

한림가스터빈 발전기/제어계의 모델링 및 PSS 동작의 정성적 분석

최경선, 문영환, 김동준  
한국전기연구소

류승헌, 추진부  
한전 전력연구원

Modeling of Hanlim's gas turbine generator & qualitative analysis of PSS operation

K.S. Choi, Y.H. Moon, D.J. Kim  
K.E.R.I

J.B. Choo, S.H. Lyu  
K.E.P.R.I.

*Abstract : Response speed of generator/control system has increased with the aid of the development of power electronics. Even though it is desirable to enhance response speed for the control system(AVR/Gov) of generator itself, in case a certain generator/control system with high response excitation system is connected with bulk power system, terminal voltage and active power of some generators can oscillate with adjoining generators or near area when even a little of disturbance take place. PSS(Power System Stabilizer) is used to damp rotor swing by adding the supplementary signal in phase with speed. As the stable AVR response is very important before PSS is installed, modeling and analysis of generator/control system was performed. Next we have analysed PSS response of Hanlim's gas turbine by transmission line open/close test.*

1. 서론

전력계통의 발전기/제어계의 응답속도는 급속한 전력전자분야의 발전과 더불어 갈수록 그 속도는 증가추세에 있으며, 계통에서 차지하는 비율도 증가하고 있다. 기존의 시스템은 응답율(Reponse Ratio)가 1.5 이하인 직류여자, 자기증폭의 여자, 교류여자등의 느린 제어시스템이 대부분이었으나, 최근에는 SCR 등의 thyristor의 등장으로 여자시스템에 회전부분이 없어진 정지형 여자방식이 주류를 이루고 있다. 정지형여자방식은 응답율이 2.0이상인 속응여자방식이다. 어느 한 발전기의 여자제어시스템의 응답속도가 빨라지는 것은 바람직하지만, 속응성의 발전기가 복잡하고 거대한 계통에 연결되어 있을 때에는 오히려 소신호안정도 측면에서 불안정을 야기할 수도 있다. 이는 제어계통의 응답속도가 빠르므로 조그만 외란에도 제어기는 민감하게 반응하여 안정화하고자 노력(fighting)하기 때문이다. 이러한 각 발전기들의 노력이 전체적인 시스템을 두고 볼 때, 일부 발전기간 혹은 지역간의 진동이라는 나쁜 영향을 초래하게 된다. 더욱이 전력계통의 제어계통의 속도는 디지털화에 의해 더욱 증가하는 현 상향에서, 앞으로의 전력계통의 안정도는 더욱 악화될 전망이다. 여기에 대한 대책으로서 이미 전력계통안정화장치(Power System Stabilizer)가 설치/운전되고 있다. 이 장치의 기능은 동요가 있는 지역의 발전기군의 AVR에 PSS출력신호를 가하여 발전기 회전자의 진동에 댐핑을 줌으로써, 발전기 출력진동을 억제하는 것이다. PSS는 모든 발전기에 설치할 필요가 없으며, 계통의 취약지역에만 설치하여야 하고, PSS의 적정 파라미터 설정이 매우 중요하다. 불필요한 곳에 PSS를 설치한다면, 취약지역에 설치하더라도 적정 PSS 파라미터가 설정되지 않은 채 운전된다면 계통의 안정도를 더 악화시킬 수 있다. 또한 PSS 설치에 앞서

제어계통에 대한 시험을 하여 IEEE Standard에서 제시하는 제약조건을 만족시키는지를 검토하여야 하며, 만약 그렇지않다면, 발전기 제어계통의 파라미터 튜닝이 우선 수행되어야 한다. 본 논문의 2장에서는 PSS의 동작원리를 소신호안정도측면에서 고찰하고, 3장에서는 발전기 및 제어계통의 특성시험결과를 이용하여 수학모델링 및 제어계통의 응답을 분석하였다. 4장에서는 선로차단시험을 하여 PSS의 효과를 정성적으로 분석하였다.

