

다중입력 PSS 튜닝 방법과 612 MVA 화력기 적용: Part 2 – 현장 튜닝시험 및 성능검증

논 문
58-4-2

Tuning of Dual-input PSS and Its Application to 612 MVA Thermal Plant: Part 2- Field Testing and Performance Verification

김 동 준[†] · 문 영 환^{*} · 김 성 민^{**} · 김 진 이^{***} · 황 봉 환^{***} · 조 종 만^{***}
(Dong-Joon Kim · Young-Hwan Moon · Sung-Min Kim ·
Jin-Yi Kim · Bong-Hwan Hwang · Jong-Man Cho)

Abstract - The second paper, Part 2, describes the field testing of IEEE type PSS2A EX2000 excitation in the Dangjin 612 MVA T/P #4. The final PSS gain, K_s , was determined by inputting 2 %-step signals into AVR at a loading of 500 MW and increasing K_s from 0 to 15 in increments of 3. After the field testing, the measured data was also analyzed by Discrete Fourier Transformation(DFT) analysis, and the model parameters of generation system were verified by replicating the measured data with the transient stability program.

Key Words : EX2000 excitation system, DFT analysis, PSS2A model parameter

1. 서 론

Part 1에서 설계된 계통안정화장치(Power System Stabilizer, 이하 PSS) PSS2A 모델 파라미터를 현장 튜닝시험에서 검증하고 이때 측정데이터를 이용하여 스펙트럼 분석 및 발전시스템 모델정수 재검증에 대해서 기술한다. 원래 당진화력 4호기 EX2000 여자시스템은 건설당시부터 IEEE PSS2A 제어블록이 없이 운전되었다. 따라서 현장 PSS 튜닝시험에서는 EX2000 여자시스템 PSS를 정상화하기 위해서 실무자가 새롭게 PSS2A 제어블록을 설치하였다. 2008년 4월에 수행된 현장 PSS 튜닝시험은 설계된 파라미터를 입력하고 500 MW 부하에서 PSS 이득을 증가하여 2 % 온라인 자동전압조정장치(Automatic Voltage Regulator, 이하, AVR) 스텝시험을 하였다. 측정된 결과로부터 설계된 PSS 파라미터의 적정성을 확인하였고 최종 PSS 이득을 결정하였다.

본 논문은 당진화력 4호기를 대상으로 기존 PSS 튜닝 방법과 다르게 측정된 데이터를 이용하여 이산후리에변환(Discrete Fourier Transformation, 이하 DFT)으로 스펙트럼 분석으로 지역모드(local mode), 광역모드(global mode), 축진동 모드(torsional mode) 등을 구분하여 결정된 PSS 이득정수 유효성을 확인하고 측정된 온라인 AVR 스텝시험을 재모의 하여 PSS 파라미터 설계시 사용된 발전시스템 모델정수를 재검증한다.

2. 현장 PSS 튜닝시험 및 검증

2.1 현장 PSS 튜닝시험

2.1.1 500 MW 온라인 2 % AVR 스텝시험

현장 PSS 튜닝시험은 설계된 PSS2A 파라미터를 입력하는 단계, 무부하 2 % AVR 스텝시험 단계, 250 MW에서 PSS 파라미터 체크 단계, 500 MW에서 PSS2A 이득을 표 1과 같이 0에서 15 엔지니어링 값(Engineering Value, 이하 EV)으로 증가하여 2 % 온라인 AVR 스텝시험 단계, 그리고 이득여유(gain margin) 시험 등으로 수행되었다.

