

원자력발전소 고압케이블 열화진단에 관한 연구

하체웅, 주광호, 한성흠
원자력발전기술원

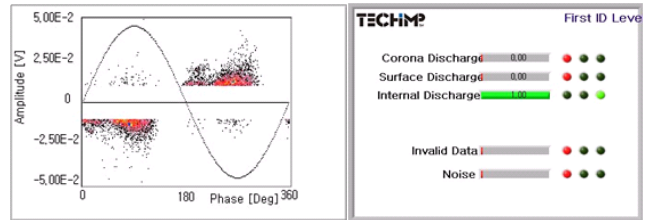
Study on Diagnosis of High Voltage Cables for Nuclear Power Plant

Che-wung Ha, Kwang-ho Joo, Sung-heum Han
Nuclear Engineering & Technology Institute

Abstract - 국내 원자력발전소에 설치되어 있는 고압케이블은 장기 운전에 따라 열화진단 및 유지보수의 필요성이 증대되고 있다. 주기적 안전성 평가(Periodic Safety Review) 및 계속운전과 관련하여서도 고압케이블의 관리방안이 지속적으로 요구되고 있다. 본 논문에서는 원자력발전소에 설치되어 있는 13.8kV급 고압케이블의 건전성을 확인하기 위하여 원자력발전소 계획예방정비 중 열화진단을 수행한 결과를 소개하고 있다.

특히 미국 NRC(Nuclear Regulatory Commission)에서는 케이블 진단 기법 11가지를 권고하고 있는데 본 논문에서는 그 중 국내 원자력발전소에 적용이 가능한 최신 케이블 진단 기술인 HFCT(High Frequency Current Transformer)를 이용한 부분방전(Partial Discharge ; PD) 측정, VLF(Very Low Frequency) 장치를 이용한 Tanδ 측정 및 열화상카메라를 이용한 케이블 온도 측정을 사용하여 고압 케이블 진단을 실시하였고, 그 결과를 서술하였다.

연결되어 있는 전동기에서 PD 발생이 일어나고 있으며 전동기의 PD 기준은 10,000pC으로 규정하고 있으므로 현재 케이블은 정상인 것으로 판단하였다.



<그림 1> N-5E-NA-S02-04패널의 C상 케이블 PD 신호

1. 서 론

해의 원자력발전소에 설치되어 있는 고압케이블의 사고 유형을 조사하여 분석한 결과 절연체 내부의 초기 결함이나 시공 불량에 의한 초기 고장이 대부분이지만, 사용 년 수 증가에 따른 전기적, 기계적, 열적 스트레스 및 방사능 조사에 의해 케이블 경년 열화가 증가하고 있어 사고 가능성 또한 증가하고 있다. 국내 원자력발전소에도 노후 케이블이 증가하는 추세에 있으며 이에 따라 진단에 대한 필요성도 크게 대두 되고 있다.

고압케이블의 경우, 열화진단으로서 가장 신뢰할 수 있는 방법은 보이더나 전기트리 개시 또는 진전될 때 발생하는 부분방전 측정 및 Tanδ 측정 이지만, 그동안 원자력발전소 실 선로 에서는 측정감도 및 설비적인 문제로 적용이 어려웠다. 그러나 최근 해외 원자력발전소 및 산업계에서는 최신기술 및 측정 장비를 사용하여 고압케이블의 열화를 진단하는 연구 및 사례가 빈번하고 있다.

따라서 본 논문에서는 원자력발전기술원에서 수행하고 있는 “가동원전 고압케이블 수명예측 및 열화진단에 관한 연구” 과제 수행관련 현장 진단 사례 및 그 결과를 소개하고자 한다.

2. PD 측정

2.1 PD 측정 및 기준

국내 원자력발전소 고압케이블의 PD 측정은 케이블 환선상태에서 두 종류(PD Base I, PD Base II)의 TechImp(社) 장비를 사용하여 상용주파수에서 측정하였다. 측정 당시 발전소가 운전 중이었기 때문에 부하(전동기)와 케이블을 분리하지 않은 채 진행하였으며, 외부에서 유입되는 대부분의 노이즈는 High Pass filter를 이용하여 분리하여 측정하였다. PD 발생이 감지된 케이블의 경우 다른 장비로 교차 측정하여 PD 진단의 신뢰성을 높였다. 측정 기준은 현재 한전 접속함 기준, 케이블 제조 및 진단 회사의 권고를 참고로 하여 20pC 이하인 경우 정상으로 설정 하였다.

