

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.5.207>

IIBC 2015-5-26

## 예상 수명을 초과하여 정상적으로 동작하는 고압 케이블의 확인

### Identification of Normally Operating High-Voltage Cables beyond Expected Life time

엄기홍\*, 이관우\*\*

Kee-Hong Um\*, Kwan-Woo Lee\*\*

**요약** 지속적이고 고품질의 전기 에너지의 공급은 현대 경제 사회에서 중요하다. 발전소에서 동작하는 모든 장비들은 신뢰할 수 있어야 하며 안전해야 한다. 변압기, 케이블, 발전기 및 개폐 장치 등의 주요 전력 장비들은 완전한 상태로 동작하여야 한다. 송전의 유일한 수단으로 사용되고 있는 케이블은 수명이 30년 이라고 제작 시에 선언되고 있다. 케이블 두 도체 사이의 절연체는 입력 고전압으로 부터의 전기적인 응력[應力]을 유지해야한다. 이러한 조건이 케이블의 동작 기간 전체에 걸쳐서 입증되어야 한다. 초저주파수(VLF)  $\tan\delta$ , 부분 방전, 절연 저항을 이용한 몇 가지 기술들이 케이블의 동작 상태를 진단하기 위하여 사용되고 있다. 우리는 이 논문에서 충청남도 태안에 위치한 (주)서부 발전소에서 설치 운영되고 있는 고전력 케이블들의 동작 특성을 진단하기 위하여 절연 저항을 이용한 결과, 예상을 초과하여 38 년의 수명을 가지고 있는 케이블이 존재한다는 사실을 확인하였다.

**Abstract** Continuous, high-quality supply of electrical energy is the backbone of any modern economy. Any equipment operating at a power station must be reliable and safe. All major power supply components such as transformers, cables, generators, and switchgear need to be kept in perfect operating condition. The lifetime of power cables, used as the main means of transferring electric power, is understood to be about 30 years, from the time of manufacturing. The dielectrics between two conductors of a cable must be able to withstand electrical stresses from high -voltage input. This condition should be verified throughout the lifetime of the cable system. Several techniques, such as VLF- $\tan\delta$ , partial discharge, and insulation resistance are used in order to determine the operating conditions of cables. In this paper, we present our work on insulation resistance to diagnose cables in operation at the Western Power station in Taean, Chungcheong Namdo Province, South Korea. As a result we have found cables the life time of which is 38 years.

**Key Words** : XLPE, VLF  $\tan\delta$ , Water tree, Parasitic resistance, Partial discharge

## 1. 서 론

국내에서의 전력 수급 시 초래될 수 있는 비상상황에

대비할 뿐만이 아니라 안정적인 전력량을 확보하기 위하여 화석연료를 이용하는 화력 발전소의 중요성이 점점 증가하고 있다. 현재 국민 1인당 전력 소모량이 연간

\*정회원, 한세대학교 IT학부(주저자)

\*\*정회원, (주)오성메가파워(교신저자)