표 1 온라인 2% AVR 스텝시험 (500 MW)

Case #	PSS 이득 (EV)	비 고
Case #1	$K_s=0.0$ EV	4과 동요 발생
Case #2	$K_s=3.0$ EV	3과 동요 발생
Case #3	$K_s=6.0$ EV	2과 동요 발생
Case #4	$K_s=9.0$ EV	1과 동요 발생
Case #5	$K_s=12.0$ EV	1과 동요 발생
Case #6	$K_s=15.0$ EV	1과 동요 발생

500 MW 부하에서 온라인 2 % AVR 스텝시험은 PSS 이득을 0에서부터 3씩 증가하면서 사전 모의결과와 비교하였다. 측정된 AVR 스텝결과는 모의결과와 잘 일치하여 이득을 15 EV까지 증가하여 스텝시험을 수행하였다. 현장에서 조정된 EV값 이득은 모의상의 Per Unit(이하, PU) 값과 다르며, PU 값으로 환산하면 약 1.5~2배 정도 값을 갖는다. 그림 1은 PSS가 없는 경우의 전력동요로서 2 % AVR 스텝 시험 결과를 보여준다. 약 4과 정도의 전력동요를 보여준다. 그림 2는 이득을 $K_s=9.0$ EV로 증가하였을 때 AVR 스텝 시험 응답 결과이다. 약 1과 정도의 전력동요를 보여주며 제

† 교신저자, 정회원 : 한국전기연구원 선임연구원
E-mail : djkim0419@keri.re.kr

* 시니어회원 : 한국전기연구원 책임연구원

** 정 회 원 : 한국동서발전(주)

*** 정 회 원 : 한국전력거래소

접수일자 : 2008년 10월 24일

최종완료 : 2009년 2월 5일

동성능이 우수하다. 그림 3은 이득을 $K_s=15$ EV까지 증가했을 때의 시험결과를 보여준다. 그림 2처럼 지역모드 제어특성이 우수하다. 현장 이득 15 EV는 PU 값 이득으로 환산하면 약 30 PU정도 해당된다. 이와 같은 측정된 스텝시험 결과로부터 결정된 파라미터에 의한 위상보상은 우수하게 되어 있음을 확인할 수 있었다.

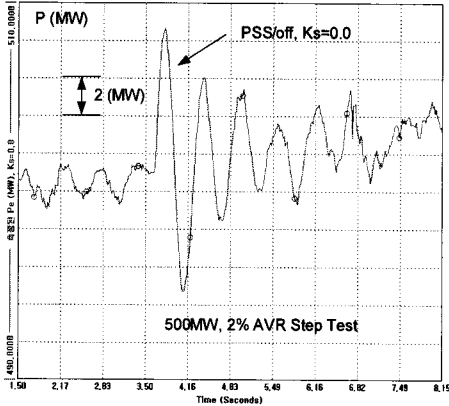


그림 1 온라인 2 % AVR 스텝시험인 경우 출력 (w/o PSS)
Fig. 1 On-line 2 % AVR Step Test without PSS

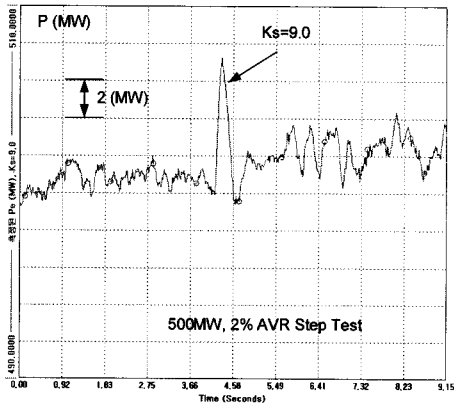


그림 2 온라인 2 % AVR 스텝시험인 경우 출력 ($K_s=9.0$ EV)
Fig. 2 On-line 2% AVR Step Test with $K_s=9.0$ EV

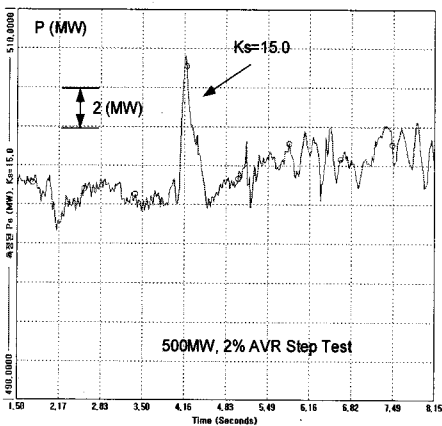


그림 3 온라인 2 % AVR 스텝시험인 경우 출력 ($K_s=15.0$ EV)
Fig. 3 On-line 2 % AVR Step Test with $K_s=15.0$ EV

