

4.16kV 고압케이블 VLF Tan δ 실측 사례

권현숙, 이경용, 김기상, 홍동석
대한전선

Case on Actual Diagnosis of 4.16kV High Voltage Cables for Nuclear Power Plant

Hyun-sook Kwon, Kyoung-yong Li, Ki-sang Kim, Dong-suk Hong
Taihan Electric Wire Co.,Ltd

Abstract - 국내 원자력발전소에 설치되어 있는 고압케이블은 장기 운전에 따라 열화진단 및 유지보수의 필요성이 증대되고 있다. 본 논문에서는 고압케이블의 열화진단에 많이 이용되고 있는 VLF Tanδ 기술에 대해 소개하고 원자력발전소에 설치되어 있는 4.16kV급 고압케이블의 건전성을 확인하기 위하여 원자력발전소 계획예방정비 기간 중 VLF Tanδ 측정 장비를 사용하여 고압케이블의 열화진단을 수행한 결과를 기술하였다.

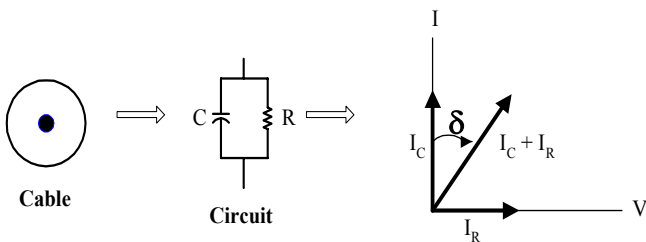
1. 서 론

국내의 원전에 사용되는 고압케이블의 진단 방법으로 부분방전, 유전정접(Tanδ), 열화상, 절연저항 측정 등 많은 진단법들이 제시되고 있으나, 현재 고압케이블의 열화진단에 있어 많이 이용되는 측정법으로는 부분방전 측정과 VLF Tanδ 측정이 있다 [1][2]. 그 중에서도 전반적인 케이블상태 진단에 우수한 VLF Tanδ 측정은 고분자의 수분 침투 및 열화에 민감하게 반응함으로써 수트리에 효과적인 것으로 알려져 있다. 하지만 장비가 크고 무겁기 때문에 이동가능성 및 편의성 측면에서 어려움이 있어 현재까지 국내 원전 실측에 도입되지 못했으며, 휴대용 Tanδ 기기를 이용한 측정이 주를 이루고 있었다. 따라서 본 논문에서는 국내에 새로 도입된 이동 가능한 장비로 BAUR社의 Viola TD를 이용하여 원자력발전소에 설치된 운영 중인 4.16kV Pink EPR 절연 고압케이블의 열화진단을 수행하였고 그 결과를 기술하였다.

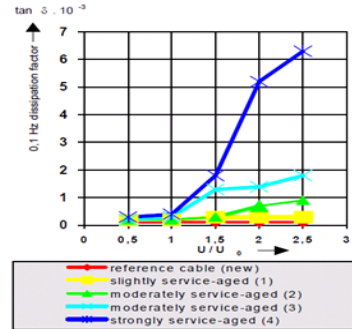
2. VLF Tan δ 진단 기술

2.1 VLF Tan δ 진단 기술

VLF Tanδ 진단 기술은 0.1Hz의 저주파 전원을 인가하여 전압과 전류를 측정하게 되는데, 인가되는 시험전압과 차폐에 흐르는 전류의 위상차를 측정하여 Tanδ(손실계수)를 계산하여 케이블 전체의 열화 상태를 판정한다[2]. 보통 <그림 1>과 같이 케이블은 커패시턴스를 표현한 커패시터(C)와 절연체의 누설저항(R)이 병렬 연결되어 있는 회로로 표현될 수 있고 전압이 인가될시 용량성 전류(Ic)와 저항성 전류(Ir)가 흐르게 되는데 좋은 유전체일수록 누설전류 벡터의 크기는 용량성 전류벡터의 크기보다 적으며, 그에 따라 손실각(δ)도 작아진다. 따라서 <그림 2>와 같이 사용 년 수가 오래된 케이블은 열화정도에 따라 시험전압 상승에 따른 Tanδ값의 상승폭이 커지게 되는데, 이러한 변화정도가 클수록 케이블 열화정도도 크며, 상승곡선도 가파른 형태를 보인다. 즉, 변화추이를 살펴보면 새 케이블에 비해 운전기간이 오래된 케이블일수록 인가전압이 상승함에 따라 VLF Tanδ 변화폭이 커짐을 확인할 수 있다.

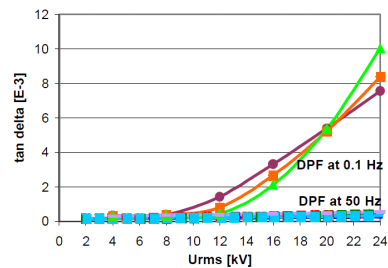


<그림 1> VLF Tan δ 개념도

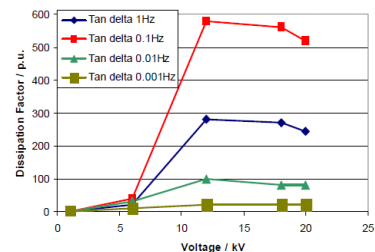


<그림 2> 케이블 노화에 따른 0.1Hz Tan δ 값의 변화

또한 0.1Hz Tanδ 진단에 대해 앞선 연구결과를 살펴보면 <그림 3>과 같이 상용주파 Tanδ 측정보다 0.1Hz Tanδ 측정이 수트리 검출에서 뛰어나다는 것을 알 수 있으며, <그림 4>와 같이 다양한 저주파 대역에서 Tanδ를 측정한 결과 손실계수가 0.1Hz에서 확인한 결과 값의 차이를 보임에 따라 0.1Hz 주파수 대역을 사용할시 좀 더 케이블 열화 진단 면에서 우수하다는 것을 알 수 있다[3].



<그림 3> 50Hz와 0.1Hz에서의 수트리 검출 비교



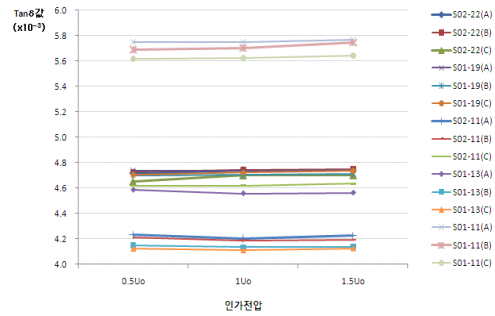
<그림 4> 다양한 저주파 대역에서의 Tan δ 값의 변화를 비교

2.2 VLF Tan δ 판정 기준

VLF Tanδ 열화 판정과 관련된 국제 기준은 IEEE Std 400과 EPR에서 제시하고 있으며, <표 1>에 판정기준을 나타내었다 [4][5]. XLPE 절연 케이블의 경우 2Uo까지 승압하여 측정된 값을 기준으로 삼고 있으며, EPR 및 Butyl Rubber의 경우 1.5Uo까지 승압하여 측정된 값을 기준으로 열화를 판정한다.

〈표 1〉 IEEE & EPRI VLF Tanδ 판정 기준(x10⁻³)

선종	시험 종류	양호	열화	매우 열화
XLPE	TD(2U0)	<1.2	1.2 ≤ x < 2.2	2.2 ≤
	△TD(2.0U0-1.0U0)	<0.6	0.6 ≤ x < 1.0	1.0 ≤
Butyl Rubber	TD(1.5U0)	<12	12 ≤ x < 50	50 ≤
	△TD(1.5U0-0.5U0)	<8	8 ≤ x < 30	30 ≤
Black EPR	TD(1.5U0)	<10	10 ≤ x < 50	50 ≤
	△TD(1.5U0-0.5U0)	<5	5 ≤ x < 30	30 ≤
Pink EPR	TD(1.5U0)	<15	15 ≤ x < 25	25 ≤
	△TD(1.5U0-0.5U0)	<3	3 ≤ x < 15	15 ≤
Brown EPR	TD(1.5U0)	<30	30 ≤ x	기준
	△TD(1.5U0-0.5U0)	<15	15 ≤ x	없음