접수일자 : 2015년 6월 12일, 수정완료 : 2015년 8월 28일

게재확정일자 : 2015년 10월 9일

Received: 12 June, 2015 / Revised: 28 August, 2015 /

Accepted: 9 October, 2015

\*\*Corresponding Author: ygu9177@daum.net

Director of R&D Center, Osungmega Power Ltd., Korea

8,092 kWh 로서 1980년에 비교하면 9배 만큼 증가하였으며, 예상 수치 보다 높은 수요로 인하여 전력의 공급 여건이 계속 악화되고 있다<sup>[1]</sup>. 발전소가 고전압 전력을 생산, 공급하기 위하여 유일한 수단으로 사용하고 있는 케이블은 가교 폴리에틸렌 (XLPE, cross linking-polyethylene) 절연 케이블 (CV cable 이라고도 함)이다. 많은 케이블들이 약 40년 전에 국내 여러 곳에서 포설되어 지금까지 사용되어 오고 있다. 이러한 케이블들은 케이블 제작 시에 선언한 30 년의 수명을 초과하여 동작하고 있을 뿐만 아니라 신뢰성 있는 동작 수명의 진단을 받지 않은 상태에서 운용되고 있기 때문에, 언제 불의의 사고를 초래할지 예측을 할 수 없을 만큼 위험한 상태에서 동작을 하고 있는 실정이다. 제작 기술, 포설 상황, 설치 환경 및 사용 조건에 따라서 다르겠지만, 설치 후 운전 상태에 있는 CV cable 은 6-8년의 기간이 경과하면 정상적인 동작을 저해하는 열화 상태가 나타나기 시작하며, 상태가 더 나쁘게 진행되는 경우 두 도체 사이에 삽입되어 사용되는 절연체의 전기적인 파괴(electric breakdown, dielectric breakdown)현상으로 인한 정전 및 화재 사고가 발생한다는 많은 사례 보고가 있다<sup>[2]</sup>. 근래에 포설한 케이블이라 할지라도 시공 불량이나 기타의 열악한 주변 환경으로 인한 약조건 상태에 노출되어 있는 경우, 그 전의 임의적인 시점에서 사고가 발생할 수가 있다. 우리는 이 논문에서 케이블의 열화 상태를 진단하기 위하여 채택되고 있는 주요한 몇 가지 기술을 소개하고, 활선 상태의 고압 케이블의 절연 저항을 측정함으로써 케이블의 잔여 수명을 예측하기 위하여 수행한 연구를 소개한다.

## II. 열화 판정법

### 1. 사선 VLF tanδ 법

일반적으로 고압 전력 케이블의 열화 상태를 파악하기 위하여 가장 흔히 사용하는 방법으로서 케이블의 사선 상태에서 사용하는 tan δ법이 있다. 정전 용량이 큰 케이블의 열화 상태를 진단하기 위하여 가장 많이 사용되는 VLF tan δ 측정법은 0.1 Hz 정도의 매우 낮은 주파수의 전원을 사용하여 tan δ (손실계수, 유전정접, 誘電正接) 값을 측정하는 방법이다. 케이블의 절연체의 특성을 파악하여 케이블의 열화 상태를 진단하는데 채택되는 VLF tan δ (very low frequency tan - delta) 방법의 원리는 다음 1과 같다<sup>[3, 4]</sup>. 케이블의 절연저항 크면 손실 전

류가 적다. 그러나, 수트리 (water tree) 등이 발생한 결과 절연체 내부에 절연저항이 감소되면 손실 전류가 증가하게 된다. 손실 전류의 증가량을 파악하기 위하여 손실 계수 tan δ를 정의하고, tan δ 값의 크기를 사용하여 절연체의 열화 징후를 판단할 수 있다는 원리이다.

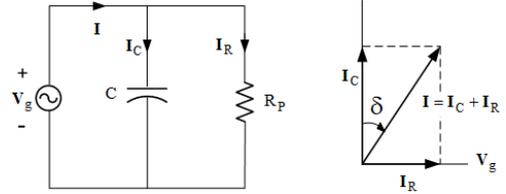


그림 1. VLF tan δ 정의  
Fig. 1. Definition pf VLF tan δ

실제의(real) 커패시터를 등가회로를 표시하면, 이상적인 커패시터(ideal capacitor) C 와 병렬로 발생하는 기생 저항(parasitic resistance) R\_p 가 존재한다. 기생 저항(parasitic resistance) 에 흐르는 저항성 손실전류(resistive loss current) 를 I\_R, 이상 커패시터에 흐르는 용량성 전류(capacitive current)를 I\_C 라고 하면, I\_R 과 I\_C 의 비 또는 유효전력과 무효 전력의 비,

$$\frac{I_R}{I_C} = \frac{\text{유효 전력}}{\text{무효 전력}} = \frac{V_g^2/R_p}{V_g^2/\omega C} = \frac{1}{\omega C \cdot R_p} = \tan \delta \quad (1)$$

