

## 전력계통 안정성 향상을 위한 발전기 제어계 특성시험 및 모델링

차승태, 김용학, 오세일, 최준호, 신정훈, 심응보, 곽노홍, 손현일  
한전 전력연구원

### Generator Testing and Model Validation for Thermal Plant

S.T Cha, Y.H Kim, S.I Oh, J.H Choi, J.H Shin, E.B Shim, N.H Kwak, H.I Son  
Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

**Abstract** - The Jeju power grid experienced several major power disturbances over the last decade. The postmortem studies of the incidents indicated that some of the generating units did not respond as predicted by system analysis & studies. Consequently, the Korean Power Exchange (KPX) mandated that all units (generators, excitation, governor and turbine systems) in the Korean network greater than or equal to 20MVA be tested to verify the generator reactive power limits as well as the dynamic model data being used for system studies. This paper presents field experiences of the authors in testing and modeling of steam turbines and their associated governors during the generator and model validation.

피던스를 결정하기 위한 4회의 부하차단 시험으로 수행된다. 측정된 데이터는 다음과 같이 정수를 유도/검증하는데 사용된다.

#### 2.1.1 무부하 개방포화곡선 시험

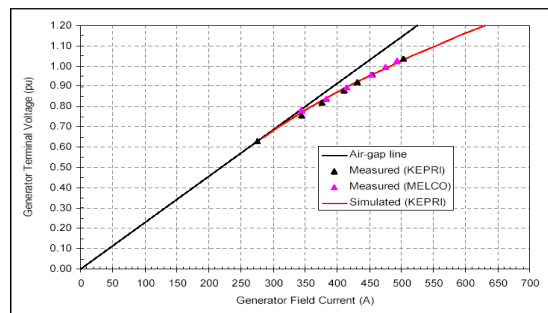
발전기 무부하 개방포화곡선 시험은 발전기를 무부하 상태에서 정격 회전수로 운전하며, GCB 차단기가 개방된 상태에서 계자전류를 변경하여 단자전압 증감함으로써 계자전류와 유도기전력의 관계를 구한 때의 양자의 관계를 나타낸 무부하 포화곡선을 작성한다. 아래의 표1은 무부하 개방포화곡선 시험 시 측정된 데이터를 보여준다. 그림1은 측정된 데이터를 이용해서 얻어진 무부하 포화곡선이다. 그림1의 ▲는 특성시험 시 측정된 고정자전압 데이터로써, 측정범위가 8.68kV~14.29kV 사이의 값이다. 발전기 보호차원에서 아주 낮은 단자전압과 높은 단자전압을 측정되지 못했으므로, 측정된 표1의 데이터를 보간하여 포화곡선을 유도하면 그림1과 같다. 따라서, 완전한 무부하 포화곡선을 얻기 위해서는 측정하지 못한 단자전압 범위까지 보간할 수 있는 방법이 필요하다. 표1로부터 2개의 포화계수를 유도하면 아래와 같으며, 발전기 단자전압을 1.0pu로 하는 공극선에 대한 기본 계자전류는 437.7A로 결정된다. 본 시험에서는 최적화 기법을 적용하여 측정된 데이터를 지수함수로 표현하고, 계산된 지수함수를 외삽하여 무부하 포화곡선을 최종적으로 작성하였다. 참고로 현장에서 V/Hz 셋팅값이 1.05pu/pu로 설정된 관계로 발전기 단자전압을 1.05pu 이상 증가하여 시험을 수행하지 않았다.