2. PSS파라미터와 시스템안정도

서론에서 이미 언급되었듯이, PSS의 기능이 제대로 발휘되기 위해서는 제어계통의 동작이 적절한 제약조건(IEEE Std.)을 만족시켜야 한다. 아래 그림 1.은 시간영역에서의 여자제어시스템의 Step응동결과이며, 평가지수에는 지연시간 상승시간, 정정시간, 오버슈트가 있다. 그림 2.는 여자제어시스템의 주파수응답을 도식한 것이며, 평가지수에는 이득여유, 위상여유, 차단주파수등이 있다.

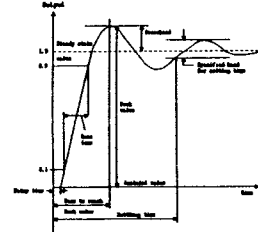


그림 1. 스텝인가시 전형적인 여자시스템의 시간응답

발전기 무부하상태에서 전형적인 여자시스템의 개루프응답 특성은 아래 그림 2.와 같다.

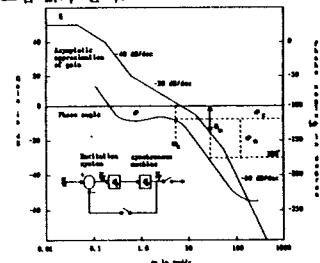


그림 2. 전형적인 여자시스템의 개루프응답 특성

관련된 성능지수는 저주파수 이득(G), 고차 주파수( $\omega_c$ ), 위상여유( $\Phi_m$ ), 이득여유(Gm) 등이 있다. 저주파수 이득이 클수록 더 안정된 전압제어가 되고, 고차 주파수가 클수록 여자제는 더 빨리 응답한다. 위상여유와 이득여유가 클수록 더 안정된 여자제어특성을 형성한다. IEEE Std.에서 제시한 언정된 제어시스템이 되기 위한 제약조건은 아래와 같다.

- 이득여유  $\geq 6\text{dB}$
- 위상여유  $\geq 40^\circ$
- 오버슈트 = 5 ~ 15%

발전기/AVR/PSS 전체에 대한 소신호에 의한 전달함수는 그림 3.과 같다.

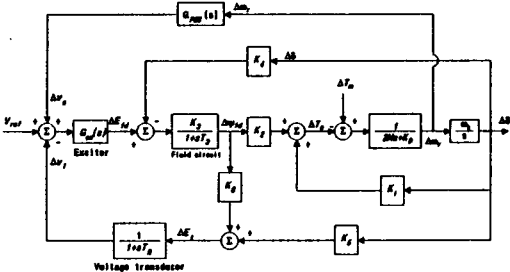


그림 3. AVR/PSS가 있는 발전기의 전달함수도

위 전달함수에 표시된 K계수들의 특징을 고찰하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 계수  $K_4$ 는 정상적으로는 양의 값을 갖고, 전기자반작용으로 인한 제자차속의 변화가 발생할 때, 양의 뎀핑 토오크를 발생하도록 한다.  $K_4$ 가 음수가 되는 경우는 뎀핑권선이 없는 수력기가 정부하로 운전되는 경우나, R/X의 비가 큰 line으로 큰 시스템에 연결되어 있을 경우이다. 또한 발전기가 큰 지역부하에 연결되어 있을 때도 동일한 현상이 일어난다. 계수  $K_2, K_3, K_4, K_6$ 는 보통 양수이지만,  $K_3$ 는 양수, 음수 둘 다 취할 수 있다. AVR이 동기화 토오크 및 뎀핑 토오크에 미치는 영향은 주로  $K_5$ 와  $G_{ex}$ 에 의해 좌우된다. AVR의 작용은  $K_5$ 가 음수일 때, 동기화 토오크는 증가시키고, 뎀핑 토오크는 감소시킨다. 위 전달함수를 분석해 본 결과, 동기화 토오크는 AVR의 이득이 증가할 수록 더불어 증가함을 알 수 있었다. 또한 전기자반작용에 의한 영향은 동기화 토오크는 감소시키고, 뎀핑토오크는 증가시킨다.

소신호안정도를 향상시키기 위해서 PSS파라메타가 최적으로 설정되어야 한다. 그림 3.의  $G_{pss}(s)$ 는 PSS전달함수를 의미하고 이를 구체적으로 나타내면 그림 4.와 같다.

