = [i_{nl1}^t, \dots, i_{nlm}^t]^t, v_{nl} = [v_{nl1}^t, \dots, v_{nlm}^t]^t$$

$Y_{gg} \sim Y_{ll}$ : 네트워크 어드미턴스 행렬

식 (7), (8)을 정리하면 발전기 단자전압 변수를 입력으로 하고, 발전기 단자전류를 출력으로 하는 어드미턴스 행렬을 유도할 수 있다:

$$i_{ng} = [Y_{gg} - Y_{gl}(Y_{ll} - J_l)^{-1}Y_{lg}]v_{ng} \quad (9)$$

네트워크에서 사용하는 좌표는 발전 플랜트에서 사용하는 동기기 좌표와 달리 시스템 기준 좌표인  $R-I$  축을 사용한다. 아래 절에서는 발전 플랜트 모델 식과 네트워크 식을 어떻게 연결하는가에 대해서 기술한다.

### 2.3 발전 플랜트와 네트워크의 Interfacing

발전 플랜트 모델 식과 네트워크 식과의 연결은 식 (10)~(12)을 이용해서, 서로 다른 기준좌표에서 계산된 입력 상태 변수를 변환하여 서로 연결한다. 식 (10)와 식 (11)은  $d-q$  축과  $R-I$  축을 서로 변환하는 식이 되고, 식 (12)은 시스템 기준좌표  $R-I$  축의 직교 좌표계와 극 좌표계의 변환식을 나타낸다. 식 (10)를 이용해서 발전 플랜트 출력 식 (2)를  $R-I$  축의 기기 단자전류로 변환하여 네트워크 식과 연결한다. 식 (11)과 식 (12)은 발전 플랜트 정식화에서 사용되어, 기기 단

자전압을 극 좌표값으로 변환한다. 네트워크에서 계산된 기기 단자전압은 식 (12)을 이용해서 발전 플랜트 모델링 식 (1)과 식 (3)에 사용될 수 있는 극 좌표 전압으로 변환하고 네트워크 식과 연결한다:

$$i_{dq} = i_{ng} = T_1 i_{ng} + T_2 \delta \quad (10)$$

$$v_{dq} = T_1 v_{ng} + T_3 \delta \quad (11)$$

$$v_{RI} = v_{ng} = T_4 v_{gv} = T_4 v_{gg} \quad (12)$$

여기서,

$$T_1 = \begin{bmatrix} \sin \delta_0 & -\cos \delta_0 \\ \cos \delta_0 & \sin \delta_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} i_{10} \cos \delta_0 + i_{20} \sin \delta_0 \\ -i_{10} \sin \delta_0 + i_{20} \cos \delta_0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} v_{10} \cos \delta_0 + v_{20} \sin \delta_0 \\ -v_{10} \sin \delta_0 + v_{20} \cos \delta_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} -V_0 \sin \theta_0 & \cos \theta_0 \\ V_0 \cos \theta_0 & \sin \theta_0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\delta = T_5 x_g \quad (17)$$

여기서,  $\delta = [\delta_1, \dots, \delta_n]^T$ 는 각 동기기의 내부 상차각의 상태변수 벡터를 가리킨다. 아래 첨자 0는 조류계산에서 계산된 정상상태의 초기값을 나타내며,  $\delta_0$ 는 기기 초기 상차각을 표현한다.  $\theta_0$ 와  $V_0$ 는 조류계산에서 수렴된 모선 초기 위상값과 모선 절대치 초기 전압값을 나타낸다. 그리고  $T_1 \sim T_4$  행렬은 각 발전 플랜트에 대해서 블락 대칭 행렬을 갖고, 행렬  $T_2$ 와  $T_3$ 는 각각의 기기 상차각 상태변수에 대해서만 어떤 초기값을 갖는다. 마지막으로,  $T_5$ 는 기기 내부 상차각 상태변수 항요소만 1이고 나머지 0으로 이루어진 단위 행렬이다.

이와 같이 발전 플랜트 모델 방정식과 네트워크 방정식을 서로 연결하면, 전체 시스템 방정식을 유도할 수 있다. 최종적으로 계산된 선형화된 시스템 행렬식은 식 (18)과 식 (19)와 같다:

$$p x_g = A x_g + B_c v_c \quad (18)$$

$$y_c = C x_g + D_c v_c \quad (19)$$

여기서,

$$A = A_g + B_g (T_1 Y_g T_4 + D_g)^{-1} (C_g - T_1' ) \quad (20)$$

$$C = C_c + D_c (T_1 Y_g T_4 + D_g)^{-1} (C_g - T_1' ) \quad (21)$$

$$Y_g = [ Y_{gg} - Y_{gt} (Y_{tt} - J_t)^{-1} Y_{tg} ] \quad (22)$$

$$T_1' = T_2 T_5 \quad (23)$$

### 3. PSS 튜닝 프로그램

#### 3.1 튜닝 프로그램 구성

그림 1은 PWRSTAB 프로그램의 계산 알고리즘이다. 입력에 사용되는 데이터는 PSS/E Ver. 24의 조류계산 입력 형식을 갖는다. 조류계산은 스파서티 기법[7]을 사용한 대형 계통 해석용 UPFlow라는 조류계산 알고리즘에 의해서 수행되며 계산면에서 매우 효율적이다. 조류계산이 끝나면 계산 결과를 출력하고, 기기 모선과 부하 모선으로 분리하기 위해서 프로그램 내부에서 모선 재배열을 하게 된다. 그런 다음 네트워크의 어드미턴스 행렬을 계산한다. 다음으로, 상용 프로그램에서 사용되는 다이내믹 입력 데이터를 파일에서 읽어

들이고, 입력된 모델의 상태변수를 초기화 한다.

