

원전 2차측 전력설비 검사기술 개발

박현신* 김건중** 김문영*
*한국원자력안전기술원 **충남대학교

A development on the inspection technologies for secondary electrical facilities in nuclear power plant

Park, Hyun-shin* Kim, Kern-joong** Kim, Moon-young*
*Korea Institute of Nuclear Safety **Chungnam National University

Abstract - Recently, the reactor trip in nuclear power plants has mostly occurred by the failure of secondary electrical facilities. Some kinds of technical standards or acceptable criteria are required to regulate those facilities. Therefore, in this paper the failures of secondary electrical facilities which cause reactor trip are analyzed, and the inspection technologies including guidelines for secondary electrical facilities are developed.

전기적 결함에 따른 원전 불시정지를 유발한 전력설비의 고장원인을 그림 2와 같이 분석한 결과, 자연재해를 제외하고 발전기, 변압기, 송전계통 고장이 원전 불시정지의 주요 원인이 됨을 알 수 있다. 여기서 송전계통은 원자력발전소 설비 관점에서 볼 때 스위치야드 설비와 직접적으로 연관된다.

1. 서 론

원자로정지와 같은 운전과도상태의 발생은 원자력발전소의 안전운영과 국민신뢰성에 부정적인 영향을 미친다. 최근 국내 원전의 불시정지는 상당 부분 2차측 전력설비 고장에 의하여 발생되고 있는 현실이지만, 이들 설비에 대한 규제를 위한 관계법규나 현장검사를 위한 기술기준 및 허용기준이 정립되어 있지 않은 상태이다. 따라서 본 논문에서는 국내 원전 불시정지 원인 및 영향을 주는 전력설비를 선정하고 해당 설비의 기술배경 및 기술기준을 검토하여 검사대상 설비에 대한 검사 지침서 및 점검표를 개발하여 원전 검사에 활용함으로써, 원전 이용률 및 안전성을 향상하고 원자력시설 안전에 대한 국민 신뢰 및 사회적 수용성 증진에 기여하고자 한다.

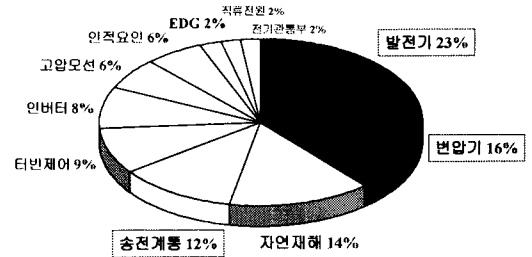


그림 2 원전 불시정지를 유발한 전력설비의 고장원인

2. 본 론

2.1 국내원전 불시정지 원인분석

최근의 국내 원자력발전소에서 발생한 사고·고장을 전기적 결함, 계측제어 결함, 기계적 결함 및 인적실수 등 4가지 원인별로 구분한 결과는 그림 1과 같으며, 전기적 결함에 의한 고장발생이 최근 높은 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다.

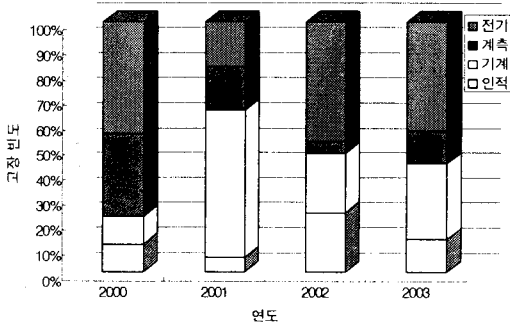


그림 1 원전 설비분야에 대한 원인별 고장비도

국내원전의 사고·고장 및 불시정지 원인 분석 결과에 따라 발전기 설비계통, 변압기 설비계통, 스위치야드 설비계통을 검사대상으로 선정하였다. 이와 같이 선정된 검사대상 전력설비에 대해서 각 설비별로 기술배경 및 기술기준을 검토하고 검사항목 개발하여 최종적으로 검사지침서 및 점검표를 개발하였다. 그림 3은 본 논문에 대한 원전 전력설비의 검사지침서 및 점검표 개발 순서도를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 한국표준형원전을 비롯하여 Westing House형, Candu형, Framatome형의 각 노형별로 원전 2차측 전력설비의 검사지침서 및 점검표를 개발하였으며, 이 논문에는 표준형원전의 발전기, 변압기, 스위치야드 설비계통에 대한 검사기술 개발결과를 기술한다.