## 1. 서 론

전력계통을 신뢰성 있고 안정되게 운용하기 위해서 전력계통 설비 및 발전 설비의 정확한 동적 모델을 사용하여 전력계통에 발생할 수 있는 다양한 고장 및 외란에 대한 해석이 필요하다. 특히, 송전선로고장, 발전기 탈락 및 부하변동에 의한 전자기/기계적 과도현상을 보다 정밀하고 정확한 해석을 할 수 있다. 상기로부터 얻어진 모의결과는 전력계통 계획 기초 자료로 활용 및 안정적인 계통운영에 활용된다. 또한, 작은 외란에도 다양한 비선형 현상들이 나타나는 대규모 전력계통의 해석, 계통 내에 존재하는 여러 제어·보호기기들간의 복잡한 상호 작용으로 인해 계통에서 발생하는 현상을 예측하거나 해석 및 전력계통 현상 모의에 의한 취약한 계통에 대한 대책·대안을 제시할 수 있다. 이와 같이, 정확한 동적 모의를 위해서는 사용하고 있는 발전설비의 동적 특성에 대한 안정도 모의결과와 모델정수에 크게 의존한다. 따라서, 전력계통의 경제적/안정운영과 합리적 계획수립을 위한 발전기 및 여자시스템의 적정 제어능력 검증과 제어능력 한계에 대한 정확한 안정도 해석용 데이터를 확보하는 것이 매우 중요하다. 최근 우리나라도 전력수요 증가에 따른 발전공급 증가로 전력계통의 전력수송 밀도는 지속적으로 증가하는 추세이다. 특히, 전력계통이 대규모화, 루프화 되면서 제약 요소가 상대적으로 많아지고 과거에는 경험하지 못하였던 선진국형 전압안정도 및 미소신호안정도 문제의 발생 가능성이 높아지고 있다. 이러한 전력 환경 변화 및 전력시장 운용의 신뢰도 확보 측면에 있어 국내에서도 발전기 및 제어계에 관한 안정도 해석 모델 정수 확보의 중요성을 오래 전부터 인식하고 전력계통 안정성 향상을 위해서 발전기 특성시험을 수행하고 측정된 데이터 분석을 통하여 발전기 및 제어계 모델 정수를 유도·결정하였다. 발전기 특성시험의 주요 내용으로는 발전기 임피던스를 유도하기 위한 온라인 측정시험, 포화계수 유도를 위한 무부하 개방포화시험, 여자계 정수를 결정하기 위한 AVR 스텝 시험, 무효전력출력 한계치 성능시험 및 발전기 시정수 및 임피던스 결정하기 위한 4회의 부하차단 시험으로 구성된다. 특성시험 시 측정된 신호는 PT, CT, 계자전압, 계자전류, 조속기신호, PSS신호, 주증기 및 축속도 신호를 포함하며, 노트북을 기본으로 하는 데이터취득시스템인 Tabula System(TS)장비에 의해서 모든 현장데이터가 취득된다. 향후, 정확한 데이터를 이용하여 계통해석을 수행함으로써 계통운영 시 보다 정확한 계통운영 여유도를 확보할 수 있으며, 이는 결국 전력계통에서 생길 수 있는 여러 문제들에 대한 적절한 대응을 가능하게 하여 그에 따른 막대한 경제적 손실을 줄일 수 있다.

Field Current (A)	Field Voltage (V)	Terminal Voltage (kV)	Generator Speed (Hz)
275.16	32.15	8.68	60.02
344.51	39.99	10.44	60.02
376.16	43.42	11.29	60.01
410.01	47.19	12.15	60.01
431.58	49.58	12.89	60.01
455.22	52.09	13.24	60.01
502.98	57.45	14.29	60.01

<표 1> 무부하 개방포화곡선 시험 취득 데이터



<그림 1> 무부하 포화곡선

## 2. 본 론

### 2.1 발전기 및 제어계 특성시험

발전기 및 제어계 특성시험은 정상상태 발전기 임피던스를 유도하기 위한 온라인 측정시험(V-curve), 포화계수를 유도하기 위한 무부하 개방포화곡선 시험, 여자계 정수를 결정하기 위한 AVR 스텝 시험 무효전력출력 한계치 시험 및 발전기 시정수/임

