

# 다중입력 PSS 튜닝 방법과 612 MVA 화력기 적용: Part 1 - IEEE PSS2A 튜닝 방법

논 문
58-4-1

## Tuning of Dual-input PSS and Its Application to 612 MVA Thermal Plant: Part 1- Tuning Methodology of IEEE Type PSS2A Model

김 동 준<sup>†</sup> · 문 영 환\* · 김 성 민\*\* · 김 진 이\*\*\* · 황 봉 환\*\*\* · 조 중 만\*\*\*  
(Dong-Joon Kim · Young-Hwan Moon · Sung-Min Kim · Jin-Yi Kim ·  
Bong-Hwan Hwang · Jong-Man Cho)

**Abstract** - This paper, Part 1, describes the effective dual-input PSS parameter design procedure for the IEEE Type PSS2A against the Dangjin 612 MVA thermal plant's EX2000 excitation system. The suggested tuning technique used the model-based PSS tuning method and consisted of three steps: 1) generation system modeling; 2) determination of PSS2A model parameters using linear, time-domain transient and 3-phase simultaneous analyses, and 3) field testing and verification, which are described in Part 2. The effective PSS2A model parameters of EX2000 system in the Dangjin T/P #4 were designed according to the suggested procedure, and verified by using three analyses.

**Key Words** : PSS2A Model, Parameter Tuning, Thermal Plant, Generation system modeling

### 1. 서 론

최근 세계적으로 전력계통에 광역정전 사고가 발생하였고 수십억 불의 직간접적 사회적 손실이 초래되었다. 이런 광역정전사고 방지를 위해서 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있으며 국내에서도 광역정전사고 방지를 위한 많은 연구가 심도 있게 진행되고 있다. 특히 국내 발전회사와 전력거래소도 별도로 대형 정전사고를 방지하기 위한 한 방안으로서 500 MW 이상 발전시스템의 미튜닝된 계통안정화장치(Power System Stabilizer, 이하 PSS)를 건전성 시험을 통하여 정상화하고 있다. 500 MW급 이상 국내 대형화력 발전소에서 사용되고 있는 대표적인 PSS는 IEEE에서 제안하는 디지털 PSS2A 모델이다[1,2]. IEEE PSS2A 모델은 2개 입력신호(주파수, 전력)를 사용하여 전력동요를 제동하며 성능이 우수하다. 주파수(frequency)를 입력으로 하는 PSS 기능은 1.0 Hz 미만의 광역모드(global mode)에서 전력진동을 제공하고, 발전기 출력(power)을 입력으로 하는 PSS 기능은 1.0 Hz 이상의 지역모드(local mode)를 제동하기 때문에 IEEE PSS2A 모델은 폭 넓은 주파수 영역에서 댐핑 토크를 제공한다.

기존의 PSS 튜닝 방법은 속도(speed)를 입력으로 하는 아날로그형 단일입력 PSS를 튜닝방법이며, 5 Hz 이하의 진동을 해석하는 선형해석을 통한 이득결과와 위상보상 시정

수 결정, 그리고 PSS/E와 같은 과도안정도 프로그램을 이용하여 검증한다[3-10]. 따라서 기존의 튜닝방법의 문제점은 먼저 PSS H/W에 포함되어 있는 두꺼운 축진동 제거 필터가 PSS 위상보상 시정수에 의해서 보상된 위상을 왜곡할 가능성이 있는데[11], 이 필터에 대한 악영향을 검토하지 않고 튜닝하는 데 있다. 또 다른 문제는 기존 튜닝방법은 디지털 여자시스템에 사용되는 IEEE PSS2A 모델 파라미터를 튜닝할 때 효과적이지 않는 데 있다. IEEE PSS2A 모델은 가속력(acceleration power)을 모의하도록 2개의 입력신호, 주파수와 출력을 입력하지만, 발전기 기계적 출력( $P_{mech}$ )이 급격하게 변동하는 경우 발전기 전압을 스윙하는 현상을 유발하기 때문에 이점을 고려해서 튜닝해야 하고, 또한 PSS2A 모델은 보통 디지털 자동전압조정장치(이하, AVR)과 같이 동작하기 때문에 PSS2A 모델과 디지털 AVR 특성을 고려해서 파라미터를 튜닝해야 한다. 마지막으로, 기존 PSS 이득튜닝 방법은 여자기 모드(exciter mode)의 불안정 최대이득에 대한 이득여유(gain margin)가 6 dB, 10 dB를 제안하고 있지만[3,4], 다중입력을 사용하는 IEEE PSS2A 모델은 보통 PSS이득이 크게 하더라도 여자기 모드가 불안정하지 않는다. 따라서 이득여유가 10 dB 이상이 되고 최대 20 dB까지 이득여유를 제공한다. 이런 이유로 PSS2A 이득결정은 기존의 여자기 모드만 고려해서 결정하는 방법대신 지역모드(local mode), 광역모드(global mode), 축진동 모드(torsional mode) 등의 제동특성을 고려해서 결정하는 현장 이득튜닝 방법이 필요하다.

본 논문은 612 MVA급 당진화력 4호기 대형 화력시스템 EX2000 여자시스템을 대상으로 다중입력 디지털 PSS모델인 PSS2A 모델에 대해서 효과적인 파라미터를 튜닝 방법과 현장시험 및 검증방법을 기술한다. 제안된 PSS2A 모델 파라미터를 튜닝 하는 방법은 위상보상 시정수를 결정하기 위

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 한국전기연구원 선임연구원

E-mail : djkim0419@keri.re.kr

\* 시니어회원 : 한국전기연구원 책임연구원

\*\* 정 회원 : 한국동서발전(주)

\*\*\* 정 회원 : 한국전력거래소

접수일자 : 2008년 10월 24일

최종완료 : 2009년 2월 23일

한 선형해석, 결정된 파라미터를 검증하기 위한 PSS/E를 이용한 안정도 해석, 그리고 축진동을 포함한 3상 순시치 프로그램 해석 등의 3가지 해석을 이용한다. 본 논문은 2편으로 구성되어 있으며 본 Part 1 논문에서는 PSS2A 모델의 파라미터를 결정하는 방법에 대해서 기술하고, Part 2에서는 실제 PSS2A 모델을 갖는 대형 화력기를 대상으로 현장 PSS 튜닝시험, 측정데이터 이산후리에변환(DFT) 스펙트럼 분석, 그리고 사용된 발전시스템 모델 검증에 대해서 다룬다.

2. 다중입력 PSS 튜닝방법 및 정수설계

2.1 다중입력 PSS 튜닝 방법

2.1.1 다중입력 PSS 튜닝 절차

본 논문에서 제안하는 다중입력 PSS 튜닝방법은 그림 1 과 같은 모델링을 기본으로 하는 튜닝방법이다[8]. 단계 1에서는 검증된 모델정수를 이용하여 발전시스템을 모델링 한다. 검증된 모델정수는 발전기/제어계 특성시험을 통하여 얻을 수 있다. 만약 현장 PSS를 튜닝 하고자 하는 발전시스템에 검증된 모델 데이터가 없다면 간단한 현장 특성시험을 통하여 최소한 발전기 계자시정수( $T_{d0}'$ ), 관성정수(H), 그리고 여자기 과도이득(transient gain)등을 도출하여 사용할 수 있다.

