Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2011) 25(8) : 114~121
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2011.25.8.114

논문 25-8-13

대형 화력발전기 전력계통 안정화장치(IEEEST-PSS)의 정수선정 기법과 실계통 적용: PART II - PSS 현장 성능시험 절차 및 성능검증

(A Tuning Method for the Power System Stabilizer of a Large Thermal Power Plant and Its Application to Real Power System : PART II - Field Tests and Verification of PSS Performance)

신정훈* · 남수철 · 백승묵 · 송지영 · 이재걸 · 김태균
(Jeong-Hoon Shin · Su-Chul Nam · Seung-Mook Baek · Ji-Young Song · Jae-Gul Lee · Tae-Kyun Kim)

Abstract

This paper, as the second part of the paper, dealt with the field test and test results to validate PSS(Power System Stabilizer) parameters which are previously tuned in Part 1 paper. In Part 1 of the paper, the selection of parameters such as lead-lag time constants for phase compensation and system gain was optimized by using linear & eigenvalue analyses and they were verified through the time-domain transient stability analysis. In part 2, the performance of PSS was finally verified by the generator's on-line field test. Through the comparisons of simulation results and measured data before and after tuning of the PSS, the models of generator and its controllers including AVR, Governor and PSS used in the simulation are verified and confirmed.

Key Words : PSS(Power System Stabilizer), Phase Compensation and System Gain, Field Test

1. 서 론

지식경제부 신뢰도 고시 기준에 의해 500[MVA]급 이상 발전기의 PSS는 매 6년마다 정수 재튜닝 및 성능시험을 수행하도록 되어 있으며, 성능시험 결과를 계통운영자에게 제공해야 한다. 특히, 제공된 보고서에는 PSS의 최종 정수값과 이들 정수들이 셋팅된 PSS의 댐핑효과에 대한 시험결과가 반드시 수록되어야만 한다[2]. 제공된 PSS 정수값들은 계통운영을 위한 발전기 및 제어기 데이터베이스(DB)에 새로이 입력되거나, 현재 값들이 새로운 값들로 갱신되어 정확한 계통운영을 위한 여러 가지 계통해석 입력 자료로 활용된다. 본 논문은 PART-I의 논문[1]에서 오프라인 해석을 통해 선정된 PSS 정수들의 유효성을 검증하기 위하여, 대상 발전기인 612[MVA]급 대형 화력발전기의 PSS에 대한 성능시험 절차를 제시하고, 시

* 주저자 : 한국전력공사 전력연구원 책임연구원
Tel : 042-865-5831, Fax : 042-865-5814
E-mail : jhshin@kepri.re.kr
접수일자 : 2011년 7월 18일
1차심사 : 2011년 7월 20일, 2차심사 : 2011년 8월 19일
심사완료 : 2011년 8월 26일

험을 통한 성능검증 결과의 제시를 통해 그 유효성을 입증하였다.

2. PSS 현장성능 시험 방법 및 절차

본 절에서는 PSS의 성능확인을 위해 표 1과 같은 절차로 시험하였다.

본 논문의 시험대상 발전기의 경우, PSS가 이미 운전 중에 있었으나 이득이 1(dial=0)로 셋팅되어 있어 효과가 거의 없었을 것으로 판단되었다. 그러나 일단, 제작사가 셋팅한 초기 정수(진지상 위상보상 시정수)의 유효성을 PART-I의 논문과 동일하게 검증하기 위하여 현재 셋팅치로 먼저 성능시험을 수행하였다. 이후, 오프라인에서 설계한 정수값으로 변경하여, 부하시 AVR(Automatic Voltage Regulator) 5[%] Step 시험, 이득여유 시험을 실시하였으며, PSS의 최종 이득(Gain) 값은 현장시험을 통해 최종확정하였다.

2.1 무부하 AVR 스텝 시험

무부하 AVR 스텝 시험은 AVR 내부 DC전압 및 여자시스템 응동 특성을 확인함과 동시에, 오프라인 모의에서 사용한 여자기 모델을 검증하기 위한 시험이다. 본 시험은 발전기 터빈정격 주파수(3600[rpm])에서, 전력계통 투입 차단기가 개방된 상태에서 AVR 합산지점에 3[%], 5[%] 스텝신호를 인가한 후 발전기 단자전압 및 계자전압 응동 특성을 확인한다. 스텝신호의 인가는 시험대상 발전기의 아날로그 AVR에 내장되어 있는 AVR 스텝신호 인가 스위치를 이용한다.

