

2016-09호(160512HU2)

원전 사고 · 고장 조사 보고서

제목 : 한울 2호기 계획예방정비 중 소내전원 절체실패에 의한 비상디젤발전기 전원공급(사건발생일 : 2016.05.12.)

2016. 6. 14



한국원자력안전기술원
KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY

원전 사고·고장 조사 보고서

보고서 번호 : 제2016-09호(160512HU2)
제 목 : 한울 1호기 계획예방정비 중 소내전원 절체실패에 의한
비상디젤발전기 안전모선 전원공급
발생 호기 : 한울 2호기
발생 일시 : 2016년 5월 12일(목), 11시 10분
발전소 운전모드/원자로 출력 : 운전모드 3 (정상저온정지) / 0 % 미입계
원자로 형 : PWR(Framatome) 3 Loops
발전소출력 : 2,775 MWth / 1,009 MWe
운영허가일 : 1988년 12월 29일

사건 요약

2016년 5월 12일(목) 11시 10분경, 계획예방정비 중 인 한울 2호기에서 비안전 등급 소내전원 절체시험 중 대기보조변압기측 인입차단기 닫힘실패로 비상디젤발전기가 안전모선에 전원을 공급하였다.

대기보조변압기측 인입차단기 닫힘실패 의한 소내전력계통 과도 기간 중, 안전모선 저전압에 따른 비상디젤발전기 자동기동 및 안전계통 부하투입 등은 설계된 바에 따라 작동하였고, 발전소 1,2차 계통의 주요 운전변수는 안정적으로 유지되었으며 소내·외 방사선 관련 특이사항은 없었음을 확인하였다.

사건조사 결과, 비안전등급 소내전원 절체시험(소내보조변압기 → 대기보조변압기) 시 B계열 비상디젤발전기(LHQ) 자동기동 및 대기보조변압기측 인입차단기 닫힘신호는 정상적으로 발생하였으나, 동 차단기 본체의 투입상태 비정상으로 6.6kV 안전모선 B계열의 정상전원이 차단되면서, 비상디젤발전기(LHQ)가 해당계열에 전원을 공급한 것으로 평가되었다.

원전운영자는 6.6kV 고압모선 차단기 Trolley Interlock Lever 정상위치 표식 부착, 비안전등급 소내전원 절체시험절차서 보완, 6.6kV 비안전등급 차단기 일부교체, 대기보조변압기측 인입차단기 Trolley Interlock Lever 정상위치 감시용 스위치 간극조정 검토 등의 단기조치사항을 완료하였고 6.6kV 비안전모선 차단기 전량교체, 차단기 조작 관련 운전절차 보완 등의 중장기대책은 수립하였고 이에 대해 검토한 결과, 유사사건 재발방지대책으로 적절한 것으로 평가한다.

따라서 KINS는 원전운영자의 조치사항 적절성 및 원전 상태 평가 결과에 근거하여 기술적 측면에서 발전소 안전성에는 문제가 없는 것으로 판단한다.

1. 개요

- 2016년 05월 12일 11:10분, 계획예방정비 중인 한울 2호기에서 비안전등급 소내전원 절체시험 중 대기보조변압기측 인입차단기 투입실패로 비상디젤발전기가 자동으로 기동하여 해당계열의 안전모선에 전원을 공급하였다.
- 이 사건은 보고규정(원자력안전위원회고시 제2014-17호) 별표 3.2.마 “해당 안전모선 저전압에 의해 비상디젤발전기가 자동기동되어 전력을 공급한 경우”에 해당하는 보고대상사건이다.
- 한국원자력안전기술원은 사건의 원인 및 영향 파악과 원전운영자 조치, 안전성 영향 평가, 수립된 재발방지대책의 적절성 평가를 위해 현장조사를 수행하였다.

2. 사건 경위

2.1 사건 전 발전소 운전상태 (5.12(목), 11:10)

- 원자로 열출력 : 0%, 미임계
- 발전기 출력 : 0%, 터빈-발전기 정지상태
- 원자로냉각재계통 압력 : 2.3bar.a
- 원자로냉각재계통 평균온도 : 31℃
- 증기발생기 평균압력 : 0.8bar.a

2.2 시간대 별 사건전개 과정

2016. 5. 11(수)

- | | |
|-------------|---|
| 13:30~17:00 | • 6.6kV LGB/C 비안전모선 대기보조변압기(SAT ¹⁾)측 인입 차단기(LGB002JA, LGC002JA) 일반점검 수행 |
|-------------|---|

2016. 5. 12(목)

- | | |
|--------------|---|
| 10:20 분경 | • 비안전등급 소내전원절체시험(주기-5821) 착수 |
| 10:45 분경 | • 비안전모선(LGA, LGB) 및 안전모선 A계열(LHA) 전원절체 완료 |
| 11:10:42:904 | • 비안전모선(LGC) 저전압 시험신호 인가 |
| 11:10:42:990 | • 소내보조변압기(UAT ²)측 인입차단기(LGC0001JA) 자동 |

1) SAT: Stand-by Auxiliary Transformer

	개방
11:10:44:089	• 안전모선 B계열 저전압계전기 작동
11:10:44:996	• B계열 비상디젤발전기(LHQ) 자동기동(소내전원 절체시험 중 발생하는 정상 작동신호로 안전모선 전원 공급대기상태 유지) - <u>대기보조변압기측 인입차단기(LGC002JA) 미투입</u> 으로 전원 절체실패
11:10:51:248	• 안전모선 B계열 정상전원측 인입차단기(LHB001JA) 자동 개방
11:10:51:281	• 안전모선 B계열 부하탈락 신호발생
11:10:52:891	• <u>안전모선 B계열 비상디젤발전기측 인입차단기(LHB002JA) 자동투입(비상디젤발전기 안전모선 전원공급)</u>
11:11:10:828	• 소내보조변압기측 인입차단기(LGC0001JA) 수동 투입으로 해당모선 전원 복구
11:19:50:114	• 안전모선 B계열 전원절체(비상디젤발전기 → 소내보조변압기)
11:33:21:670	• B계열 비상디젤발전기(LHQ) 수동정지

3. 안전성 평가

- KINS 사건조사팀은 안전모선 저전압 발생에 대한 발전소 안전성 확인을 위하여 1) 사건발생 원인평가, 2) 발전소 계통·기기 거동 및 운전원 조치의 적절성 평가, 3) 재발방지대책 적절성 평가를 수행하였다.

3.1 사건 전개과정 확인결과

다음은 원전운영자가 사건발생 직전에 수행한 비안전등급 소내전원 절체시험(UAT → SAT)과 사건발생 후의 계통거동 및 운전원조치의 적절성에 대하여 KINS 조사팀이 조사 및 확인한 사항이다.

- 10:20분경부터 비안전등급 소내전원 절체시험(주기-5821) 착수되었다. 해당 전원절체시험 비안전등급 소내전원이 소내보조변압기에서 대기보조변압기로 자동절체 후 안정적으로 소내에 필요한 전력을 공급받을 수 있는지 점검하기 위해 실시된다.
- 11:10분경, 시험원은 6.6kV 비안전모선(LGA, LGB) 및 안전모선(LHA) 전원절

2) UAT: Unit Auxiliary Transformer

체 시험완료 후, 6.6kV 비안전모선 LGC 저전압에 의한 자동 전원절체 시험을 위하여 차단기 분전반 단자를 제거하여 해당 모선의 저전압계전기를 작동시켰다.

※ 한울 1호기 6.6kV 비안전모선은 4개(LGA, LGB, LGC, LGD)로 구성되어 있으며, 6.6kV A계열 안전모선(LHA)은 LGB 비안전모선 또는 비상디젤발전기 A로부터, B계열 안전모선(LHB)은 LGC 비안전모선 또는 비상디젤발전기 B로부터 전원을 공급받음.

- 6.6kV 비안전모선 LGC 저전압계전기 작동에 의해 소내보조변압기측 인입차단기(LGC001JA)가 자동개방 된 후 LGC 비안전모선으로부터 전력을 공급받고 있는 안전모선 B계열(LHB) 저전압계전기 작동으로 비상디젤발전기(LHQ)가 자동으로 기동되었으나, 대기보조변압기측 인입차단기(LGC002JA)가 투입되지 않았다.(주기-5821 10.3항, 6.6kV LGC 모선 저전압에 의한 자동 전원절체 시험 실패)

⇒ “3.2 사건 발생원인 평가”에서 상세 분석

- 대기보조변압기측 인입차단기 미투입으로 인한 전원절체실패로, 비안전모선으로부터 공급받는 안전모선 B계열 정상전원 인입차단기 개방 및 비상디젤발전기 출력차단기가 투입되어 안전모선에 전원을 공급하였다.
- 이후 운전원은 수동으로 6.6kV 비안전모선 LGC를 복구하였으며, 비상디젤발전기로 안전모선에 전원을 약 8분 58초 동안 공급한 후 비상디젤발전기 전원공급이 차단되었다.