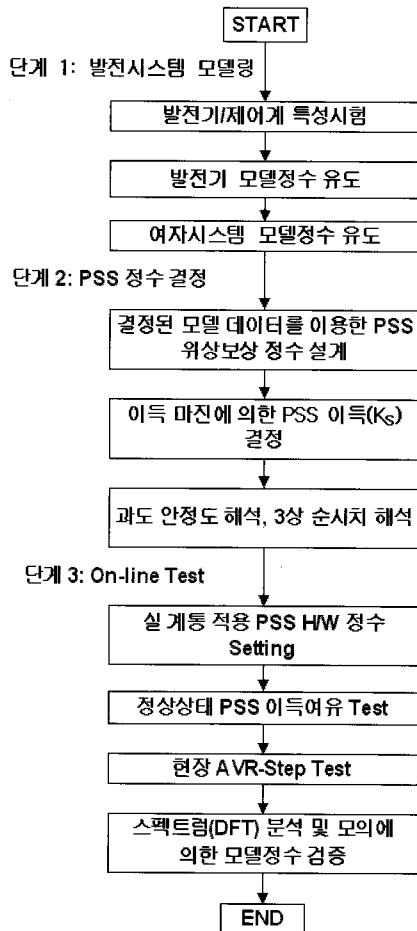


그림 1 IEEE PSS2A 파라미터 튜닝 절차  
Fig. 1 IEEE PSS2A Parameter Tuning Procedure

단계 2에서는 결정된 모델정수를 이용하여 선형해석, 비선형 과도안정도 시간영역 해석[15], 그리고 EMTDC/PSCAD[16]를 이용하여 축진동 해석 등을 수행한다. 선형해석을 통해서 위상보상 시정수를 설계하고 PSS 이득증가에 따른 고유치 제적을 구하며, 최적 PSS 이득정수를 잠정적으로 설정한다. 비선형 과도안정도 해석에서는 PSS/E와 같은 과도안정도 프로그램을 이용하여 AVR 스텝시험, 송전선로 임피던스가 증가할 때 댐핑효과, 3상 단락사고 분석 등을 수행한다. 이와 같이 모의함으로써 설계된 PSS 정수의 강건성을 시뮬레이션 상에서 검증할 수 있다. 그리고 3상 순시치 프로그램인 EMTDC/PSCAD를 이용해서는 설계된 축진동 notch 필터(또는 band rejection filter)의 파라미터를 확인하고, 다중 축진동 모델과 축진동 필터를 포함하여 전체적으로 성능을 재검증한다.

이렇게 설계된 모델정수는 단계 3에서 현장시험을 통해서 검증하게 된다. 현장시험에서는 설계된 정수가 제대로 동작되는지 2~4 % AVR 스텝시험을 통해서 확인한다. 현장 PSS 튜닝시험에서 측정된 데이터는 DFT 스펙트럼 분석을 통해서 PSS 성능을 확인하고, 안정도 시간영역 모의를 통해서 사용된 발전시스템 모델정수를 검증하는데 사용된다.

2.1.2 EX2000 여자시스템 모델링

본 논문에서 튜닝 대상으로 하는 당진화력 4호기 EX2000 여자시스템의 PSS2A 파라미터를 튜닝하기 위해서는 정확하고 검증된 데이터를 이용하여 발전기, 여자시스템, 그리고 PSS를 모델링해야 한다. 미국 GE사의 EX2000 여자시스템은 PSS/E 프로그램 ESST4B로 모델링 된다. 그림 2의 ESST4B 모델은 앞단에 있는 자동모드(AVR)용 P-I 제어기, 뒤 단에 있는 수동모드(MVR)용 PI 제어기, 그리고 여자기 변압기 모델로 구성된다. 정상적인 AVR 모드 운전상태에서는 MVR 모드 P-I 제어기는 사용되지 않는다.

모든 P-I 제어기는 non-winding 제한치를 갖는다. 이것은 기존의 아날로그 여자시스템 모델에서 가지고 있는 winding 제한장치와 다른 점이다. EX2000 여자시스템 AVR 모드의 P-I 제어정수는 AVR 과도이득이 약 20 PU정도 갖도록 P-I 정수치가 튜닝된다[3]. 당진화력 4호기의 동기기 모델 데이터는 동일사양의 보령화력 6호기 발전기 모델 데이터를 사용한다. 보령화력 6호기 동기기 모델정수는 발전기/제어계 특성시험을 통하여 도출하고 검증한 값이다. 실제 당진화력 4호기의 현장 PSS 튜닝시험에서 측정된 데이터는 시험 후 모델결과와 잘 일치하였다. 최적 PSS 모델정수를 도출하기 위해서 여자시스템 모델정수는 제작사에서 제공한 값을 사용하였다. 본 논문에서 사용한 발전시스템 모델데이터는 부록과 같다.

EX2000 여자시스템 PSS는 그림 3과 같은 PSS2A 모델 블록도를 갖고 발전기의 PT와 CT에서 측정된 발전기 출력(P)과 주파수(f)를 입력으로 한다. 입력에 사용되는 주파수는 발전기 과도 임피던스( $X_q'$ ) 배후 전압의 주파수이다[1]. 입력신호에 대한 블록은 내부적으로 고정되어 있어 사용자가 변경할 수 없고, Washout 시정수  $T_w$ 는 하나의 값만 입력하면 모든  $T_w$ 는 동일하게 적용된다. 마찬가지로 ramp tracking 필터의 차수도  $M=5$ 이고  $N=1$ 로 고정되어 있고, 시정수도  $T_9=0.1$ ,  $T_8=0.5$ 로 고정되어 있다.