상태변수가 초기화 되면, 시스템 선형화 행렬들을 계산하고 선택된 방법에 따라서 고유치 해석과 주파수 응답 해석을 수행할 수 있다. 고유치 해석을 통한 이득 튜닝, PGE 함수의 위상지연을 보상하는 PSS 정수 튜닝, 그리고 PSS 튜닝 조건에 대한 자세한 설명은 기존 문헌[1][2][3]에 자세히 기술되어 있으므로 본 논문에서는 튜닝기법에 대한 상세한 설명은 생략한다. 선형화된 동적 모델도 PSS/E에서 사용하고 있는 모델을 선형화 하였다.

이와 같이 개발된 PWRSTAB 프로그램은 이 같은 상용 과도 안정도 프로그램 형식의 데이터를 사용함으로써 개발된 선형화 프로그램에 의해서 설계된 PSS 제어 정수를 바로 과도 안정도 프로그램을 이용해서 검증할 수 있는 장점이 있다. 또한, 최근 국내에서 사용되는 다이내믹 모델 정수는 실제 계통의 발전기 특성시험에 의해서 실측된 데이터를 PSS/E 모델에 맞게 유도하기 때문에, 어떠한 모델 정수 변환 없이 그대로 사용할 수 있고 실측에 의해서 유도된 정확한 모델 정수를 그대로 사용할 수 있는 장점도 있다.

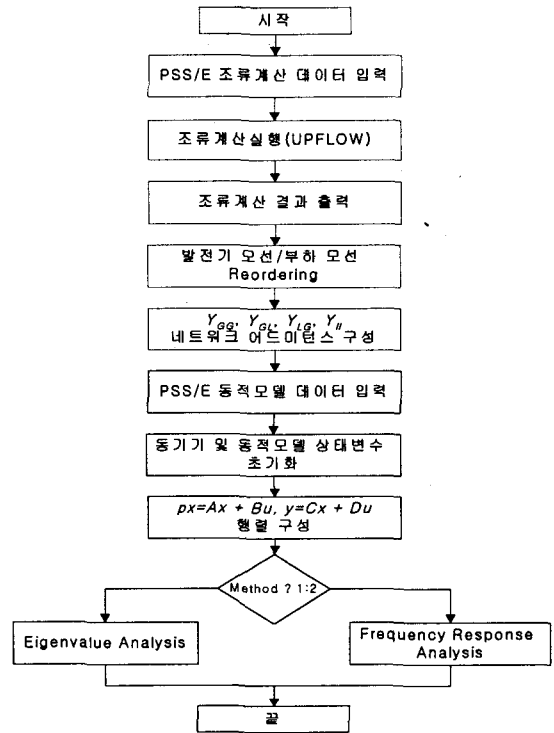


그림 1 PWRSTAB 프로그램 알고리즘  
Fig. 1 PWRSTAB Program Algorithm

계산된 시스템 행렬 A는 모든 디바이스의 상태변수를 포함한 만차 행렬(full matrix)로 계산되기 때문에, 수 천차 이상의 대형 전력 시스템에 적용하는 것은 불가능하다. 그러나 개발된 프로그램은 500차 이하의 상태변수를 갖는 소형 대기 전력 시스템에 적용가능 하도록 구성하였으며, 상세 모델링된 기기와 제어기에 대해 모든 고유치를 계산할 수 있다. 또한, PSS 정수를 윈도우 환경에서 쉽게 튜닝할 수 있도록, GUI 환경이 개발되었다. 개발에 사용된 언어는 두 가지 언어로서, 계산 엔진은 FORTRAN을 사용하였으며 GUI 환경

은 비주얼 C++을 이용하여 구현하였다.

### 3.2 윈도우 GUI 환경 구현

PSS 정수 튜닝을 위한 PWRSTAB 프로그램은 사용자가 편리하게 사용할 수 있도록 GUI 환경으로 구성되어 있다. 그림 2는 PWRSTAB 프로그램이 GUI 환경을 갖는 구조를 보여주고 있다. GUI 환경은 비주얼 C++로 구현되었고, 더불어 데이터를 편집할 수 있는 편집기 객체와 주파수 특성을 분석할 수 있는 그래픽 객체가 프로그램에 포함되어 있다. 실제 계산은 Visual FORTRAN 언어로 컴파일된 동적 링크 라이브러리(Dynamic Link Library, 이하 DLL) 파일에서 계산된다. 이와 같이 PWRSTAB 프로그램은 사용자가 편리하게 사용할 수 있는 GUI 환경이 제공되며, Mixed-language 기법이 사용된 프로그램이다.

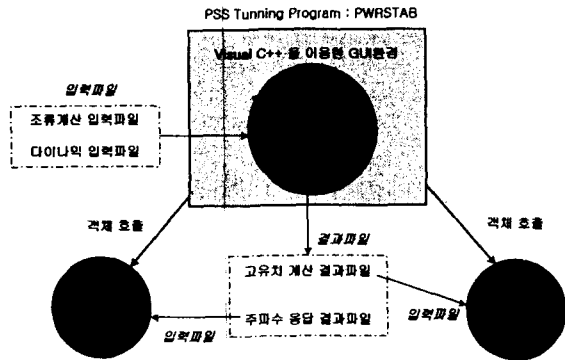


그림 2 GUI 환경을 갖는 PWRSTAB 프로그램  
Fig. 2 PWRSTAB Program With GUI

그림 3은 PWRSTAB 프로그램의 실행화면을 보여주고 있고, 데이터를 편집할 수 있는 에디터 기능과 다중으로 문서를 편집할 수 있는 다중 문서 인터페이스(Multiple Document Interface, 이하 MDI) 기능을 보여주고 있다. 또한, 그림 3은 대화상자에서 사용자가 원하는 해석방법을 선택할 수 기능을 보여준다. 해석 결과는 파일로 저장된 다음, 파일을 오픈하여 편집하거나 또는 보드선도로 결과를 분석할 수 있다. 그림 3의 PWRSTAB 프로그램 내의 대화상자에 있는 5개의 해석 방법은 다음과 같은 해석을 FORTRAN 언어로 코딩되어 컴파일 되어 있는 DLL 파일에서 수행한다:

