

발전기 제어계 정수 추출시험의 국내외 비교분석

최 흥 관* 김 동 준* 문 영 환*
한국 전기 연구원*

Comparison of Various Generator Testing and Model Validations

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

Abstract - It is essential for testing and model validations about generator and controls for stability analysis in power system. After two large disruptions, field testings were much more important and tested for all generators of greater than 10MW. It compared and reviewed about testing and modeling of WSCC, Powertech, and domestic's. This paper points out insufficient testing items and presents complementary testing draft considering domestic circumstance.

운영규칙 제5.3.5조, 제 5.3.6조에 따라 의무적으로 발전기 모델 및 제어시스템 특성을 제시하도록 하고 있다.

2.2 국외 현황

2.2.1 WSCC의 규정 및 현황

미국 서부지역에서 1996년 7월과 8월에 두 차례의 외란으로 인한 정전이 발생하여 진상조사가 이루어졌고 이 과정에서 실제 고장기록장치에 기록된 결과와 Simulation 결과와 많은 차이가 발생한다는 점이 부각되었다. 결국 NERC(North American Electric Reliability Council)와 WSCC(Western Systems Coordinating Council)에 의해 M&VWG(WSCC Modeling and Validation Work Group)와 CWG(Control Work Group)가 결성되어 발전기, 여자계, PSS, 터빈 조속기 등을 시험할 수 있는 Guideline이 개발되었다. 이러한 guideline에 따라 10MW 이상의 모든 발전기에 대해 다음과 같은 시험이 이루어 졌다.

- 발전기 무효전력한계 검증
- 발전기 동적 제어계의 성능
- 안정도 해석을 위한 Simulation 모델 검증

결국 이러한 일련의 현장 특성시험을 통하여 검증이 이루어졌고 실제 기록과형과 거의 동일한 simulation 결과를 얻게 되었다.

2.2.2 온타리오 IMO 규정 및 현황

발전/송전/배전 사업자 등 시장참여자들에 대한 의무사항을 시장규칙에 명시하고 있다. 참여자들은 IMO의 요청에 따라 7년마다 시장규칙에 합당하다는 자료를 제출할 수 있도록 특성시험을 실시하여야 하며, 비용은 시장 참여자가 부담하는 것이 원칙이지만 전체 시장참여자에게 혜택이 돌아갈 수 있는 사항에 대해서는 IMO가 추가시험 및 감시장치를 자기비용으로 부담하고 나중에 Uplift 비용에 추가할 수 있도록 규정하고 있다.

시험절차는 IMO가 제시할 수 있으며 신뢰도에 문제가 있다고 판단되면 시험 절차를 수정할 수 있다. 만일 시장사업자의 기기가 운용 신뢰도에서 문제가 되는 경우 IMO는 이를 시정하도록 명령할 수 있다.

2.3 발전기 특성시험 분석

2.3.1 WSCC 특성시험

모든 시험장비에 대해 정상상태(steady state)와 주파수 범위 0.01Hz ~ 10Hz의 dynamics 응답특성을 측정할 수 있는 기능을 갖도록 규정하고 있다.

발전기 제어계의 한계치 및 모드 변화에 대한 특성시험을 위해 큰 외란 시험(AVR 스텝 시험, 발전기 부하차단 시험, 송전선 개폐 시험 등)을 이용하여 시험할 것을

1. 서 론

안정도를 해석하는데 있어서 발전기와 발전기 제어계에 대한 시험 및 모델링은 필수적이며 대단히 중요한 사항이다. 수년전 미국의 두차례 정전 사태이후 다시 이러한 중요성이 인식되어 강제적으로 대규모 발전기 시험이 시행되었다. 국내에서도 이러한 시험이 간헐적으로 시행되어 오고 있다. 본 논문에서는 이러한 발전기와 발전기 제어계에 대해 국내에서 시행되고 있는 시험방법과 최근 미국과 캐나다 등에서 시행되고 있는 시험방법들을 비교 분석하였다. 아울러 국내실정에 맞는 시험방법들을 제안하였다.