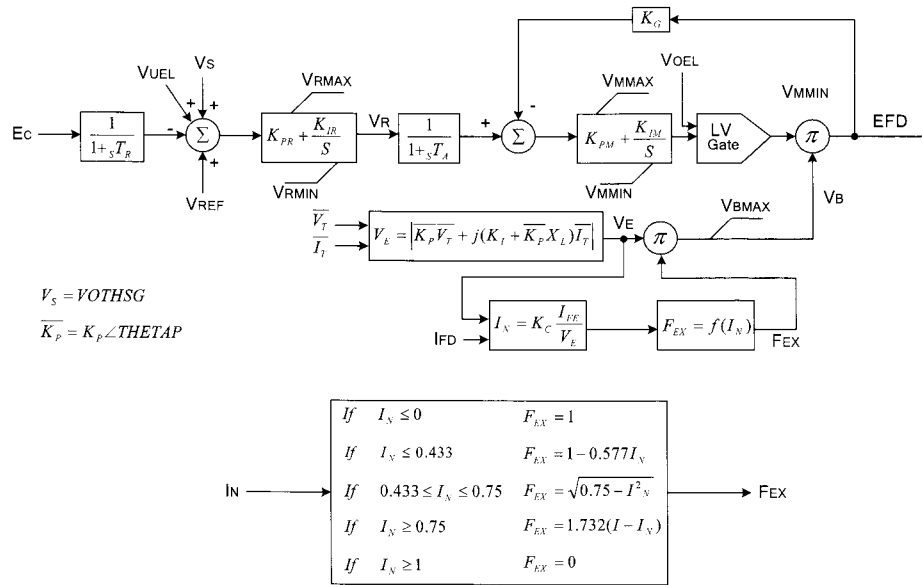


그림 2 ST4B 여자시스템  
Fig. 2 ST4B Excitation System

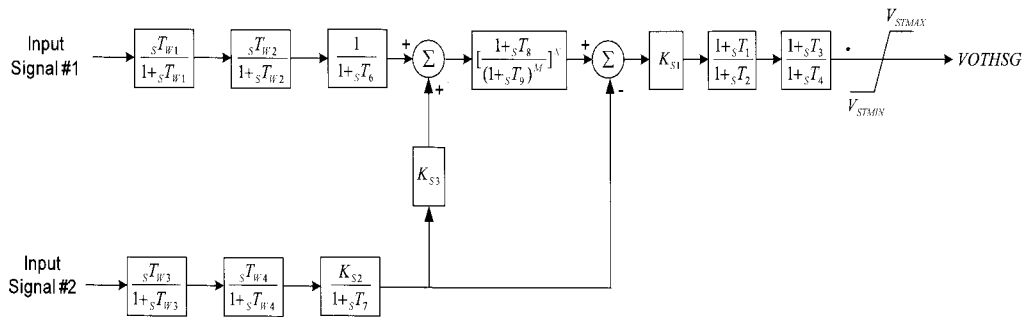


그림 3 IEEE PSS2A 모델  
Fig. 3 IEEE PSS2A Model

특히 EX2000 여자시스템은 그림 3과 같은 PSS2A 모델 블록에 2단 축진동 제거 notch가 끝부분에 더 추가되어 있다. 부록 데이터는 당진화력 4호기의 EX2000 여자시스템 PSS에 들어가는 최적 파라미터를 보여준다. 당진화력 4호기의 가장 댐핑이 안 되는 제1 축진동 모드는 16.3 Hz이다. 이 모드를 제거하기 위해서 2개의 notch 필터가 사용된다. 첫 번째 notch 필터는 고유주파수가 15.8 Hz를 갖도록 설계하였고, 두 번째 필터는 16.83 Hz를 갖도록 하였다. 이렇게 함으로써 PSS가 16.3 Hz의 축진동 모드에서 가장 낮은 이득 값을 갖는다. 정상상태에서는 이 축진동 모드는 중요하지 않으나 3상 단락사고 같은 큰 사고가 발생하면 이 축진동 모드가 활성화 되어 시스템에 악영향을 줄 수 있다.

### 2.2 최적 PSS 모델정수 설계

발전시스템의 모델링이 되면 최적 PSS 모델정수는 선형 해석, 시간영역 과도안정도 해석, 그리고 3상 순시치 모의를 통해서 결정한다. 선형해석에서는 위상보상 해석과 고유치 해석을 통해서 위상보상 시정수와 최적 이득을 도출한다.

과도안정도 시간영역 해석에서는 PSS/E와 같은 안정도 프로그램을 이용하여 3 % AVR 스텝시험 모의, 3상 단락사고 모의, 송전선로 임피던스 증가, washout 시정수( $T_w$ ) 효과 분석, PSS 제한치(limiter) 정수 영향 등을 모의하여 PSS 정수를 도출하고 검증한다. 마지막으로 3상 순시치 프로그램인 EMTDC/PSCAD를 이용하여 축 시스템과 notch 필터를 모델링하고 시간영역 모의하여 설계된 PSS 파라미터가 축진동에 영향이 없는지 그리고 PSS/E 결과와 같은 결과가 나오는지 확인한다.

#### 2.2.1 선형해석

선형해석에서는 당진화력 4호기 출력이 500 MW, 송전선로 임피던스가 20 %에서, PSS에 의해서 보상된 발전기(G)-여자기(E)-계통(P) (이하, GEP) 위상이 부족보상으로 되었는데 이를 확인한다. GEP 함수의 위상보상에 사용된 프로그램은 PWRSTAB 프로그램이다[7]. PSS 위상보상 시정수는 제작사에서 제공된 값을 초기 값으로 사용하였다. 그림 4는 출력 500 MW에서 주파수 입력형(frequency-input) PSS<sub>f</sub> 위

상보상 시정수에 의해서 보상된 GEP 함수의 주파수 응답특성을 보여준다. 배후 단자전압의 주파수 입력으로 하는 PSS 주파수 응답특성은 발전기 속도(speed) 입력 특성과 같다. PSS2A 모델은 가속력(acceleration power)을 이용한 PSS로 제안되었지만 실제 주파수 입력형 PSS<sub>r</sub>와 발전기 출력(power-input)형 PSS<sub>p</sub>를 합쳐 놓은 것과 같다[8].

주파수 입력형 PSS<sub>r</sub>는 약 1.0 Hz 이하 영역에서 주로 댐핑을 제공하고, 발전기 출력형 PSS<sub>p</sub>는 1.0 Hz 이상에서 댐핑을 주로 제공한다. 그림 4는 주파수 입력형 PSS<sub>r</sub> 응답특성으로서 1.0 Hz이하에서는 부족 보상되어 있다. 발전기 출력형 PSS<sub>p</sub>는 발전기 속도에 비해서 위상이 -90도 뒤져있다. 따라서 그림 4에서 1.0 Hz 이상에서는 발전기 출력형 PSS<sub>p</sub>가 동작되며 1.0 Hz 이상에서는 위상보상이 부족보상으로 되어 있다. 0.8~1.0 Hz 사이에서는 주파수 입력형 PSS<sub>r</sub>와 발전기 출력 입력형 PSS<sub>p</sub>가 같이 동작되는 부분이며 발전기 출력 입력형 PSS<sub>p</sub>에 대해서는 약간의 과보상이 되었다. 그러나 이 주파수 범위에서는 두 입력형 PSS의 유효이득이 적은 부분이라서 동기화 토크에 큰 영향을 주지 못한다. 최종 결정된 PSS 파라미터는 위상보상 시정수 4개이다.

그림 5와 같은 고유치 해석에서는 PSS 이득을 증가시켜 고유치 제적으로부터 PSS 이득정수를 잠정 결정한다. 그림 5는 이득증가에 따른 지역모드와 제어모드를 보여주고 있다. PSS 이득이 증가할수록 지역모드의 댐핑율은 증가하나 제어모드는 불안정 영역인 오른쪽으로 이동한다. PSS이득을 45 PU 까지 증가하더라도 여자기 모드에 대한 미소신호 불안정은 발생하지 않는다. PSS 이득은 지역모드의 댐핑율이 최대를 하는 이득 37 PU의 절 반 정도인 15 PU로 잠정 결정한다. 본 논문에서 PSS2A 모델 최종이득은 지역모드 댐핑을 가장 크게 하는 최대이득의 절 반값으로 하였으나, 실제 단자전압 동요(hunting) 문제, 광역모드 또는 축진동 모드 등의 문제가 생길 수 있는 최대이득에 대해서 약 6 dB 이상의 이득여유가 제공되도록 결정되며 현장 PSS 튜닝시험을 통해서 결정된다.

2.2.2 시간영역 과도안정도 해석

가. On-line 3% AVR 스텝시험 모의

선형해석에서 결정한 PSS 위상보상 시정수는 PSS/E 프로그램에 이용하여 1기 무한계통으로 계통을 모델링 하고 다양한 운전조건에서도 강건하게 동작하는지 검증한다. 그림 6은 송전선로 임피던스가 20 %이고, 발전기 출력이 500 MW에서 PSS 이득을 증가시켜 가면서 3 % AVR 스텝시험을 모의한 것을 보여주는데 이득이 증가할수록 전력동요 댐핑율이 증가한다. 즉 이것은 위상보상이 적절히 되어 있음을 의미한다. 그러나 이득이 15 PU 이상에서는 PSS 이득증가에 따른 댐핑을 증가는 그다지 크지 않다. 이러한 결과는 선형해석 결과와 잘 일치한다.

송전선로 임피던스가 발전기 용량의 40 %, 60 %일 때도 3 % AVR 스텝시험 모의에서 전력동요 댐핑 효과가 우수하였다. 이 시간영역 3 % AVR 스텝시험 모의결과는 생략한다. 이득여유를 고려할 때 설계상 최적 이득은 K<sub>s</sub>=15 PU가 적당한 값으로 결정할 수 있고 최종 이득결정은 현장 튜닝 시험에서 결정한다.