- 시스템 고유치 해석 : 계산된 계통 A행렬의 고유치 해석
- PGE(s) 함수 위상 지연 주파수 응답: 계통-발전기-여자기(PGE)의 주파수 응답특성을 나타낸다. 여기서 발전기의 관성은 무한( $H=\infty$ )으로 가정함. 입력은 여자기의 기준 전압( $\Delta V_{ref}$ )이고 출력은 발전기의 유효전력( $\Delta P_e$ )이 된다. 여기서, 발전시스템의 전압제어는 페루프로 구성된다.
- 부하시 GE(s) 함수 주파수 응답: 발전기-여자기(Generator-Excitation, 이하 GE)의 주파수 응답특성을 보여준다. 계통(Power)은 고려하지 않은 주파수 응답을 보여주며, 부하시의 페루프로 전압제어되는 발전 시스템의 단자전압특성을 분석할 수 있다. 여기서 발전기의 관성은 무한( $H=\infty$ )으로 가정함.
- PGE(s) • PSS<sub>d</sub>(s) 함수 위상보상 주파수 응답: 입력은

발전기의 속도( $\Delta Speed$ )이고 출력은 발전기의 유효출력( $\Delta P_e$ )이다. 이때, 발전기 관성(H)는 무한대( $H=\infty$ )로 가정한다. PSS에 의해서 발전기와 여자기에서 지연된 위상을 보상하는 것을 분석할 수 있다.

프로그램 사용법은 매우 간단하다. 먼저, 사용자는 국내 전력회사에서 사용하고 조류계산 데이터와 다이나믹 데이터를 미리 준비해야 한다. 데이터가 준비되면, 프로그램을 실행시키고, 원하는 입력 데이터를 에디터로 오픈하여 편집할 수 있다. 고유치 해석은 메뉴에서 "분석(A)-PWRSTAB 실행"순으로 실행시키면 입력 파일 대화 창이 나온다. 대화 창에 요구한 파일명을 확인하고 실행시키면 바로 고유치 계산이 지정된 파일에 저장된다. 주파수 응답특성을 해석하고자 한다면, 입력 파일 대화창의 탭 선택에서 "해석방법"을 선택한다. 그러면 그림 3과 같이 바뀌게 되고 원하는 해석 방법을 선택하면 된다.

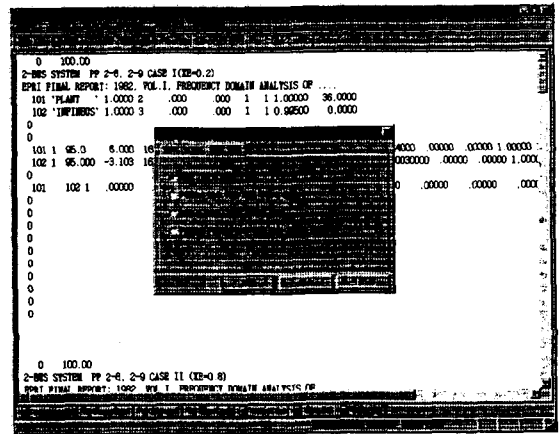


그림 3 PWRSTAB 프로그램 실행화면  
Fig. 3 PWRSTAB Program Execution Window

그림 4는 계산된 후 파일로 저장된 주파수 응답 특성 결과를 읽어 들여서 보드선도로 나타낸 것이다. PWRSTAB에서는 PSS 정수 변화에 따라 달라지는 주파수 응답 특성을 분석하기 위해서, 보드 선도를 그려주는 그림 객체에 Multiplot 기능이 갖추어져 있다.

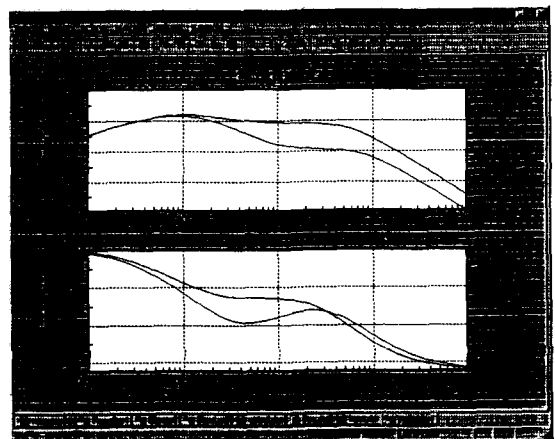


그림 4 PWRSTAB 프로그램 실행화면  
Fig. 4 PWRSTAB Program Execution Window

### 4. 모델 선형화

PWRSTAB내에서 사용된 동기기모델, 여자기모델, 조속기·터빈 모델 그리고 PSS 모델은, 국내 한전에서 사용중인 시간영역 시뮬레이터인 상용 프로그램 PSS/E 모델을 기본으로 하였다. 또한 입력데이터 형식도 PSS/E 형식을 읽을 수 있도록 하고 있다. 선형화된 동기기 모델로는 원통형 모델, 돌극기 모델 그리고 무한 모션용 클래식 모델 등이 있다. 여자기 모델은 DC형인 IEEE1 모델을 비롯하여 정지형, 회전형 등의 9개의 모델이 선형화 되어 있다.