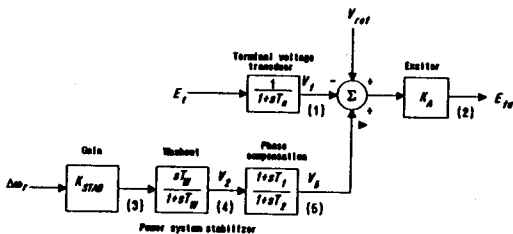


그림 4. 전형적인 PSS의 전달함수도와 AVR과의 연결관계

PSS의 위상보상은 여자기일력과 발전기의 전기적 출력토오크간의 시간지연을 보상하는 역할을 한다. PSS의 출력신호는 발전기의 속도편차방향과 동위상이 되도록 하여야만, 그 제어효과를 최대한 발휘할 수 있으므로 적절한 위상보상은 중요하다. PSS 출력신호는  $\Delta\omega$ 과 동위상이야 하므로 PSS에서  $\Delta\omega$ 를 lead-lag compensator의 파라메타 튜닝에 의해 위상을 조정하여야 한다. signal washout의 기능은 고역필터로서 시정수  $T_w$ 는 일반적으로 PSS입력신호( $\omega_r$ )를 변하지 않은 채, 그대로 통과시키는 역할을 해야하므로 충분히 큰 값을 취하도록 한다. 조정범위는 1~20초 사이이다. stabilizer gain의 기능은 PSS의 뎀핑의 정도를 조정하는 것으로서, 그 값이 클수록 뎀핑은 증가하지만, PSS의 과도한 동작은 오히려 발전기의 다른부분(예를 들면, 단자전압의 동요등)에 악영향을 줄 수 있으므로 제한을 받는다.

표 1.은 어떤 샘플 계통에 대해 PSS 유무시에 동기화 토오크( $K_d$ ), 뎀핑 토오크 계수( $K_p$ )의 변화를 정리한 것이다. PSS가 있을 때, 동기화 토오크 계수는 약간 감소하였으며, 뎀핑토오크 계수는 크게 증가하였다. 그러나 두 값 모두 양의 값을 갖는다. PSS가 없을 때에는 뎀핑 토오크 계수가 음의 값을 가질 수 있으며, 시스템 불안정의 요인이 된다.

표 1. PSS설치유무에 따른 각 평가지수의 변화 예

평가지수	Constant $E_{d0}$	AVR only	AVR and PSS
$\omega_d$	1.07 HZ	1.15 HZ	1.05 HZ
$\zeta$	0.017	-0.07	0.15
$K_d$	0.763	0.976	0.829
$K_p$	1.53	-7.06	14.08

### 3.발전기/제어계의 모델링 결과

한림북합화력 가스터빈 발전기의 AVR은 최신의 디지털 제어 방식(EX2000)을 사용하고 있다. 조속기-터빈은 MARK V 시스템이 채택/운전되고 있다. 1호기의 발전기의 일반사양은 표 2.와 같다.

표 2. 한림북합화력 가스터빈발전기(1호기)의 일반사항

항 목	내 용
시설용량(MVA)	50
정격전압(kV)	13.8
정격전류(A)	2,092
정격여자전압	125
정격여자전류	880
속도/극수	3,600/2
역률	0.85
여자방식	정지형
AVR 유형	EX2000(디지털방식)
조속기터빈제어방식	D-EHC
제 각 처	G.E.

발전기 정수유도는 부하차단시험에 의해 발전기 단자전압을 측정하여  $d$ -축 및  $q$ -축의 자속변화를 구하여 이로부터 각 축의 정수 유도를 할 수 있다.<sup>[1]</sup> 유도결과는 표 3.과 같다.

표 3.에서 유도된 값들을 검증하기 위해, PSS/E에 의해 부하차단(1.5MW-5.1MWvar, AVR/off)을 모의하고, 실측한 단자전압과 모의한 단자전압을 비교하였다. 그림 5.는 최종 튜닝된 파라메타를 이용하여 실측 및 모의 파형을 함께 그려, 모델을 검증한 그림이다.