나. PSS 출력 상하한 제한치(Limiter) 검토

PSS2A 모델 출력 상하한 제한정수(V<sub>STMAX</sub>, V<sub>STMIN</sub>)의 영향을 검토하기 위해서 무한모선에 단순 3상 단락사고를 발생하고 제거하는 모의를 수행하였다. 이때 발전기 위상각이 발산하는 고장제거시간(CCT)은 216 msec였으며, PSS가 있는 경우나 PSS가 없는 경우나 CCT는 같았다. 이것은 결정된 위상보상 시정수가 과도안정도에 영향을 주는 동기화 토크를 훼손하지 않음을 의미한다. PSS 출력 상하한 제한치 특성을 비교하기 위해서 제한치를 ±10 %로 하는 경우와 ±5 %로 하는 경우를 비교하였다.

그림 7-(a)은 발전기 출력(P<sub>o</sub>)을 비교한 것이다. 초기 부분에는 거의 차이가 없고 댐핑이 크게 줄어드는 마지막 부분에서 약간의 차이를 보여준다. 그림 7-(b)은 PSS 출력(PSS<sub>out</sub>)을 비교한 것이다. 제한치가 ±10 %인 경우와 ±5 %인 경우를 보여주는데 초기 부분에 PSS 출력이 모두 제한값을 갖는다. 이러한 결과는 그림 2의 ST4B 모델 AVR 내부에 있는 상하한 non-winding limiter(V<sub>rmax</sub>, V<sub>rmin</sub>)와 관련이 있다. 이 제한치에 설정된 제작사 값은 V<sub>rmax</sub> = 1.0과 V<sub>rmin</sub> = -0.87이다. 이것은 PSS 출력이 아무리 큰 값을 AVR에 주더라도 non-winding AVR 상하한 제한치에 의해서 AVR 최대치와 최소치에 도달하면 상태변수가 초기화되기 때문이다.

따라서 PSS<sub>out</sub> 출력 제한치를 ±10 %로 높게 설정하는 것보다 ±5 %로 설정하는 것이 보수적인 관점에서 좋다. 만약 ±10 %로 설정할 경우 혹 전압 동요에 의해서 발전기 단자전압이 과여자제한장치(이하, OEL)이나 저여자제한장치(이하, UEL) 등의 보호장치를 동작시킬 수 있다. 그러나 PSS<sub>out</sub> 출력 제한을 ±5 %로 설정하는 경우는 혹 AVR 제어기에 다른 문제가 생기더라도 다른 보호장치를 동작시킬 가능성이 적다.

다. Washout 시정수 영향 분석

Washout 시정수의 영향을 검토하기 위해서 제작사에서 제공한 T<sub>w</sub> = 10 초와 최근 디지털 PSS에 주로 사용되고 있는 T<sub>w</sub> = 2.0 초에 대해서 비교하였다. 그림 8은 PSS 이득 K<sub>s</sub> = 15 PU인 경우 3 % 온라인 AVR 스텝시험을 모의하여 발전기 출력을 비교한 것이다. 두 결과가 큰 차이가 없다. 그러나 washout 시정수가 큰 경우 낮은 주파수 영역에서 이득이 크게 되기 때문에 비관심 모드를 활성화할 수 있다. 예로 PSS2A 모델에서 washout 시정수를 크게 두는 경우 발전기 단자전압 장주기 스윙문제가 있다고 보고된다[1].

북미처럼 지역간 동요가 0.5 Hz 이하에서 존재한다면 T<sub>w</sub>를 큰 값인 10초로 두어야겠지만[6] 국내에서와 같이 지역간 동요가 0.6~0.7 Hz에서 존재하는 경우에는 굳이 크게 들 필요가 없다. washout 시정수를 2초로 두는 경우, PSS는 국내 지역간 동요모드인 광역모드에 대해서도 충분히 댐핑이 제공될 수 있는 주파수 범위를 포함한다. 국내 광역모드에 대한 자세한 기술은 Part 2의 현장 튜닝시험 결과분석에서 기술한다. 또한 여러 개의 notch 필터를 사용할 경우 이 시정수를 크게 두는 경우 보상된 위상보상이 왜곡될 수 있다[14]. 따라서 washout 시정수를 T<sub>w</sub> = 2.0초로 설정하는 것이 바람직하다.

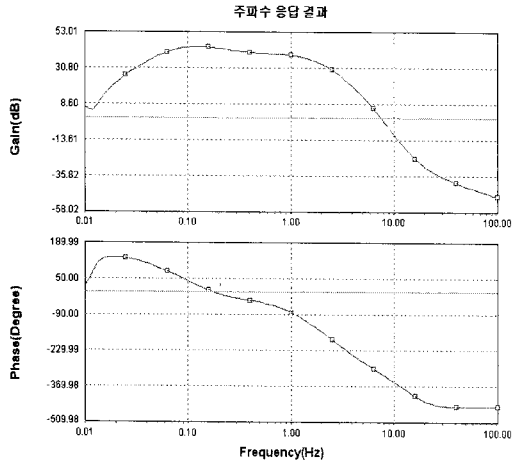


그림 4 부하시 주파수 입력형 PSS의 GEP 전달함수 주파수 응답특성 ( $P_e/\omega$ )

Fig. 4 Frequency Response of frequency-input PSS<sub>i</sub> at a loading condition