2.2 발전기 설비계통에 대한 검사지침서

2.2.1 검사대상범위

표준형원전의 주발전기, 발전기 차단기, 여자기, 상분리 모션 등을 포함하는 발전기설비 계통에 적용한다.

2.2.2 검사목적

관련 절차서에서 요구하는 점검주기에 따라 발전기 설비계통이 적합하게 점검됨을 확인하여 그 건전성을 입증한다.

2.2.3 검사개요

표준형원전의 발전기 설비계통은 운전 가능하기 위해 주기적인 점검 및 성능시험이 요구된다. 관련 절차서의 점검요구사항에 의거 절연저항 및 성극지수 측정 등의 점검 사항이 적합하게 점검되고 있는지를 현장회의, 도면 및 서류검토, 면담 등을 통해 검사한다.

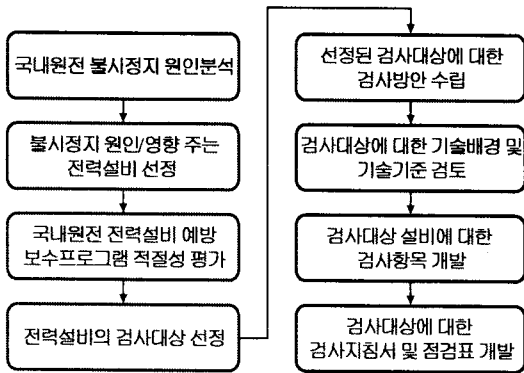


그림 3 전력설비 검사지침서 및 점검표 개발 순서도

2.2.4 검사내용

2.2.4.1 절연저항 및 성극지수 측정

주발전기 회전자 및 고정자의 절연저항을 시간적인 간격을 두고 측정하여 시간에 따른 절연저항의 변화로써 절연상태의 건전성을 확인하는 것으로, 주발전기의 고정자 및 회전자권선에 대한 절연저항 측정값 및 1분 절연 측정값과 10분 절연측정값의 비율로 계산되는 성극지수가 다음의 허용기준(시험절차서 기준값 참조)을 만족하는지를 확인한다.

- 고정자권선 절연저항 : 80MΩ 이상
- 회전자권선 절연저항 : 25MΩ 이상
- 고정자권선 성극지수 : 2.5 이상
- 회전자권선 성극지수 : 1.25 이상

단, 상기의 허용기준을 따르지 않는 발전소는 IEEE Std 43(2000) 기술기준에서 권고하는 최소 절연저항값 및 성극지수를 준수하는지 확인한다.

2.2.4.2 권선저항 측정

주발전기의 고정자 및 회전자권선에 대한 권선저항을 측정하여 권선에 대한 단선이나 연결의 건전성을 확인하는 점검으로 고정자 권선저항은 25℃에서 825.1μΩ±2%, 회전자 권선저항은 62.4mΩ±2% 허용기준(시험절차서 기준값 참조)을 유지하는가를 확인한다.

2.2.4.3 발전기 내부 육안점검

육안으로 주발전기 내부의 물리적인 손상이나 비정상적인 현상 등을 점검하여 발전기 내부의 건전함을 확인한다. 주발전기의 균열발생 여부, 이물질 및 오일침투 여부, 이완여부 및 케이블 상태 등을 확인한다.

2.2.4.4 발전기차단기 동작시험

시험절차서에 따라 발전기차단기의 투입 및 차단시간이 허용기준시간내에서 정상적으로 동작됨을 확인하고, 공기압축기 자동기동 및 계기교정 설정값이 관련 시험절차서의 판정기준을 만족하는지 확인한다.

2.2.4.5 여자장치 및 자동전압조정기 성능시험

PT 전원상실시 및 DC fail시 경보상태가 정상임을 확인하고, 온도상승시험 및 모의부하시험으로 여자기 설비의 건전함을 확인한다.

2.2.4.6 상분리 모선 점검

주발전기와 주변압기 사이를 연결하는 상분리 모선(IPB)의 건전성을 확인하는 점검으로 절연저항 측정 결과가 150MΩ 이상이어야 하며, 접촉저항 측정 결과는 10μΩ 이하의 허용기준(시험절차서 기준값 참조)을 만족하는지를 확인한다.

2.2.4.7 발전기 보호장치 시험

주발전기 보호를 목적으로 하는 보호계전기의 점검과 개체시험을 통하여 성능의 저하가 없음을 확인하고, 발전기 보호장치 동작에 의한 해당 차단기의 연동상태가 적합함을 확인한다.

2.2.4.8 계통병입 및 부하운전시험 점검

주발전기의 계통병입과 2차계통 부하운전시험의 점검

을 통하여 주발전기 출력 100%시 주발전기, 변압기, 자동전압조정기(AVR)의 성능에 이상이 없음을 최종 확인한다.

2.2.5 판정기준

발전기 설비계통에 대한 점검 결과가 “검사내용”에 기술한 허용기준을 만족하여야 한다.

2.3 변압기 설비계통에 대한 검사지침서

변압기 설비계통은 발전기 설비계통의 검사대상범위, 검사목적, 검사개요, 판정기준의 형식과 동일하며 여기에서는 검사내용만을 기술한다.

2.3.1 검사내용

2.3.1.1 절연저항 측정

주변압기, 소내보조변압기, 대기보조변압기 등을 포함하는 변압기 설비계통의 절연성을 확인하는 점검으로 변압기 권선간 및 대지간 절연저항이 다음의 허용기준(시험절차서 기준값 참조)을 만족하는지를 확인한다.

- 변압기 권선간 절연저항 : 800MΩ 이상
- 주변압기 대지간 절연저항 : 410MΩ 이상
- 소내 및 대기보조변압기 대지간 : 1000MΩ 이상

2.3.1.2 절연유 점검

변압기 설비계통의 절연유가 건전함을 확인하는 점검으로 절연유 내력시험 결과와 절연유 산가 및 절연유 습분 측정 결과가 다음의 허용기준(시험절차서 기준값 참조)을 유지하는가를 확인한다.

- 절연유 내력시험 : 50kV 이상
- 절연유 산가 측정 : 0.1 mgKOH/g 이하
- 절연유 습분 측정 : 30 ppm 이하

2.3.1.3 냉각설비 전동기 점검

변압기 설비계통에서 절연유를 냉각하는 냉각설비 전동기의 정상적인 작동을 확인하는 점검으로 선간저항은 상간 불일치 10% 이내이어야 하며, 절연저항 측정 결과가 kV+1 이상의 허용기준(시험절차서 기준값 참조)을 만족하는 것을 확인한다.

2.3.1.4 변압기 내부 점검

변압기설비 내부의 물리적인 손상이나 비정상적인 현상 등을 점검하여 변압기 내부의 건전함을 확인한다. 변압기 붓싱리드 연결 상태, 각종 볼트 조임 상태, 이물질 유입여부 등을 확인한다.

2.3.1.5 변압기 중성점 접지스위치 점검

변압기 중성점 접지스위치의 건전성을 확인하는 점검으로 접촉부위 상태 및 연결부 접촉저항 등이 관련 시험절차서에 따라 적합하게 점검되고 있음을 확인한다.

2.3.1.6 변압기 보호장치 시험

주변압기를 포함하여 소내보조변압기 및 대기보조변압기 보호를 목적으로 하는 보호계전기의 점검과 개체시험을 통하여 성능의 저하가 없음을 확인하고, 변압기 보호장치 동작에 의한 해당 차단기의 연동상태가 적합함을 확인한다.

2.4 스위치야드 설비계통에 대한 검사지침서

스위치야드 설비계통은 발전기 설비계통의 검사대상범위, 검사목적, 검사개요, 판정기준의 형식과 동일하며 여기에서는 검사내용만을 기술한다.

2.4.1 검사내용

2.4.1.1 스위치야드 345kV 차단기 동작특성 시험

스위치야드 345kV 차단기의 동작특성을 통하여 사용가능 및 건전함 확인하는 시험으로 차단기 투입, 개방, 결상시간 등이 다음의 허용기준(시험절차서 기준값 참조)을 만족하는지를 확인한다.

- 차단기 투입시간 : 150ms 이하
- 차단기 개방시간 : 33ms 이하
- 차단기 결상시간 : 4ms 이하

2.4.1.2 차단기 주회로 절연저항 및 접촉저항 측정

스위치야드 345kV 차단기 주회로 절연저항 측정

검사대상시설	전력계통시설	검 사 원		
검 사 항목	발전기설비계통			
검 사 목 적	주발전기 및 발전기차단기 설비에 대한 점검을 통해 발전기설비계통 건전성 확인			
검 사 주안점	주발전기 원전저항 측정시험 및 발전기차단기 특성시험 적합성 확인			
검 점 분 야	검 점 내 용 1. 원전저항 및 성극지수 측정 - 고장자 권선 - 회전자 권선 2. 권선저항 측정 - 고장자 권선 - 회전자 권선 3. 발전기 내부 육안점검 - 균열발생 여부 - 이물질 및 오일침투 여부 - 이환여부 및 케이싱 상태 4. 발전기차단기 동작시험 - 투입시간 - 차단시간 - 공기압축기 점검	검 사 방 법 - 시험절차서 검토 - 시험결과 검토 - 현장시험 임의 면담	합 격 기 준 - 고장자권선 원전저항 : $\geq 80 \text{ M}\Omega$ - 고장자권선 성극지수 : ≥ 2.5 - 회전자권선 원전저항 : $\geq 25 \text{ M}\Omega$ - 회전자권선 성극지수 : ≥ 1.25 - 고장자 권선저항 : $825.1 \text{ m}\Omega \pm 2\% (25^\circ\text{C})$ - 회전자 권선저항 : $62.4 \text{ m}\Omega \pm 2\% (25^\circ\text{C})$ - 육안으로 발전기 내부 건전성 확인	합 격 기 준 - 원전저항 : $\geq 150 \text{ M}\Omega$ - 접속저항 : $< 10 \text{ }\mu\Omega$ - 발전기 보호장치 동작에 의한 연동상태 확인 - 관련 시험 절차서 편정기준 참조

	검 점 내 용	검 사 방 법	합 격 기 준
검 점 분 야	5. 여자장치 및 자동전압조절기 (AVR) 성능시험 - PT 전원 상실시 경보 - DC fail시 경보상태확인 - 온도상승시험 - 모의 부하시험 (Dummy Load Test) - 무부하 및 부하시험 (3주기 당 한번 실시)	- 시험절차서 검토 - 시험결과 검토 - 현장시험 임의 면담	- 관련 시험 절차서 편정기준 참조
	6. 상분리 모션(IPB) 점검 - 원전저항 측정 - 접속저항 측정		- 원전저항 : $\geq 150 \text{ M}\Omega$ - 접속저항 : $< 10 \text{ }\mu\Omega$
	7. 발전기보호장치 시험 - 보호장치 개체시험 - 연동시험		- 발전기 보호장치 동작에 의한 연동상태 확인
검 점 분 야	8. 계통병입 및 부하운전시험 점검 - 계통병입 - 부하운전시험		- 관련 시험 절차서 편정기준 참조
	관 련 규 정 및 참 고 자 료 1. 최종안전성분석보고서(FSAR) 8장(영광3.4.5.6/울진3.4.5.6) 2. KEPIC EEB 1000(회전기 일반사항) 3. IEEE Std 67-1990, "IEEE Guide for Operation and Maintenance of Turbine Generators" 4. IEEE Std 43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery." 5. 주발전기 점검 정비절차서(영광3.4.5.6/울진3.4.5.6) 6. 발전기 부하차단기 점검 정비절차서(영광3.4.5.6/울진3.4.5.6)		

그림 4 표준형원전의 발전기설비계통에 대한 검사점검표

결과값이 1000M 이상이어야 하며, 차단기 주회로 접속저항의 측정 결과값이 개발시험값×1.2 이하로 허용기준(시험절차서 기준값 참조)을 유지하는가를 확인한다.