로 정의한다. 식 (1)에서 각도 δ 를 손실각이라고 한다. 또, I\_R은 저항성 손실 전류, I\_C 는 용량성 전류, V\_g 는 인가 전압, R\_p 는 기생 저항 절연 저항, ω = 2πf 는 입력 전압의 주파수, C 는 정전 용량을 나타낸다<sup>[5]</sup>. 절연체 내부의 저항 성분에 의하여 누설 전류(leakage current)가 발생하면 tan δ 값이 나타나게 된다. 누설 전류는 절연체의 외부에 전압을 가했을 때 절연체 내부를 흐르는 약한 전류를 말한다. 내부를 흐르는 전류와 표면을 흐르는 전류가 있으며, 대부분의 경우 표면을 흐르는 전류가 더 크다. 표면을 흐르는 전류를 표면 누설 전류라 한다. 내부 또는 표면을 흐르는 전류는 내부 상태나 표면의 상태·형태에 따라 큰 차이를 나타낸다.내부 온도나 표면의 습도 등 주위의 조건에 의해서도 좌우되므로 옴의 법칙을 만족하지 않는 경우가 많다.

절연체의 내부에서 누설 전류의 저항성분에 의한 영향이 커지면 tan δ가 따라서 커지게 된다. 이것은 케이블 절연체의 열화가 진행되고 있음을 의미한다. 그러나, 이

방법은 활선 상태를 중지한 환경에서 측정하여야 한다는 선형 조건으로 인하여 측정 작업을 하기 위하여 많은 제약을 극복해야만 한다. 우리는 이 논문에서 고압전력 케이블의 가동을 중지해야만 한다는 바람직하지 못한 문제점을 해결하기 위하여, 케이블이 운전하고 있는 상태를 그대로 유지하는 조건에서 케이블의 절연 저항을 측정하기 위한 기술을 소개한다.

## 2. 활선 부분 방전법 및 절연 저항법

활선 진단법은 케이블이 살아있는 상태에서 측정하는 방법이다. 현재 한국에서는 이 방법으로서 부분 방전법과 절연 저항법이 있다. 부분 방전법은 케이블이 사고가 발생하기 전에 일어나는 부분 방전을 측정하여 케이블 시스템의 이상 여부를 확인하는 방법이다. 부분방전 (PD, partial discharge) 은 일반적으로 절연물 표면에서 고전계에 의한 부분적인 표면 방전 또는 절연물 내부에 일부 존재하는 공극이나 기포에 발생하는 내부 방전등을 말한다. 부분 방전에 의하여 발생하는 절연체의 열화는 케이블 열화 과정의 마지막 시기에 발생한다. 이 경우에 미세하게 동반되는 코로나 잡음을 측정하여, 케이블 시스템의 이상 여부를 판단한다<sup>[6]</sup>. 그러나, 케이블의 길이가 길 경우, 잡음은 케이블을 따라 긴 구간에서 발생하게 된다. 부분 방전에 의한 코로나 잡음(corona noise) 과 케이블 주변의 잡음을 분류하는 업무가 매우 어렵다. 그 대신, 케이블 접속체에 부분 방전 감지 장치를 설치하여 케이블 접속체 및 고정 장치의 이상 여부를 판단함으로써 케이블 시스템의 이상 여부를 감지하기 위한 적절한 방법이라 할 수 있다. 전압이 한계값 이상으로 인가되면 PD가 노이즈 상태로 발생하게 되는데, 주파수에 따라 피크 전압 부분에서 주로 발생하게 된다. 케이블에서 PD가 발생한다는 것은 케이블이 이상 동작을 하고 있음을 나타내고 있기는 하지만 잔존 수명을 예측하기는 여전히 매우 어렵다. 따라서 PD가 발생한다면 케이블을 교체할 준비를 하는 것이 사고를 미연에 방지할 수 있는 하나의 방법이 된다. 절연 저항법은 케이블 시스템의 중성점에 DC 전압을 가하고, 차폐층을 통하여 나오는 누설 전류를 측정하여 전압과 전류의 비 (즉, 절연 저항) 의 크기를 측정하여, 케이블 시스템의 이상 여부를 판단하는 방법이다. 열화가 발생할수록 케이블 시스템의 절연 저항이 감소한다. 이 특징을 이용하여 케이블 시스템의 이상 여부 및 잔여 수명을 판단할 수 있다. 본 자료에서, 이러한 기본 이론을 바탕으로 6.6 kV 케이블 시스템의 수명 이론 및

측정 장치에 대한 설명을 바탕으로 부하 전류가 케이블의 수명에 미치는 영향에 대하여 논하고자 한다.