### 2.1.2 무효전력출력 한계치 성능 시험

정상상태에서의 발전기 무효전력출력 한계치 성능시험 목적은 발전기가 정격 100% 출력에서 최대/최소로 출력할 수 있는 무효전력 공급능력을 확인하는 시험이다. 발전기가 90MW 출력 운전 중에 최대 무효전력출력 한계치 성능 시험에서 측정된 결과는 아래의 표2와 같다. 최대무효전력을 제한하는 요인은 발전기 자체의 고정자 전압 운전 범위를 95%~101%로 미리 결정하고 특성시험을 수행하였다. 이외에도 서두에 언급 발전기 임피던스를 유도하기 위한 온라인 측정시험, 여자계 정수를 결정하기 위한 AVR 스

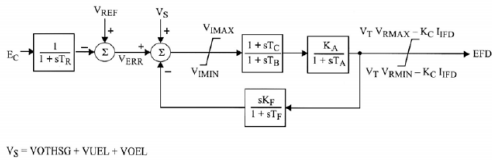
템 시험 및 발전기 시정수 및 임피던스 결정하기 위한 4회의 부하차단 시험 등이 있으나 생략하기로 한다.

	Q <sub>max</sub> (MVAR)	Test Conditions				
		P <sub>gross</sub> (MW)	V <sub>terminal</sub> (kV)	I <sub>stator</sub> (A)	V <sub>field</sub> (V)	I <sub>field</sub> (A)
Max	30.8 (1)	95.7	13.99	3940.6	101.8	874.1
Min	-20.4 (2)	93.5	13.14	4095.9	78.5	665.1

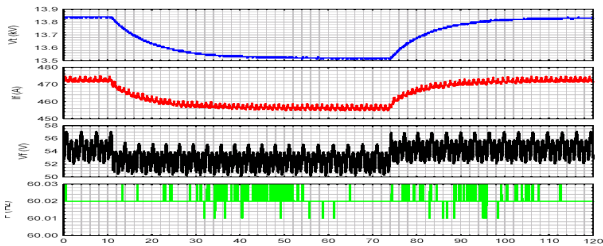
<표 2> 무효전력 용량 한계치

## 2.2 여자기 모델정수 유도 및 결정

발전기의 여자시스템은 "MEC 5330"로서 직접제어 방식인 정지형 여자기로 구성되어 있다. PSS/E 프로그램에서 적당한 여자시스템 모델은 그림2와 같은 "EXST1"로 결정할 수 있다. EXST1 여자기 모델의 경우에는 여자 전력(excitation power)을 발전기 단자에 연결된 변압기를 통하여 공급 받으면서 제어 정류기(controlled rectifier)를 통하여 조절된다. 따라서 최대 여자전압은 발전기의 단자전압에 따라서 결정되게 된다. 이 모델은 여자기 시정수가 작고 과도이득이 작은 것이 특징인데, 이와 관련된 정수가 TB, TC, KF, TF이다. 또한, 일반적으로 KF는 "0"이다. 발전기 D축 과도개방 시정수를 결정하기 위해서 무부하 상태에서 정격 회전수로 운전하고 단자전압을 감소하면서 여자기 스텝 시험을 수행하였으며, 아래의 그림3은 취득된 데이터를 나타낸다. 다음으로는 실제 측정된 계사전압을 표3의 결정된 모델에 적용하여 최종적으로 결정한다. 또한, 이로부터 유도된 직축 과도개방 시정수값은 11.3 sec이다.



