

복합화력발전소 가스터빈 발전기계통 모델정수 도출 및 검증을 위한 특성시험

김종구*, 유호선**†

*한국서부발전, **†대한기계설비산업연구원

Characteristic Tests on the Gas Turbine Generator System for Determination and Verification of Model Parameters in a Combined Cycle Power Plant

Jong Goo Kim*, Hoseon Yoo**†

*Korea Western Power Co., Ltd, **†KRIMFI

ABSTRACT : In this study, a technical characteristic test was conducted on the gas turbine generator system of Seoincheon Combined cycle no.6 to derive and verify the model constants. As a result of the generator maximum/minimum reactive power limit test, the maximum reactive power limit is 80 MVar and the minimum is -30 MVar. The generator uses the GENROU model, the field time constant (T'do) is 4.077 s, and the inertial constant (H) is 5.461 P.U. Excitation system used ESST4B model to derive and verify model constants by simulating no-load 2% AVR step test, PSS modeling derived from PSS2A model constants, and simulated and compared measurement data measured when PSS off/on Did. The GGOV1 model was used for the governor-turbine, and the numerical stability of the determined governor-turbine model constant was verified by simulating a 10% governor step test through the PSS/E simulation program

초록 : 본 연구에서는 서인천복합 6호기 가스터빈 발전기계통에 대하여 기술특성시험을 실시하여 모델정수를 도출하고 검증하였다. 발전기 최대/최소 무효전력 한계시험 결과 최대 무효전력 한계는 80 MVar이고, 최소 무효전력 한계는 -30 MVar이다. 발전기는 GENROU 모델을 사용하였고, 계자시정수(T'do)는 4.077 s, 관성정수(H)는 5.461 P.U로 결정하였다. 여자시스템은 ESST4B 모델을 사용, 무부하 2% AVR 스텝시험을 모의하는 방식으로 모델정수를 도출하고 검증하였으며, PSS 모델링은 PSS2A 모델정수로 도출하였고, PSS Off/On일때 측정된 계측 데이터를 모의, 비교하여 검증하였다. 조속기-터빈은 GGOV1 모델을 사용하여 모델정수를 도출하고 검증하였다. PSS/E 시뮬레이션 프로그램을 통해 10% 조속기 스텝시험을 모의하여 결정된 조속기-터빈 모델정수의 수치 안정성을 확인하였다.

Key words : Characteristic test(기술특성시험), Generator(발전기), Excitation system(여자시스템), Power System Stabilizer(계통안정화장치), Governor-turbine(조속기-터빈)

-기호설명-

Efd : 계자(Field) 전압 (V)

Q : 무효전력 (Mvar)

Ifd : 계자(Field) 전류 (A)

Vt : 단자전압 (kV)

P : 유효전력 (MW)

† Corresponding Author, hsyoo@ssu.ac.kr

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

전력산업이 발전함에 따라 전력계통규모는 증대하고 복잡해져 운영기술의 고도화가 요구되며 전력계통의 상정고장 및 정상운전에 대한 이상 문제를 정밀 분석하고 대책을 마련하여 전력계통 운영계획에 반영해야 한다.(1)

고도 정보화 사회로 발전함에 따라 전기에너지에 대한 의존도는 이미 30%를 넘어서고 있으며 1996년 8월 10일 발생한 미국 서부계통에서의 대형 정전사고와 2003년 8월 14일 동부계통에서 발생한 정전사고 등의 계통붕괴 사고 피해는 천문학적 규모에 달하고 있다.

북미 서부계통 정전사고(1996년) 이후 서부계통신뢰도위원회(WECC)는 지역의 10 MVA 이상 1,500여기의 발전기에 대해 발전기 특성시험 지침을 마련하고 이에 따른 발전기 특성시험을 수행하여 검증된 데이터를 제출하도록 하였다.(2)

우리나라 발전소는 비수도권에 주로 위치해 있고 전력수요는 수도권에 몰려 있어 계통운영의 제약요소가 많아져 안정도의 문제가 발생할 가능성이 높으며, 더욱이 전력시장의 경쟁체제 도입에 따른 신뢰도의 확보가 중요해졌다.(3) 따라서 전력계통 계획 및 운영의 신뢰도를 확보하기 위한 발전기·제어계의 기술 특성자료가 요구되고 있다. 이러한 이유로 산업부 고시 “전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준”(제32조)에 의거 발전설비 신·증설시 기술 특성자료를 제출하여야 한다.(4)

서인천복합 6호기는 1992년 12월 준공 이후 한 번도 특성시험을 하지 않은 발전설비로서 본 논문에서는 서인천복합 6호기에 대하여 발전설비 기술특성시험을 수행하고 측정된 데이터를 분석하여 신뢰도 있는 PSS/E 프로그램의 발전설비 모델정수를 도출하고 검증하고자 한다.