## III. 절연 저항 측정의 개념

진기적인 장치(전기 모터)에 사용되는 절연체의 저항을 절연 저항 (단위는  $M\Omega$ ) 이라 한다. 절연 저항 테스트는 저항 값이 충분히 커서 절연 상태가 유지되는지를 확인하는 작업이다. 도선과 실드사이의 절연 저항을 측정하여 결함 (열화)의 형태를 판단한다. 저항값이 적으면 (이론상 0 Ohm) 상태란 두 도체가 절연 상태를 유지하지 못하고 도전(conducting) 상태라는 의미이다<sup>[7, 8]</sup>. 케이블의 절연 저항을 측정하기 위하여, 중성점에 DC 전압원을 인가한다. 이 때, 쉬스 차폐층을 통하여 흐르는 누설 전류를 측정하고, 향후 DC 전압을 인가한 후의 케이블의 절연체를 통하여 흐르는 누설 전류를 측정하여 그 차이 값을 절연 저항으로 환산한다.

## IV. 케이블의 절연 저항 측정 시스템

### 1. 측정 대상 케이블

전송 케이블을 동작 전압에 따라 구별한다면, 저압 (50/60 Hz, 110-220 V) 케이블과 고압(50/60 Hz, 3.3-22 kV) 케이블로 구분한다. 우리가 측정한 케이블 시스템은 22 kV,  $1C \times 325 SQMM$  부하전류 90 A 로써, 설치 후 10 년 동안 운전 중에 있었다. 케이블의 동작 특성을 진단하기 위하여 그 후 13년 동안 10일에 한 번 자동 측정 장치를 이용하여 획득한 절연저항 데이터를 분석하여 열화 과정의 추세를 파악하였다.

### 2. 측정 장치의 설치

우리가 발전소에서 설치 운전 중인 케이블 시스템을 진단하기 위하여 연구한 케이블은 충청남도 태안에 위치한 (주)서부 발전소(Western Power Station)에서 설치되어 운전 중인 6.6 kV 에 의한 고전력을 송전하는 초고압 지중 송전선로 케이블 (CV cable) 이었다. 이러한 케이블들이 운전 상태에 있는 동안에 특성을 파악하였다. 태안 발전소에서 동작중인 고전압 케이블 6.6kV,  $1 \times 100 SQMM$ 의 9회 선을 선택하였다<sup>[9]</sup>. 상기 이론을 바탕으로 제작한 측정 장치를 설치하여 케이블의 절연저

항을 1년 동안 측정하고 있는 중이다. 케이블의 동작 특성을 분석하기 위하여 추출한 데이터를 한세대학교 실험실에서 연구한 일부의 결과를 제시한다.

### V. 측정의 결과

그림 2 는 그 기간 중의 일부 기간 (2,500 일)동안 측정된 절연저항을 나타내는 그래프이다. 이 그림을 이용하여 약 2,500일 경과한 시점에서 미래의 잔여 수명을 예측할 수 있다. 즉, 절연 저항이 선형으로 감소하므로 기준치 한계 절연저항 500 MΩ 이하로 감소하면, 케이블을 즉시 교체하여야 한다. 따라서, 4,000일 되는 시점에서 한계 절연 저항의 한계값이 타난다고 판단할 수 있으며, 케이블의 안정적으로 운전할 수 있는 잔여 수명은 1,500 일 남았다고 예상할 수 있다<sup>[10]</sup>.

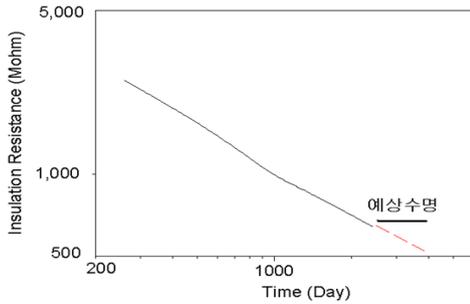


그림 2. 측정 절연저항에 의한 예상 잔여 수명  
Fig. 2. Remaining life time expected with measured insulation resistance

케이블의 수명을 결정하기 위하여 사용하는 와이בל 분포(Weibull distribution) 이론에 의하면

$$V^n \times t = Const \quad (2)$$

라고 알려져 있다. 이 이론은 전체 시스템이 여러 개의 작은 부속품으로 구성되어 있는 경우 일부 부속품의 고장이 부품 전체의 파손 또는 기능의 오동작, 정지 등을 초래하는 현상을 수학적으로 해석하기 위한 확률 분포 함수이다.