표 3. 발전기 입력 데이터 (GENROU)

발전기 정수	유도값	계산치값
$T_{do}$	8.8	5.441
$T'_{do}$	0.0543	0.022
$T'_{gp}$	0.509	0.573
$T_{gp}$	0.08	0.044
H	6.0	5.7
D	0	0
$X_d$	2.29	2.178
$X_q$	2.021	2.033
$X'_d$	0.23	0.266
$X'_q$	0.25	0.374
$X''_d = X''_q$	0.106	0.188
$X_1$	0.1	0.162
S(1.0)	0.158	
S(1.2)	0.52	

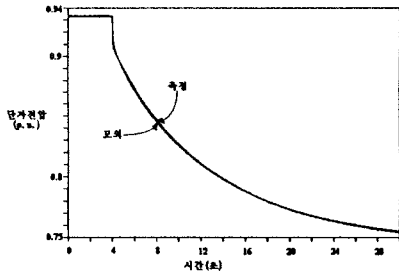


그림 5. 한림가스터빈 발전기 모델의 검증

한림화력의 여자시스템은 디지털 AVR로서 GE의 EX2000을 사용하고 있으며 AVR 회로도로부터 그림 6과 같은 수학적 모델을 할 수 있다. 제어는 일정 여자전압제어와 일정 단자전압 제어 루프로 되어 있다. 일정 여자전압제어는 초기 여자에 전압확립에만 이용되고, 정상시 AVR 운전시에는 일정 전압제어 루프만 동작한다. 따라서 아래 전달함수에서  $K_G=0$ ,  $K_{PM}=1$ ,  $K_{IM}=0$ 으로 두면 된다.

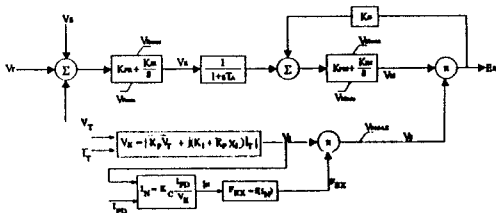


그림 6. 한림복합화력 여자시스템의 전달함수도 전압제어방식은 PI를 사용하고 있으며, 위 그림에서 일정 여자전압제어의 PI제어를 무시하면 PSS/E 모델 중에서 PI 전압제어모델인 EXPIC1을 수학적모델로 선택할 수 있다. EXPIC1 모델의 전달함수도는 그림 7과 같다.

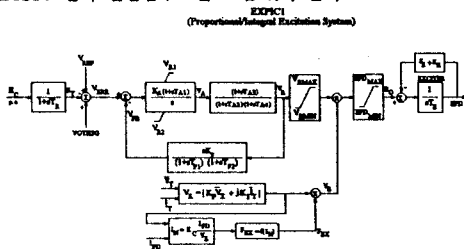


그림 7. 여자시스템 모델 (EXPIC1)의 전달함수도

표 4.는 EXPIC1 모델에 대한 계정수 유도값이다.

표 4. 여자시스템 모델 (EXPIC1)의 유도값

정수명	유도값	정수명	유도값
$T_R$	0.01	$T_{R2}$	1.0
$K_A$	19	EPD <sub>MAX</sub>	6.57
$T_{A1}$	1.5	EPD <sub>MIN</sub>	-5.0
$V_{R1}$	6.57	$K_e$	0.0
$V_{R2}$	-5.0	$T_e$	0.0
$T_{A2}$	0.0	$E_1$	1.0
$T_{A3}$	0.0	$SE_1$	0.0
$T_{A4}$	0.0	$E_2$	2.0
$V_{RMAX}$	6.57	$SE_2$	0.0
$V_{RMIN}$	-5.0	$K_p$	1.0
$K_R$	0.0	$K_I$	0.0
$T_{R1}$	1.0	$K_C$	0.0

이 값들은 AVR/on 상태 (무부하)에서 AVR Step 응답시험을 이용하여 결정된 값이다. 여자시스템 모델을 검증하기 위해, 무부하 정격속도에서 AVR Step 시험과 PSS/E 모델을 비교하여 EXPIC1 모델의 PI 정수를 튜닝하였다. 시켰다. 그림 8은 AVR 기준전압을 0.937p.u. → 0.966p.u.으로 변화시켰을 때의 측정과 모의 결과를 비교한 것이다. 양 곡선의 모차는 거의 없음을 알 수 있고, 표 4.의 유용성이 입증되었다.