영국과 미국에서 시행되고 있는 바와 같이 국내에서도 전력산업 구조개편에 따라 전력시장(CBP)에 의한 계통이 운영되고 있다. 전력시장 체제의 계통운용은 과거의 수직통합체제의 경우보다 계통운용의 고도화가 요구되며 이에 따른 데이터 확보와 해석기술이 더욱 중요하게 인식되고 있다. 미국의 경우 서부계통과 신뢰도위원회의 가이드라인에 따라 수많은 발전기에 대한 시험을 실시하여 모델 및 파라미터 검증용 실시한 바 있다. 그러나 이와 같은 특성시험에 대해 국내 규제기관의 가이드라인이 제시되고 있지 않아 특성시험 전반에 걸친 절차서 개발이 시급한 실정이다.

2. 본 론

2.1 국내 현황

국내의 경우 측정예 의한 발전기 및 제어계에 관한 안정도 해석 모델 파라메타 유도의 중요성을 인식하고 전력계통 안정도 모의 정도 향상을 위해서, 1988년부터 발전기 모델 파라메타 유도기술 개발과 전국 발전소의 현장 자료 조사를 실시하였다.

이후 1995년, 미국 PTI 사의 전문기술을 도입하여 서인척 복합화력(#3)을 대상으로 발전기 특성시험과 모델 개발이 실시되었다. 이때부터, 국내에서는 발전기 특성시험 측정 방법 및 측정 데이터로부터 모델 정수 유도기법이 정립되었다.

전력산업구조개편이 진행되면서 규정이 마련되었는데, 발전설비 신·증설시, 산자부 고시 "전력계통 신뢰도 및 진기품질 유지기준" 제24조(발전설비 특성자료) 및 시장

권고하고 있다. 그러나 소신호 외란을 이용한 주파수 응답 특성 방법은 선형모델을 유도해야 하는 경우에는 사용이 가능하지만, 장비와 시험시간이 많이 소요되고 비선형 특성을 구할 수 없다는 단점이 있다. 다음은 간략하게 특성시험 절차를 나타낸 것이다.

- 사전 시험대상 발전기의 자료조사
- 현장에 맞는 시험방법을 발전회사의 실무자와 결정
- 현장시험에 앞서 기존 모델 정수를 이용한 사전 시험 내용 모의
- 사전 계획된 특성시험 현장시험 수행
- 현장 특성시험을 모의하여 측정된 결과와 비교하고, 두 결과가 같지 않으면 일치하도록 기존 모델 정수를 조정하여 검증
- 검증된 모델 정수는 WSCC DB에 사용할 수 있도록 작성하여 제출

표 2.1 발전기 특성시험에 의한 모델 정수 유도 방법

| 주요 발전기 제어계 모델 정수 | 모델 정수 유도방법 | 시험방법 |
|--|--|-------------------|
| 관성정수, H | 발전기 부하차단시 측정된 회전자 가속도 분석 | 발전기 부하차단시험 |
| 자동전압조정기의 최대/최소 한계치 | 자동전압조정기의 기준점에 스텝신호 인가 | 무부하 개방회로 AVR 스텝시험 |
| 발전기 직축 리액턴스 및 시정수 ($X_{d0}, X_{d0}', X_{d0}'', T_{d0}, T_{d0}'$) | 발전기가 OMW이고 계자전압이 일정한 MVAR에서 발전기 주차단기를 차단하고, 이때 측정된 고정자의 전압계측을 분석하여 정수 유도 | 발전기 부하차단시험 |
| 발전기 무부하 포화 정수: S(1.0), S(1.2) | 발전기 무부하 개방회로 상태에서 발전기 정격전압 1.0과 1.2pu에서 포화정수 유도 | 무부하 개방회로 발전기 포화시험 |
| PSS 선형화 특성 | PSS 장치를 대상으로 입력단과 출력단에 주파수 응답특성 시험을 통한 선형 특성 분석 | 주파수응답시험 |
| 조속기 Droop상수, Kp | 발전기 부하차단 후 초기 터빈 속도와 최종 터빈속도치를 분석해서 결정 | 발전기 부하차단시험 |