2.1.2 이득여유 시험

PSS 이득을 $K_s=15$ EV로 두고 AVR 스텝시험 한 결과 발전기 계자전압과 단자전압에서 약간의 동요(hunting)가 관찰되었다. 이러한 이유로 더 이상 스텝시험을 하지 않고 이득만 천천히 $K_s=17$ EV까지 증가하여 정상상태 진동 특성을 관찰하였다. 이때 단자전압과 계자전압은 더 동요하였다. 따라서 17 EV 보다 더 높은 이득여유 시험은 시스템에 위험을 줄 수 있기 때문에 더 이상 PSS 이득증가를 하지 않았다. 기존 PSS 이득결정 방법은 여자기 모드가 불안정해지는 최대이득의 1/3배로 잡거나 1/2배 이득으로 설정한다. 그러나 PSS2A 모델에서는 이득을 크게 증가하여도 여자기 제어모드가 불안정하지 않기 때문에, 최적이득은 단자전압과 계자전압의 동요가 심해서 운전자가 무효전력을 제어하기 어렵게 하는 최대이득의 1/2로 하는 것으로 하였다.

단자전압과 계자전압의 동요 문제는 PSS 이득 값이 큰 이유로 작은 노이즈 성분이 증폭되어 운전자가 단자전압 및 무효전력 등을 제어하기 어렵게 하기 때문에 여자기 모드의 불안정(unstable) 문제와 구분이 되어야 한다. 따라서 최적 PSS 이득결정은 단자전압과 계자전압의 동요가 눈에 띄게 관찰되는 시점의 최대이득에서 마진을 6 dB(1/2배)로 결정하는 것으로 하였다. 최종 결정된 PSS 최적이득은 $K_s=9$ EV이다. 참고로 2008년 5월 수행된 동일사양 당진화력 3호기 PSS 이득여유 시험에서는 이득을 25 EV까지 증가시켜 정상상태에서 단자전압과 계자전압의 진동을 관찰하였다. 이때도 단자전압과 계자전압의 증폭된 노이즈에 대한 다소 큰 동요가 관찰되었지만, 진동주파수를 갖는 여자기 모드와 같은 불안정(unstable) 현상은 없었다.

그림 4는 PSS 이득증가에 따른 AVR 스텝시험과 이득여유 시험을 측정된 파형으로서 약 30분 동안의 계자전압, 단자전압, 발전기 출력을 보여준다. PSS 이득이 $K_s=9$ EV일 때 측정된 파형은 가장 안정한 특성을 보인다. 그러나 PSS 이득을 $K_s=15$ EV까지 올린 경우는 계자전압 파형에 눈에 띄게 노이즈가 더 많아졌고 동요진폭이 더 커졌다. 이때 단자전압과 발전기 출력도 정상상태 진폭이 더 커졌다. 좀 더 상세하게 분석하기 위해서 측정된 발전기 출력 파형을 이용하여 DFT 스펙트럼 분석으로 각 동요 모드에 대한 영향을 다음 절에서 분석한다.

2.2 현장 PSS 튜닝시험 결과 분석

측정된 시험 결과는 설정된 PSS 파라미터가 지역모드 제어에 매우 효과적임을 보여준다. 그러나 측정된 시간영역 데이터로는 PSS가 다른 모드에 어떤 영향을 주는지는 알 수 없다. 이런 이유로 본 논문은 이득에 따른 측정된 정상상태 발전기 출력을 DFT 스펙트럼 분석하였다. 또한 측정된 결과를 재모의 하여 모델정수와 모의결과를 재검증하였다.