PSS 모델로는 IEEE1 모델 외에 한 개의 다중입력 PSS를 선형화 하였다. 조속기·터빈 모델로서 화력기 모델인 IEEE1 모델이 선형화 되었지만 프로그램의 모듈성 때문에 필요에 따라 계속 추가할 수 있다.

PWRSTAB 내부에서 시스템 행렬구성 방법은 입력되는 다이나믹 입력데이터에 따라 유효한 모델만 선택되어 행렬이 구성되어 진다. 앞 정식화에서 기술한 바와 같이 먼저 동기기 모델, 여자기 모델, 조속기/터빈 모델, 그리고 보조제어기 순으로 행렬이 구성된다. 만약 여자시스템 모델이 없는 경우는 이 모델은 생략된다. 다른 모델도 마찬가지로 모델이 없으면 생략되지만, 반드시 지정된 기기 모션에는 기기 데이터가 입력되어야 한다. 그리고 기기의 기계적 토오크와 조속기·터빈의 출력변수 연결, 또는 AVR과 PSS의 입출력 변수의 연결은 행렬의 상태변수 위치가 저장된 연결벡터에 의해서 이루어 진다.

다음은 제안된 방법인 극좌표계로 된 선형화된 모델에 대해서 몇 개를 살펴본다.

#### 4.1 기기 모델의 선형화

그림 5는 선형화된 기기 모델중 하나인 원통형 기기 모델을 보여주고 있으며, 직축에 댐핑 권선이 1개, 횡축에는 2개의 댐핑 권선을 갖는다.

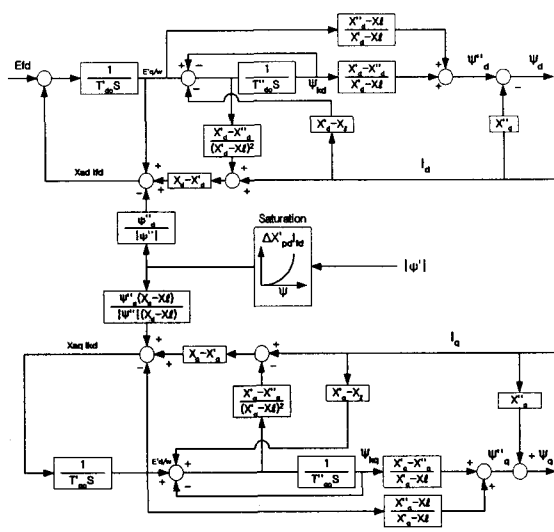


그림 5 원통형 발전기 모델 GENROU  
Fig. 5 Round Type Machine Model "GENROU"

위 그림의 기기 모델에 대해서 기기 포화를 포함하여 선형

화 하면 식 (24)과 같은 선형화 행렬을 유도할 수 있고, 앞에서 언급한 것과 같이 발전기 단자전압이 극좌표로 표현되어 있음을 보여준다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{E}_f \\ \Delta \dot{\psi}_{fd} \\ \Delta \dot{E}_d \\ \Delta \dot{\psi}_{fd} \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & 0 & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 & 0 & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & 0 & a_{36} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_f \\ \Delta \psi_{fd} \\ \Delta E_d \\ \Delta \psi_{fd} \\ \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \\ b_{41} & b_{42} \\ b_{51} & b_{52} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & u_{52} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{fd} \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (24)$$

기기 모델에서 가장 간단한 고전모델은 초기 과도 리액턴스 배후전압을 갖으며 이 배후전압은 발전기 계자전압  $E_{fd}$ 이고 사고와 관계없이 항상 일정하다. 이 기기 모델은 1기 무한모션 계통에서 무한모션을 나타내는데 사용되고, 전기적 변동이 없으므로 2차 동기기 동요 방정식만으로 표현된다. 동요방정식을 선형화 하면 식 (25)와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (25)$$

#### 4.2 여자기 모델의 선형화

그림 6은 여자기 모델 IEEE1을 보여주고 있다. 이 모델을 선형화하면, 식 (26)과 같다.

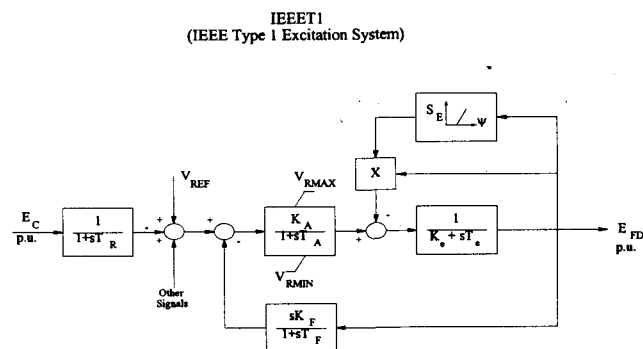


그림 6 여자시스템 모델 "IEEE1"  
Fig. 6 Excitation System Model "IEEE1"

아래와 같이 여자시스템 모델선형화에서 입력 단자전압은 극 좌표계로 표현된 전압크기를 사용한다. 여기서 리미터 같은 비선형 요소는 무시한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_c \\ \Delta \dot{V}_R \\ \Delta \dot{E}_{fd} \\ \Delta \dot{V}_{RP} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_c \\ \Delta V_R \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta V_{RP} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & b_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ u_{21} & u_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{REF} \\ \Delta V_s \end{bmatrix} \quad (26)$$

아래 그림 7은 정지형 여자시스템이 EXST1 모델을 보여주고 있고, 식 (27)은 선형화된 행렬을 나타낸다.