표 2.2 필요한 데이터의 등급별 구분 1

| 등급 | 발전기 | 여자기 | PSS | 조속기 |
|----|--|---|---|--|
| A | X_{d1}, X_{q1} II T_{d0}^{do} S1.0 S1.2 | E_{fd} K_a V_{rmax} T_a, T_b, T_c T_f X_{comp} | K_{PSS} Type of Input Dominant Time Constant | R(droop) g_{nl} Gain at K_1-K_5 P_{max} Deadband Vcl max |
| B | X_{d0}, X_{q0} X_{d0}', X_{q0}' $T_{d0}^{do}, T_{d0}^{do'}$ X_i | K_p, K_i S_{c1}, S_{c2} $E_{fd} \max$ | | T_w, K_p r, K_i T_r T_1-T_4 Steam/Turbine Model |
| C | R_a X_2 X_0 R_0 | | | D |

위의 표는 필요한 데이터에 대한 항목을 등급으로 구분하여 요약한 것이다. 등급 A는 필수적으로 제공해야 하고, 등급 B는 의무적, 등급 C는 권고사항이다. 그러나

필수적과 의무적의 구분이 모호하므로 A, B 등급을 통합하여 필수, 권장사항 두 등급으로 분류하는 것이 바람직하다.

표 2.3 필요한 데이터의 등급별 구분 2

| 등급 | 여자제어&보호 | | 조속기 제한기 | |
|----|---|--|--|--|
| | limits | Trips | Hydro | Steam |
| A | OEL type/set UEL type/set V/Iz PF Control status Stator Current limit | LOF IPP interface Over/Under F req. Over/Under Volt. Over Current Excitation Overcurrent V/Iz | Tunnels/ Tanks/ Motoring/ Water Depressed | Boiler Modes BF, TF, CC Load limiter |
| B | | | | |
| C | | | | |

2.3.2 국내외 특성시험 비교분석

특성시험에 대해 비교한 결과 주요한 차이점은 V-curve 시험, 리미터 시험, 주파수 응답시험, 무효전력 용량곡선 시험 등이다. 이러한 차이점은 국가별 상황에 따라 보완적이라고 할 수 있다. 즉 특정한 시험이 반드시 필요하다는 점보다 여러 시험들을 통해 관련 데이터들을 여러 번 검증을 하고 있음을 알 수 있다.

그러나 국내 특성시험의 경우 리미터 시험을 수행하고 있지 않으며 무효전력용량곡선 시험은 최근에야 발전기 특성시험과 무관하게 진행되고 있다. 즉 발전설비 모델링시 적절하게 반영되고 있지 않은 것이다. 반면 V-curve 시험이 수행되고 있는데 V-곡선 특성시험에서는 여자전류-단자전압의 관계를 구한다. V-곡선의 측정은 부하조건에 따른 x_d 와 x_q 의 변화 분석과 시뮬레이션 초기조건을 위하여 필요하다. 즉, 정상상태 운전 조건을 고려하여 PSS/V 프로그램에 내장된 VCV 프로그램에서 계산된 여자전류 I_{fd} 와 부하각을 비교함으로써 각각 x_d 와 x_q 의 값을 교정할 수 있다. V-곡선의 측정방법은 다음과 같다

발전기가 계통에 병입되어 정상 운전되고 있는 상태에서 유효출력을 조정하여 일정 수준(100%, 75%, 50%, 25%, 0% MW)으로 한 다음 각 부하 수준에서 전압을 조정하여 (즉, 여자전류를 조정하여) 무효출력을 조정 (-50%, -25%, 0%, 25%, 50% MVar) 하면서 단자전압과 여자전류의 관계를 측정하는 것이다

주파수 응답특성 시험은 선형모델을 유도해야 하는 경우에는 사용이 가능하나 비선형 특성을 구할 수 없다는 단점이 있다. 또한 추가적인 장비비와 시험시간이 많이 소요되는 것은 큰 단점으로 지적되고 있다. 따라서 시험시간이 충분하고 장비를 보유하고 있다면 주파수 응답시험을 병행하는 것이 이상적일 것이나 반드시 포함해야 할 시험방법은 아니다.

