

발전기 고정자냉각수 수질 이상 경험사례 분석

김정미*, 손순환

한국수력원자력(주)중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

*jeongmi00@khnp.co.kr

1. 서론

국내 원자력발전소에서는 주발전기 고정자코일의 전기저항으로 인한 과열을 방지하기 위해 별도의 고정자냉각수계통(SCW : Stator Cooling Water System)을 운영하고 있다. 일반적인 기기냉각수(1,2차 기기냉각수, EDG 냉각수 등)가 계통의 부식 방지를 위해 하이드라진(N₂H₄)이나 아질산나트륨(NaNO₃) 등의 화학방식제를 적용하는 것에 비해, 고정자냉각수는 화학처리를 하지 않은 순수(Demineralized Water)만으로 운전하는 방식이다. 이는 고정자냉각수의 운전 중 절연저항을 만족해야 하기 때문이며, 이 때문에 냉각수의 전도도를 제한치 이내로 엄격히 관리하여야 한다^[1].

최근 국내 원전에서 고정자냉각수 전도도 상승과 관련한 이상 현상을 경험하여, 국내외 유사사례와 기술문서를 검토하고 조치계획을 수립하였다.

2. 본론

2.1 고정자냉각수 수질 관리현황

고정자냉각수의 주요 수질관리 항목은 절연저항 요건 충족을 위한 전도도, 순수 계통에서 고정자 권선 구리재질의 부식 방지를 위한 용존산소 농도, 부식 및 재질 건전성 확인을 위한 구리(Cu)와 철(Fe) 이온 농도이다. 국내 표준형원전에서 적용하고 있는 고정자냉각수 수질관리 기준은 <Table 1> 과 같다.

Table 1. Monitoring Parameters for SCW

Parameter	Unit	Normal Range	Sampling Frequency
pH	-	6.0 ~ 8.0	Weekly
Conductivity	μS/cm	< 0.5	Weekly
Dissolved Oxygen	ppm	2 ~ 8	Weekly
Fe	ppb	< 20	Weekly
Cu	ppb	< 20	Weekly

이러한 수질 요건을 충족시키기 위해 전체 냉각수 운전 유량 중 10%는 연속적으로 이온교환수지와 수지탑 전단필터로 구성된 정화시스템을 통과하여 재공급 하고 있다^[2].

2.2 전도도 상승 경험사례 현상 분석

국내 표준형 원전 A발전소에서 고정자냉각수 수질 전도도가 운전 주기 초 약 0.10 μS/cm 미만으로 안정적인 상태를 유지하였으나, 약 5개월 만에 <Fig. 1>에서 보는 바와 같이 서서히 상승하여 전도도 0.28 μS/cm에서 전량 교체하였다(1차 교체). 전도도 상승 시 Cu, Fe, DO 농도 등 다른 수질관리 항목은 변화가 없었다. 1차 수지 교체 후 약 3개월 경과 시부터 전도도가 다시 상승하여, 약 5개월 후에 전도도 0.25 μS/cm에서 2차 교체를 수행하였다. 수지 2차 교체 후 전도도에 큰 변화가 없어 계통의 Feed & Bleed를 반복 수행하고, 약 1개월 만에 3차 수지 교체 후 계통 수질을 지속 관리하고 있다.

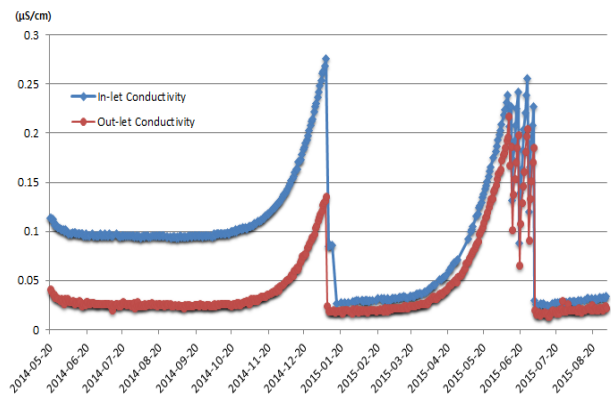


Fig. 1. SCW Conductivity Trends at Ion Exchange Bed in-let and out-let.

2.3 원인분석

국내외 경험사례 검토 결과, 고정자냉각수 계통 수질 이상 사례의 일반적인 원인은 1) 계통 재질 보호피막 불안정에 따른 부식생성물 증가, 2) 2차 기기냉각수 누설 유입, 3) 이온교환수지 불량 또는 성능 미흡, 4) 필터로부터의 오염물질 용출 등이다. 5) 이 외 정비용 오일류의 유입, 공급수의 수

질 문제, 계통 배기 불량 등이 원인이 되는 경우가 있다^{[3],[4],[5]}.