2.2.1 발전기 출력(P_g) DFT 스펙트럼 분석

그림 5는 PSS가 없는 경우 발전기 출력을 DFT 해석을 이용하여 주파수 스펙트럼 분석한 것이다. 분석에 사용된 데이터는 그림 4의 측정된 데이터 중 AVR 스텝시험과 같이 과도외란이 없는 정상상태 때 측정된 1000개의 데이터를 사용하였다. 측정에 사용된 Dynamic System Monitor 계측

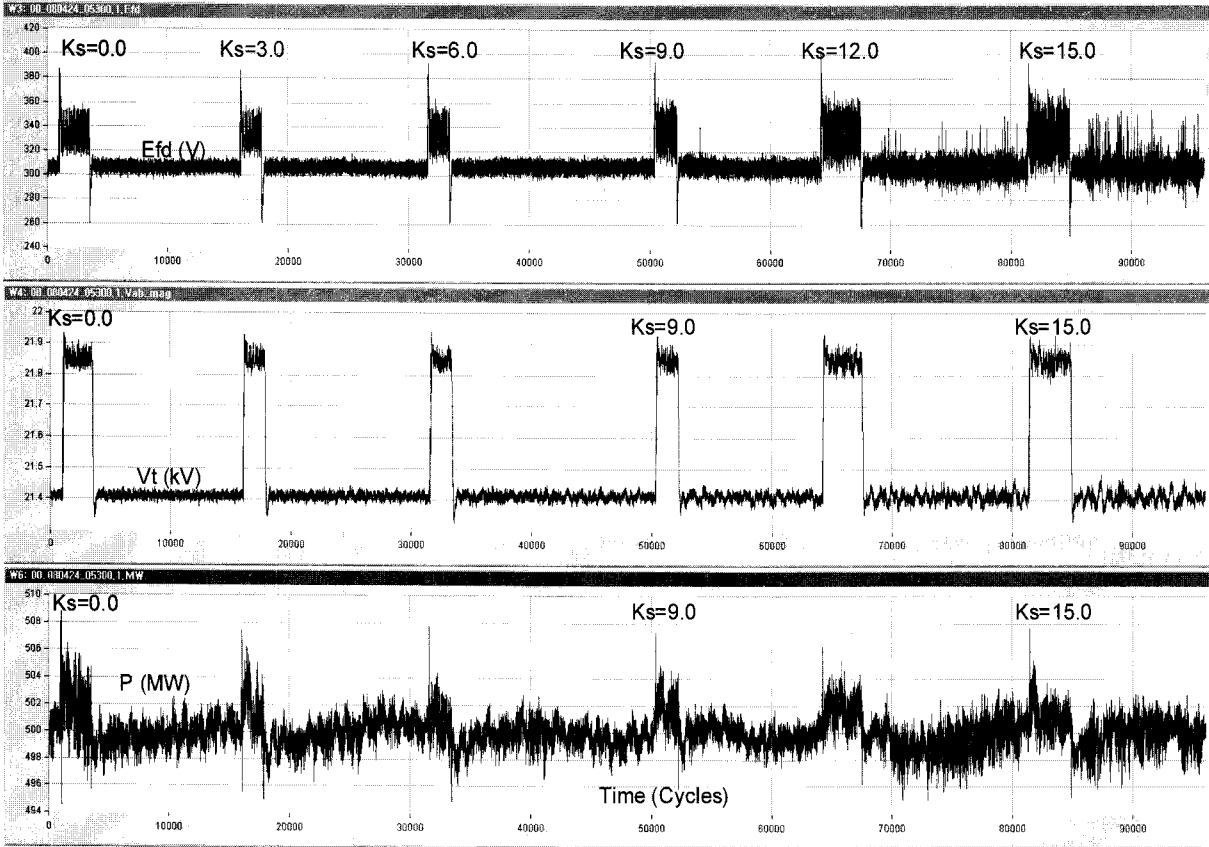


그림 4 온라인 2% AVR 스텝시험과 PSS 이득여유 시험 (500 MW)
 Fig. 4 On-line 2% AVR Step Test and PSS's Gain Margin Test

장비는 1초에 60개의 데이터를 RMS 값으로 변환하여 저장한다. DFT 분석 방법은 먼저 측정된 발전기 출력 데이터의 DC 성분을 제거하고, 동요부분만 있는 데이터를 DFT 알고리즘에 의해서 분석한다. 이때 분석된 DFT 결과는 복소수 형태로 나오기 때문에 최종 DFT 분석결과는 동요모드를 잘 구분하기 위해서 절댓치로 변환된 값이다.