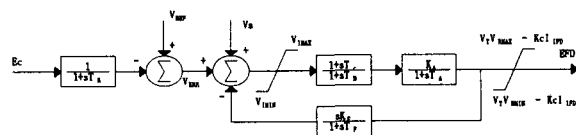


그림 7 정지형 여자시스템 모델 "EXST1"  
Fig. 7 Static Excitation Model "EXST1"

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_C \\ \Delta \dot{V}_{LL} \\ \Delta \dot{E}_{FD} \\ \Delta \dot{V}_{RF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_C \\ \Delta V_{LL} \\ \Delta E_{FD} \\ \Delta V_{RF} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & b_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ u_{21} u_{22} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{REF} \\ \Delta V_S \end{bmatrix} \quad (27)$$

4.3 PSS 모델의 선형화

그림 8은 IEEE에서 제안된 표준 PSS를 보여주고 있다. 이 선형화 모델은 5개 입력신호를 해석할 수 있다. 여기서 선형화 식은 생략한다. 이 모델을 이용하면 기본적인 PSS 튜닝 해석을 수행할 수 있다. 기타 구조가 다른 PSS 모델에 대해서는 필요에 따라서 선형화하여 메인 프로그램에 쉽게 첨가할 수 있다.

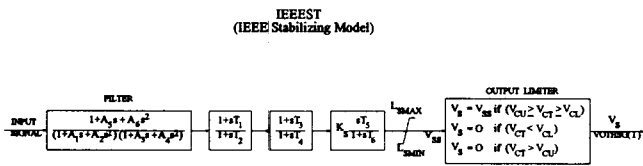


그림 8 PSS 모델 "IEEEEST"  
Fig. 8 PSS Model "IEEEEST"

4.4 비선형 부하 모델의 선형화

비선형 부하 모델링은 R-I 축을 이용하여 모델링 했으며 일정 임피던스, 일정 전류, 일정 전력으로 하는 다중모델[9]로 하였다. 이 다중모델에 대한 수식 설명은 생략한다.

5. PSS의 전력 시스템 적용

5.1 EPRI 1기 무한모선

PWRSTAB 프로그램을 그림 8의 EPRI 1기 무한모선[8]에 적용하여 PSS 제어정수 튜닝을 위한 주파수 해석과 고유치 해석을 수행하였다. 부록에는 사용된 기기 정수와 여자기 모델 정수를 보여주고 있다. 계통해석에 사용된 기기 모델은 부록과 같은 정수를 갖는 원통형 모델이며 여자기 모델은 IEEE1 모델이다.

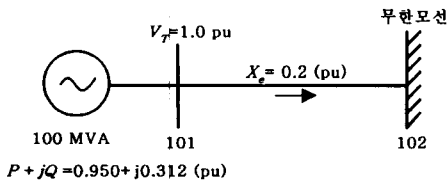


그림 8 EPRI 1기 무한 모선 시스템  
Fig. 8 EPRI's One Machine and Infinite Bus System

표 1은 사용된 모델과 정수에 따른 고유치 해석 결과를 보여주고 있다. 기기만 있는 경우 지역모드(Local Mode)는 1.737Hz이며 댐핑율은 0.050를 가리키고 있다. PSS 없이 여자 시스템이 부가되었을 때, 지역모드의 댐핑율은 0.034로 저하되었다. 또한, 지역모드 외에 댐핑이 잘 안되는 여자기 제어모드(Exciter Mode) 1.850Hz가 발생하였다. PSS가 부가되

어 이득을 증가시켰을 때, 지역모드 댐핑율은 증가하고 있다. 그러나, 여자기 모드는 댐핑이 저하됨을 알 수 있다. 따라서, 사용된 PSS 제어정수의 이득 결정은 10 pu 이하에서 결정하여야, 지역모드와 여자기 모드가 적절한 이득여유를 가질 수 있다.

표 1 PSS 이득 Ks 증가에 따른 고유치 변화(가장 댐핑이 안되는 모드)

Table 1 Eigenvalue Analysis by Increasing Ks (Least damping ratio Mode)

Ks Mode	Generator Only	Ks=0.0	Ks=5.0 pu	Ks=10.0 pu	Ks=15.0 pu
Local Mode	-0.545±j10.916	-0.371 ± j10.818	-2.600±j11.000	-4.788±j9.463	-5.240±j7.794
	fa=1.737Hz	fa=1.722Hz	fa=1.751Hz	fa=1.506Hz	fa=0.1241Hz
	ζ=0.050	ζ=0.034	ζ=0.230	ζ=0.451	ζ=0.558
Control Mode	-	-25.149±j11.623	-14.652±j16.550	-9.096±j20.424	-6.325±j23.752
	-	fa=1.850Hz	fa=2.634Hz	fa=3.251Hz	fa=3.780Hz
	-	ζ=0.908	ζ=0.663	ζ=0.407	ζ=0.257

그림 9는 PSS(s)함수에 의해서 PGE(s) 위상지연을 보상하는 것을 보여준다. 이 주파수 응답의 위상에서는 0°에서 완전보상을 나타낸다. 그리고, 0°~-90°에서의 주파수 대에서는 댐핑 토오르크를 제공하는 주파수 영역이 된다[1][2][3]. -90°이하의 영역의 주파수 대에서는 부의 댐핑 토오르크를 제공하는 영역이 되므로, 이 주파수 대에서의 이득은 시스템에 큰 영향을 주지 않도록 매우 작아야 한다. 그림 9에서 알 수 있는 특성은 댐핑 토오르크를 제공할 수 있는 주파수 영역은 0.1Hz ~ 5Hz까지의 범위이며, 이득특성은 5Hz 이하에서는 이득이 적어야 하나 다소 큰 값을 가지고 있다. PSS 이득 Ks 증가에 따른 특성은 위상특상은 이득에 관계없이 일정하나, 이득특성은 PSS 이득 증가에 따라 주파수 특성이 오른쪽으로 움직인다. 즉, PSS 이득이 클 수록 높은 주파수 영역의 마이너스 댐핑 토오르크를 제공하는 특성이 강하게 나타난다.