재질의 보호피막(CuO, Cu₂O 형태)이 불안정한 경우 전도도 증가와 함께 구리 농도가 같이 상승한다. 본 사례에서는 구리 농도의 변화가 없어 보호피막 불량이 주원인은 아닌 것으로 판단하였다. 또한 2차기기냉각수(TBCCW)가 누설되어 유입되는 경우, 방식제 성분이 검출되어야 하나 본 발전소에서 방식제로 쓰이는 하이드라진(N₂H₄) 분석 결과 검출되지 않았고, 2차기기냉각수가 사용되는 열교환기를 교체 운전 시 전도도 상승 경향에 변화가 없어 이로 인한 문제는 아닌 것으로 판단하였다^[5].

2.3.1 이온교환수지 이상 검토

국내 다수 호기에서 고정자냉각수 계통의 이온교환수지 성능 문제로 수질 이상을 경험한 사례가 보고되었다(한울2호기, 한울4호기, 한울5호기 등)^[4]. 본 사례의 수지 성능을 확인하기 위하여 이온교환수지 교환용량, 함수율, 재생율, 외관검사 등 물리·화학적 특성 분석을 수행하였으나, 특이사항이 발견되지 않았고, 산화 진행 정도가 양호한 것으로 판단되었다. 또한 기존 사례에서 이온교환수지 합성 물질인 Trimethylamine(N⁺(CH₃)₃OH)이 전도도 상승을 유발한 사례가 있어 분석을 시행하였으나, 해당 계통수에서 검출 농도 미만으로 분석되었다.

2.3.2 필터 용출물로 인한 오염

고정자냉각수의 정화계통에 설치되어 있는 필터에서 유기물질 용출로 인한 전도도 상승사례는 대부분 발전소 운전 주기 초에 나타나거나, 계획예방정비 기간 중 필터 세척 시 거품 발생 현상으로 확인할 수 있다. 본 사례는 주기 초가 아닌 운전 시작 수개월 후에 전도도가 급상승 되는 양상으로 기존 보고 사례와 차이가 있으나, 장기용출 가능성을 고려하여 필터 용출물에 대해 GC-MS 분석법으로 Methyl isobutyl ketone 등 10종의 의심 대상 화학물을 분석한 결과 대조 시료와 비교하여 의심 물질을 확인할 수 없었다.

2.4 주요 조치방안 도출

해당 발전소는 3회에 걸친 이온교환수지 교체 후 전도도가 관리 범위 이내로 유지되고 있으나 시간 경과에 따라 다시 점진적인 전도도 상승 경향이 관찰되고 있으므로, 이에 대한 지속적인 관리와 조치방안을 강구할 필요가 있다.

2.4.1 단기 조치 방안

전도도 상승으로 인한 수질 문제가 계통 재질 부식에 영향을 미치지 않도록 구리농도와 용존산소 등 관리항목들을 지속적으로 모니터링하고, 전도도 상승의 주원인 물질을 규명할 수 있도록 미량 유기, 무기 분석을 추가 시행할 계획이다.

2.4.2 중장기 조치 방안

차기 계획예방정비 기간 중 1) 고정자냉각수 계통의 점검·정비 계획 수립 이행 2) 적절한 건식보관을 통한 구리피막 안정화 3) 이온교환수지 및 필터에 대한 철저한 사전 세척 및 점검 4) 정비용 윤활유 및 오일류 사용 주의 5) 계통 배기 상태 점검 6) 공급수에 대한 지속적 수질 관리가 필요하다.

3. 결론

최근 국내 원전에서 고정자냉각수 전도도 상승과 관련한 이상 현상을 경험하여, 국내외 유사사례와 기술문서를 검토하고, 원인 분석을 수행하였다. 전도도 상승은 재질 부식이나 계통 누설이 아닌 외부 오염 물질 유입에 의한 것으로 판단하였다. 이에 따라 이온교환수지와 필터 용출물에 대한 유기화합물을 분석하였으나 특정 의심 물질을 규명하지는 못하였으며, 이에 대한 장단기적 조치 방안을 수립하여 수질을 지속관리하고 있다.

4. 참고문헌

- [1] EPRI Technical Report, "Closed Cooling Water Chemistry Guideline", Rev.01 to TR-107396 (2004).
- [2] EPRI Technical Report, "Prevention Flow Restrictions in Generator Stator Water Cooling circuits", TR-1006684 (2002).
- [3] EPRI Technical Report, "Generator Stator Cooling Water System Layup Guideline", TR-1004952 (2003).
- [4] 한국수력원자력(주), 운전경험보고서 8건 (KONIS-원자력 기술정보활용).
- [5] INPO Plant Event Operating Experience Daily Data Reports, "Stator Cooling Water Contamination By Cooling Water Infiltration", OE22670 (2006).