이 분포는 유연하기 때문에 수명 데이터 분석에 자주 쓰이는데 정상 분포 또는 지수 분포의 통계적인 분포를 나타낼 수도 있다. 시스템의 수명을 추정하는 데 사용되며, 시간이 지나면서 고장 날 확률이 증가하는 경우와 감

소하는 경우와 일정한 경우 모두 추정 할 수 있다. 고장 날 확률이 시간에 따라 일정한 경우는 지수분포와 같다.

식 (2)을 수학적으로 유도해 보자. 그림 2 에서 직선은 기울기가  $-a$  ( $a > 0$ ),  $Y$  축의 절편이  $b$  ( $b > 0$ ) 이므로

$$Y = -aX + b \quad (a > 0, b > 0) \quad (3)$$

의 꼴을 갖고 있다. 식 (3) 에 대하여,  $X$  축에서 시간  $t$ 의  $Log$  를 취하고,  $Y$  축에서 절연저항  $R$ 의  $Log$  를 취하여 정리하면

$$\begin{aligned} Log(Log(R)) &= -aLog(t) + b \\ Log(R) \times t^a &= exp(b) \end{aligned}$$

양변의 지수를 정리하면,

$$[Log(R)]^{\frac{1}{a}} \times t = exp[b]^{\frac{1}{a}} \quad (4)$$

식 (4)에서  $[e^b]^{\frac{1}{a}}$  는 상수(Constant)이다.  $Log(R)$  을  $V$  에,  $1/a$  을  $n$  으로 놓으면, 관계식 (2) 가 얻어지며, 파괴이론과 수명이론은 일치함을 알 수 있다. 그림 3은 측정 장비를 사용하여 동작 중인 케이블로부터 1년 동안 획득한 절연 저항 데이터를 분석한 결과이다. 케이블 시스템이 설치 동작한지 18년 정도를 경과한 케이블이지만, 이 결과에 의하면, 절연 저항값이 충분히 커서  $10^6$  MΩ 이상을 나타내고 있으므로, 케이블의 수명은 앞으로도 20년 이상 남아있는 것으로 추정된다. 따라서 케이블 제작 시 수명이 30년이라고 선언되어 있지만, 우리가 실험한 케이블의 경우 향후 관리 운영을 체계적으로 한다면 30년 이상 신뢰성 있게 사용할 수 있음을 나타내고 있다.

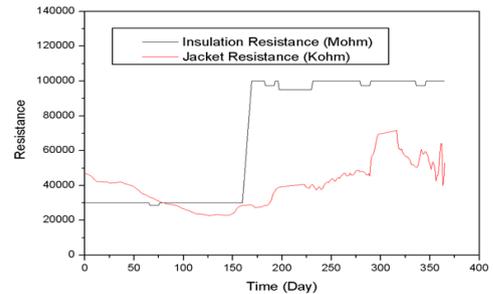


그림 3. 절연저항 및 방식층 저항의 변화  
Fig. 3. Changes of insulation resistance and jacket resistance

## VI. 결 론

우리는 (주)서부 발전소에서 동작하고 있는 운전 중인 고전압 케이블을 선택하여 절연저항 측정 장치를 설치함으로써 데이터를 획득하고 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 측정 장치를 개발, 설치, 및 운영함으로써 케이블 시스템을 진단할 뿐만 아니라 수명 평가를 하여, 고압 케이블의 예상 교체 시점을 설정할 수 있다.
2. 지금까지는 20년 이상 동작 중인 케이블은 무조건 교체해 오고 있는 실정이다. 그러나, 우리가 실험한 바에 의하면, (주)서부 발전소에 18 년 동안 설치 및 운영 중인 케이블은 아직도 20년 이상의 기간 동안 더 사용 할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 이 케이블의 설치 수명은 거의 38년 이상이라고 판단 된다.
3. 동작 중인 케이블 시스템의 예상 수명을 판단할 수 있게 되었으므로, 동작 기간이 20년 지났다고 하여 무조건 교체함으로써 초래될 수 있는 예산 낭비를 줄일 수 있다.
4. 진단 장치를 설치함으로써 케이블 시스템의 돌발 사고를 사전에 예방할 수 있다.

## References

- [1] J. S. Kim, K. H. Kim, J. S. Lee, "The Study on the Variable Orifice Spray of the Steam Power Plant Desuperheater," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society(JKAIS), Vol. 14, No. 1, pp. 63-68, 2013.
- [2] K. H. Um, K. W. Lee, "Nonchange of Grounding Current due to Equipment Measuring Insulation Resistance", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol. 15, no. 3, Jun 2015.
- [3] S. Hvidsten, J. T. Benjaminsen, "Diagnostic testing of MV XLPE cables with low density of water trees" Electrical Insulation, 2002. Conference Record of the 2002. IEEE International Symposium on, 7-10 Apr 2002, pp. 108 - 111, Boston, MA, 10.1109/ELINSL, 2002, 995892.
- [4] A. N. Luiten, Topics in Applied Physics (Book 79), Springer Frequency Measurement and Control: Advanced Techniques and Future Trends (Topics in Applied Physics), p.45-49. Paperback - Sep 12, 2014.
- [5] J. B. Lee, Y. H. Jung, "An Amendment of the VLF  $\tan\delta$  Criteria to Improve the Diagnostic Accuracy of the XLPE-insulated Power Cables," Trans. KIEE. Vol. 59, No. 9, Sep 2010.
- [6] N. Davies, D. Jones, "Testing Distribution Switchgear for Partial Discharge in the Laboratory and the Field," Electrical Insulation, 2008. ISEI 2008. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on, June 9-12 2008 Vancouver, BC, DOI:10.1109/ELINSL.2008.4570430.
- [7] <http://www.pat-testing-course.com/blog/faqs/insulation-resistance-test>.
- [8] IEEE-Std-43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery", IEEE Power & Energy Society, p. 18, Mar 2000.
- [9] K. H. Um, K. W. Lee, "Developing Equipment to Detect the Deterioration Status of 6.6kV Power Cables in Operation at Power Station", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol. 14, no. 4, pp. 197-203, Jun 2013.
- [10] K. W. Lee, Y. H. Hwang, S. H. Lee, K. H. Um, "A study on the Relationship between Load Current and Temperature of 6.6 kV Cable Systems in Operation", 2015 Summer Conference KIEE. 2015. July 15 - 17, 2015. Moojoo, Chunbook.

저자 소개

엄 기 홍(정회원)



학력

- BS : 한양대학교 전자공학과
- MS : Dept. of Electrical & Computer Engineering, Polytechnic Institute of Engineering, NYU (New York University), New York, USA

- Ph.D : Dept. of Electrical & Computer Engineering, New Jersey Institute of Technology (NJIT), New Jersey, USA

경력

- TA, RA, and Lecturer at NJIT (New Jersey, USA)
  - Researcher at RS Microwave Company Inc. (New Jersey, USA)
  - Researcher at Physics Department, Princeton University (New Jersey, USA)
  - Adjunct Professor at NJIT (New Jersey, USA)
  - 강남대, 상명대, 한양대 강사
  - 현재 : 한세대학교 IT 학부 교수
- <주관심분야 : 안테나, 마이크로파, 전기전자재료>

이 관 우(정회원)



학력

- 학사 : 한양대학교 전기공학과
- 석사 : 원광대학교 전자재료공학부
- 박사 : 원광대학교 전자재료공학부

경력

- LG 전선 연구소
  - 일진 전선 연구소
  - 호원대학교 전기전자재료공학부 겸임교수
  - 원광대학교 외래 교수
  - 현재 : (주)오성메가파워 연구소장
- <주관심분야 : 전기전자재료>