1.2 연구내용 및 방법

서인천복합 6호기 가스터빈 발전기계통의 발전설비에 대한 발전기·제어계 특성시험을 2019년 06월 16일에 수행하였다. 특성시험은 K-DSM 계측장비를 설치하고 순차적으로 시험항목을 실시하였다.

발전기 모델정수, 여자시스템 모델정수, 계통안정화장치(Power System Stabilizer, 이하 PSS) 모델정수, 그리고 조속기-터빈 모델정수 등을 결정하고 검증하였고, 도출된 모델정수는 PSS/E 프로그램을 사용하여 모의된 결과와 측정된 데이터를 비교하는 방식으로 검증하였다.

2. 발전기계통 모델정수 도출 특성시험

2.1 시험 대상 복합화력발전소

서인천복합발전소는 LNG 연료를 사용하는 복합발전소로 1Unit(C/C)당 가스터빈 1기와 스팀터빈 1기로 운영되며 총 8Unit로 구성되어있다. Unit당 설비용량은 가스터빈 발전기가 215.7 MVA, 스팀터빈 발전기가 100.7 MVA이고, C/C당 발전 출력은 보통 225 MW 정도로 총 1,800 MW의 전력을 생산할 수 있다.

2.2 발전기 무효전력 한계시험 및 관성정수 결정

무효전력 한계시험(Reactive Power Limit Test)의 목적은 발전기가 정격출력 100%에서 최대·최소로 출력할 수 있는 공급능력을 확인하는 시험이다.(5) 이 시험을 통해 도출된 최대 무효전력 값은 조류 안정도 계산의 한계치로 제공된다.(6)

2019년 06월 16일에 실시한 서인천복합 6호기 GTG 무효전력 한계시험은 약 180 MW에서 실시하였다. GTG의 최대무효전력은 약 82 MVar에서 단자전압 Setter 105% 상한 설정치에 의해 제한되어졌고, 최소무효전력은 -38 MVar 부근에서 단자전압 Setter 95% 하한 설정치에 의해 제한되어졌다.

관성정수(발전기와 터빈 포함) 결정은 부하차단 시험시의 발전기 가속 주파수 기울기로부터 계산된다.(7) GTG의 경우 1차 부하차단(20.125 MW, 20.088 MVar) 후 발전기 가속 주파수로부터 관성정수를 구하면 식 (2-1)과 같이 H는 5.461 P.U로 계산된다.

$$H = \frac{\Delta P_a}{2 \frac{d\omega}{dt}} = \frac{20.125 MW / 215.7 MVA}{2 \times 0.008642} = 5.461 P.U \quad (2-1)$$

2.3 여자시스템 및 계통안정화장치 정수 결정 시험

서인천복합 6호기 GTG의 여자시스템은 전력연구원에서 개발한 맥스파워사의 KDR-2100으로 직접여자방식의 정지형 여자기이다. PSS/E 프로그램에서 적당한 여자시스템 모델은 제작사에서 제공한 모델과 같은 ESST4B 모델이다.

서인천복합 6호기 GTG의 경우에도 여자시스템에서 정격 단자전압의 2% 스텝 입력 값으로 무부하 AVR 스텝시험을 실시하였다. 모의 결과 GTG의 제작사 계자시정수 값은 현장시험 결과에 비추어 동일한 응답속도로 나타난다. 따라서 모의를 통해 결정된 계자시정수 값은 4.077 s 이며 제작사 값과 동일하다.(결정된 T'do = 4.077 s)

GTG의 무부하 AVR 2% 스텝시험에서 측정된 과도이득은 식 (2-2)와 같이 약 34 P.U로 계산되어진다.

$$K_{TC} = \frac{\Delta E_{fd}}{\Delta V_{ref}} = \frac{(167.6 - 99.8)/99.8}{0.02} = 34.0 P.U \quad (2-2)$$

서인천복합 6호기 GTG의 PSS 응답시험은 약 160 MW 출력에서 PSS/Off인 경우와 PSS/On인 경우에 각각 2% 온라인 AVR 스텝시험을 수행하였다. 제작사 PSS모듈 내에 입력되어진 파라메타 값을 기초로 하여 PSS2A 모델정수로 사용하였다. PSS 모델정수 중 Ks2 관성이득은 서인천복합 6호기 GTG의 도출된 관성정수(H=5.461 P.U)를 이용하여 계산된 값으로 0.183 P.U이다.