<그림 2> PSS/E EXST1 여자기 모델



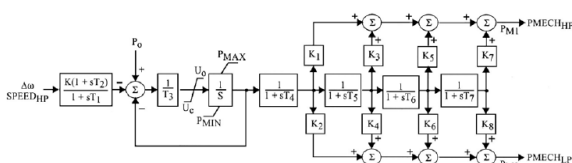
<그림 3> 여자기 스텝 시험 취득 데이터

Parameters (Model EXST1)	Parameter Description	NELCO Value (1)	Validated Value (2)
T <sub>R</sub>	Voltage transducer time constant, seconds	0.008	0.008
V <sub>MAX</sub>	Maximum control error, p.u.	999.0	1.0
V <sub>MIN</sub>	Minimum control error, p.u.	-999.0	-1.0
T <sub>C</sub>	Lead time constant of transient gain reduction, seconds	0.43	0.46
T <sub>B</sub>	Lag time constant of transient gain reduction, seconds	1.18	1.18
K <sub>A</sub>	Voltage regulator gain, p.u.	161.4	200
T <sub>A</sub>	Voltage regulator time constant, seconds	0.029	0.029
V <sub>MAX</sub>	Maximum voltage regulator output, p.u.	4.23	7.28
V <sub>MIN</sub>	Minimum voltage regulator output, p.u.	-1.57	-1.32
K <sub>C</sub>	Excitation system regulation factor, p.u.	0.14	0.14
K <sub>F</sub>	Rate feedback gain, p.u.	0.0	0.0
T <sub>F</sub>	Rate feedback time constant, seconds	1.0	1.0

<표 3> 결정된 여자기 정수와 제작사 모델 비교

## 2.3 조속기/터어빈 모델정수 유도 및 결정

발전기의 조속기/터어빈 모델로는 HP, IP 및 LP를 표현할 수 있는 그림4의 "IEEG1" 모델로 결정할 수 있다. 이 모델에 대한 정수를 유도하기 위해서는 부하차단시험, 조속기 스텝 시험 및 온라인 측정 시험(V-curve) 등을 통하여 수행되었으며, 아래의 표4는 조속기/터어빈의 결정된 모델정수를 보여준다.



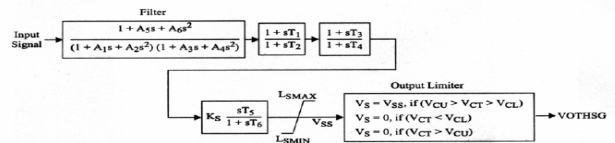
<그림 4> PSS/E IEEG1 조속기 모델

Parameters (PSS/E Model IEEEG1)	Parameter Description	NELCO Value (1)	Validated Value (2)
K	Governor gain (reciprocal of droop), pu	20	15.4 (3)
T <sub>1</sub>	Governor lag time constant, sec.	0.1	0.1
T <sub>2</sub>	Governor lead time constant, sec.	0.0	0.0
T <sub>3</sub>	Servo time constant, sec.	0.05	0.05
U <sub>0</sub>	Max. valve opening velocity, pu/sec.	0.31	0.31
U <sub>2</sub>	Max. valve closing velocity, pu/sec.	-0.31	-0.31
P <sub>max</sub>	Maximum valve position, pu	1.05	1.05
P <sub>min</sub>	Minimum valve position, pu	0.0	0.0
T <sub>4</sub>	Steam chest time constant, sec.	0.3	0.3
K <sub>1</sub>	Fraction of 1 <sup>st</sup> shaft power after 1 <sup>st</sup> boiler pass.	0.3	0.3
K <sub>2</sub>	Fraction of 2 <sup>nd</sup> shaft power after 1 <sup>st</sup> boiler pass.	0.0	0.0
T <sub>5</sub>	1 <sup>st</sup> Reheater time constant, sec.	0.7	4.7
K <sub>3</sub>	Fraction of 1 <sup>st</sup> shaft power after 2 <sup>nd</sup> boiler pass.	0.7	0.7
K <sub>4</sub>	Fraction of 2 <sup>nd</sup> shaft power after 2 <sup>nd</sup> boiler pass.	0.0	0.0
T <sub>6</sub>	2 <sup>nd</sup> reheater time constant, sec.	0.0	0.0
K <sub>5</sub>	Fraction of 1 <sup>st</sup> shaft power after 3 <sup>rd</sup> boiler pass.	0.0	0.0
K <sub>6</sub>	Fraction of 2 <sup>nd</sup> shaft power after 3 <sup>rd</sup> boiler pass.	0.0	0.0
T <sub>7</sub>	Crossover time constant, sec.	0.0	0.0
K <sub>7</sub>	Fraction of 1 <sup>st</sup> shaft power after 4 <sup>th</sup> boiler pass.	0.0	0.0
K <sub>8</sub>	Fraction of 2 <sup>nd</sup> shaft power after 4 <sup>th</sup> boiler pass.	0.0	0.0