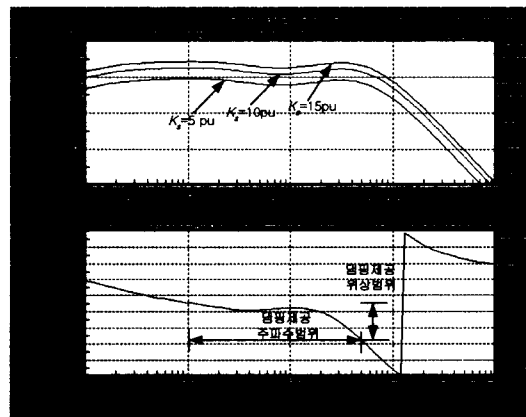


그림 9 PGE(s)-PSSs(s) 주파수특성  
Fig. 9 Frequency Response of PGE(s)-PSSs(s)

5.2 Two-Area 전력 시스템 적용

다기계통인 Two-Area 시스템에 개발된 프로그램을 적용하였다. 그림 10은 4기 11모선 계통인 Two-Area 시스템을

보여주고 있다. 사용된 네트워크 데이터는 문헌[9]과 같다. 그리고 기기와 여자시스템의 모델과 정수는 부록과 같다.

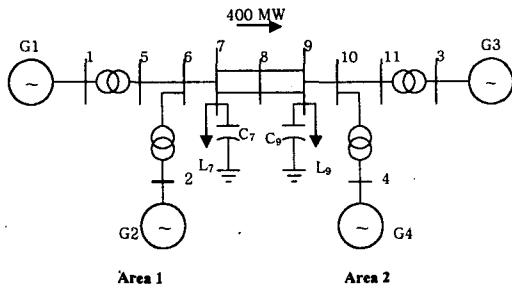


그림 10 4기 11노선의 Two-Area System  
 Fig. 10 Two-Area System: 4-Machine and 11-Bus System

Two-Area 계통의 고유치 계산결과를 비교하기 위해서 다 기계통 제어기 튜닝을 위한 소신호 안정도 프로그램인 MASS[10] 을 이용하여 PWRSTAB의 고유치 결과와 비교하였다. 사용된 모델과 정수는 송전선로 데이터, 부하데이터, 그리고 포화모델이 생략된 기기 모델만 고려하여 계산하였다. 기기 모델에서 포화모델을 고려하지 않은 이유는 MASS 프로그램과 PWRSTAB 방법이 동일하지 않기 때문이다. 표 2는 두 프로그램에서 계산된 결과를 보여준다. 구성된 모델 차수는 24차로써, 6차 모델링 되는 4개의 기기로 구성된 시스템이다. 두 프로그램에서 계산된 두 결과는 거의 일치하고 있다. 두 개의 전기기계적 지역모드는 모드 13과 모드 14이고, 한 개의 광역 모드는 모드 18로써 가장 댐핑이 안되는 모드가 된다. 마지막 두개의 모드는 제로 고유치로써, 하나는 전력 시스템에 무한모션이 없는 관계로 절대 상차각이 없는 데서 기인하며, 다른 하나의 모드는 동기기의 토오크가 속도

표 2 MASS 고유치 계산결과와 PWRSTAB 계산결과 비교

Table 2 Comparison of MASS's Results and PWRSTAB's Results

Mode No.	MASS 고유치 계산 결과		PWRSTAB 고유치 계산결과	
	Real	Imag.	Real	Imag.
1	-37.25	0.0	-37.253	0.0
2	-37.19	0.0	-37.189	0.0
3	-36.17	0.0	-36.170	0.0
4	-35.99	0.0	-35.985	0.0
5	-35.05	0.0	-35.050	0.0
6	-34.22	0.0	-34.218	0.0
7	-30.39	0.0	-30.393	0.0
8	-29.43	0.0	-29.434	0.0
9	-4.700	0.0	-4.698	0.0
10	-4.658	0.0	-4.656	0.0
11	-3.279	0.0	-3.279	0.0
12	-2.529	0.0	-2.529	0.0
13	-0.5771	±7.015	-0.579	±7.021
14	-0.5742	±6.793	-0.575	±6.798
15	-0.2607	0.0	-0.261	0.0
16	-0.1739	0.0	-0.174	0.0
17	-0.1688	0.0	-0.169	0.0
18	-0.09293	±3.402	-0.093	±3.406
19	-0.07184	±0.01955	0.014	±0.012
20	0.03180	0.0	-0.010	0.0

(speed)의 편차에 독립한다는 가정에 근거한다[9].