또 다른 사항은 전용 simulation 프로그램의 유무이다. WSCC의 경우 시험을 수행하는 회원사에 대해 GE의 PSLF 프로그램을 제공하여 지속적이고 주기적인 자료갱신이 이루어지도록 하고 있다. 또한 계속적으로 새로운 모델을 추가하면서 관련 프로그램을 향상시키고 있다. 그러나 Powertech과 국내의 경우는 PSS 튜닝프로그램만 개발되어 있다. Powertech의 경우는 PSS tuning 전용 프로그램으로 Powertech's Control Design Toolbox 라는 프로그램을 상업용으로 제공하고 있다. 국내의 경우도 PSS tuning 전용 프로그램이 개발되어 활용되고 있다.

표 2.4 국내외 발전기 특성시험의 비교분석

| 시험 종류 | | WSC C | Powertech | 국내 | 비고 |
|------------------|--------------------|----------|-----------|------|----------|
| 발전기 시험 | 개방 포화곡선 시험 | C | C | C | |
| | V-Curve 시험 | X | X | C | |
| | 계자 단락 시험 | X | C | X | |
| 여자계 시험 | 직축/횡축 전류 차단 | C | C | C(△) | |
| | 여자기 스텝 응답 시험 | C | C | C | |
| | 주파수 응답 시험 | C | C | | |
| | 리미터 시험 | C | C | X | |
| 조속기 시험 | 무효전력 부하 절제 | C | C | C | |
| | 일정부하 절제시험 | C | C | C | |
| 주파수 응답시험 | | C | C | X | |
| 무효전력 용량곡선 시험 | | C | C | △ | 개별 시행 |
| PSS 시험 | 스텝 응답시험 | C | C | C | |
| | 주파수 응답시험 | C | C | C | |
| | 여자기 스텝응답 | C | C | C | |
| 전용 모의 프로그램 | 발전기, 여자기, 조속기 등 | C | X | X | |
| | PSS | C | C | C | |

2.3 OEL과 OEP 시험 방안

국내 특성시험에 필요한 OEL과 OEP 시험방안에 대해 알아본다.

과여자 제한기(Over Excitation Limiter; OEL)는 AVR이 제어하고 있는 동안 계자권선의 열용량을 초과하지 못하도록 제한한다. 즉 계자권선의 열용량 허용범위내에서 계자전류를 감소시키거나 유지하는 역할을 한다. 이에 비해 과여자 보호장치 (Overexcitation Protection Device; OEP)는 전압조정기를 분리하거나 발전기를 절제하는 역할을 한다.

WSCC에 의해서 개발된 초기의 특성시험 guideline에는 과여자 제한기와 보호설비에 대해서도 시험을 불해 타입과 설정치를 제출하도록 되어있다. 그러나 세부적인 시험절차는 포함되지 않았다. 그 이후 상당기간이 지나서 개발이 되었으며 이를 요약하면 다음과 같다.

2.3.1 제출 데이터

- ▶ 최소 pickup value : 장치가 동작하는 최소 계자전류
- ▶ 최대 계자전류 한계치
- ▶ 시간에 따른 계자전류 한계
- ▶ 동작점과 한계치사이의 시간 지연
- ▶ 장치 작동시의 상황(전압조정기, 제어모드, trip 등)

2.3.2 시험 방안

- ▶ 전압조종기가 고/저 신호를 출력할 때 변화를 시험하여 과여자 동작에 대한 한계치와 trip을 체크한다. 이때 고/저 신호는 리미터나 trip에 의해 보정될 때까지 유지되어야 한다.
- ▶ 리미터나 trip이 동작할 때 pickup level, time delays, levels 등을 기록한다.
- ▶ 과도한 전류나 전압을 방지하기 위해 시험하는 동안 일시적으로 리미터나 trip 설정을 변경할 필요가 있다.
- ▶ 일반적인 릴레이 시험법을 이용하여 발전기가 정지하는 동안 리미터나 trip 설정을 교정한다.