2.2 부하시 AVR 스텝 시험(PSS 출력 미인가)

부하시 AVR 스텝시험은 먼저, PSS의 출력이 AVR의 합산지점에 인가되지 않도록 PSS출력 스위치를 'OFF'로 전환한 후 5[%] 스텝신호를 인가하여 발전기 단자전압 및 PSS 출력신호를 모니터링한다. 이는 외란(disturbance)에 대하여 PSS의 정상동작과 여자시스템의 응동을 미리 확인함에 그 목적이 있다.

2.3 PSS 이득여유 시험

PSS의 이득여유 시험은 발전기가 계통에 병입

표 1. PSS 성능시험 절차
Table 1. A test procedure to verify the performance of PSS

순번	시험항목	소요 시간	운전조건	조 작 사 항	목 적
1	시험준비	2시간	발전기 정지	* 시험전 Meeting 및 협의 * 계측기 결선 및 계측기 Calibration	-
2	무부하 AVR 스텝시험	30분	무부하 (계통병해 상태)	* AVR 스텝 시험(20초간 유지) Step up/down 변화(3[%], 5[%])	* AVR 내부 DC 전압 및 여자시스템 응동 확인
3	PSS Off: 부하시 AVR 스텝시험	60분	85[%]정격출력 이상 PSS Off	* AVR 스텝 시험(20초간 유지) Step up/down 변화(3[%], 5[%])	* PSS 출력신호 확인 여자시스템 응동 확인
4	PSS Gain Margin 시험		85[%]정격출력 이상 PSS On	* PSS Gain 증가시험(PSS 이득변화) - 0, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25	* 이득 Margin 시험
5	PSS On: 부하시 AVR 스텝시험	60분	85[%]정격출력 이상 PSS On	* AVR 스텝 시험(각각 20초간 유지) Step up/down 변화(3[%], 5[%]) (PSS 이득변화, 0, 3, 7, 10, 15)	* PSS 성능시험 전력댐핑 확인

※ 음영처리 부분은 계통병입 중 시험일정임

된 정상상태에서 PSS를 투입하고, PSS의 이득을 0에서부터 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25[pu]까지 약 20초 간격으로 서서히 증가시켜 발전기 단자전압, 계자전압, 유·무효전력, PSS 출력 값을 모니터링 하여 이들 신호 중 하나라도 불안정하게 응동 하면 즉시 PSS를 OFF 시킨다. PART-I의 논문에서 제시한 바와 같이 불안정이 발생하기 시작한 이득의 약 1/3을 잠정적인 PSS 이득 값으로 결정한다[1].

2.4 부하시 AVR 스텝 시험(PSS 출력인가)

부하시 AVR 스텝시험은 PSS의 이득을 0(PSS 없을때)에서부터 상기 2.3절의 이득여유 시험에서 결정한 잠정이득까지 조정하고, 각 이득에 대하여 5[%] 스텝신호를 인가하여 PSS 효과를 모니터링 및 측정(단자, 계자전압, 유·무효출력, PSS 출력)한다. 결과치를 비교하여 가장 댐핑 효과가 큰 이득으로 PSS의 최종이득을 결정한다.

3. 현장 성능시험 결과

2절에서 설명한 바와 같이, 현장 성능시험에서는 초기 제작사 셋팅치를 그대로 두고 PSS 효과를 확인하기 위한 시험을 먼저 수행하였다. 수행결과, 이득을 3으로만 높여도 오히려, 다른 제어모드가 불안정하게 되어 진동에 대한 댐핑력을 주지 못하고 또 다른 진동모드를 유발시켰다. 이는 초기 파라메터 셋팅치(T1=T3=0.5sec, T2=T4=0.05sec)에 대한 PART-I 논문의 오프라인 고유치 해석 결과 및 시간영역에서의 모의결과와도 정확히 일치한다[1]. 이후, 오프라인에서 설계한 파라메터로 변경하여, 부하시 AVR 5[%] Step 시험, 이득여유 시험을 실시하였으며, PSS의 최종 이득(Gain) 값은 현장시험을 통해 최종확정하였다. PSS 진지상 위상보상 시정수 설정치는 오프라인에서의 PSS 정수설계 결과와도 일치하였다. 성능시험시 운전조건은 표 2와 같다.

표 2. 성능시험시 운전조건
Table 2. Operating conditions for field tests

구 분	무부하 AVR 스텝 시험	이득여유시험	부하시 AVR Step 시험
유효전력	-	498[MW]	495[MW]
무효전력	-	75[MVar]	75[MVar]
단자전압	21.8[kV]	21.4[kV]	21.4[kV]

3.1 무부하 3[%], 5[%] AVR 스텝 시험

본 시험에서는 무부하시(발전기 계통투입 차단기 개방) 3[%] 및 5[%] AVR 스텝시험을 통하여, 여자시스템의 응동 특성을 확인하였다. 스텝신호에 의한 발전기 단자전압 변동에 따라 여자시스템이 적절하게 응동하고 있음을 그림 1과 그림 2의 단자전압 출력 파형을 통해 알 수 있다.

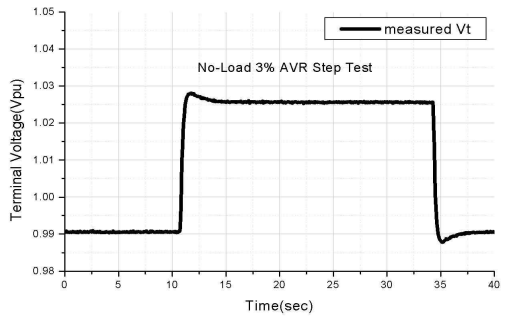

그림 1. 무부하 3[%] AVR 스텝 시험결과(단자전압)
Fig. 1. No load 3[%] AVR step test(Terminal Voltage)

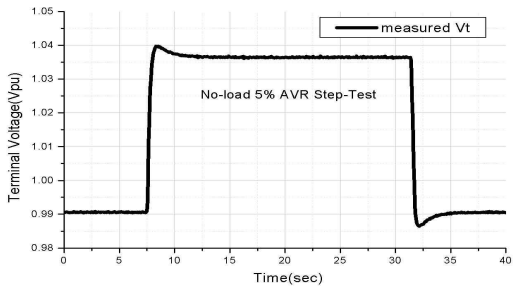

그림 2. 무부하 5[%] AVR 스텝 시험결과(단자전압)
Fig. 2. No load 5[%] AVR step test(Terminal Voltage)

3.2 AVR On-line 5[%] Step 시험(PSS 출력미인가)

본 시험에서는 발전기 출력 490[MW]에서 PSS의 출력을 AVR 합산지점으로 인가하지 않고(PSS 출력 스위치 'OFF'), 5[%] AVR 스텝 신호를 외란으로 인가, 이에 대한 PSS 및 여자시스템의 응동을 확인하였다. 이때 PSS 출력(이득=1)은 'Washout and Output' 보드의 출력단자를 이용하여 계측장비로만 모니터링 하였다. 시험결과, 그림 3에서와 같이 외란에 대하여 PSS가 정상적으로 응동함을 확인함과 동시에 부하시, 여자시스템의 응동도 정상적임을 확인하였다.

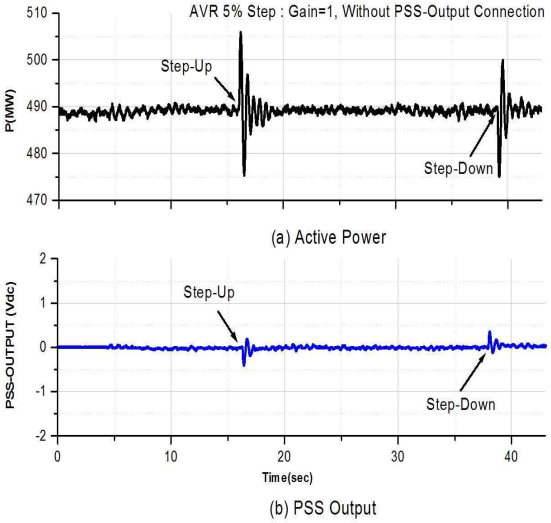

그림 3. 부하시 AVR 5[%] 스텝 시험결과
Fig. 3. Results of AVR 5[%] step test

3.3 제작사 셋팅 유효성 확인 시험(튜닝전)

본 시험에서는 제작사 초기 셋팅치로 운전중인 PSS의 유효성을 검증하기 위하여 AVR 5[%] Step 시험을 이득 1과 이득 3에서 실시하였다.

시험결과, 그림 4와 같이 이득 1인 경우에서부터 이미 초기 계자전압에 훼손을 줌으로써 적절한 위상보상 시정수 및 이득의 결정이 필요하다는 것을 짐작 할 수 있으며, 그림 5에서처럼 이득을 3으로 조정했을 경우, 오히려 진동이 더욱 지속됨을 확인하였다. 이는

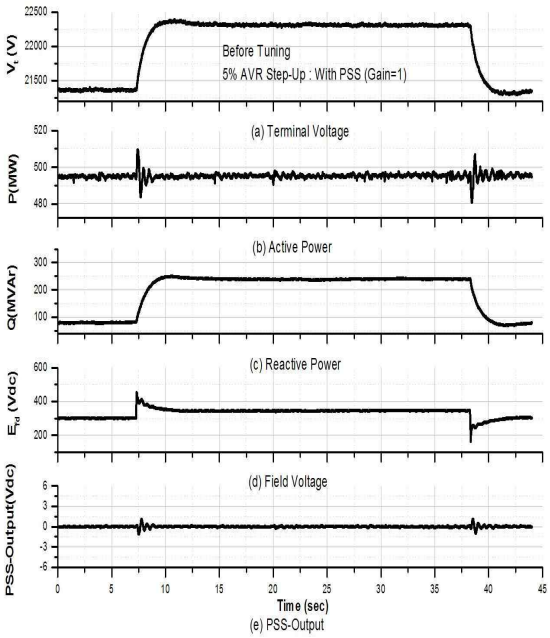

그림 4. 초기 셋팅 정수 이용시 5[%] 스텝시험 결과 (이득=1)
Fig. 4. Results of 5[%] step test for the PSS with initial setting values(Gain=1)

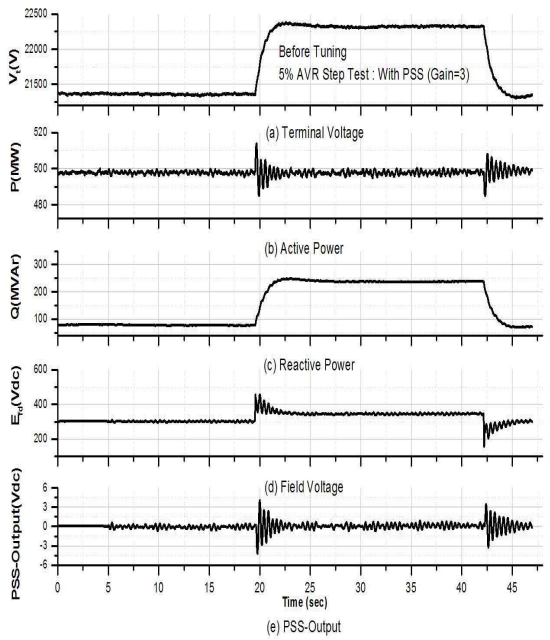

그림 5. 초기 셋팅 정수 이용시 5[%] 스텝시험 결과 (이득=3)
Fig. 5. Results of 5[%] step test for the PSS with Initial setting values(Gain=3)

PART-I 논문에서의 오프라인 시뮬레이션 결과와 정확히 일치하며, 이 결과를 통해 시험대상 발전기의 PSS는 적정하게 동작하지 않고 있으며, 정수 재튜닝이 필요함을 확신할 수 있다.

3.4 PSS 이득여유 시험(Gain Margin Test)

본 시험에서는 발전기 출력 498[MW]에서 PSS 출력을 AVR 합산지점에 연결(PSS 출력 스위치 'ON') 한 후, 아무런 외란이 없는 정상상태에서 PSS의 이득만 단계별로 증가시켰다. PSS 'Washout and Output' 보드에 위치한 이득조정 다이얼을 이용하여 이득을 0에서부터 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25까지 조정하고 각 이득에 대하여 약 20초 동안 모니터링 하였다. 모니터링 대상은 발전기 단자전압, 유·무효출력, 계자전압 및 PSS 출력이며, 이들 신호 중 하나라도 불안정한 진동이 발생하면 즉시 PSS를 OFF 시켜야 한다. GE의 PSS 이득 설정 기준(Criteria)은 PSS 루프의 이득 여유가 최소 10dB을 가져야 하며 이는 이득 불안정 지점의 약 1/3보다 작아야 한다는 것이다[7]. 시험결과, 그림 6과 같이 이득을 약 25로 조정하였을 때 단자전압, 유/무효전력, 계자전압, PSS출력에 불안정한 진동이 발생하였으므로 PSS의 이득을 약 7로 잠정결정하였다. 최종적인 이득결정은 부하시 AVR 스텝시험에서 각 이득에 대한 PSS의 댐핑효과를 검토한 후 결정하기로 한다.

3.5 AVR On-line 5[%] Step 시험

이득여유 시험에서 잠정적으로 결정된 이득값(이득=7)까지 이득을 변경시켜 각 이득값에 대한 PSS의 댐핑 효과를 검토한 후, 최종적으로 PSS 이득을 결정하였다. 이득증가에 따라 진동에 대한 PSS에 의한 댐핑 효과가 나타남을 그림 7에서 알 수 있으며, 최종이득은 7로 결정하였다. 이득이 15일 때는 오히려 진동이 더 지속되는 것으로 나타났으며, 이는 이득을 높임으로서 다른 제어모드가 불안정한 영역으로 이동한 것에 기인한 것으로 추정된다[7].

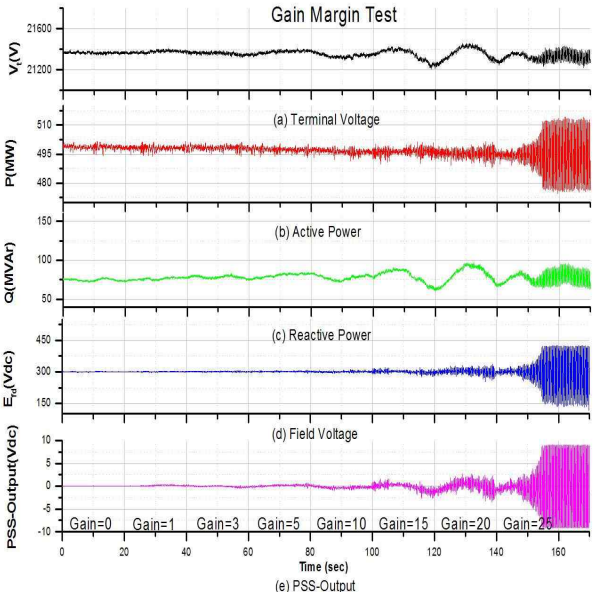

그림 6. 이득여유 시험결과
Fig. 6. Results of gain margin test

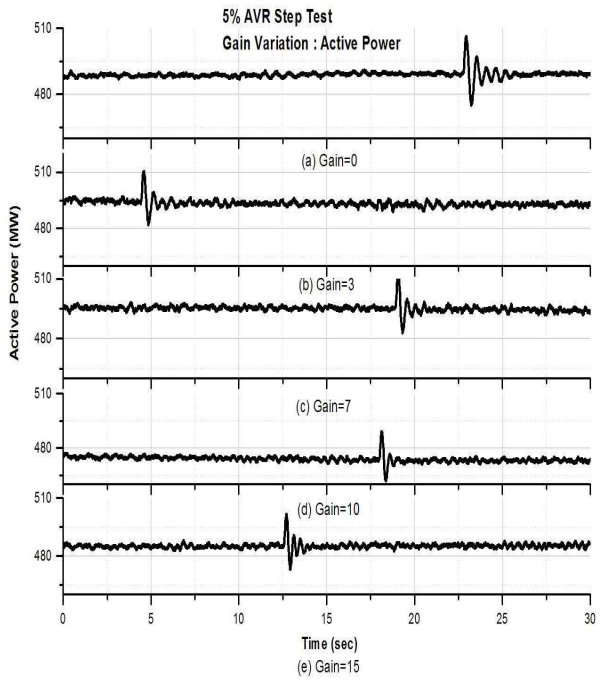

그림 7. PSS 이득변화에 따른 댐핑효과[유효전력([MW])]
Fig. 7. AVR 5[%] step responses according to PSS gain variations[P([MW])]

그림 8은 PSS의 이득변화에 따른 PSS 출력값의 변

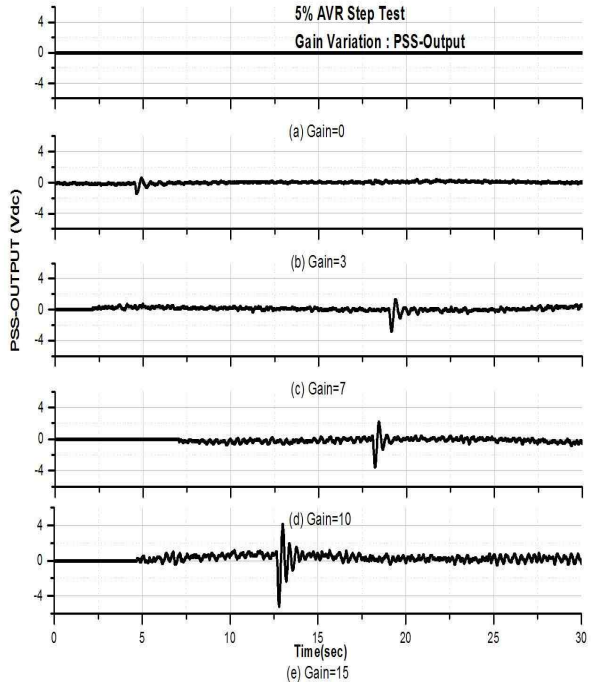

그림 8. PSS 이득변화에 따른 PSS출력변화
Fig. 8. AVR 5[%] step responses according to PSS gain variations[PSS-OUTPUT(Vdc)]

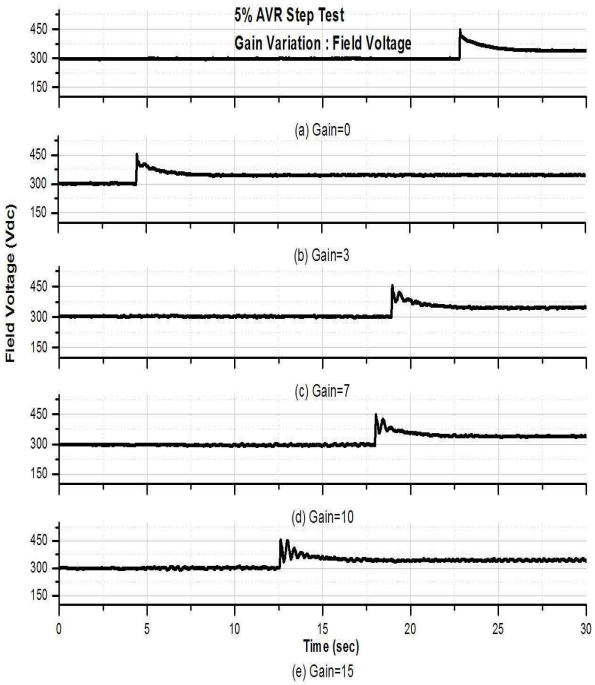

그림 9. PSS 이득변화에 따른 계자전압 변화
Fig. 9. AVR 5[%] step responses according to PSS gain variations[field voltage(Vdc)]

화이다. 이득이 클수록 PSS 출력값의 크기가 커짐을 알 수 있으며, 그림 9는 PSS의 이득변화에 따른 계자전압의 변화이다. PSS 출력값이 커짐에 따라 계자전압의 훼손정도도 비례적임을 알 수 있다. AVR 스텝-Up 시험시, 현장 판넬에 부착된 아날로그 Gauge 에서도 순간적으로 발전기 계자전압의 심한 흔들림을 관찰할 수 있다.

4. 오프라인 모의결과와의 비교 (모델검증)

오프라인 모의를 통한 결과비교를 위해서는 발전기 특성시험을 통한 현재 발전기 및 제어기의 정확한 동적모델 데이터가 필요하다. 본 논문에서 사용한 발전기 및 제어기 모델 데이터는 PART-I 논문에 제시한 바와 같이, 한전 전력연구원이 1999년에 수행한 발전기 특성시험 결과를 (GENROU /EXST3/ IEEEG1)를 이용하였다. 모의에 사용한 툴은 TSAT(Transient Stability Assessment Tool) 9.0을 이용하였으며, 무부하 3[%], 5[%] AVR 스텝시험과 PSS OFF/ ON시의 댐핑효과를 각각 비교하였다. 대상 발전기의 PSS는 발전기 축에서 나오는 속도(speed)를 입력으로 하는 'IEEEST'형으로 모의에 사용한 PSS 모델 데이터(위상보상시정수)는 PART- I의 논문에서 제시한 바와 같으며, 표 3에 다시 나타내었다.

표 3. 오프라인 모의를 통해 선정된 위상보상시정수
Table 3. Time constants for phase compensation

Time Constants	T1	T2	T3	T4
시정수(sec)	0.25	0.025	0.25	0.025

4.1 무부하 5[%] AVR 스텝 시험 결과비교

그림 10 은 무부하 5[%] 스텝시험 모의결과와 측정결과를 비교한 것으로 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며 이를 통해 오프라인에서의 튜닝에 사용한 여자기 모델 데이터가 유효함을 알 수 있다.

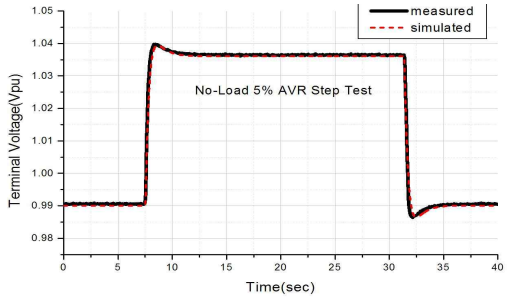

그림 10. 무부하 5[%] 스텝시험 결과비교(단자전압)
Fig. 10. Result comparison for no-load AVR 5[%] Step Test(terminal voltage)

4.2 PSS 댐핑 효과 비교

그림 11은 PSS가 없을때(이득=0), 5[%] 스텝시험을 수행한 결과, 발전기 출력([MW]) 그래프이며, 그림 12는 PSS가 있을때(이득=7)의 결과이다. 모의결과 및 측정결과 공히, PSS가 있을 때 전력 댐핑 효과가 잘 나타나고 있으며 모의결과와 측정결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

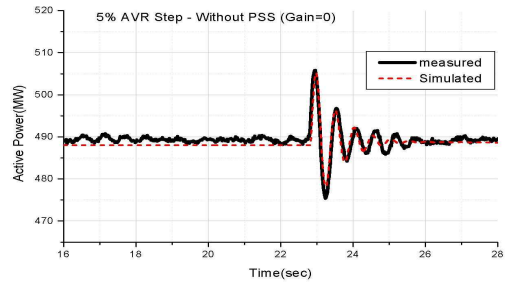

그림 11. PSS가 없을 때 결과비교([MW], Gain=0)
Fig. 11. Result comparison for AVR 5[%] Step Test([MW], Gain=0)

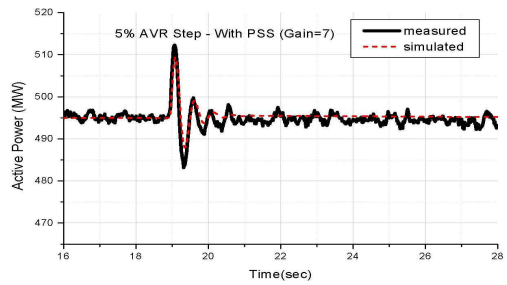

그림 12. PSS가 있을 때 결과비교([MW], Gain=7)
Fig. 12. Result comparison for AVR 5[%] Step Test([MW], Gain=7)

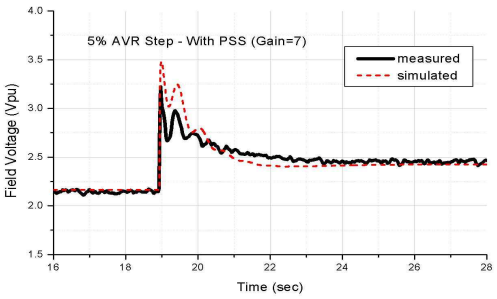

그림 13. PSS가 있을 때 결과비교(계자전압, Gain=7)
Fig. 13. Result comparison for AVR 5[%] Step Test(field voltage, Gain=7)

그림 13의 계자전압은 PSS의 이득이 7인 경우, 모의결과와 측정결과를 비교한 그림으로 크기에 다소 차이가 있지만, 응동 특성은 유사하다고 할 수 있다.

그림 11~13에 나타난 결과는 PART-I의 논문에서, 오프라인 PSS 정수 선정 모의 시 사용한 발전기 및 제어계의 모델들이 실제 설비의 특성을 잘 반영하고 있다는 것을 나타낸다.

5. 결 론

PART-I의 논문과 함께 총 2개의 논문으로 이루어진 본 PART-II의 논문에서는 612[MVA]급 대형 화력발전기에 설치되어 있는 아날로그 PSS(IEEEST)를 대상으로, 아날로그 PSS의 현장 성능시험 절차를 소개하고 성능시험을 실시하여, 제작사 초기 셋팅치로 PSS를 운전 했을때의 부적절한 효과에 대한 증명과 함께, 오프라인에서 선정한 PSS 정수들의 유효성을 실제 현장 시험을 통해 증명하였다. 또한, 시험 측정치와 모의 결과치를 비교 검증함으로써, 사용한 해석모델의 적정성을 검증하였다.

시험대상 발전기는 아날로그 PSS가 여자시스템에 부착되어 운전하는 형태로써, 터빈 축에서 나오는 발전기 속도(speed)를 입력신호로 사용하는 단일입력 PSS이다. 발전기 속도를 입력으로 하는 대부분의 아날로그 PSS는 터빈 축 진동 모드(torsional frequency)를 제거하기 위한 축 진동 필터가 내장되어 있으며, 본 시험대상 발전기도 동일한 형태이다. 본 PSS는 2단의 진지상 위상보상 회로와 washout 및 이

득정수 설정을 위한 회로로 구성되어 있으며, PSS 연산회로의 고장검출용으로 비교회로를 별도로 추가해서 제어신호가 정상인지를 판별하고 있다. 따라서, 제어신호에 문제가 있으면 자동적으로 PSS를 OFF하게 된다. 이와 같이, 우리나라 500[MW]급 표준 석탄화력 발전기에는 동일한 형태의 아날로그 PSS가 설치되어 있는데, 유지보수 및 튜닝, 성능의 관점에서 볼 때, 이들 PSS는 디지털 형태의 다중입력 방식 PSS로 교체할 필요가 있다.

References

[1] 신정훈, 이재걸외 , "대형 화력발전기 전력계통 안정화장치(IEEEST-PSS)의 정수선정 기법과 실계통 적용: PART I-오프라인 해석을 통한 PSS 정수선정", 조명전기설비학회논문지 제23권 제12호 pp.194-200, 2009.12.

[2] 지식경제부 고시 제2005-11호(2005.1.24), "전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준".

[3] F.P. deMello, C.Concordia, "Concepts of Synch- ronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans. Vol. PAS-87, June, 1969, pp. 316-329.

[4] NERC Standards, Avaliable: http://www.nerc.com.

[5] NERC/WSCC Publication doc. Avaliable: http://www.wecc.biz.

[6] WSCC Modeling Working Group, "Criteria to deter mine excitation system stability for PSS in WSCC system", presented at the WSCC Working Group Meeting, San Diego, CA, 1993.

[7] 한국전력공사, "발전기 제어계통 안정화 장치(PSS) 개발연구"최종보고서, 2002.3.

[8] 신정훈, 김태균, 김동준, 문영환, 백영식, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구, PART Ⅱ:PSS 실계통 최적 정수 선정을 위한 튜닝 기법", 대한전기학회 논문지, 제49권 제7호, 2000.7.

[9] 김동준, 문영환, 신정훈, 김태균 "PSS 정수튜닝을 위한 전력시스템 미소신호안정도 해석 프로그램", 대한전기학회 논문지 제52권 제5호, 2003.5.

[10] 김동준, 문영환, 김태균, 신정훈, "PSS 튜닝을 위한 기본 연구 PART Ⅰ: 계통 운전조건에 따른 토크 특성분석", 대한전기학회 논문지 제48권 제9호, 1999.9.

[11] 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.

[12] P.Kundur, D.C.Lee, H.M.Zein El-Din, "Power Sys tem Stabilizers for Thermal Units", Analytical Techniques and On-Site Validation, IEEE Trans. Vol. PAS-100, No. 1, January 1981, pp. 184-198.

[13] P.Kundur, Power System Stability and Control, MacGraw-Hill, 1994..

◇ 저자소개 ◇

신정훈(申政勳)
1969년 1월 6일생. 1993년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 한국전력공사 입사. 2002~2010년 한국전력공사 전력연구원 선임연구원. 2010년~현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원.

남수철(南守喆)
1978년 7월 18일생. 2001년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2006년 고려대학교 전기공학과 졸업(석사). 2006년 한국전력공사 입사 2006년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임보연구원.

백승묵(白承默)
1979년 6월 6일생. 2006년 연세대학교 기계전자공학부 졸업. 2007년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(석사). 2010년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(박사). 2009년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원.

송지영(宋智永)
1983년 7월 23일생. 2008년 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2010년 고려대학교 전자전기공학과 졸업(석사). 2010년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원.

이재걸(李宰杰)
1976년 8월 19일생. 2002년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2004년 인천대학교 전기공학과 졸업(석사). 2004년 한국 전력공사 입사. 2007~2010년 한국전력공사 전력연구원 일반연구원 2010년~현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원.

김태균(金泰均)
1964년 11월 28일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1989년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 1996년 한국전력공사 입사. 1996년~현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원.