2.4 조속기-터빈 정수 결정 시험

서인천복합 6호기 가스터빈의 조속기-터빈 모델은 Fig. 2-5와 같이 PSS/E 프로그램의 GGOV1 모델로 결정할 수 있다. GGOV1 모델은 GE General Governor/ Turbine Model로 기존의 GAST2A 모델보다 안정적이고 GAST 모델보다 더 정교하다.

조속기 Droop 모델정수는 제작사 값이 4%로 되어있으나, 0.3 Hz 스텝에 따른 조속기 스텝응답 시험결과 6호기 GTG 조속기 Droop 모델정수 R 값은 식 (2-3)과 같이 약 4.2%로 결정되었다.

$$R = \frac{\Delta f}{\Delta P} = 4.2\% \quad (2-3)$$

3. 모델정수 검증 및 고찰

3.1 검증 방법

서인천복합 6호기 가스터빈 발전기계통의 정확한 발전설비 모델정수 도출하기 위해서 발전설비 기술특성시험을 2019년 6월 16일에 실시한 후 측정된 데이터를 이용하여 발전기, 여자시스템, PSS, 그리고 조속기-터빈의 모델정수를 도출하였다. 도출된 모델정수는 PSS/E 과도안정도 프로그램을 사용하여 모의한 후 AVR 2% 스텝시험 등을 통해 측정된 데이터와 비교하는 방식으로 검증하였다.

3.2 발전기

서인천복합 6호기 최대/최소 무효전력 한계시험에서 GTG의 측정된 결과는 Table 3-1과 같다. GTG의 경우 정격 194 MW 출력에 해당되는 정격 무효전력은 약 90 MVar이다. 최대 무효전력 한계시험은 정격보다 낮은 약 164 MW 부근에서 실시하였고, 시험결과 정격 무효전력보다 약간 낮은 82 MVar에서 여자시스템에 설정되어진 단자전압 Setter 105% 상한 설정치에 의해 제한되어졌다. 이때의 발전기 단자전압은 101.2%였고, 이 운전조건에서 15분간 연속 운전하여 최대 무효전력 운전점을 확인하였다.

결국 무효전력 한계치 시험 결과와 계통 안정도를 고려할 때 서인천복합 6호기 GTG의 최대 무효전력 한계치는 80 MVar 정도이고, 최소 무효전력 한계치는 -30 MVar 정도이다.

Fig. 3-1은 관성정수(H)가 5.461인 경우 1차 부하차단(20.125 MW) 시 측정된 단자전압 주파수와 모의된 발전기 속도를 비교한 파형이고, Fig. 3-2는 2차 부하차단(28.641 MW) 시 측정된 단자전압 주파수를 비교한 결과

Table 3-1 Max/Min Reactive power limit test result

Division	Vt (kV)	P (MW)	Q (MVar)	I _{fd} (A)	E _{fd} (V)	Limit
Max	13.9	164.2	82.7	1210.1	257.8	Voltage Setter 105%Max(101.2%)
Min	13.2	165.5	38.1	869.2	183.2	Voltage Setter 95%Min(95.7%)

이다. 부하차단 후 모의된 초기 속도 상승률이 측정된 주파수의 초기 기울기와 일치하고 있다.