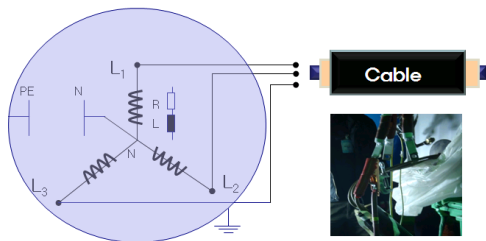


〈그림 7〉 VLF Tanδ 측정 프로파일

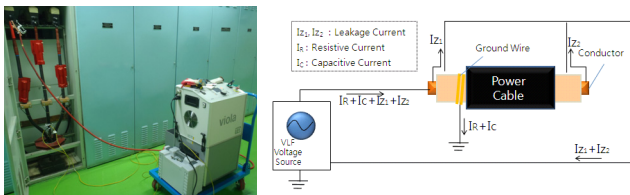
3. Tanδ 측정

3.1 VLF Tanδ 측정 개요

VLF Tanδ 측정은 BAUR社 Viola TD 장비를 사용하였으며, 전동기와 연결되어 있는 케이블의 경우 VLF 내압에 의한 전동기 절연파괴를 방지하기 위해 측정케이블을 모두 전동기에서 분리하여 측정하였다[2]. <그림 5>에서 케이블과 전동기간의 접속 개념도를 나타냈으며, <그림 6>에서는 측정 사진 및 Viola TD의 측정 개념도를 나타내었다. <그림 6>에서 알 수 있듯이 측정을 위한 케이블들은 패널내에 설치되어 있으며, VLF Tanδ 측정을 위한 VLF 전압인가는 케이블 단말을 보호하고 있는 보호박스를 제거하여 전압을 인가하였다. Baur社의 Viola TD 장비의 경우 양쪽 단말 절연층 위로 가드링 설치를 통해 케이블 양쪽 단말에서 발생하는 누설전류를 제거해 줌으로써 케이블 열화 진단의 정확성을 높여주나, 발전소 내부 케이블 단말이 외부로의 노출이 없을 뿐만 아니라 케이블들이 위치한 Switchgear room 내부의 온도와 습도가 일정하게 유지되고 있어 케이블 단말 수분침투 혹은 오염에 의한 누설전류의 영향이 적을 것으로 사료되어 가드링을 설치하지 않고 시험하였다[3].



〈그림 5〉 전동기와 케이블간의 접속개념도



〈그림 6〉 VLF Tanδ 측정 모습 & Viola TD 측정 개념도

3.2 VLF Tanδ 진단 결과

각 패널마다 3개의 케이블로 구성되었으며 진단 결과를 <표 2>에 나타내었다. <표 2>에서 알 수 있듯이 측정된 모든 케이블이 VLF Tanδ 1.5U0 기준에서 Pink EPR 기준치 15 x 10⁻³ 이내이며 △Tanδ 기준 3x10⁻³ 이하로 상승 변화가 거의 없으므로 양호하고 판단된다. 특히 △Tanδ 측정값은 Viola TD의 기기 정확성이 1x10⁻⁴이고, 인가 전압의 상승에 따른 측정 Tanδ 값의 감소 폭이 오차범위에 속하기 때문에, 케이블 열화에 의한 Tanδ 상승이 거의 없다고 판단된다. 측정된 모든 케이블들은 4.16kV Switchgear에 연결되어 있는 전력 케이블로 냉각수 펌프, 순환수 펌프의 전력 공급원으로 사용되었으며, 측정 패널 각각에 대한 프로파일을 <그림 7>에 나타내었다.

〈표 2〉 VLF Tanδ 진단 결과

측정 패널	VLF Tanδ 측정 (x10 ⁻³)			△Tanδ (x10 ⁻³)	
	0.5U0	1U0	1.5U0	1.5U0-0.5U0	
N-5E-NB-S02-22	A	4.717	4.740	4.739	0.022
	B	4.728	4.743	4.751	0.023
	C	4.652	4.702	4.703	0.051
N-5E-NB-S01-19	A	4.740	4.734	4.744	0.004
	B	4.702	4.703	4.713	0.011
	C	4.706	4.722	4.736	0.030
N-5E-NB-S02-11	A	4.232	4.203	4.226	-0.006
	B	4.211	4.190	4.192	-0.019
	C	4.617	4.621	4.634	0.017
N-5E-NB-S01-13	A	4.586	4.558	4.563	-0.023
	B	4.150	4.135	4.140	-0.010
	C	4.125	4.111	4.127	0.002
N-5E-NB-S01-11	A	5.749	5.749	5.767	0.018
	B	5.689	5.700	5.747	0.058
	C	5.619	5.623	5.643	0.024

4. 결론

본 논문에서는 고압케이블의 열화진단에 많이 이용되고 있는 VLF Tanδ 기술에 대하여 소개하였고, 측정기기인 BAUR社의 Viola TD를 이용하여 원자력발전소에 설치되어 운전 중인 4.16kV Pink EPR 절연 고압케이블을 대상으로 열화진단을 수행한 결과를 기술하였다. 측정된 결과 모든 케이블이 EPRI의 VLF Tanδ 열화판정 기준 미만으로 측정되어 열화 측면에서는 양호하다고 판단된다. 한편, 본 논문에서는 열화진단을 위해 VLF Tanδ 측정에 대해서만 기술하였지만 보다 신뢰성 있는 열화진단을 위해 추가적으로 부분방전 및 열화상 카메라를 통한 진단도 수행하였으며, 그 결과도 역시 양호한 것으로 판정이 되었다.

향후 원자력발전소 고압케이블 열화진단기법의 정립을 위해 다양한 측정기술을 적용하여 시험 및 측정을 진행 할 예정이다.

[참고 문헌]

- [1] 임우상, 주광호, 하체웅, “편의성을 고려한 원자력발전소 고압 케이블 상태감시기술 선정 및 적용”, 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 2010
- [2] 이재봉, 정연하, “VLF Tanδ 측정에 의한 배전 해저케이블 시스템의 열화진단”, 대한전기학회 추계학술대회 논문집, 2010
- [3] Kuala Lumpur, “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 to 27, Nov 08
- [4] IEEE Std 400-2001 IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems
- [5] “Aging Management Program Guidance for Medium Voltage Cable Systems for Nuclear Power Plant”, EPRI, Palo Alto, October 14, 2009