3. 결 론

국내외의 발전기 특성시험을 비교분석한 결과 몇가지 점에서 고려해야 할 사항이 발견되었다. 발전기 특성시험을 통하여 파라미터를 유도하는 방법은 대단히 복잡하고 유도하는 전문가에 따라 그 값이 달라질 수 있다. 특히 동특성 데이터를 시험하는 경우 스텝시험과 주파수 응답시험을 병행하는 경우 가장 이상적인 파라미터를 유

도할 수 있다. 그러나 과도한 시험시간, 추가적인 고가장비 마련, 시험비용 증가 등의 단점이 존재하고 있다. 그러므로 주파수 응답시험은 PSS 파라미터를 구하는 경우 치명적으로 제한하는 것이 더 합리적이다.

반면에, 국내외 특성시험의 경우 과여자제한기나 과여자제한장치에 대한 시험이 없고 무효전력 용량곡선 시험이 이루어지지 않거나 최근에는 개별적으로 시행되는 문제점이 있다. 결국 과여자제한기등을 시험하는 항목을 발전기 특성시험에 포함하여야 하며 무효전력 용량곡선 시험의 결과를 특성시험 후 파라미터를 유도하는 절차에 필히 반영하여야 한다.

또한 특성시험 및 파라미터 유도를 위한 전용 모의 프로그램 개발도 시급한 과제중의 하나이다.

[Denotes]

- X_d & X_q : 직축/횡축 리액턴스
- II : 관성정수
- T'_{do} : 회전자 직축 과도 시정수
- S1.0 & S1.2 : 1, 1.2 pu flux 때의 포화함수
- K_a : 전압조정기 이득
- V_{max} : 제어 요소 최대 출력
- T_a : 전압조정기 시정수
- T_b : 전압조정기 lead 시정수
- T_c : 전압조정기 lag 시정수
- T_r : 전압조정기 제한 시정수
- P_{max} : gate 최대 개방
- g_{nl} : 무부하시의 밸브 개방
- OEL : 과여자 제한기
- UEL : 부족여자 제한기
- X''_d, X''_q, X'_d, X'_q : 직축/횡축 과도/초과도 리액턴스
- T''_{do}, T'_{do} : 직축/횡축 초과도 회전자 시정수
- K_p, K_i : ST 여자형 potential/current source 이득
- S_{e1}, S_{e2} : 브리쉬리스 여자기 포화함수
- T_w : 수력 관성 시정수
- K_v : 수력 조속기 이득
- T_r : dashpot 시정수
- K_1-K_3 : 교압/저압 터빈 비율
- R_a : 고정자 리액턴스
- X_2 : negative sequence 리액턴스
- R_0, X_0 : zero sequence 저항/리액턴스
- D : 터빈 댐핑

[참 고 문 헌]

- [1] Les Pereira, "Introduction and Background to Synchronous Unit Testing and Model Validation in the WSCC" 1999
- [2] WSCC, "Test Guidelines for Synchronous Unit Dynamic Testing and Model Validation" 1997. 2
- [3] G.R. Berube, "Testing and Modeling of Generator Controls"
- [4] WSCC, "Guidelines for Over Excitation System Limiter(OEL) and Over Excitation Protection(OEP) Testing" 2000
- [5] 한국전력공사, "전력계통 안정도 해석용 발전기 제어계 모델 결정에 관한 연구" 최종보고서, pp434-439, 1996. 10
- [6] F.P.de Mello, J.R Rebeiro, "Determination of Synchronous Machine Parameters from Tests," IEEE Trans. PAS Vol. PAS-96, July/Aug. 1977, pp.1211-1218
- [7] M.Namba, J.hosoda, S. Doi, and M.Udo, "Development for Measurement of Operation Parameters of Synchronous Generator and Control Systems"
- [8] IEEE Std 421.5-1992. "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies"