

지중송전 케이블 급유조 절연유 H₂과다 원인분석

오장만*, 이봉희*, 방항권*, 윤동수*
한국전력공사 중앙교육원*

Analysis of H₂ Gas in the oil Tank of Underground Power cable

Jang-Man Oh*, Bong-Hee Lee*, hang-Kwon Bang, Dong-Soo Yoon*
Korea Electric Power Corporation*,

Abstract -초기투자비용의 과다 발생으로 제한적으로 시공되고 있는 지중송전케이블의 역사는 1971년 154kV급 OF케이블이 처음으로 한국전력에 의해 상용운전후 현재에 이르고 있으며, 최근들어 지중케이블에서 발생된 송전선로 고장은 대부분 대형화되고 있어 초창기 시공된 케이블 종류의 대부분을 차지하고 있는 OF 케이블의 현상태를 정확하게 진단하고 각종 현상들을 분석하여 결론을 도출하지 않으면 안된다.

실제 계통에서 운전되고 있는 설비를 절거하여 상태를 관정할 수 있는 여건이 아니기 때문에 케이블의 현상태를 정확하게 분석하기 위해서는 절연유의 분석 등 간접적인 방법을 택하지 않을 수 없다.

OF 케이블에 있어서 급유조는 케이블의 성능에 가장 직접적인 영향을 미치는 구성요소이며, 급유조에서 기준치보다 2~5배에 해당되는 이상가스의 발생원인을 파악하여 예방대책을 수립할 수 있게 되었다.

분리기의 용접부분 또는 접합부분에 틈이 생기지 않도록 하고 틈 부위에는 세라믹이나 폴리머등으로 코팅하여 H₂가스의 과다 발생을 방지할 수 있었다.

1. 서 론

1971년 154kV급 OF(Oil Filled) 지중케이블이 한국전력에 의해 처음으로 시공되어 상용운전에 들어 간후 1983년부터 XLPE케이블의 병용 운전까지 도시인구의 급증으로 인한 전력수요에 능동적으로 대처하고 가공송전선로 건설의 어려움을 극복하기 위한 좋은 대안이었다. 지중송전선로는 초기 투자비용의 과다, 고장발생시 보수에 어려움에도 불구하고 지속적으로 건설되었으며, 2000년 초까지 건설된 OF케이블은 현재 50%가량의 점유율을 나타내고 있다. 건설된지 오래된 OF 케이블의 유지보수방안, 초기 건설된 OF 케이블의 수명예측등 새로운 기법으로 케이블의 안정적인 설비운동을 위한 각종 현상들을 분석하고 고장을 사전에 예방하기 위한 조치가 그 어느 때 보다 필요하다. 무엇보다 1995년부터 여러 가지 여건으로 인해 OF케이블의 신규건설이 제한되고 있으며 이로 인해 케이블 제작사의 공장설비, 제조 및 시공인력, 장비등이 절수되고 있는 현실이며, 고장발생시 신속한 복구가 현실적으로 불가능하게 되며 이에 대한 대안을 미리 수립하기 위한 OF 케이블의 각종 현상들을 정확하게 분석하는 것이 무엇보다 필요하다. 154kV 대치#1,2T/L 급유조의 절연유를 분석한 결과 일부에서 H₂함유량이 기준치보다 2~5배 초과하여 나타난 원인을 규명하고 고장방지대책을 강구하고자 한다.

2. 본 론

2.1 OF 케이블

2.1.1 OF 케이블의 구조 및 급유계통의 구성



그림1 OF케이블의 구조

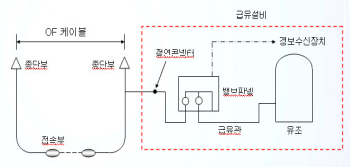


그림2 급유계통의 구성

2.1.2 급유조의 종류

급유조는 급유설비의 주요부분을 구성하는 것으로 압력형과 중력형으로 대별되지만 국내에서는 주로 압력형으로 사용하고 있다. 압력형에는 셀속에 가스가 봉입된 내가스형(일명 PT, Pressure Tank)과 셀 바깥의 유조내에 가스가 봉입된 외가스형(일명 BPT, Bellows Pressure Tank)이 있다.