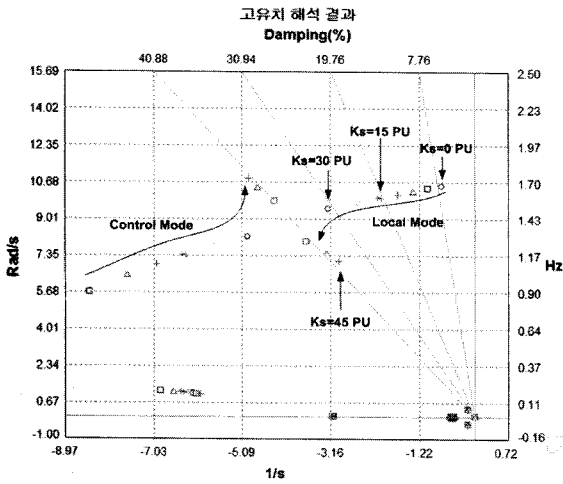


그림 5 PSS 이득증가에 따른 고유치 궤적  
Fig. 5 Eigenvalue trace according to the PSS Gain

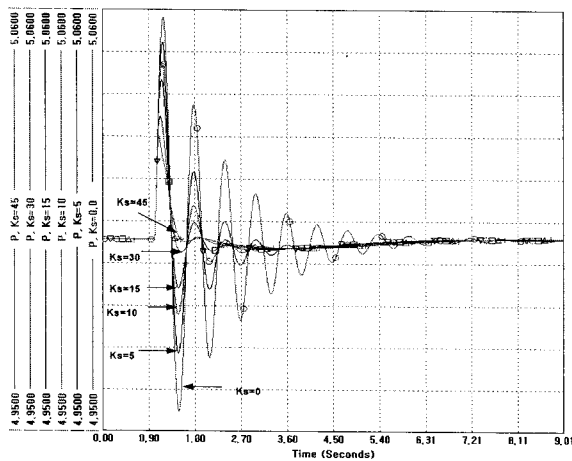
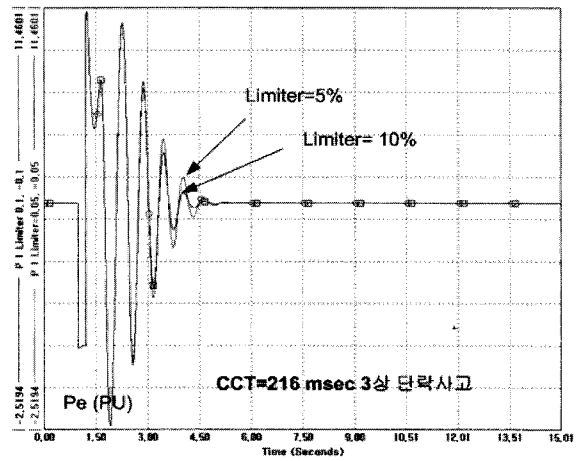
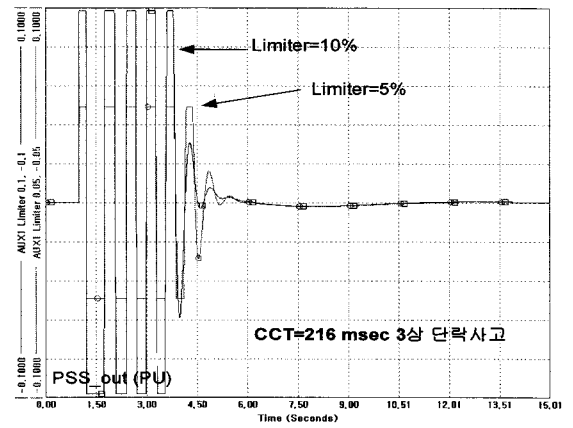


그림 6 3% 온라인 AVR 스텝시험 모의인 경우 발전기 출력( $P_e$ ) 비교 (500 MW, 20% 임피던스)  
Fig. 6 Simulation of 3% AVR Step Test



(a) Comparison of electric power ( $P_e$ )



(b) Comparison of the output of PSS ( $PSS_{out}$ )

그림 7 3상 단락사고인 경우 발전기 출력( $P_e$ ), PSSout 출력 모의결과 비교 (Limiter=10%, 5%)

Fig. 7 Comparison of electric power and the output of PSS at three phase fault

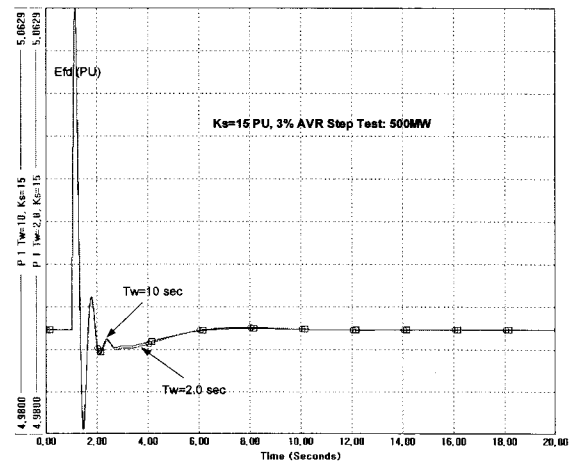


그림 8  $K_s=15$  PU, 3% AVR 스텝 모의인 경우 발전기 출력 ( $P_e$ ) 비교 ( $T_w=10$  sec,  $T_w=2$  sec)

Fig. 8 Comparison of electric power with different  $T_w$  in 3% AVR Step Simulation

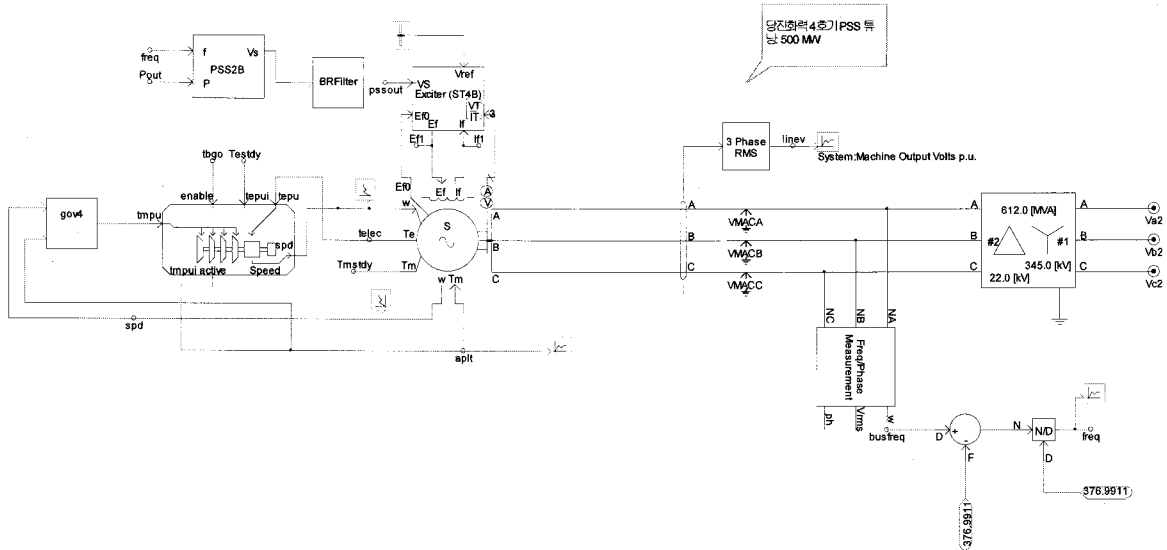


그림 9 EMTDC/PSCAD 모델링 (당진화력 4호기)  
 Fig. 9 EMTDC/PSCAD Modeling (Dangjin T/P #4)

### 2.2.3 EMTDC/PSCAD를 이용한 축진동 해석

축진동 제거 필터와 PSS가 타 모드에 영향이 없는지 3상 순시치 프로그램인 EMTDC/PSCAD를 이용해서 5차의 축진동 모드와 PSS의 band rejection 필터인 2개의 notch 필터를 모델링하여 확인하였다. 설계된 축진동 필터 파라미터는 가장 지배적인 제1 축진동 모드를 제거하도록 설계된다. 당진화력 4호기 축진동 모델 데이터는 IEEE SSR 1st Benchmark 모델 데이터를 다소 조정하여 제1 축진동 모드가 나타나도록 모델링하였다[12]. EX2000 여자시스템에서 사용하고 있는 식 (1)과 같은 notch 필터는 당진화력 4호기 제1 축진동 모드인 16.3 Hz를 감쇄시키기 위해서 2개가 사용된다. 식 (2)의 필터 고유주파수는 각각 15.86 Hz와 16.863 Hz로 결정하였다. 가장 불안정한 제1 축진동 모드, 16.3 Hz는 동일 사양을 갖는 보령화력 6호기 발전기 특성시험 측정 결과를 분석하여 나온 결과이다. 댐핑 factor는 식 (3)과 같다. 두 필터의 합성 효과는 16.3 Hz에서 최소의 이득을 갖도록 동작 된다. EX2000 여자시스템의 PSS2A 모델에서는 입력신호가 모두 전기적인 신호이기 때문에 발전기 속도를 입력으로 하는 아날로그 PSS와 같이 5개까지의 notch 필터는 사용하지 않는다[14].

$$\frac{\omega^2 + 2\zeta_N \omega_n s + s^2}{\omega^2 + 2\zeta_D \omega_n s + s^2} \quad (1)$$

$$\omega_n = 2\pi(f_i \pm 0.5) \quad (2)$$

$$\zeta_D = 0.25 \quad \zeta_N = 0.05 \quad (3)$$

그림 9는 축진동 모델과 PSS의 notch 필터 모델이 포함된 3상 순시치 EMTDC/PSCAD 모델을 보여준다. 15 Hz 이상의 축진동 모드 해석은 PSS/E와 같은 안정도 해석용 프로그램에서는 해석 할 수 없다. 사용된 발전기 모델정수와 여자시스템 모델정수는 부록과 같고 PSS 이득은 15 PU로 하였다. 운전조건은 500 MW이고 송전선로 임피던스는 20 %이다.