2.3 부분방전 측정 결과

표 1의 부분방전 측정 결과에서 볼 수 있듯이 N-5E-NA-S02-04 패널의 C상 케이블에서 23pC로 측정된 PD는 내부방전의 형태를 보이며 결과는 그림 1과 같다.

그러나 다음절에 다룰 VLF Tanδ 측정결과에서 보듯이 PD 발생 케이블이 양호한 값을 나타낸 것으로 미루어보아 케이블과

<표 1> PD 측정 결과

측정 패널	측정감도[pC]			측정 결과
	A	B	C	
N-5E-NA-S04-04	5	7	3	정상
N-5E-NA-S03-04	4	4	1	정상
N-5E-NA-S02-04	1	2	23	C상 열화 (Tanδ 측정 결과 정상)
N-5E-NA-S01-05	3	3	5	정상
N-5E-NA-S01-04	12	2	2	정상

3. Tan δ 측정

3.1 Tan δ 측정 및 기준

케이블의 Tanδ 측정은 BAUR社 Viola TD 장비를 사용하였으며, 단락전류 문제와 절연내역이 내압크기보다 클 경우 발생하는 전동기 절연과피 문제를 우려하여 측정케이블을 모두 전동기에서부터 분리하여 측정하였다. 그리고 현장에 설치된 케이블의 특성 상 가드링 작용에 따른 말단 누설전류를 제거할 수 없기 때문에 가드링을 사용하지 않은 채 가압하여 측정하였다. 그림 2는 VLF 장비를 사용한 케이블 Tanδ 측정 상황을 나타낸 것이다.



<그림 2> VLF 장비를 사용한 케이블 Tan δ 측정

〈표 2〉 원자력발전소 고압케이블 Tan δ 기준[1]

[단위 : ×10⁻³]

절연 재질	시험종류	양호	열화	매우 열화
XLPE	TD(2U ₀)	<1.2	1.2 ≤ x <2.2	2.2 ≤
	ΔTD(2.0U ₀ -1.0U ₀)	<0.6	0.6 ≤ x <1.0	1.0 ≤

3.2 Tan δ 측정 결과

일반적으로 절연재질이 XLPE인 케이블의 경우 표 2에서 보듯이 최대 2U₀까지 가압하여 VLF Tanδ값을 측정하나, 이번에 측정했던 케이블의 경우 절연재질에 대한 명확한 정보가 없어서 케이블의 안정성을 고려하여 0.5U₀, 1U₀ 및 1.5U₀로 단계적으로 승압하면서 Tanδ를 측정하였다. 측정 결과는 표 3에 나타내었다.

표에서 보듯이 N-5E-NA-S02-06 패널 A상의 Tanδ 측정값이 표 2의 기준과 비교해 봤을 때 열화가 진행되고 있음을 알 수 있었다. 그리고 XLPE 절연에 대한 VLF Tanδ의 국제적인 기준이 2U₀에서의 VLF Tanδ값을 기준으로 열화를 판단한다는 점에서 실측당시의 측정값이 최대 1.5U₀까지만 승압했다는 점에서 향후 계획예방정비 시 의심 케이블에 대해서 2U₀까지 승압하여 재 측정할 필요가 있다.

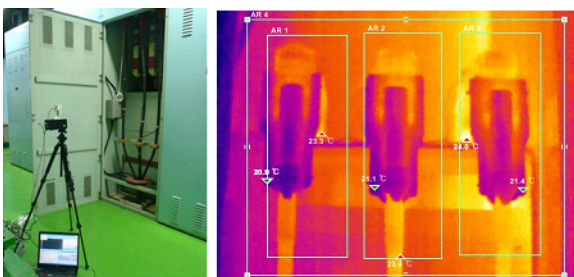
〈표 3〉 Tan δ 측정 결과

측정 패널		VLF Tanδ 측정 (×10 ⁻³)			Δ Tanδ (×10 ⁻³)
		0.5U ₀	1U ₀	1.5U ₀	1.5U ₀ -0.5U ₀
N-5E-NA-S03-04	A	0.565	0.570	0.592	0.027
	B	0.573	0.591	0.623	0.050
	C	0.704	0.793	0.944	0.240
N-5E-NA-S02-06	A	1.055	1.180	1.316	0.261
	B	0.610	0.603	0.600	-0.010
	C	0.643	0.696	0.745	0.102
N-5E-NA-S02-04	A	0.669	0.645	0.631	-0.038
	B	0.651	0.638	0.628	-0.023
	C	0.671	0.659	0.656	-0.015
N-5E-NA-S01-04	A	0.644	0.630	0.710	0.066
	B	0.633	0.629	0.643	0.010
	C	0.651	0.656	0.703	0.052