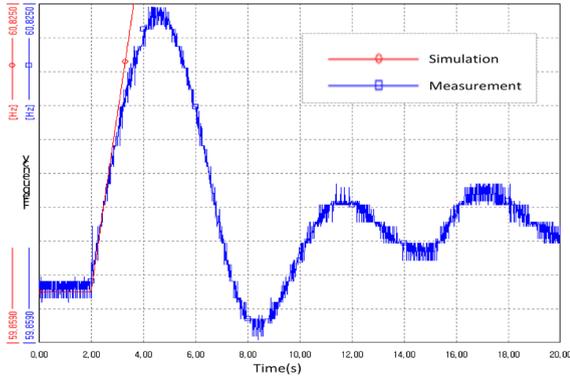


Fig. 3-1 1st Load (20.125 MW) rejection test / frequency

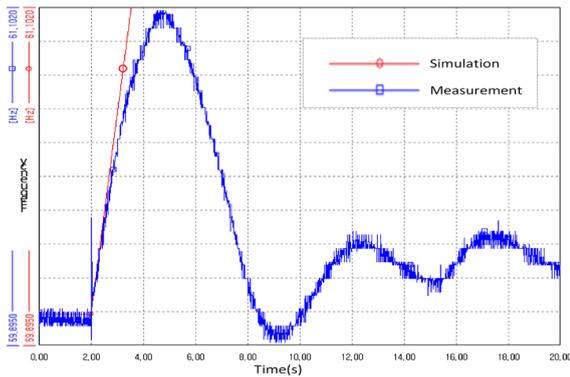


Fig. 3-2 2nd Load (28.641 MW) rejection test / frequency

3.3 여자시스템 및 계통안정화장치

무부하 AVR 스텝시험에서 측정된 발전기 단자전압과 계자전압을 이용하여 여자시스템 모델정수를 튜닝하였고, 결정된 모델정수는 측정된 결과와 비교하여 검증하였다. Fig. 3-3은 결정된 여자시스템 모델정수와 발전기 모델정수를 이용하여 무부하 2% AVR 스텝인 경우 단자전압을 모의하고 측정된 결과와 비교하여 모델정수를 검증한 것이다. 두 파형은 거의 일치하며 다른 정수 값인 경우 측정된 파형을 재현해 낼 수 없다. 모의된 발전기 단자전압은 측정된 단자전압의 과도 기울기를 잘 모의하고 측정된 정상상태 값으로 잘 수렴한다.

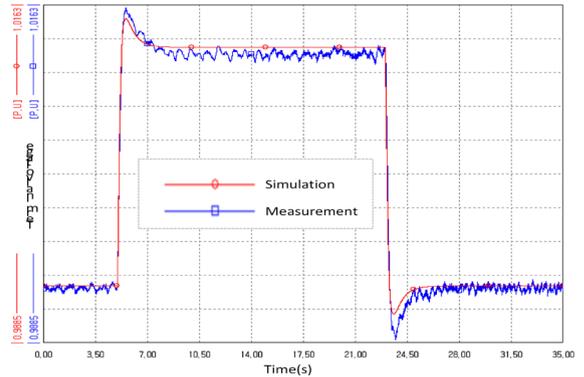


Fig. 3-3 Offline 2% AVR step up&down / terminal voltage

Fig. 3-4는 PSS가 Off인 경우 2% 온라인 AVR 스텝시험 시 측정된 유효전력과 모의된 유효전력을 비교하고 있다.

Fig. 3-5는 PSS를 On한 경우 측정된 유효전력과 모의된 유효전력을 비교하고 있다. 약 160 MW에서 온라인 2% AVR 스텝시험 시 비교된 두 결과는 전력동요를 제 3파에서 제동하고 있음을 보여준다. PSS가 없는 경우는 전력동요가 5파 이상 진행되었다. 따라서 서인천 6CC GTG의 동작 중인 PSS는 전력동요의 제동효과를 일정부분 가지고 있음을 알 수 있다.