2.4.1.3 SF₆ 가스 누설시험 및 수분 함유량 측정

스위치야드 345kV 차단기 동작에 대한 SF₆ 가스 누설 시험 및 수분 함유량 측정결과가 SF₆ 가스 성분 건전성 및 사용 가능성을 확인하는 점검으로 SF₆ 가스 누설 시험의 결과가 년 1%(21Ir 경과후 5ppm이하 일 것) 이하 이어야 하며, SF₆ 가스 성분의 순도가 98% 이상을 유지하고 수분 함유량 측정 결과가 300ppm 이하 인지를 확인한다. 또한, SF₆ 가스 구동용 공기압력 및 밀도스위치 등 현장계기가 허용기준(시험절차서 기준값 참조)을 만족하는 것을 확인한다.

2.4.1.4 차단기 내부 점검

스위치야드 345kV 차단기 내부의 물리적인 손상이나 비정상적인 현상 등을 점검하여 차단기 내부의 건전함을 확인한다. 차단기 붓싱 표면상태, 주회로 단자 및 각종 볼트 조임 상태, 이물질 유입여부 등을 확인한다.

2.4.1.5 단로기 동작시험 및 피뢰기 건전성 확인

스위치야드 단로기와 차단기, 접지단로기와 선로단로기 기간 연동시험이 관련 시험절차서에 따라 적절하게 점검 및 시험되고 있으며, 피뢰기 외관점검 및 저항측정 등이 판정기준(시험절차서 기준값 참조)을 유지하는가를 확인한다.

2.4.1.6 보호계전기 및 차단기 연동시험

발전소 주요설비 등을 보호하는 감중보호계전기에 대한 개체 점검 및 시험과 보호계전기 동작에 의한 해당 차단기 동작을 확인하는 연동시험을 통하여 스위치야드 345kV 차단기 및 모션 보호설비의 성능 저하가 없음을 확인하는 시험으로 보호계전기의 개체 점검 및 시험이 관련 시험절차서에 따라 적절하게 수행되고 있으며, 주발전기, 주변압기, 소내보조변압기, 대기보조변압기 등의 주요설비 보호를 위한 보호계전기 동작으로 해당 차단기가 동작되는 연동상태가 적합함을 확인한다.

2.4.1.7 제어전원 점검

스위치야드 345kV 차단기에 대한 제어전원의 건전성을 확인하는 점검으로 AC/DC Source 동작상태 및 Alarm 상태 등이 관련 시험절차서에 따라 적합하게 점검되고 있음을 확인한다.

2.4.1.8 공기압축기 점검

스위치야드 345kV 차단기 및 단로기 등에 구동용 공기를 공급하는 공기압축기의 건전성을 확인하기 위해 공기압축기 자동기동, 안전밸브 및 압력스위치 점검 등이 관련 시험절차서에 따라 적합하게 점검되고 있음을 확인한다.

2.5 전력계통시설에 대한 검사점검표

본 연구에서는 개발된 검사지침서를 바탕으로 각 검사 항목에 대해서 그림 4 표준형원전의 발전기설비계통 검사점검표에서 보여 지는 것과 같이 각 노형별 원전 2차 측 전력설비에 대한 검사점검표를 개발하였다.

3. 결 론

이 논문에서는 국내 원전 불시정지에 영향을 미치는 주요 전력설비로서 발전기, 변압기 및 스위치야드 차단기 설비를 선정하고, 이들 설비에 각각에 대해서 기술배경 및 기술기준을 검토하였다. 이러한 검토를 통하여 각각의 전력설비에 대해 점검 및 시험 등을 통하여 확인되어야 할 사항을 도출하고 그에 대한 허용기준을 제시하였다. 본 연구를 통하여 개발된 원전 2차 측 전력설비의 검사지침서 및 점검표는 원전 검사에 적극 활용은 물론, 관계법령의 근거 자료 및 기술기준을 제공할 수 있으며 원전 신뢰도 향상과 기술수준의 자립에도 기여할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE Std 67-1990, "IEEE Guide for Operation and Maintenance of Turbine Generators"
- [2] IEEE Std 43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery"
- [3] IEEE C57.12.00-2000, "IEEE Standard General Requirement for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers"
- [4] NUREG-0800, Sec. 8.2 App. A, "Guidelines for Generator Circuit Breakers/Load Break Switches"