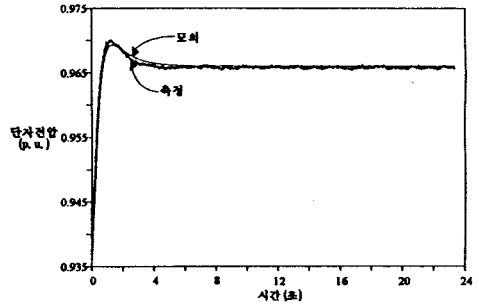


그림 8. 한림복합화력 가스터빈 발전기 1호기 여자시스템 모델 (EXPIC1)의 검증

#### 4. 한림 가스터빈발전기의 PSS 성능의 정성적 고찰

한림화력은 가스터빈 1호기와 2호기가 한 Bus에 연결되어 한주 T/L과 한림 T/L로 연결되어 있다. PSS 정수를 결정하기 위해서 한주 T/L을 개방/차단했을 때, 유효전력, 무효전력, 단자전압, 여자전압등을 측정하였다. 그림 9와 그림 10은 PSS/on 및 PSS/off시에 한주 T/L #1을 폐로했을 때, 유효전력 응답을 측정한 결과의 예이다.

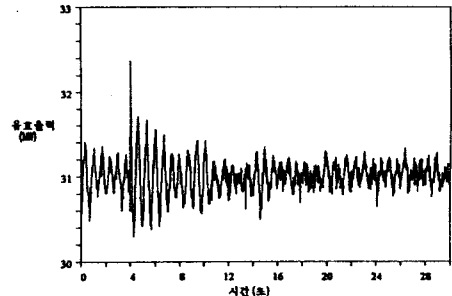


그림 9. 한주 T/L #1 폐로시 가스터빈 1호기의 출력 (PSS/on)

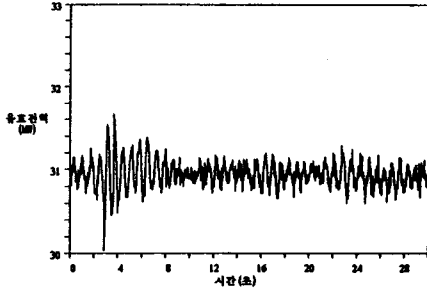


그림 10. 한주 T/L #1 페로시 가스터빈 1호기의 출력 (PSS/off)

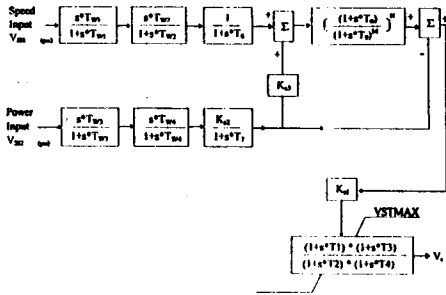


그림 11. EX2000 시스템의 PSS 모델

그림 9와 그림 10을 비교해 보면, PSS/on 시에 유효전력의 진동폭이 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 PSS 설치로 인해 오히려 출력이 더 진동된 결과이며, PSS 파라메타 설정이 제대로 되지 않았음을 알 수 있다. 차후, PSS 파라메타 설정을 위한 시험과 튜닝작업이 필요하리라 본다.

그림 11은 EX2000 시스템의 전형적인 PSS 모델을 나타낸 것이다. 여기에 해당되는 IEEE에서 제시한 모델로는 PSS2A이며, 속도와 유효전력의 두 입력을 갖는다. 두 입력에 해당되는 PSS/E 표준모델로는 IEE2ST와 ST2CUT가 있으나 PSS2A의 구조와 다소 차이가 있다. 실제 모의실험 시도했으나 진동 주파수 및 재동효과의 정도에서 차이가 발생했으며, 이는 정확한 모델링이 되는 않은 결과로 판단된다. 따라서, 정확한 현상을 재현하기 위해서 PSS/E의 표준모델이 아닌 사용자 모델을 구성하여야 한다.