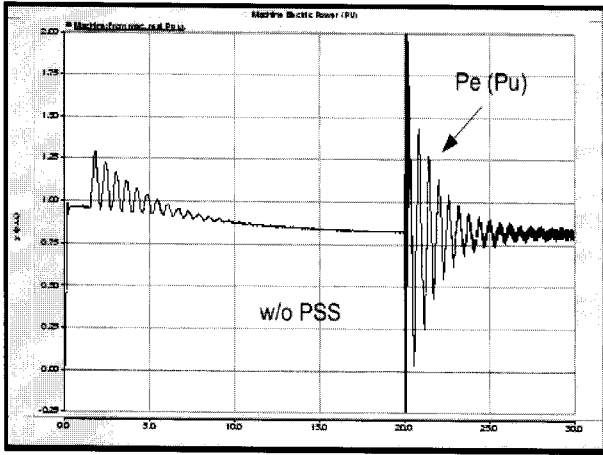
### 가. 3상 단락사고 모의

EMTDC/PSCAD로 1기 무한모션으로 모델링된 당진화력 4호기는 무한모션에 단순 6 사이클 단락사고를 발생하여 사고만 제거하는 단순 상정사고를 모의하였다. 이와 같이 큰 계통사고를 발생시켜 축진동 모드를 좀 더 크게 활성화 할 수 있다. 그림 10-(a)은 PSS가 없는 경우의 응답 특성이고, 그림 10-(b)은 PSS가 있는 경우의 응답 특성이다. PSS가 있는 경우가 발전기 출력( $P_e$ ) 동요를 효과적으로 제동하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 앞의 과도안정도 시간영역 해석 결과와 잘 일치한다. 이것은 2개의 축진동 필터가 PSS 위상보상에 영향을 주지 않음을 보여준다.

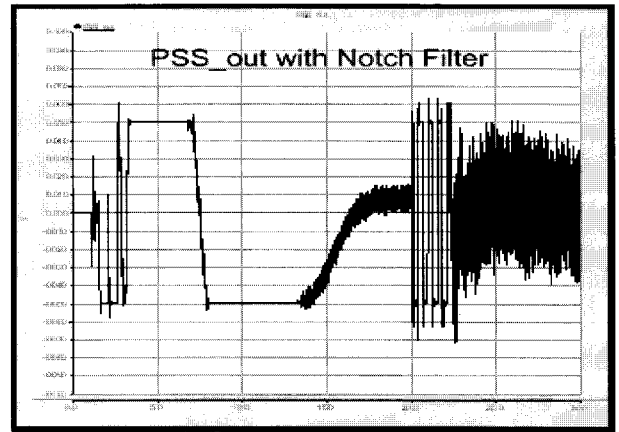
3상 단락사고인 경우 PSS2A에 notch 필터가 있는 경우와 없는 경우의  $PSS_{out}$  출력파형을 비교하면 그림 11과 같다. 그림 11-(a)은 notch 필터가 없는 경우이고, 그림 11-(b)은 이 필터가 있는 경우로서 축진동 노이즈를 감소시키고 있다.

### 나. PSS 출력 상하한 제한치 특성 비교

발전기 기계적 출력( $P_{mech}$ )을 100 % MW에서 80 % MW 정도로 갑자기 변동하는 경우 PSS2A 모델은 단자전압 동요가 발생할 수 있다. 이와 같은 이유로 PSS 출력 상하한 제한치를  $\pm 10\%$ 와  $\pm 5\%$ 를 사용하여 단자전압 동요를 모의하였다. 출력 상하한 제한치를  $\pm 10\%$ 로 하는 경우 그림 12처럼 발전기 단자전압이 1.17 PU까지 상승하였다. 반면 PSS 출력 상하한 제한치를  $\pm 5\%$ 로 설정하는 경우는 그림 13과 같이 1.07 PU까지만 상승하였다. 대형 화력기에서 발전기 출력이 몇 십초 만에 출력이 10~20 % 까지 갑자기 감발되지 않으나 3상 단락사고와 같은 큰 계통에 사고가 발생시 전력동요 댐핑효과가  $\pm 10\%$  제한치나  $\pm 5\%$  제한치나 크게 차이가 나지 않는다면, PSS 출력 상하한 제한치를  $\pm 5\%$ 로 설정하는 것이 보수적인 관점에서는 좋다.

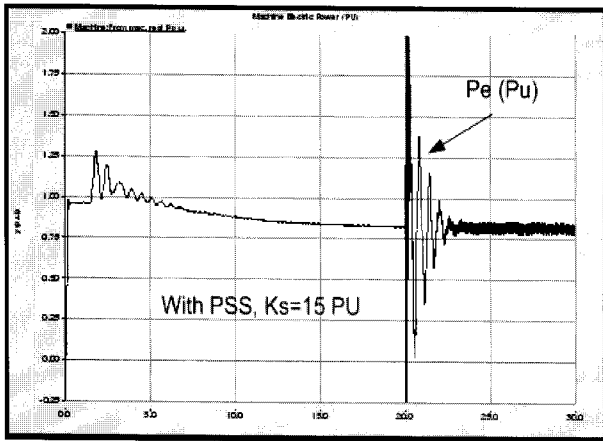


(a) PSS 없는 경우 (without PSS)



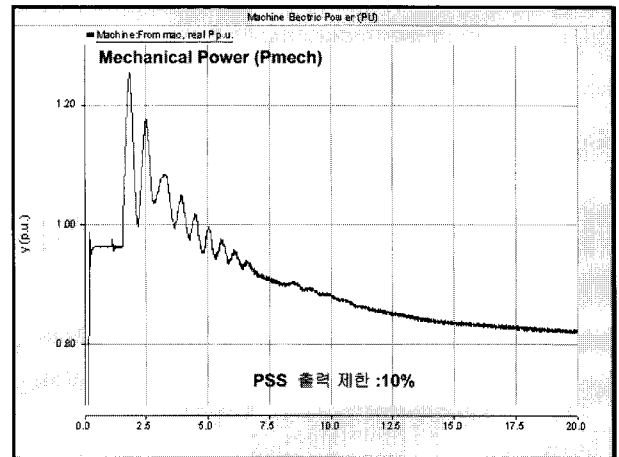
(b) Notch 필터가 있는 경우 (with notch filter)

그림 11 Notch 필터 유무에 따른 PSS 출력(PSS<sub>out</sub>) 비교  
Fig. 11 Comparison of the output of PSS w/o and with notch filter

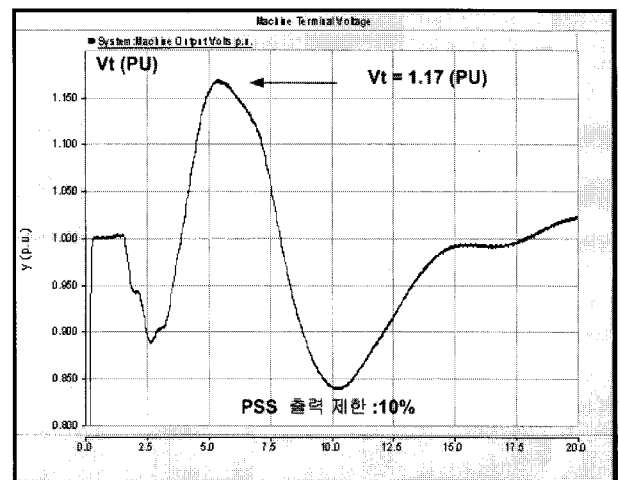


(b) PSS가 있는 경우 (with PSS)

그림 10 발전기 출력(P<sub>e</sub>) 응답비교 (6 사이클 3상 단락사고)  
Fig. 10 Comparison of electric power (6 cycle fault)



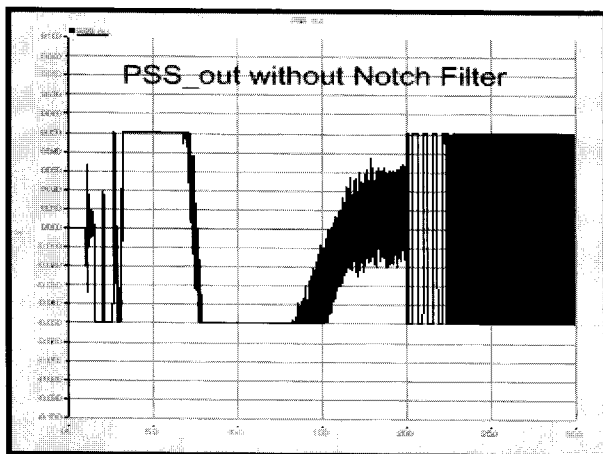
(a) Mechanical torque change



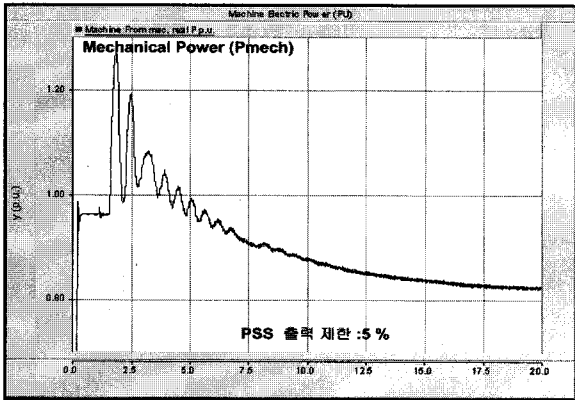
(b) Oscillation of terminal voltage

그림 12 발전기 기계적 출력(P<sub>mech</sub>)단시간 변동시 단자전압 (V<sub>t</sub>) 동요 (PSS<sub>out</sub> Limiter: ±10%)

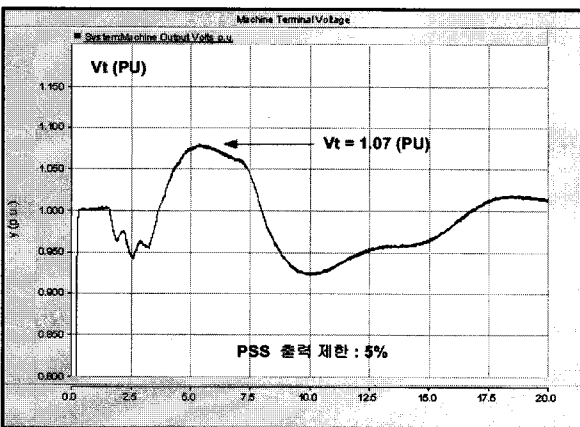
Fig. 12 Oscillation of terminal voltage at the change of P<sub>mech</sub> (PSS<sub>out</sub> Limiter: ±10%)



(a) Notch 필터가 없는 경우 (w/o notch filter)



(a) Mechanical torque change



(b) Oscillation of terminal voltage

그림 13 발전기 기계적 출력( $P_{mech}$ )단시간 변동시 단자전압 ( $V_t$ ) 동요 (PSS<sub>out</sub> Limiter:  $\pm 5\%$ )

Fig. 13 Oscillation of terminal voltage at the change of  $P_{mech}$  (PSS<sub>out</sub> Limiter:  $\pm 5\%$ )

### 3. 결 론

본 논문은 총 2개의 논문으로 이루어져 있고, 본 Part 1 논문에서는 디지털 다중입력 PSS 모델의 파라미터를 효과적으로 튜닝하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 당진화력 4호기 EX2000 여자시스템의 IEEE Type PSS2A를 대상으로 파라미터를 결정하고 모의 검증하는데 적용하였다. 본 논문에서 도출한 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 다중입력 IEEE PSS2A 모델 파라미터를 효과적으로 튜닝하기 위한 제안된 방법은 모델기반 튜닝방법으로서 먼저 검증된 데이터를 이용하여 발전시스템을 모델링하고, 다음으로 위상보상 시정수와 PSS 이득을 결정하기 위한 선형 해석, 선형해석에서 결정된 PSS 파라미터를 검증하기 위한 과도안정도 해석, 그리고 축시스템 및 축진동 필터를 포함한 3상 순시치 해석, 그리고 마지막은 현장 튜닝시험 및 성능검증 단계로 이루어진다.

2. 다중입력 PSS가 대형 화력기의 축진동에 미치는 영향을 분석하기 위해서 3상 순시치 프로그램을 이용하여 notch 필터의 영향을 분석하는 것이 필요하다. notch 필터가 두꺼

운 경우 위상보상 시정수에 영향을 줄 수 있다. 튜닝 대상인 당진화력 4호기의 PSS2A 모델의 notch 필터 파라미터는 3상 순시치 프로그램을 이용하여 PSS 위상보상 시정수에 영향을 주지 않고 제1 축진동 모드를 효과적으로 제거하는 것을 확인하였다.

3. PSS2A 모델이 여자기 모델인 ST4B 모델에서 사용될 경우 PSS<sub>out</sub> 제한치는 5 %로 결정하는 것이 적절하다. EX2000 여자시스템 디지털 AVR은 P-I 제어기에 non-winding 제한장치가 붙어있다. 이 제한장치는 큰 PSS 출력이 AVR에 입력되더라도 계자전압으로 나가는 출력을 제한하고 AVR의 상태변수를 초기화 한다. 이러한 이유로 상한한 제한치를 10 %로 두더라도 5 %에 비해서 효과가 크지 않았다. 또한 3상 순시치 해석에서 발전기 기계적 출력( $P_{mech}$ )이 갑자기 변동하는 경우 PSS<sub>out</sub> 제한치를 높게 둘 때 발전기 전압동요 폭이 커져 OEL, UEL를 동작시킬 가능성이 있다.

4. PSS2A 이득 결정은 선형해석에서 지역모드 뎀핑율을 최대로 하는 이득의 1/2로 결정하였다. 그러나 최종 PSS 이득결정은 현장 PSS 튜닝시험에서 지역모드, 광역모드, 축진동 모드, 그리고 단자전압 동요 등을 고려해서 재결정하는 것이 필요하다.

Part 2에서는 본 Part 1에서 도출된 당진화력 4호기 PSS2A 모델 파라미터를 이용하여 현장 PSS 튜닝시험 수행 및 결과 분석, 측정데이터를 이용한 이산후리에변환(DFT) 스펙트럼 분석, 그리고 측정된 온라인 AVR 스텝시험 결과를 모의 재현하여 발전시스템 모델정수 검증 등을 기술한다.

### 참 고 문 헌

- [1] A. Murdoch, S. Venkataraman, " Integral of Accelerating Power Type PSS: Part 1, Part 2, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999
- [2] IEEE Standard 421.5, "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", August 1992.
- [3] F.P. deMello, C.Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans.Vol. PAS-87, June, 1969, pp.316-329
- [4] Larsen, E.V. and D.A. Swann, "Applying power system stabilizers, Part I, II, and III", IEEE Trans., Vol. PAS-100, No.6, June, 1981, pp.3017-3046
- [5] P.Kundur, D.C.Lee, H.M.Zein El-Din, "Power System Stabilizers for Thermal Units", Analytical Techniques and On-Site Validation", IEEE Trans. Vol. PAS-100, No.1, January 1981, pp.184-198
- [6] P. Kundur, M. Klein, G.J. Rogers, M.S. Zywno, "Application of Power System Stabilizer for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 4, No.2, May 1989
- [7] 김동준, 문영환, 신정훈, 김태균, "PSS 정수튜닝을 위한 전력시스템 미소신호안정도 해석 프로그램", 대한전기



학회 논문지 제 52권 제 5호, 2003.5.

- [8] D.-J. Kim, Y.-H. Moon, H.-Y. Kim, J.-H. Shin, T.-K. Kim, " Application of Dual-input PSS to 343 MVA Pumped Storage Unit and Its Validation", IEEE 2004, GM, Denver, Colorado
- [9] 김동준, 문영환, 신정훈, 김태균, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구, Part I", 대한전기학회 논문지 제 48권 제 9호, 1999. 9월.
- [10] 신정훈, 김동준, 문영환, 김태균, " PSS 튜닝을 위한 기본 연구, Part II", 대한전기학회 논문지, 제 49권 제7호, 2000년 7월.
- [11] R.A. Lawson, D.A. Swann, and G.F. Wright, "Minimization of Power System Stabilizer Torsional Interaction on Large Steam Turbine-Generators" IEEE Trans. PAS. Vol. 97, Jan./Feb. 1978, pp183-190
- [12] D.-J. Kim, Y.-H. Moon, H.-K. Nam, "SSR Small-signal Stability Analysis Program of Power System and its Application to IEEE Benchmark Systems", IEEE Powertech 2007, Lausanne.
- [13] D.-J. Kim, H.-K. Nam, Y.-H. Moon, " A Practical Approach to HVDC System Control for Damping SSO Using the Novel Eigenvalue Analysis Program", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.22, No.4 Nov. 2007
- [14] 김동준, 문영환, 송성근, 김진이, 조종만, " 주파수 응답특성 시험을 통한 화력발전소 속도-입력형 PSS의 축진동 필터 모델링 및 현장 PSS 튜닝시험", 2008.5.30 대한전기학회 전력계통연구회 춘계학술대회
- [15] PSS/E Ver. 30, Siemens-PTI, 2004
- [16] PSCAD/EMTDC 4.1.3, Manitoba, 2006

**부 록 A**

**가. GENROU 모델 (612.0 MVA, 22 kV):**

$T_{do}' = 7.70$  ,  $T_{do}'' = 0.044$  ,  $T_{qo}' = 0.82$  ,  $T_{qo}'' = 0.048$  ,  $H = 3.66$  ,  
 $D = 0.0$  ,  $X_d = 1.940$  ,  $X_q = 1.476$  ,  $X_d' = 0.224$  ,  $X_q' = 0.382$  ,  $X'' = 0.193$  ,  $X_1 = 0.134$  ,  $S(1.0) = 0.2055$  ,  $S(1.2) = 0.4236$

**나. ST4B 여자시스템(ESST4B):**

$TR = 0.00$  ,  $KPR = 3.97$  ,  $KIR = 3.97$  ,  $VRMAX = 1.0$  ,  
 $VRMIN = -0.87$  ,  $TA = 0.01$  ,  $KPM = 1.00$  ,  $KIM = 0.00$   
 $VMMAX = 1.00$  ,  $VMMIN = -0.87$  ,  $KG = 0.00$  ,  $KP = 5.71$  ,  
 $KI = 0.00$  ,  $VBMAX = 6.30$  ,  $KC = 0.170$  ,  $XL = 0.00$  ,  
 $THETAP = 0.00$

**다. PSS2A 모델:**

$ICS1 = 1$  ,  $REMBUS1 = 0$  ,  $ICS2 = 3$  ,  $REMBUS2 = 0$  ,  $M = 5$  ,  
 $N = 1$  ,  $TW1 = 2.0$  ,  $TW2 = 2.0$  ,  $T6 = 0.0$  ,  $TW3 = 2.0$  ,  
 $TW4 = 0.0$  ,  $T7 = 2.0$  ,  $KS2 = 0.293$  ,  $KS3 = 1.0$  ,  $T8 = 0.50$  ,  
 $T9 = 0.10$  ,  $KS1 = 15.0$  PU,  $T1 = 0.20$  ,  $T2 = 0.02$  ,  
 $T3 = 0.20$  ,  $T4 = 0.02$  ,  $VSTMAX = 0.05$  ,  $VSTMIN = -0.05$

**저 자 소 개**



**김 동 준 (金東俊)**

1992년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 박사 졸업. 관심 분야는 과도안정도, 발전기 특성시험 및 PSS 튜닝시험 (<http://gtv.keri.re.kr/>), HVDC 및 SSR 제어기 설계, HPC 실시간 과도 안전도 프로그램 개발 등. 현재 한국전기연구원 전력시스템연구본부 Smart Grid 연구센터, 선임연구원.  
 Tel : 031-420-6184  
 E-mail : djkim0419@keri.re.kr



**문 영 환 (文英煥)**

1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 Univ. of Texas(Arlington) 전기공학과 졸업(공학박). 관심 분야는 발전기 특성시험 및 PSS 튜닝, 전력계통 안정도해석, WAMS, 전력시장 등. 현재 한국전기연구원 전력시스템연구본부 Smart Grid 연구센터장, 책임연구원.  
 Tel : 031-420-6004  
 E-mail : yhmoon@keri.re.kr



**김 성 민 (金成民)**

1988년 한국전력공사 입사. 현재 한국동서발전(주) 발전처 기술전문팀 과장. 관심분야는 현재 발전기 제어시스템 튜닝 및 Trouble Shooting, 보호계전기 정정 및 시험, 전기설비 수명진단 등.  
 Tel : 02-3456-7583  
 E-mail : hople@ewp.co.kr



**김 진 이 (金眞伊)**

1999년 광운대 전기공학과 졸업. 2002년 서울대학교 대학원 전기공학과 공학석사. 2002년~현재 전력거래소 전력계통계획 및 전력기술 해석분야 근무.  
 Tel : 02-3456-6764  
 E-mail : whenaman@kpx.or.kr



**황 봉 환 (黃 奉 桓)**

1994년 고려대 공대 전기공학과 졸업.  
2004년 미국 유니온대학교 대학원 전기  
공학과 졸업(석사). 현재 한국전력거래소  
전력시장처 과장.

Tel : 02-3456-6654

E-mail : bhhwang@kpx.or.kr



**조 종 만 (趙 鍾 萬)**

1986년 서울산업대 전기공학과 졸업.  
1998년 경상대 대학원 전기공학과 공학  
석사. 2006년 한양대 대학원 전기공학과  
공학박사. 1986년~2001년 한국전력공사  
근무. 2001년~현재 전력거래소 부장.

Tel : 02-3456-6760

E-mail : jongman@kpx.or.kr