

원자력발전소 장기사용 XLPE 케이블 성능측정

임우상, 주광호, 하체웅
원자력발전기술원

Dignosis of XLPE Cable Long-Term Used in Nuclear Power Plant

Woo-Sang Lim, Kwang-ho Joo, Che-wung Ha
Korea Hydro & Nuclear Power Co.

Abstract - 국내 원자력발전소의 고압 케이블의 체계적인 열화 진단 및 수명예측을 위한 사전작업으로 원자력발전소에서 불리한 환경 하에서 장기간 사용된 후 철거된 XLPE 전력 케이블을 대상으로 성능 측정을 수행하였다. 측정 방법으로는 VLF(Very Low Frequency) Tanδ 방법 및 상용주파 부분방전시험을 택하였다. 또한 고주파변류기(HFCT)를 사용하는 부분방전 측정방법(HFPD)에 VLF 내압기를 적용할 수 있는지 확인하였다.

1. 서 론

국내 원자력발전소에 설치되어 있는 고압케이블은 사용 년수 증가에 따른 경년열화에 대비하기 위하여 육안점검 또는 주위 온도, 방사선 준위 등 환경변수 등이 감시되고 있다. 해외에서는 미국의 경우 오래된 발전소가 많아 소내 지하에 매설된 케이블이나 접근이 곤란한 케이블에 대해서는 고장을 사전에 감지할 수 있도록 체계적인 케이블 진단을 수행하도록 요구 받고 있다 [1,2].

이에 따라 향후 체계적인 케이블 진단 프로그램을 개발하기 위한 사전작업으로 열악한 환경에서 장기간 사용된 후 철거된 케이블을 대상으로 성능진단을 수행하였다. 진단방법으로는 미국의 NRC가 권고하고 있는 방법 중에서 고압케이블에 적용 가능한 유전정접(이하 Tan δ) 측정법과 부분방전(PD) 측정법을 택하였다[3].

Tanδ 측정법은 케이블에 인가되는 시험전압과 차폐에 흐르는 전류의 위상차를 측정하여 tan δ 값의 크기로 열화상태를 판정하는 기술로서, 인가전압에 상용주파가 아닌 저주파를 사용하는 VLF tan δ 측정법을 선택하였다. 이는 측정 감도가 좋으며[4] 발전소 내 측정 작업을 위해서 장비가 소형 경량화 될 수 있다는 점을 고려하였기 때문이다.

부분방전 측정에 있어서는 상용주파 인가전압을 사용하는 고주파 부분방전 측정법으로 성능을 확인하였다. 이 방법은 실제로 원자력발전소 고압케이블에 적용된 사례가 있으나[5], 케이블 사용전압 이상의 전압에서도 부분방전 개시전압 확인을 위하여 VLF 내압기를 이용하여 저주파 전원을 인가하는 방법의 적용성도 확인하였다.

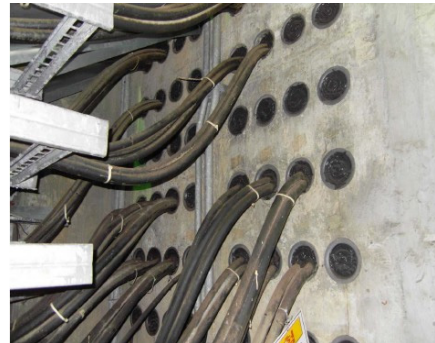
2. 대상 케이블

시험 대상으로 선정된 케이블은 그림 1에서 보는 바와 같이 터빈건물 지하층의 콘크리트 구조물의 도관을 통과하여 다른 건물에 위치한 4대의 기기냉각해수펌프에 4.16kV 전압의 전력을 공급하는 XLPE 절연재질의 케이블이다. 이 케이블 들은 30년간 사용되어 철거된 후 약 100m 길이로 잘라져 측정 장소로 운송되었으며 이 중 6개의 케이블이 시편으로 사용되었다.

3. VLF Tan Delta 측정

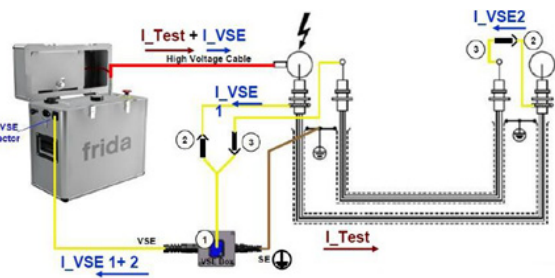
3.1 VLF Tan Delta 측정방법

VLF Tanδ 측정값의 정확성을 높이기 위하여 수거된 케이블에 기존의 수분 함량 외에 별도의 수분이 침투해서는 안되므로, 케이블 수거 후 단말이 미처리 된 상태에서 수일간 옥내 및 옥외에 보관되었던 점을 고려하여 질소가스 퍼징(N₂ Gas Purging)을 수행하였다. 케이블 단말로부터 표면을 타고 흐를 수 있는 누설전류에 의한 측정값의 왜곡을 최소화하기 위하여 반도전층을 200mm 정도 제거하여 케이블 단말을 처리하였다.