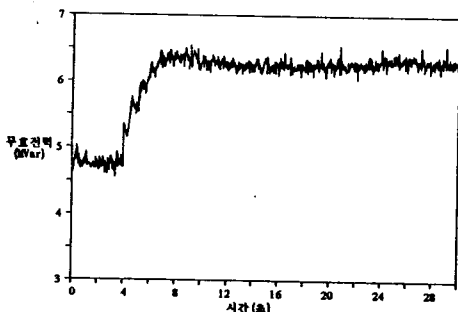


그림 12. 한주 T/L #1 페로시 가스터빈 1호기의 유효전력 (PSS/on)

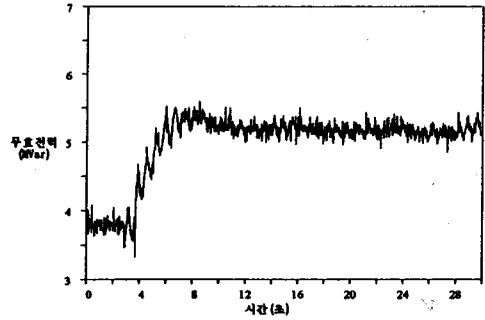


그림 13. 한주 T/L #1 페로시 가스터빈 1호기의 무효전력 (PSS/off)

그림 12와 그림 13은 한주 T/L을 페로했을 때의 무효전력을 PSS/on과 PSS/off시 각각에 대해 나타낸 것으로서, PSS/on 및 PSS/off 시에 무효전력의 변동이 틀니형태를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 두 무효전력을 비교해 보면, PSS/off 시보다 PSS/on 시에 틀니의 크기가 더 작음을 알 수 있다. 일반적으로 PSS/on 시에 유효전력 진동의 억제에 위해 AVR에 보조신호가 더해지므로 무효전력의 변동이 더 커지지만 여기서는 반대현상이 발생했다. 즉, PSS/on 시에 무효전력의 변동이 PSS/off 시보다 더 작았다. 결론적으로 한림화력의 PSS는 현재 그 기능이 어느 정도 작용하고 있으나 PSS/off와 비교해 볼 때 그 차이가 미소하며, PSS 기능을 제대로 발휘하기 위해서 차후 현장을 통한 튜닝작업이 필요하다고 본다.

## 5. 결론

한림화력의 AVR은 EX2000의 디지털제어방식의 정지형여자방식 사용하므로, AVR의 응답속도가 매우 빨랐다. 그러나 Step응동시험 결과는 안정되게 나왔다. 따라서 PSS설치에는 어려움이 없으리라 본다. 현재 한림 가스터빈 발전기에 설치되어 있는 PSS의 동작을 정성적으로 분석해 본 결과, PSS 동작효과는 미미하였다. 그리고 PSS/on과 PSS/off 시에 선로차단 후 유효전력을 비교해 본 결과, 오히려 PSS/on 시에 다소 진동의 크기가 더 크게 발생되었음을 확인했다. 그러나 그 차이는 작았다. 그리고, PSS 파라메타를 튜닝하는 과정에서 PSS의 전체 이득이 매우 작게 설정되어 있었으며, 이것이 PSS의 효과가 미미한 원인으로 판단된다. 향후, 선로차단시험 및 PSS Step응동시험에 의해 PSS 파라메타들의 튜닝작업이 필요하리라 본다. PSS에 대한 정확한 모델링은 선로차단 전의 각 선로의 조류상황 및 발전기의 초기상태 그리고 PSS의 정확한 하드웨어구조동의 정보의 부족으로 본 논문에서는 PSS 동작의 정성적인 고찰만을 수행하였다.

## 6. 참고문헌

[1]최경선, 문영환, 김동준, 추진부, 류승현, 권태인, "부하차단시험에 의한 서인전복합화력 발전기 제어계의 모델링 및 검증", 대한전기학회, 제 45 권 제 4 호, pp.501-510, 1996