⇒ “3.3 발전소 계통기기 거동 및 운전조치 평가”에서 상세 분석

3.2 사건 발생원인 평가

3.2.1 비상디젤발전기 B(LHQ) 자동기동 및 전원공급 원인

- 원전운영자는 비안전등급 소내전원 절체시험을 위해 시험절차에 따라서 수동으로 6.6kV 비안전모선(LGC) 저전압계전기를 작동시켰다. 이에 따른 소내보조변압기측 인입차단기(LGC001JA) 개방으로 6.6kV 비안전모선(LGC) 및 하부 안전모선(LHB) 전원상실이 발생하여 비상디젤발전기(LHQ)가 자동으로 기동되어 대기상태를 유지하였다.

- ※ 한울2호기 비상디젤발전기의 자동기동 조건은 안전주입신호(SI), 격납건물 고-고압력(HHCP), 6.6kV 안전모선 전압상실(LOV, Loss of Voltage) 조건이며, 금번 전원 절체시험 과정 중 6.6kV 안전모선 전압상실에 따라 비상디젤발전기가 자동기동함.
- ※ 한울2호기 설계특성에 따라서 비안전모선의 전원절체는 잔류전압절체에 의하여 이루어지며, 이에 따라 6.6 kV 비안전/안전모선에 순간 전압상실이 발생하고 비상디젤발전기가 기동 및 대기상태를 유지함. 이후 전원절체가 정상적으로 이루어진 경우 비상디젤발전기는 수동으로 정지함.
- 소내보조변압기측 인입차단기(LGC001JA)가 개방되고 1.5초 이후에 대기보조변압기측 인입차단기(LGC002JA)가 투입되어야 하나, 투입이 실패하였다. 안전모선 B계열의 전압상실에 유지됨에 따라서 안전모선의 부하는 탈락하였으며 이후에 비상디젤발전기의 출력차단기(LHB002JA)가 투입되어 안전모선에 전원을 공급하였다.
- 비상디젤발전기의 출력차단기 투입이후에 안전부하가 설계된 순서에 따라 재기동되어 허용된 기동시간 기준이 만족하였음을 사건전개기록지, 정보목록 등을 통해 확인하였다. 이는 비상디젤발전기 및 부하순차투입기의 목적과 설계에 따라 적합하게 동작한 것으로 원전운영자가 도출한 비상디젤발전기 자동기동 원인 및 기동에 따른 부하의 순차적 투입결과는 적절한 것으로 평가한다.

3.2.2 대기보조변압기측 인입차단기(LGC002JA) 투입실패 원인

- 원전운영자는 대기보조변압기측 인입차단기(LGC002JA) Trolley Interlock Lever의 비정상 위치로 인하여 동 차단기 투입이 실패한 것으로 평가하였다.
 - 원전운영자는 원인확인을 위하여 차단기 논리회로 점검, 차단기 동작상태 점검, 멀티핀 및 회로 건전성 점검 등을 수행하였으며, 점검결과 차단기 Trolley Interlock Lever의 위치가 불완전하여 닫힘신호가 제어회로에 정상적으로 입력되었음에도 실제 차단기가 투입되지 않은 것으로 확인함.
- ※ Trolley Interlock Lever는 차단기 본체와 외함을 물리적으로 고정시켜 차단기 비정상 위치에서 차단기 투입방지 역할을 하며, 정상위치는 Trolley Interlock Lever가 8시 방향에 위치해야 함.
 - 차단기 본체를 완전히 인출한 후, Trolley Interlock Lever 비정상 위치(7시

방향)로 놓고 차단기 제어전원을 인가한 상태에서 모의 투입신호 입력 시 동 차단기 투입실패가 재현되었으며, Trolley Interlock Lever 정상위치(8시 방향)에서 차단기 정상투입이 확인됨.

- 차단기 본체를 비안전모션 LGC 차단기반에 인입한 상태에서, Trolley Interlock Lever를 정상위치에 고정한 후, 주기-5821 10.3항(6.6kV LGC 모션 저전압에 의한 자동 전원절체 시험)을 재 수행 하였으며 대기보조변압기측 인입차단기가 허용기준(2초) 이내에 투입되어 전원절체시험이 만족함.

※ Trolley Interlock이 불완전한 경우 차단기 투입코일은 여자 되지만, 차단기의 기계적인 투입 메커니즘은 동작하지 않음.

- KINS 사건조사팀은 차단기 Trolley Interlock Lever 비정상 위치로 인하여 차단기 투입실패에 대한 재현시험을 현장 확인하였으며, 정상위치 전환 후 전원절체시험이 만족하였으므로 원전운영자의 원인분석이 적절한 것으로 평가한다.

3.2.3 차단기 Trolley Interlock Lever 비정상 위치 원인

- 원전운영자는 사건전일(5월 11일) 6.6kV 차단기 일반점검을 마치고, 대기보조변압기측 인입차단기(LGC002JA) 정상복구 과정에서 차단기 Trolley Interlock Lever가 비정상 상태로 위치한 것으로 추정하였다.
- 사건당일, 전원절체시험 실패 후 정비원은 차단기 Trolley Interlock Lever 위치기록을 확보하였으며, 확인결과 Trolley Interlock Lever는 비정상 위치(약 7시 방향)로 고정되어 있었음.
- 원전운영자는 차단기 Trolley Interlock Lever 비정상 위치에 대한 표식 부재로 차단기 조작자가 정상위치를 확인하기 어렵고 장기간 사용에 따른 차단기와 차단기 외함간 변형으로 차단기 Trolley Interlock Lever가 불완전하게 위치한 것으로 평가하였다.
- Trolley Interlock Lever를 6시 방향으로부터 시계방향으로 일정부분 돌릴 경우, 정상위치에 도달하지 않은 경우에도 차단기 제어반의 경보(Fault Lamp)와 주제어실의 관련경보가 소멸되어 조작자는 차단기 본체가 정상적으로 고정된 것으로 판단할 개연성이 있음. 이에 원전운영자는 Trolley Interlock Lever 정상위치 도달 시 경보가 소멸되도록 정상위치 감시용 스

위치 간극조정을 검토하였으며 검토결과, 간극조정으로 차단기 트립 메커니즘에 영향을 줄 수 있어 간극의 임의조정은 어려운 것으로 확인됨.

- 차단기 본체와 외함이 노후화에 의한 변형으로 Trolley Interlock Lever 조작 시 원활하게 동작하지 못하여 정상위치인 8시 방향까지 위치하지 않고 불완전한 위치에 놓일 수 있음.
- 한울 2호기 운영허가 이후 교체이력이 없는 차단기 사용에 따른 노후화, 차단기 비정상 투입을 식별할 수 있는 판단기준(경보) 부재를 근거로 한 Trolley Interlock Lever 비정상 위치원인 평가는 적절한 것으로 판단한다.

3.3 발전소 계통·기기 거동 및 운전조치 평가

- 사건조사팀은 발전소 과도상태 대응 적절성 평가를 위해 사건전개기록지, 경보목록, 1,2차측 주요 운전변수, 운전원일지, 방사선감시기 기록 등을 확인하였다.
- 2호기 계획예방정비 중으로 사건발생 전에 안전모선 A계열은 정상적으로 대기보조변압기로 전환되어, A계열 주요 안전계통 기기들이 운전 중이었으며 노심 잔열제거는 A계열을 통해 이루어지고 있었으므로 금번 전원절체 실패로 인하여 공학적안전설비 A계열 안전기능에는 영향이 없었음.
- “비안전등급 소내전원 절체시험(주기-5821)”을 수행하는 과정에서 소내보조변압기에서 대기보조변압기로의 전원절체가 이루어지지 않았으나, 비상디젤발전기 전원이 순차적 자동 부하투입 상태에서 약 8분 58초 동안 전원을 공급하였으므로 공학적안전설비 B계열 안전기능에는 문제가 없는 것으로 평가됨.
- 이후 운전원은 수동으로 6.6kV LGC 비안전모선 복구하여 비상디젤발전기를 정지함.
- KINS 사건조사팀은 한울 2호기 전원절체 시험실패로 인한 과정에서 발전소 1,2차 계통의 주요 운전변수를 점검한 결과, 해당 사건은 계획예방정비 중 발생한 사건으로서 주요운전 변수의 변화가 없음을 확인하였고 소내·외방사선 관련 특이사항 또한 없었음을 확인함.
- 해당 주기시험 실패로 인하여 발생한 비상디젤발전기 안전모선 부하탈락 및 이에 따른 순차적 자동 부하투입 등은 설계된 바에 따라 적절하게 작동하였

고, 이후 6.6kV LGC 비안전모선 복구 및 비상디젤발전기 수동정지를 위한 운전원의 대응조치는 적절한 것으로 평가한다.