표 3은 여자시스템에 PSS가 있는 경우와 없는 경우의 고유치 결과를 보여준다. 사용된 데이터는 부록과 같은 EXST1 시스템의 정수와 PSS 모델정수이다. PSS가 없이 여자시스템과 기기만 있는 경우는 지역모드의 댐핑율이 적고, 광역모드에서는 댐핑율이 음의 값을 갖게 되어 시스템이 불안정하다. 그러나 부록의 PSS 모델정수를 갖는 PSS를 전력 시스템에 투입했을 경우는 모드 1과 2번의 여자기 모드의 댐핑율이 다소 저하되지만, 다른 지역모드와 광역모드의 댐핑율은 크게 개선된다.

표 3 PSS가 있는 경우와 없는 경우의 PWRSTAB 계산결과 비교

Table 3 PWRSTAB's Results with PSS and without PSS

Mode No.	Without PSS			With PSS		
	고유값	Hz	ζ	고유값	Hz	ζ
1	-18.293±j17.867	2.844	0.715	-17.446±j18.369	2.923	0.689
2	-18.971±j14.414	2.294	0.796	-18.121±j14.849	2.363	0.773
3	-0.664±j7.380	1.175	0.090	-2.238±j8.560	1.362	0.253
4	-0.665±j7.158	1.139	0.092	-2.153±j8.211	1.307	0.254
5	0.014±j3.821	0.608	-0.004	-0.712±j3.787	0.603	0.185

사용된 여자시스템과 PSS의 주파수 특성을 PWRSTAB 프로그램에서 분석하면 그림 11과 같다. 댐핑 제공 주파수 영역도 앞의 EPRI 1기 무한 모션 시스템보다 더 넓은 0.1Hz~20Hz 정도이며, 음의 댐핑 토오크를 제공하는 영역에서의 이득특성도 이득이 보다 적어 PSS가 잘 튜닝되어 있음을 판단할 수 있다.

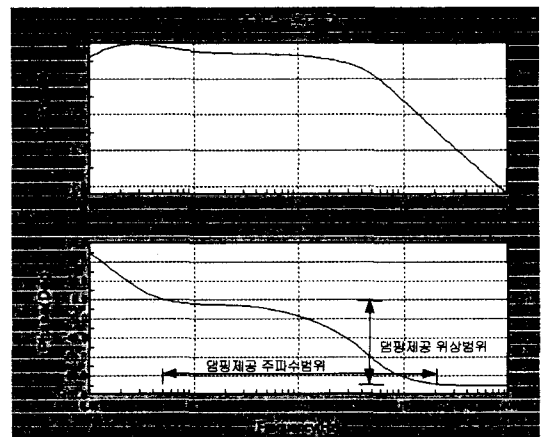


그림 11 PGE(s)·PSS(s)ω 주파수특성  
 Fig. 11 Frequency Response of PGE(s)·PSSω(s)

## 6. 결 론

본 논문은 실 계통 PSS 정수튜닝을 효율적으로 수행할 수 있는 전력 시스템 미소신호 안정도 프로그램에 대해서 기술하였다. 개발된 프로그램의 주요 특징은 아래와 같다:

- 개발된 프로그램은 대형 전력 시스템에 설치되는 PSS 제어 정수 튜닝을 편리하도록 주파수 응답 해석과 고유치 해석이 가능한 전력 시스템 미소신호 안정도 해석 프로그램이다. 제안된 시스템 행렬은 전력 시스템의 선형

화된 네트워크 행렬, 모선전압이 극좌표로 표현된 발전 시스템 행렬, 그리고 두 선형화 행렬을 연결해주는 인터 페이스 행렬에 의해서 구성되며 직접 모델들을 선형화했기 때문에 정확한 주파수 응답 해석과 고유치 해석이 가능하다.

- 제안된 프로그램은 모듈화 기법을 적용하여 전력 시스템의 다양한 여자 시스템이나 조속기·터빈 같은 필요한 모델을 쉽게 프로그램에 추가 또는 수정할 수 있는 유연성을 갖는다. 또한 500차 이하의 어떠한 전력 시스템 입력 데이터에 대해서도 분석할 수 있다.
- GUI 환경이 제공되어 사용자가 쉽게 PSS 제어정수를 튜닝할 수 있다. 주파수 응답해석을 수행할 때 보드선도를 프로그램 내에서 그릴 수 있도록 개발되었으며, Multiplot 기능 등이 포함되어 쉽게 PSS 제어정수를 튜닝할 수 있다.
- 국내에서 사용하고 있는 상용 안정도 프로그램 데이터와 호환이 가능하여 데이터를 따로 변환 없이 사용할 수 있다. 최근, 국내에서 사용하고 있는 안정도용 발전 플랜트 모델 등은 현장 특성시험을 통하여 상용 프로그램 모델에 맞게 모델 정수들을 결정하고 있다. 따라서, 정확한 해석을 위해서는 동일한 모델을 선형화하고 모델정수를 사용하는 것이 매우 중요하다.