<그림 1> 철거되기 전 케이블 설치상태

일반적으로 케이블을 대상으로 Tan δ를 측정할 경우 케이블 절연체를 통한 저항성 전류(I_R) 보다는 케이블 단말에서의 누설 전류로 인한 저항성 전류가 크다. 그러므로 정확한 측정을 위해서는 누설전류의 영향을 반영할 수 있는 장비가 단조장 케이블의 단말에 설치되어야 한다. Baur社의 VLF Tan δ 측정 장비는 가드링이라는 누설전류의 영향을 고려할 수 있는 장비가 있다. 도체에서 절연체 표면을 통해 케이블 시스템으로 흐르는 누설전류를 측정하여 재귀시키므로써 VLF 내압기에서 공급하는 전류는 정확히 케이블 Tan δ의 요소만이 남게 된다. 측정 개념도는 그림 2와 같으며, 인가전압을 0.5U₀(1.45kV), 1.0U₀(2.9kV), 1.5U₀(4.35kV), 2.0U₀(4.8kV) 순으로 상승시키며 Tan δ 및 ΔTan δ (2U₀ - 1U₀) 값을 확인하였다.



<그림 2> VLF Tan δ 측정 개념도

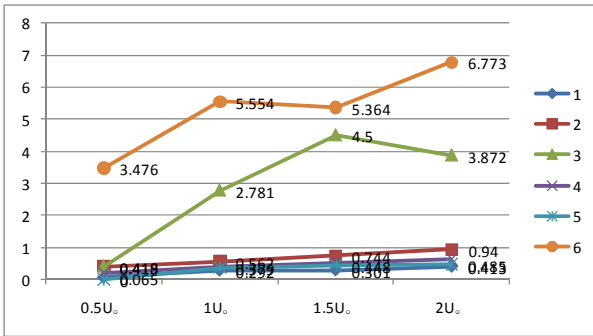
3.2 VLF Tan δ 측정결과

케이블 열화판정 기준으로는 표 1에 제시된 IEEE Std. 400의 판정기준을 적용하였다. 측정결과는 그림 3에서 보는 바와 같이 샘플 6번 케이블의 2U₀ tanδ 값은 6.773E-3으로, 표 1에 제시된 IEEE Std. 400의 XLPE 케이블의 VLF Tanδ 의한 매우 열화된 케이블로 판정되는 기준인 2.2E-3을 훨씬 상회하고 있다. ΔTan δ 값은 1.219E-3으로 매우 열화된 값을 나타내고 있다. 케이블의 열화상태가 심하여 자켓 외관을 점검한 결과 케이블 절거 또는 운송 과정 중 손상되었을 것으로 판단되는 자켓 결함이 발견되었으며, 자켓을 탈피하여 그림 4에서 보는 바와 같이 도체가 드러날 정도의 절연체 손상을 확인하였다.

샘플 3번도 2U₀ Tanδ 값이 3.872E-3, Δ Tanδ 값은

1.091E-3으로 매우 열화 된 것으로 판정되었으며, 그 외의 케이블은 양호한 것으로 나타났다.

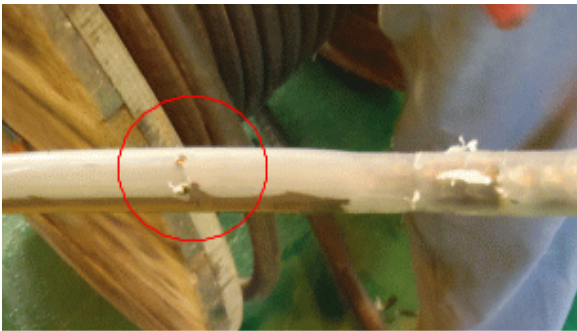
6번 케이블의 측정 결과에 의해 VLF Tanδ 측정방법의 실효성을 확인하였으며, 접근이 곤란하고 열악한 환경하에서 장기간 사용되었을 경우 일부 케이블이 열화될 수 있음을 확인하였다.



〈그림 3〉 VLF Tan δ 측정 결과

〈표 1〉 VLF Tan δ에 의한 XLPE 케이블 판정기준

| Tan δ at 2U ₀ | Δ tan δ (2U ₀ -1U ₀) | Assessment |
|--------------------------|---|------------|
| 1.2x10 ⁻³ 미만 | 0.6x10 ⁻³ 미만 | 양호 |
| 1.2x10 ⁻³ 이상 | 0.6x10 ⁻³ 이상 | 열화 |
| 2.2x10 ⁻³ 이상 | 1.0x10 ⁻³ 이상 | 매우 열화 |



〈그림 4〉 6번 케이블 시편의 절연체 손상 상태

4. 부분방전 측정

4.1 상용주파 내압기

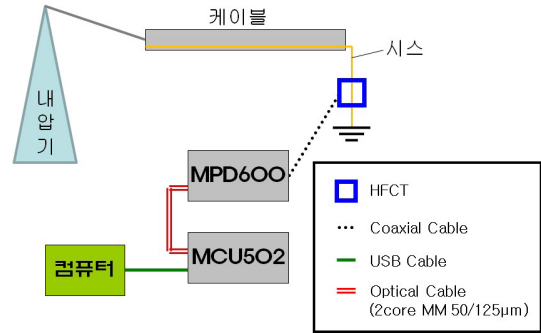
본 시험에서는 수거 케이블에 대한 PD 측정을 위하여 Omicron사의 MPD600을 사용하였으며, 그 연결 개념도는 그림 5와 같다. 작업장 주변으로 유입되는 노이즈를 최소화 시킬 수 있는 측정주파수를 탐색하여 9.4[MHz]에서 측정을 수행하였으며, 전압 U₀를 인가한 결과 1~5번 샘플 케이블에서는 PD 신호가 감지되지 않았다.

6번 샘플에서는 U₀에서 측정했을 때 1~5번 샘플 케이블 측정에서는 나타나지 않던 패턴이 발생하였다. PD 여부를 확인하기 위해 1.5U₀에서 측정한 결과 동일한 패턴으로 크기 변화가 발생하였다.

4.2 VLF 내압기

상용주파수의 내압기로 전압을 인가하기 위해서는 내압기 용량에 따른 크기 및 무게의 문제로 이동 및 현장 적용이 용이하지 않다. 따라서 본 시험은 HFCT를 사용하는 측정장비의 VLF 내압기 적용성을 확인하기 위하여 Omicron사의 MPD600 장비와 VLF 내압기를 사용하여 시도되었다. 상용주파 전원 대신 0.1Hz 저주파 전원을 인가하여, 절연층이 손상된 6번 케이블을 대상으로 측정한 결과 약 1.7U₀ 이상에서 부분방전이 발생하였으며, 150초 동안 0.1Hz 주기로 15번 방전이 일어나는 것을 관찰할 수 있었다. 이를 통해 VLF 내압을 통해 PD를 측정하는 방안의 실효성을 확인하였다. 상용주파의 경우 주변 노이즈와 함께

지속적으로 PD 신호가 유입되면 노이즈와 PD 신호의 구별이 난해하나, VLF 내압의 경우 PD 신호의 규칙성을 쉽게 찾아낼 수 있는 장점이 있음을 확인하였다.



〈그림 5〉 부분방전 측정 개념도

5. 결 론

국내 원자력발전소에서 장기간 사용된 후 철거된 XLPE 고압 케이블에 대하여 VLF tanδ 시험과 상용주파수 부분방전 측정으로 일부 케이블의 열화 정도를 확인하였다. Tanδ 시험 결과에 의해 3번 케이블은 수트리에 의해 열화된 것으로 판단되며, 상용주파 부분방전시험 결과에 의해 전기트리 까지 진행된 케이블은 없는 것으로 판단된다.

또한 절연체가 손상된 케이블을 대상으로 HFCT를 사용하는 부분방전 측정장비에 VLF 내압기를 적용하여 측정한 결과 주기적으로 부분방전이 발생함을 확인하였다. 이로써 VLF 내압기를 이용하여 케이블 off-line 상태 및 사용전압 이상에서 부분방전 개시전압을 파악할 수 있는 가능성을 확인하였다.

시험대상 케이블은 향후 가속열화시험을 통하여 잔여수명을 평가할 계획을 수립 중에 있으며 이 시험 결과를 고압케이블 경년열화관리 프로그램 수립에 활용할 예정이다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] Draft Regulatory Guide DG-1240, "Condition Monitoring Program for Electric Cables Used in Nuclear Power Plants", US NRC, 2010.
- [2] Regulatory Guide 1.211, "Qualification of Safety-Related Cables and Field Splices for Nuclear Power Plants", US NRC 2009.
- [3] G. Toman, "Plant Support Engineering: Aging Management Program Guidance for Medium-Voltage Cable Systems for Nuclear Power Plants", EPRI, 2010.
- [4] 이재봉 외, "지중배전케이블 최적열화진단기술 선정 및 운영방안에 관한 연구", 전력연구원, 2009.
- [5] 임우상, 주광호, 하체용, "편의성을 고려한 원자력발전소 고압케이블 상태감시 기술 선정 및 적용", 2010 대한전기학회 전력기술분회 추계학술대회 논문집, 2010.