4. 열화상 온도 측정

4.1 열화상 온도 측정 및 기준

열화상 측정은 계획예방정비 기간에 측정 가능한 케이블을 대상으로 모두 측정하였으며, 각각의 케이블 연결부와 전체를 기준으로 측정하였다. 그림 3은 열화상 카메라를 사용하여 케이블을 측정하였던 상황을 나타낸 것이다. 그리고 열화상 온도 측정 기준은 표 4에 나타내었다.



〈그림 3〉 케이블 열화상 측정

케이블 열화상 측정 장치의 기능으로는 열화상 및 실제화상 그리고 지정된 부분의 온도 최고점과 최저점을 측정하여 보여줌으로써 국부적인 열화를 감지할 수 있는 특징이 있다.

〈표 4〉 열화상 온도 측정 기준[1]

상태	범위
주의	Rise Above Reference (0.5°C to 8°C)
고 주의	Rise Above Reference (9°C to 28°C)
심각	Rise Above Reference (29°C to 56°C)
매우 심각	Rise Above Reference (56°C)

4.2 열화상 측정 결과

열화상 카메라로 측정된 결과 대상 케이블 모두 특별한 Hot-spot은 발견되지 않았으며, 열화상 기준인 표 4에 명시된 것처럼 케이블 연결부에서 8°C 이상의 온도차를 발견하지 못했다.

참고로 현장에서 측정했던 케이블 패널 및 측정 당시 전류 크기를 표 5에 나타내었다.

〈표 5〉 열화상 온도 측정 패널 및 전류 크기

측정 패널	케이블 전류 크기
N-5E-NA-S04-04	79A
N-5E-NA-S03-06	260A
N-5E-NA-S03-04	82A
N-5E-NA-S02-07	260A
N-5E-NA-S02-04	78A
N-5E-NA-S01-06	260A
N-5E-NA-S01-05	84A
N-5E-NA-S01-04	82A

5. 결 론

국내 원자력발전소 13.8kV 케이블을 대상으로 부분방전, VLF Tanδ 및 열화상 카메라를 이용한 케이블 온도를 측정하였다. 전체 결과를 분석해본 결과 PD 발생이 의심되었던 케이블은 N-5E-NA-S02-04 패널의 C상 케이블이었으나, VLF Tanδ 측정시 정상 영역을 지시하고 있어 케이블은 건전한 것으로 판단하였고, 열화상 측정결과 역시 정상으로 판단하였다. 단 Tanδ 측정 도중 N-5E-NA-S02-06 패널 A상 케이블에서 열화가 진행되고 있음을 확인하였다. 따라서 차기 계획예방정비 시기에 정밀 재 측정을 수행할 계획에 있다.

본 논문에서 제시되어진 최신 케이블 경년열화 진단 기법의 주기적 적용은 원자력발전소의 안정적 운영에 기여할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] U.S. NRC, "Condition Monitoring Program for Electric Cables used in Nuclear Power Plants", DG-1240, June, 2010.
- [2] Gunter Voigt, "New Studies On Site Diagnosis of MV Power Cables by Partial Discharge and Dissipation Factor Measurement at Very Low Frequencies VLF", International Conference & Exhibition on T & D Asset Management for Electric Utilities, 24 ~ 27 Nov. 2008.
- [3] S. Aggarwal, "Condition Monitoring Program for Electric Cables Used in Nuclear Power Plants" NRC, 2010. 6.
- [4] Plant Support Engineering : Aging Management Program Guidance for Medium-Voltage Cable Systems for Nuclear Power Plants, CA:2010, 1020805.
- [5] Gary Toman, "Aging Management Program Guidance for Medium Voltage Cable Systems for Nuclear Power Plants", Drafte-2, October 14, 2009.