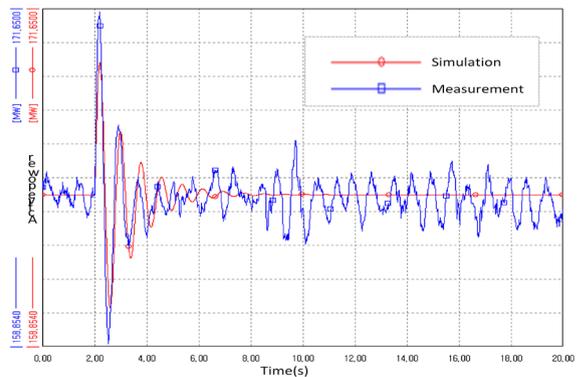


Fig. 3-4 PSS Off 2% AVR step / active power

3.4 조속기-터빈

서인천복합 6호기 GTG의 조속기 모델정수를 도출하고 검증하기 위해 140 MW 출력 조건에서 조속기 속도 스텝

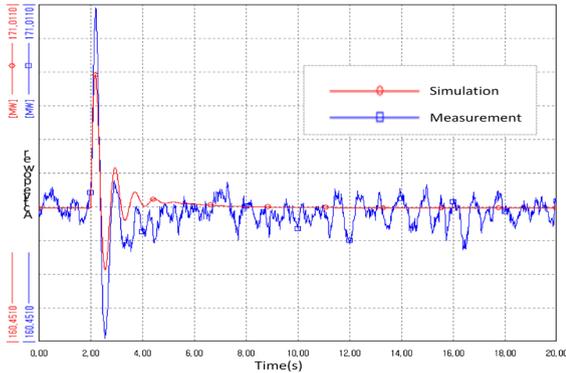


Fig. 3-5 PSS Off 2% AVR step / active power

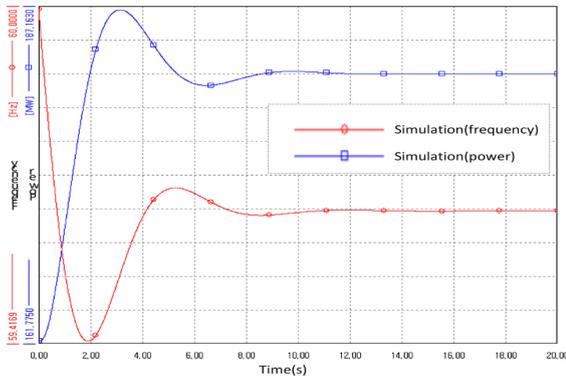


Fig. 3-6 GRUN model governor step / simulation power and frequency

시험을 실시하였다.

또한 모의를 통해 측정된 파형에 대한 특성이 가장 유사하게 재현되는 조속기 PI 이득정수와 터빈이득, 그리고 Actuator 시정수 값을 결정하였다.

Fig. 3-6은 PSS/E 프로그램의 GRUN 모의를 이용하여 조속기 스텝시험을 모의한 것으로 기계적 출력(MW)과 터빈 속도(Hz)를 보여준다.

조속기 스텝시험 모의는 발전기 초기 출력조건이 161.78 MW(0.75 P.U)에서 10%에 해당하는 21.57 MW (0.1 P.U) 스텝을 입력하여 출력이 약 180 MW까지 증강하는 것으로 하였다. 이 모의로부터 서인천복합 6호기 GTG의 결정된 GGOV1 모델정수가 안정한 특성을 보여준다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

안정적인 계통운영과 효율적인 계통계획을 위해서 발전 설비 동적 모델 데이터가 계통의 동특성을 정확하게 반영해야 한다. 정확한 발전설비 모델정수를 도출하기 위해서 서인천복합 6호기에 대한 발전설비 기술특성시험을 실시한 후 측정된 데이터를 이용하여 모델정수를 도출하였다. 도출된 모델정수는 PSS/E 프로그램을 사용하여 모의한 후 측정된 데이터와 비교함으로써 검증하였다. 결과에 대한 고찰을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 발전기 무효전력 한계치 시험 결과와 계통 안정도를 고려할 때 최대 무효전력 한계치는 180 MW 기준 단자전압 설정치 105% 상한에 해당하는 80 MVar이고, 최소 무효전력 한계치는 180 MW 기준 단자전압 설정치 95% 하한에 해당하는 -30 MVar이다. 원통형 발전기 모델인 GENROU 모델을 사용하였고, 발전기 계자시정수는 4.077 s, 관성정수는 5.461 P.U로 결정하였다.
2. 여자시스템은 제작사 제공 모델인 ESST4B를 사용하였고, PSS는 시스템에 입력되어진 파라메타 값을 참고하여 PSS2A 모델정수로 도출하였다. 160 MW에서 측정된 온라인 2% AVR 스텝시험 결과 PSS가 Off인 경우 5 파 이상의 전력진동이 관찰되었으나, PSS On인 경우 약 3파의 전력진동만 관찰되어 PSS의 제동효과가 확인되었다.
3. 조속기-터빈 모델링은 GGOV1 모델을 사용하였고, Droop 모델정수는 현장 조속기 속도 스텝시험 결과를 통해 4.2%로 결정하였다. 10% 조속기 스텝시험과 3상 단락사고를 상정 모의하여 안정성을 확인하였다.

참고문헌

- (1) 이용희, 2018, 발전기 모델정수 도출을 위한 부하각 보정 알고리즘에 관한 연구, 전남대학교, pp. 1
- (2) 김동준, 2006, 발전기 안정도 해석 파라메타 도출 및 검증 기법 표준화 연구, 한국전력거래소, pp. 31
- (3) 임승현, 2017, 발전기 기술특성시험을 이용한 발전기 모델정수 도출 및 검증, 충남대학교, pp. 2

- (4) 산업통상자원부, 2019, 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준(고시 제2019-176호)
- (5) 김용학, 곽노홍, 손현일, 신정훈, 심응보, 오세일, 차승태, 최준호, 2007, 전력계통 안정성 향상을 위한 발전기 제어계 특성시험 및 모델링, 대한전기학회, pp. 473
- (6) 김상돈, 2014, 산업플랜트 동기발전기 운전특성 및 특성데이터 취득 시험 연구, 고려대학교, pp. 74
- (7) CWG & MVWG, 1997, Test Guidelines for Synchronous Unit Dynamic Testing and Model Validation, WECC. www.wecc.biz