3.4 재발방지 조치 적절성

원전운영자는 확인된 사건 발생원인과 관련하여 재발방지대책을 다음과 같이 제시하였다.

○ 단기 조치 : 완료

- 6.6kV 고압모선 차단기 Trolley Interlock Lever 정상위치 표식 부착
 - 2호기 6.6kv 고압모선 차단기 Trolley Interlock Lever 정상위치 표식 부착(안전 및 비안전등급 차단기 6대)
- 비안전등급 소내전원 절체시험(주기-5821)절차서 보완
 - Trolley Interlock Lever가 정상위치에 놓여 있는지 확인(경보 및 Fault Lamp 소멸)한 후 전원절체 시험을 착수할 수 있도록 절차서 보완
 - SAT 측 인입차단기(LGB002JA, LGC002JA) 투입 실패 시, UAT 측 인입 차단기(LGB001JA, LGC001JA) 수동 재투입 시기 명확화
- 6.6kV 비안전등급 차단기 일부교체
 - Trolley Interlock Lever에 고정장치가 설치된 고압차단기로 교체(2호기: SAT 인입차단기(LGB/C 002JA) 2대를 제외한 16대 교체완료)
- 대기보조변압기측 인입차단기 Trolley Interlock Lever 정상위치 감시용 스위치 간극조정 검토
 - 차단기 운전위치(Rack-In)에서 Trolley Interlock Lever가 정상위치에 있을 때 관련 경보 및 Fault Lamp가 소멸되도록 스위치 스트로크 조정

○ 장기 조치 : 완료

- 6.6kV 비안전모선 차단기 전량교체('17.12)
 - 비안전모선 차단기(LGA/B/C/D) 20대(1호기 18대: '16.12월, 2호기 2대: '17.12월)
- 6.6kV 고압모선 차단기 조작 관련 운전절차 보완('16.12)
 - 차단기를 비운전상태(Rack-out)에서 운전상태(Rack-in) 상태로 전환 시 Trolley Interlock Lever를 정상위치(표식 위치)까지 조작하는 절차 추가

4. 보완요구사항

- 없음.

5. 결론

- 이번 사건은 계획예방정비중인 한울 2호기에서 비안전등급 소내전원 절체시험 중 대기보조변압기측 인입차단기 닫힘실패로 비상디젤발전기가 안전모선에 전원을 공급한 사건이다.
- 전원절체 시험실패로 인한 과정에서 비상디젤발전기 안전모선 부하탈락 및 순차적 부하투입 등은 설계된 바에 따라 적절하게 작동하였고, 발전소 1,2차측 계통의 주요 운전변수는 변화 없이 안정적으로 유지되었으며, 소내·외 방사선 관련 특이사항은 없었음을 확인하였다.
- 사건조사 결과, 비안전등급 소내전원 절체시험(소내보조변압기 → 대기보조변압기) 시 B계열 비상디젤발전기(LHQ) 자동기동 및 대기보조변압기측 인입차단기 닫힘신호는 정상적으로 발생하였으나, 동 차단기 본체의 투입상태 비정상으로 6.6kV 안전모선 B계열의 정상전원이 차단되면서, 비상디젤발전기(LHQ)가 해당계열에 전원을 공급한 것으로 평가되었다.
- 원전운영자는 이번 사건과 관련하여 6.6kV 고압모선 차단기 Trolley Interlock Lever 정상위치 표식 부착, 비안전등급 소내전원 절체 시험절차서 보완, 6.6kV 비안전등급 차단기 일부교체, 대기보조변압기측 인입차단기 Trolley Interlock Lever 정상위치 감시용 스위치 간극조정 검토 등의 조치를 완료하였다. 향후 유사사건의 재발방지 방안으로 6.6kV 비안전모선 차단기 전량교체, 차단기 조작 관련 운전절차 보완 등의 장기 대책을 수립하였다.
- KINS는 유사사건의 재발방지를 위한 대책이 적절하게 수립된 것을 확인하였고 원전운영자의 조치사항 적절성 및 원인평가에 근거하여 기술적 측면에서 발전소 안전성에는 문제가 없는 것으로 판단한다.