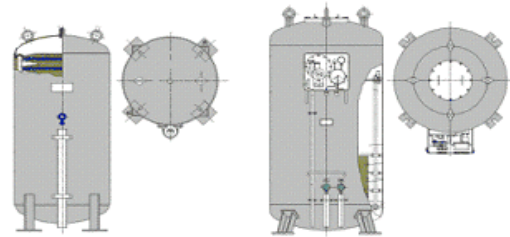


그림 3 PT(좌)

BPT(우)

2.2 지중송전케이블 급유조 절연유 분석

2.2.1 설비현황

표 2 절연유분석 송전선로 현황

| 선로명 | 설치년월 | 절연유종류 | 유량 | 비 고 |
|-----------|---------|--------|-------|-----|
| 154kV대치#1 | 1985.12 | 하드알킬벤젠 | 200 l | |
| 154kV대치#2 | 1987. 3 | 하드알킬벤젠 | 200 l | |

2.2.2 절연유 H₂ 발생원인 분석

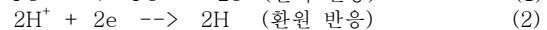
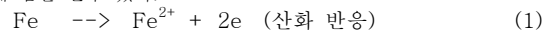
표3 급유조내 절연유 분석 결과

| 가스분석항목 | 기준치 | 분석치 | 비 고 |
|----------------|-----------|------|----------|
| H ₂ | 1116-2622 | 500 | 기준치 2~4배 |
| 전산가(mg KOH/g) | 0.01 | 0.02 | |
| pH | 4.4 | | |

상기표에서 나타난 결과와 같이 H₂가스가 기준치의 2~5배에 해당하는 값이 나타났다. H₂가스는 표4에서와 같이 코로나 방전에 의한 결과이며 TCG(Total Combustible Gas, H₂+CH₄+C₂H₆+C₂H₄+C₂H₂+CO)의 전체적 평가에 영향을 미치게 되어 심각한 경우에는 케이블의 교체까지도 고려해야할 요소이다.

문제가 발생된 PT(급유조)를 분해점검한 결과 급유조의 분리기에서 용접부 주위 및 판재 접합부 등의 일부 부위에서 부식이 발생되었음을 확인할 수 있었다.

절연유의 pH가 산성(4.4)인 경계 절연유내에서 탄소강의 부식이 발생되면 아래와 같은 식에 의해 절연유내에 함유된 수소가수이온이 수소로 환원되게 됨을 알 수 있다.



이렇게 환원된 수소는 식(3)과 같이 반응하여 수소가스를 형성한다.



따라서 절연유 내에서 탄소강으로 만들어진 분리기의 부식이 발생되면, 그에 따른 환원반응에 의하여 절연유 내에는 고농도의 H₂가 발생될 수 있다.

예를 들어, 탄소강의 부식 속도가 10-5 A/cm², 부식 발생 총면적이 100 cm², 부식 발생 기간이 1년이라고 가정하면, 부식 반응으로 인한 발생 전하량은

$$10^{-5} \text{ A/cm}^2 \times 100 \text{ cm}^2 \times 3.15 \times 10^7 \text{ sec} = 3.15 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{sec}$$

로 된다. 그런데 1 Faraday(= 96500 Coul = 96500 A · sec)의 전하

량에 의해서는 이론적으로 1gr 당량의 H₂ gas가 발생되고 이 양은 상온 상압에서는 11.2 l이므로, 위의 부식 반응으로 인해 발생될 수 있는 H₂ gas 양은 약 3.7 l 정도가 된다. 그런데 위의 식 (3)의 반응에서 2H가 H₂로 되는 양이 전체 환원된 수소양의 약 10% 정도라고 가정하면, 발생될 수 있는 H₂ gas의 양은 약 0.37 l 정도가 된다. 이를 200 l의 PT내 절연유 농도로 환산하면 약 1850 ppm이 된다.

이상과 같은 부식으로 인한 발생 수소 농도 계산은 탄소강의 부식 속도, 부식 발생 면적, 부식 시간, H₂ 결합율 등에 있어서 일반적인 가정을 한 것이므로 본 PT의 경우를 정확히 모사 했다고는 할 수 없다. 다만, 이와 같이 탄소강의 부식에 의하여 PT내에 1000 ppm 정도 단위의 농도를 갖는 H₂ gas의 발생이 가능하다는 것을 잘 설명할 수 있다.

2.2.3 절연유 유종 가스분석 결과 판단기준

| 분석 항목 | | 기준치 (ppm) | 판단 항목 |
|-----------------|-------------------------------|---------------|------------------------|
| 수소 | H ₂ | 500 이하 | 코로나 방전에 의해서 발생 |
| 메탄 | CH ₄ | 200 이하 | 절연유의 저온열분해 |
| 에탄 | C ₂ H ₆ | 200 이하 | 저 방전 에너지에서의 코로나 방전 |
| 에틸렌 | C ₂ H ₄ | 200 이하 | 절연유의 고온열분해, 코로나 방전 |
| 아세틸렌 | C ₂ H ₂ | Trace | 고 방전 에너지에서 발생 |
| 일산화탄소 | CO | 100 이하 | 절연지의 열분해, 코로나 방전 |
| 이산화탄소 | CO ₂ | 1,000 이하 | 절연지의 열분해, 수분혼입 |
| 가연성 가스총량 | TCG | 1,500 이하 | 이상가스발생의 전체적 평가 |
| 육 불화황 | SF ₆ | 30,000 이하 | 기밀성 평가(EBG) |
| 유종 수분량 PPM | | 10 이하 | 기밀성 평가와 절연성의 영향평가 |
| 전 산 가 mg/KOH | | 0.02 이하 | 화학적 절연유열화의 전체적 평가 |
| 유전정접(Tanδ) Ω·cm | | 1 x 10E+13 이상 | 절연성의 평가 (절연유 오염상태의 평가) |
| 체적저항율 % | | 2 이하 | |

2.2.4 분리기 부식원인 분석

분리기에서 부식이 발생된 부위를 살펴보면 그림5에 나타난 것과 같이 주로 용접을 한 부위 인근에 나타나고 있으며, 부수적으로는 그림5에 나타난 것과 같이 두 철판간의 접합부위 등에 나타나고 있다.

이같은 부식 현상들은 모두 소위 틈부식(crevice corrosion)이라고 하는 것으로서 용접 또는 철판간의 접합시에 관재들 사이에 약 0.1mm 정도 이하의 아주 작은 틈이 존재하게 되는 전형적인 부식현상이다.

부식 분위기하에서 철판 사이에 미세한 틈이 존재하게 되는 경우, 부식 발생 초기에는 틈 내부나 외부 모두 일정한 산화, 환원 반응이 발생하게 되어 틈 내부가 특별히 부식이 촉진되지는 않는다. 그러나 점차 시간이 경과되면서 틈 내부에서는 환원제(본 PT의 경우 H⁺ ion)가 고갈되게 되고, 따라서 틈 내부에서는 산화반응만 발생되며 환원반응은 틈 외부에서만 발생하는 현상이 나타나게 된다. 이렇게 되면 틈의 외부는 부식이 억제되고, 틈의 내부만 부식이 촉진되는 현상이 나타나게 되고, 이 반응은 점점 가속화 된다.

분리기에 발생된 부식이 틈부식에 의한 것이라는 것은 <그림 6>에 나타난 것과 같이, 같은 분리기 내에서도 철판간의 간격이 비교적 클 때 (대략 1mm 정도 이상)에는 부식이 전혀 발생되지 않고 있음을 보아도 알 수 있다.

틈부식 이외의 부식 발생 기구(mechanism)로는 다음과 같은 것들이 있을 수 있으나, 재질, 부식 발생 형태 등으로 보아 그 가능성은 매우 낮은 것으로 판단된다.

- ① 용접제와 모재부의 재질 차이에 따른 이종금속접합부식 (galvanic corrosion): 용접부와 모재부의 재질 차이가 적음.
- ② 용접열에 의한 용접부 근처의 열영향부(HAZ: Heat Affected Zone) 형성: 부식이 용접부 주위에 띠 등의 특정 형상으로 나타나게 됨.
- ③ 절연유내의 미생물에 의한 부식(MIC: Microbiologically Induced Corrosion): 부식의 주요 형상이 구멍부식 형태(pit)로 나타나게 됨.

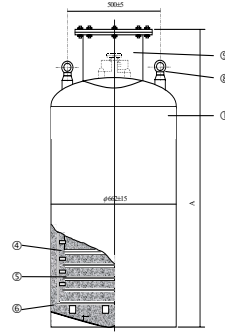


그림 5

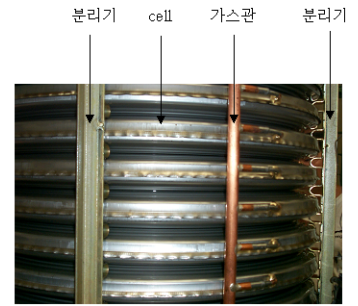


그림 6

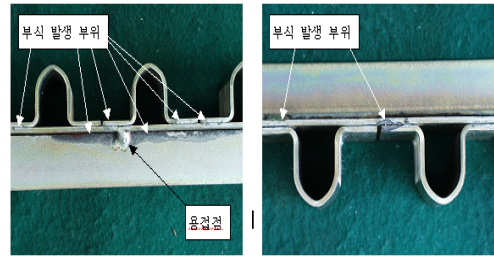


그림 7

2.2.5 부식방지대책

PT 내의 분리기의 부식 방지 대책으로는 다음과 같은 것들이 있다. 분리기의 용접 또는 접합 방법을 개선하여 철판 사이에 틈이 형성되지 않도록 한다. 또한 분리기의 틈 부위를 polymer 또는 ceramic coating 하여 이 부위가 절연유와 접촉되는 것을 방지한다. 이 목적으로 적절한 coating 재에 대하여는 별도로 PT 운전 조건 등을 정밀 검토하여 결정하는 것이 바람직하다.

3. 결 론

154kV 지중송전 OF(Oil-Filled) 케이블인 대치 #1,2 T/L 급유조(PT: Pressure Tank)의 절연유에 나타난 높은 H₂ 함유 원인 분석 결론은 다음과 같다.

절연유 내의 높은 H₂ 함유량은 PT 내부의 분리기(separator)가 부식되면서, 그에 따른 절연유 내의 H⁺ ion의 환원 반응 결과로 발생되었다. 분리기의 부식은, 분리기 내의 용접부 등에 미세한 틈이 형성되면서 이 부위에서 틈부식(crevice corrosion)이 발생되었기 때문이다.

절연유 중의 H₂ 함유량이 높을 경우, 절연유의 품질 저하는 물론이고 PT내의 cell 재질인 스텐레스강의 재질 내부 팽창(bulging), 균열(crack) 발생 등의 수소취성(HE: Hydrogen Embrittlement) 현상이 나타날 수 있으므로 정기적인 수소 함량 측정은 물론, 가능하다면 PT를 분해 점검하여 분리기 및 cell의 부식 상태 등을 정밀 점검하는 것이 바람직하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 일본전기협동연구 55권2호 케이블 절연유 가스분석 평가기준치 1999
- [2] 한국전력공사 지중송전케이블케이블시스템,송변전건설처 2002.12
- [3] 한국전력공사 “지중송전 30년사(1971-2004)”