<표 4> 결정된 조속기 정수와 제작사 모델 비교

## 2.4 전력계통 안정화 장치(PSS) 모델정수 유도 및 결정

발전기에 설치된 전력계통안정화 장치(PSS)는 발전기 출력의 전력을 입력으로 하는 단일입력 PSS 모델로 PSS/E 프로그램에서 적당한 PSS 모델은 그림5와 같은 "IEEST1" 모델로 결정할 수 있다. PSS 모델정수를 유도하기 위해서는 PSS 스텝 시험을 통하여 수행되었으며, 아래의 표5는 결정된 모델정수를 보여준다.



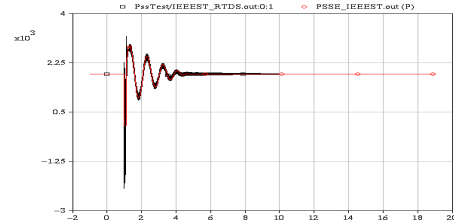
<그림 5> PSS/E IEEST PSS 모델

Parameters (PSS/E Model IEEST1)	Parameter Description	NELCO Value (1)	Validated Value (2)
ICB	Input signal code	3	3
IB	Remote signal bus number	0	0
A1	Filter time constant	0.008	0.008
A2	Filter time constant	0.000010	0.0
A3	Filter time constant	1.0	1.0
A4	Filter time constant	0.0	0.0
A5	Filter time constant	0.13	0.13
A6	Filter time constant	0.0	0.0
T <sub>1</sub>	Lead time constant, sec.	0.13	0.13
T <sub>2</sub>	Lag time constant, sec.	0.05	0.05
T <sub>3</sub>	Lead time constant, sec.	0.13	0.13
T <sub>4</sub>	Lag time constant, sec.	0.05	0.05
T <sub>5</sub>	Washout numerator time constant, sec.	1.5	1.5
T <sub>6</sub>	Washout denominator time constant, sec.	1.5	1.5
K <sub>S</sub>	Stabilizer gain, pu	-0.6	-0.6
L <sub>max</sub>	Maximum stabilizer output, pu	0.05	0.05
L <sub>min</sub>	Minimum stabilizer output, pu	-0.05	-0.05
V <sub>cu</sub>	Stabilizer input cutoff threshold, pu	0.0	0.0
V <sub>cl</sub>	Stabilizer input cutoff threshold, pu	0.0	0.0

<표 5> 결정된 PSS 정수와 제작사 모델 비교

## 2.5 시뮬레이터(KEPS)에 의한 PSS 모델 검증

시뮬레이터에서 제공하는 기본 라이브러리와 Composite 모델 생성법을 이용, PSS 모델을 개발하였다. IEEST 모델에서는 I<sub>c</sub> 정수의 입력 값에 따라서 w를 입력으로 받을 수도 있고 P<sub>e</sub>를 입력을 받을 수 있도록 구성한다. 모델검증은 1기 무한 모션계통으로 구성된 KEPS 시험 계통에 3상 사요를 인가하여 PSS 모델의 적절한 동작을 확인하고, 이를 PSS/E 모의 결과와 비교한다.



## 3. 결론

본 특성시험에서는 현재 운전 중인 발전기 및 제어계에 대한 시험을 수행하고 모델정수 유도 및 결정함으로써 안정도 해석용 데이터의 정밀성을 향상시킬 수 있다. 전체적으로 제작사 제공값과 측정된 데이터를 재현하도록 모의한 결과 측정값과 일부 차이를 보였으며, 이는 결정된 모델정수가 실제계통 발전설비의 동특성을 보다 정확하게 반영하고 있다고 할 수 있다.

## [참고 문헌]

- [1] 전력연구원, "발전기 제어계 최적 조정", 최종보고서, 2002년
- [2] M. Nagpal, "Experience with testing & modeling of gas turbines", IEEE, pp652-656, 2001
- [3] 김동준, 문영환, "발전기/제어계 특성시험", 최종보고서, 2006