그림 5는 PSS가 없는 경우로서 0.66 Hz의 광역모드, 3개의 지역모드, 그리고 제1 축진동 모드 16.3 Hz를 보여준다. 광역모드는 서해안 발전기군과 동해안 발전기군에서 측정되는 모드로 계통 운전조건에 따라 0.6~0.7 Hz에서 존재한다 [10-13]. 특히 문헌[10]은 국내 최초로 광역모드를 언급한 문헌으로서 EPRI SSSP 고유치 프로그램에서 분석된 광역모드를 발전소에서 측정된 출력을 DFT 분석하여 확인하였다. 대형계통 고유치 해석 프로그램에서 광역모드 확인은 우고유 벡터인 mode shape을 보고 분석한다. 동해안 발전기군과 서해안 발전기군의 고유벡터 위상이 180도 틀리는데 이것은 두 발전기군들이 스윙하기 때문이다. 과도안정도 프로그램인 PSS/E 프로그램에서도 광역모드를 확인할 수 있다. 계통에 단락사고 같은 큰 상정사고를 발생시키면 동서 발전기군의 발전기 출력이 서로 위상이 180도 틀리면서 진동하는 것을 관찰할 수 있다[11]. 최근에는 시카동기화된 Phasor Measurement Unit 측정장치를 통해서 직접 광역모드를 감시할려는 연구가 국내에서 진행 중이다.

그림 6은 이득을 $K_s=9.0$ EV인 경우 스펙트럼 분석 결과

이다. 지역모드가 모두 사라졌고, 광역모드의 크기가 다소 줄어들었으며, 축진동 모드는 별 영향이 없다. 그림 7은 이득을 $K_s=15$ EV까지 증가인 경우의 결과로서 1.0 Hz보다 낮은 모드에 대해서는 비효과적이고 축진동 모드도 약간 크기가 커졌다. 이와 같이 결정된 최적 이득 $K_s=9.0$ PU를 재검증하였다. 결정된 PSS 이득 값은 지역모드에 매우 효과적이면서 광역모드까지 제동하는 특성을 보여준다.

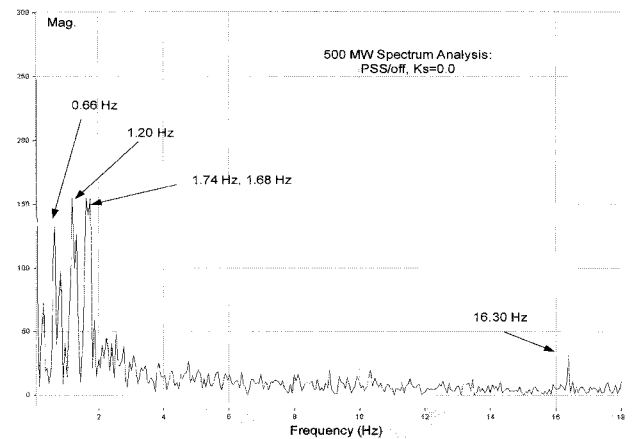


그림 5 발전기 출력 DFT 스펙트럼 분석 (w/o PSS)
 Fig. 5 DFT Spectrum Analysis for P_e (MW) (without PSS)

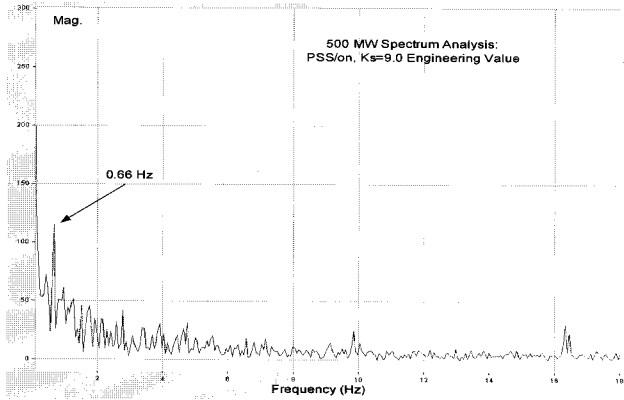


그림 6 발전기 출력 DFT 스펙트럼 분석 ($K_s=9.0$ EV)
 Fig. 6 DFT Spectrum Analysis for P_e (MW) (with PSS, $K_s=9.0$ EV)

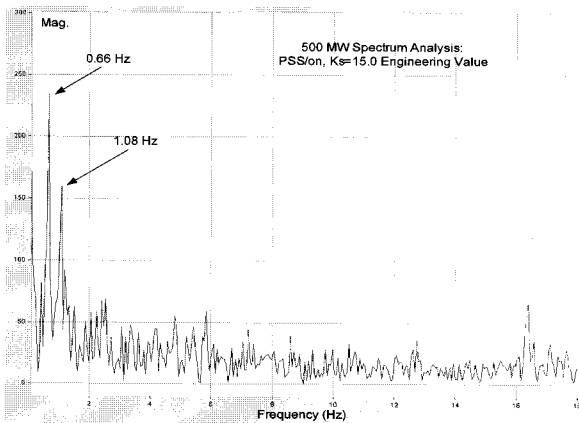


그림 7 발전기 출력 DFT 스펙트럼 분석 ($K_s=15.0$ EV)
 Fig. 7 DFT Spectrum Analysis for P_e (MW) (with PSS, $K_s=15.0$ EV)

2.2.2 측정결과 시뮬레이션 및 모델정수 검증

제안된 튜닝 마지막 단계는 당진화력 4호기 EX2000 여자 시스템을 대상으로 측정된 결과를 똑같은 시험조건에서 모의하여 사용된 모델정수를 재검증하는 것이다. 모델링은 Part 1에서와 같이 1기 무한모션으로 계통을 모델링하여 모의한다. PSS/E 프로그램으로 전체 한전 계통을 넣고 2% AVR 스텝시험을 모의하나 1기 무한모션으로 모의하나 지역모드만 비교하기 때문에 두 모의 결과는 같다. 측정된 파형에서 광역모드, 축진동 모드, 그리고 여자기 모드 등은 눈으로 분석하기 어렵다. 이 경우는 앞 결과 같이 DFT 스펙트럼 분석해야 한다. 여기서 사용된 발전기에서 바라본 등가 임피던스는 2% AVR 스텝시험에서 측정된 단자전압 편차와 무효전력 편차를 이용하여 정확히 계산한 값 ($X=dV/dQ_e$)이다[14].

이렇게 재검증을 함으로써 사용된 발전시스템 모델정수의 유효성을 확인하고 결정된 PSS2A 파라미터의 신뢰성을 더 높일 수 있다. 그림 8처럼 PSS가 없는 경우 모의에 사용된 모델 데이터는 측정된 발전기 출력 결과와 잘 일치한다. 단, ST4B 모델의 AVR P-I 이득 정수는 사전모의에서는 3.97 PU 이었으나 측정된 결과를 재모의 할 때는 5.70 PU로 약

간 높게 정정하였다. 그림 9는 계자전압을 비교한 것으로서 측정된 결과와 잘 일치한다. 그림 9에 측정된 계자전압 파형에서 5.0초 이후부터 나타나는 불연속 부분은 AVR에 스텝신호 명령을 인가할 때만 나타나는 노이즈 현상이다. 입력된 AVR 스텝신호를 제거하면 이러한 현상은 사라진다. EX2000 여자시스템에서 AVR에 스텝을 인가하기 위해서는 별도의 노트북과 EX2000 시스템에 연결할 통신라인이 필요하다. 일단 통신라인이 두 시스템에 연결되면 노트북을 통해서 EX2000 시스템에 AVR 스텝신호 인가 명령을 보낼 수 있다. 따라서 이러한 계자전압에서 보이는 불연속 노이즈는 통신라인과 노트북에서 발생된다.

그림 10은 PSS가 있는 경우의 결과를 비교한 것이다. 현장 이득 $K_s=9.0$ EV는 모의상 PU 이득 $K_s=15.0$ PU와 잘 일치한다. 그림 11은 계자전압을 비교한 것이다. 마찬가지로, 측정된 계자전압은 5초 이후에 스텝입력에 따른 노이즈 때문에 파형이 다소 매끄럽지 못하다. AVR 스텝신호를 제거하면 이러한 현상은 사라지기 때문에 실제 당진화력 4호기를 운전하는 데 문제가 없다.

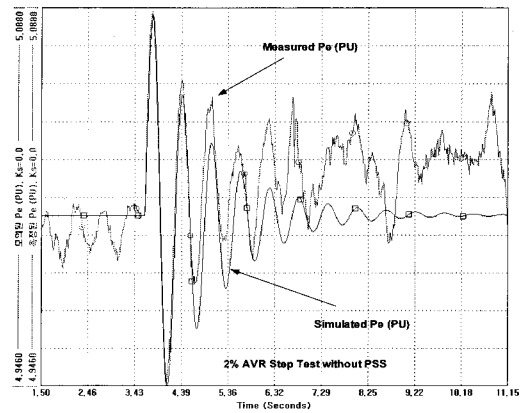


그림 8 온라인 2% AVR 스텝시험인 경우 측정된 출력(P_e) 비교 (w/o PSS), Base=100 MVA
 Fig. 8 Comparison of P_e in the on-line 2% AVR Step Test

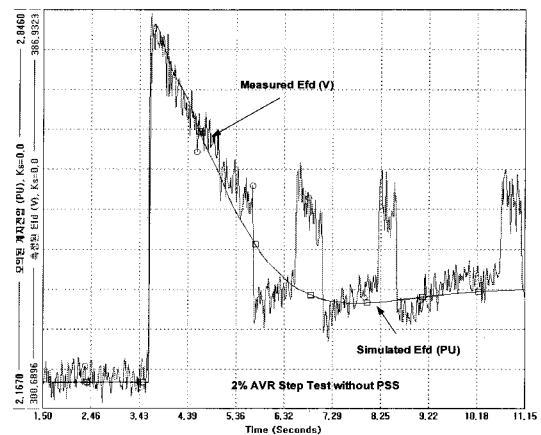


그림 9 온라인 2% AVR 스텝시험인 경우 측정된 계자전압 (E_{fd}) 비교 (w/o PSS)
 Fig. 9 Comparison of E_{fd} in the on-line 2% AVR Step Test

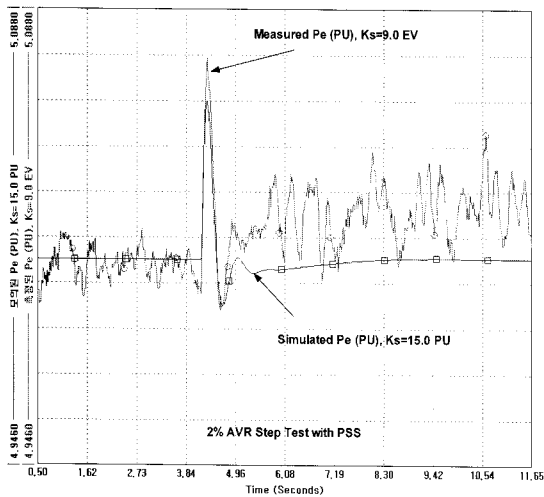


그림 10 온라인 2 % AVR 스텝시험인 경우 측정된 출력(P_e) 비교 ($K_s=9.0$ EV), Base=100 MVA

Fig. 10 Comparison of P_e in the on-line 2% AVR Step Test with PSS

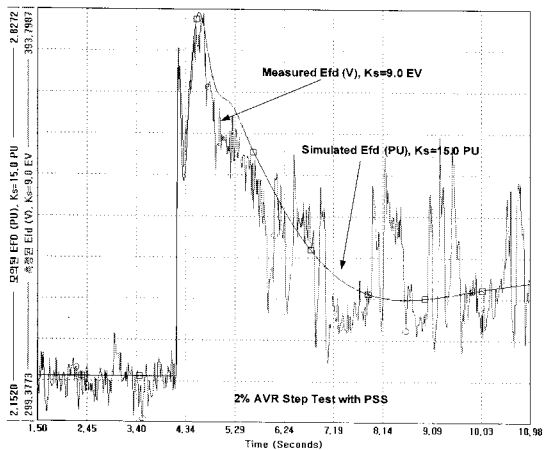


그림 11 온라인 2 % AVR 스텝시험인 경우 측정된 계자전압(E_{fd}) 비교 ($K_s=9.0$ EV)

Fig. 11 Comparison of E_{fd} in the on-line 2% AVR Step Test with PSS

3. 결론

본 Part 2 논문은 설계된 PSS2A 파라미터를 당진화력 4호기 EX2000 여자시스템을 대상으로 온라인 2 % AVR 스텝시험에 의한 현장 PSS 튜닝시험, 모드분석을 위한 DFT 스펙트럼 분석, 그리고 설계에 사용된 발전시스템 모델정수 검증 등을 기술하였다. 현장 PSS 튜닝시험은 설계된 파라미터를 입력하고 100 % 부하(500 MW)에서 PSS 이득 K_s 를 0에서 3씩 증가하여 $K_s=15$ EV까지 온라인 2 % AVR 스텝시험을 수행하였고 최종 PSS 이득을 결정하였다. 또한 측정된 발전기 출력 데이터를 DFT 주파수 스펙트럼 분석하여 최종 결정된 PSS2A 파라미터가 지역모드와 광역모드 제동에 효과적이고 제1 축진동 모드에 영향을 주지 않음을 확인하였다. 마지막 단계로서 측정된 결과를 시간영역 과도안정

도 프로그램을 이용하여 재현함으로써 사용된 모델데이터를 재검증하였다. 이와 같이 본 논문은 화력기에 사용되는 다중입력 PSS의 효과적인 튜닝방법을 제안하였고, 제안된 방법은 당진화력 4호기 EX2000 여자시스템 PSS2A 모델에 적용하여 PSS 모델정수를 설계하고 현장 PSS 튜닝 시험을 통해서 성능 검증을 기술하였다.

향후 연구방향은 국내 500 MW급 이상 기존 대형 화력기에서 사용되고 있는 발전기 속도를 입력으로 하는 아날로그 PSS의 5단 축진동 필터 모델링과 이 필터를 고려한 PSS 튜닝방법을 연구할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] 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
- [3] 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, January1981, pp.184-198.
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] IEEE Standard 421.5, "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", August 1992.
- [7] 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
- [8] 김동준, 문영환, 신정훈, 김태균, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구, Part I", 대한전기학회 논문지 제 48권 제 9호, 1999. 9월.
- [9] 신정훈, 김동준, 문영환, 김태균, " PSS 튜닝을 위한 기본 연구, Part II", 대한전기학회 논문지, 제 49권 제7호, 2000년 7월.
- [10] 김동준, 문영환, 김용학, 윤용범, "DFT 알고리즘을 이용한 전력계통 동요모드 확인", 대한전기학회 논문지 제50권 제5호, May, 2001.
- [11] 발전기 제어계통 안정화장치(PSS) 개발, 2002.03, 한국전력공사
- [12] 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

- [13] 김동준, 문영환, "AVR 스텝 시험에 의한 울진 N/P 1호기 PSS 모델링 연구", 대한전기학회 논문지 제 50권 제 8 호, Aug, 2001
- [14] J.V.Plewinski, Jr., A.Murdoch, "EX2000 PSS Tuning and Torsional Interaction Vector Study", Report to Doosan Inc., GE. Feb 23, 2006.
- [15] PSS/E Ver. 30, Siemens-PTI, 2004

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(공학). 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 전기공학과 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 공학석사. 2006년 한양대 대학원 전기공학과 공학박사. 1986년~2001년 한국전력공사 근무. 2001년~현재 전력거래소 부장.
Tel : 02-3456-6760
E-mail : jongman@kpx.or.kr