개발된 프로그램은 네트워크의 다이내믹 특성이 고려되지 않은 대수 방정식을 사용하기 때문에 해석 주파수 영역이 5Hz 이하의 낮은 주파수 영역에서만 해석결과가 유효성을 갖는다. 따라서, 향후 연구는 고속 전력전자 제어를 튜닝할 수 있는 네트워크 다이내믹이 고려된 고주파용 미소신호 안정도 프로그램을 개발하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

**참고문헌**

[1] E.V.Larsen and D.A.Swan, "Applying Power System Stabilizers, Parts I, II and III", IEEE Trans., Vol. PAS-100, June 1981, pp. 3017-3046

[2] 김동준, 문영환, 김태균, 신정훈, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구, Part I: 계통 운전조건에 대한 토오크 특성분석", 대한전기학회논문지 제 48권 제9호, 1999.9

[3] 신정훈, 김태균, 김동준, 문영환, 백영식, "PSS 튜닝을 위한 기본연구, Part II: PSS 실계통 최적 정수 선정을 위한 튜닝기법", 대한전기학회 논문지 제 49권 제 7호, 2000.7

[4] F.P. Demello and C.Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control, IEEE Trans., Vol. PAS-88, April 1969, pp. 316-329

[5] User Manual, PSS/E Ver. 24, 1993 PTI

[6] K.Yoshimura, N.Uchida, "Countermeasures for Power System Stability Improvement (Part 4)- Double input signal PSS parameter optimization method -", Komae Research Laboratory Rep. NO. T96027

[7] William F.Tinney, Walter L.Powell, Notes on Newton-Raphson Method for Solution of AC Power

Flow Problem, BPA, Portland, Oregon April 1971

[8] EPRI Research Project 744-1, Frequency Domain Analysis of Low-Frequency Oscillation in Large Electric Power Systems, April 1982

[9] P. Kundur, Power System Stability and Control, 1994 McGraw-Hill, Inc

[10] EPRI, Small Signal Stability Analysis Program Package: Version 3.0, February 1993

[11] P.Kundur, D.C. Lee and H.M. Zein El-Din, "Power System Stabilizers for Thermal Units' Analytical Techniques and On-site Validation", IEEE Trans., Vol. PAS-100, Jan. 1981, pp. 81-85

[12] P.Kundur, M.Klein, G.J. Rogers, M.S. Zywno, "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans., PWR, Vol.4, No.2, May 1989

[13] M.Parniani, M.R.Iravani, "Computer Analysis of Small-Signal Stability of Power Systems Including Network dynamics", IEE Proc.-Gene. Transm. Distrib., Vol. 142, No. 6, pp. 613-617, November 1995

**Appendix A: EPRI 1기 무한모선**

**표 A.1** 동기기 정수값 Base =100 MVA

**Table A.1** Machine Parameters

정수	정수 값	정수	정수 값
$X_d$	1.75	$X_q$	0.24
$X_d'$	0.285	$T_{d0}'$	5.2
$X_d''$	0.24	$T_{d0}''$	0.011
$X_l$	0.14	$T_{q0}'$	1.96
$X_q$	1.68	$T_{q0}''$	0.053
$X_q'$	0.47	H (D)	3.0 (0.0)

**표 A.2** 여자기 모델 "IEEE1"의 정수값

**Table A.2** Excitation Model "IEEE1" Parameters

정수	정수 값	정수	정수 값
$K_A$	400	$K_E$	1.0
$T_A$	0.02	$S_1$	0.50
$V_{RMAX}$	7.3	$S_2$	0.82
$V_{RMIN}$	-7.3	$K_F$	0.03
$T_E$	0.8	$T_F$	1.0

**표 A.3** PSS 모델 "IEEEST"의 중요 정수값

**Table A.3** Key Parameters of PSS Model "IEEEST"

정수	정수 값	정수	정수 값
$K_S$	5	$T_2$	0.198
$T_w$	10.0	$T_3$	0.0198
$T_1$	0.0198	$T_4$	0.198



**Appendix B: Two-Area System**

**표 B.1** 동기기 정수 값, MBase =900 MVA

**Table B.1** Machine Parameters

정수	정수 값	정수	정수 값
$X_d$	1.89	$T_{do}$	0.030
$X'_d$	0.30	$T_{qo}'$	0.40
$X_d''$	0.25	$T_{qo}''$	0.050
$X_l$	0.20	H (G1/G2)	6.50
$X_q$	1.79	H (G3/G4)	6.175
$X_q'$	0.55	D	0.0
$X_q''$	0.25	S(1.0)	0.0
$T_{do}'$	8.0	S(1.2)	0.0

**표 B.2** 여자기 모델 "EXST1"의 중요 정수값

**Table B.2** Key Parameters of "EXST1"

정수	정수 값	정수	정수 값
$K_A$	200	$T_R$	0.01

**표 B.3** PSS 모델 "IEEEEST"의 중요 정수값

**Table B.3** Key Parameters of PSS Model "IEEEEST"

정수	정수 값	정수	정수 값
$K_s$	20	$T_2$	0.02
$T_w$	10.0	$T_3$	3.0
$T_1$	0.05	$T_4$	5.4

**저 자 소 개**

**김 동 준(金東俊)**

전기학회 논문지 제 49A 7권 참조  
 Tel : 055-280-1318, FAX : 055-280-1390  
 E-mail : djkim0419@keri.re.kr

**문 영 환(文英煥)**

전기학회 논문지 제 49A 7권 참조  
 Tel : 031-420-6130, FAX : 031-420-6139  
 E-mail : yhmoon@keri.re.kr

**허 진(許眞)**

전기학회 논문지 제 49A 9권 참조  
 Tel : 031-420-6133, FAX : 031-420-6139  
 E-mail : jinhur@keri.re.kr

**신 정 훈(申政勳)**

전기학회 논문지 제 50A 7권 참조  
 Tel : 042-865-5833, FAX : 042-865-5844  
 E-mail : jhshin@kepri.re.kr

**김 태 균(金泰均)**

전기학회 논문지 제 49A 7권 참조  
 Tel : 042-865-5831, FAX : 042-865-5844  
 E-mail : tkkim@kepri.re.kr

**추 진 부(秋鎭夫)**

전기학회 논문지 제 50A 7권 참조  
 Tel : 042-865-5830, FAX : 042-865-5844  
 E-mail : jbc@kepri.re.kr