

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.2.273>

IIBC 2015-2-37

## 온도변화에 따르는 고전력 케이블의 수명 변화 연구

### A study on Lifetime Evaluation of High-power Cables Based on Temperature Changes

엄기홍\*, 이관우\*\*

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

**요약** 증가하는 전력 수요량을 충족시키기 위하여 송전 설비의 전기적인 용량이 커져야 한다. 고전력의 전기를 생산하고 전달하는 설비들은 대규모화될 뿐만 아니라 높은 신뢰성으로써 동작하여야 한다. 따라서 전기설비가 안정상태에서 동작해야 한다는 것은 매우 중요한 과제이다. 고전력을 전달하기 위한 유일한 수단으로 채택되고 있는 케이블에서 전류에 의하여 줄 열이 발생하며, 열에 의하여 케이블 시스템의 열화가 발생한다. XLPE 케이블의 경우 90℃에서 30년 수명을 보장한다는 조건으로 제작, 설치 및 운영 되고 있으나, 실제 30년 사용한 시점에서 수명이 종료될 것이라는 보장이 현재로서는 없는 상태이다. 이 논문에서 기존의 수명 이론을 바탕으로 활선 상태의 6.6 kV 케이블 9회선의 온도를 측정하고, 케이블의 온도와 수명의 상관관계를 파악하기 위하여 우리가 제작하여 (주)서부발전에 설치하여 운영하고 있는 장치를 소개한다.

**Abstract** In order to meet increasing power demands, electrical capacity of equipment for power transfers should become larger accordingly. The equipment used for producing and delivering high-voltage power is also required to operate with a high degree of reliability. The stable operation of power equipment is a necessity, not an option. The current through the power cable, the only device to deliver high power, generates a Joule heat, which causes a deteriorating process on the cable system. The XLPE cable is manufactured in such a manner that it can operate for 30 years at 90℃, but there is no guarantee that each cable will reach its projected lifetime of 30 years. In this paper, we have measured the temperatures of nine power cables in operation, based on the theory of cable longevity. In order to study the relationship between temperature and longevity, we have devised a new set of equipment and installed it at Korea Western Power Co., Ltd. located in Taean.

**Key Words** : XLPE, Arrhenius equation, Insulation Resistance, Acceleration factor,  $Tan\delta$ , Weibull deterioration

## 1. 서 론

국내에서 사용되는 대부분의 전기 에너지는 화력 및 원자력에 발전에 의존하며, 공급에 비하여 매년 7% 이상의 수요 증가로 인한 전력 여유율의 감소 및 발전 시

설의 부족현상에 대하여 전기에너지를 절약할 필요성이 제기되고 있다<sup>[1]</sup>. 전기 에너지의 생산 및 전달을 함에 있어서 효율성을 높여야 함은 당연한 과제일 뿐만 아니라, 전력전달의 유일한 수단으로서의 케이블은 신뢰성 있게 동작을 하여야 한다. 케이블로서 주로 사용되고 있

\*정회원, 한세대학교 IT학부

\*\*정회원, (주)오성메가파워(교신저자)

접수일자 : 2015년 2월 15일, 수정완료 : 2015년 3월 28일

게재확정일자 : 2015년 4월 10일

Received: 15 February, 2015 / Revised: 28 March, 2015

Accepted: 10 April, 2015

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

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

는 가교 폴리에틸렌 (XLPE) 절연 케이블을 제조하는 데 사용되는 재료와 기술이 우수해야 하며, 동작의 신뢰성이 보장되어야만 한다. 케이블 시스템의 정상적인 동작을 저해하는 현상들의 원인은 주파수 불안정성, 전압 불안정성, 발전기의 진동, 전기의 과도 현상교란에 의한 비동기 특성 등이 있다<sup>[2,3,4]</sup>. 케이블의 두 도체가 전기적 절연 상태를 유지하도록 사용되는 절연체의 상태를 파악함으로써 케이블의 열화정도를 측정, 수명을 예측하고자 한다<sup>[5]</sup>.

## II. 케이블 온도

케이블에 전류가 흐르면 발생한 열이 방사되어 케이블 상태 및 주변 조건에 의하여 주변 온도까지 떨어지게 되는 데, 아래 식으로 표시된다<sup>[3]</sup>.

$$I = \sqrt{\frac{T_1 - T_2 - T_d}{r \cdot R_{th}}} \quad (1)$$

식 (1)에서  $I$ 는 허용 전류,  $T_1$ 은 도체 온도,  $T_2$ 는 주위 온도,  $T_d$ 는 유전체 발열에 의한 온도 상승,  $r$ 은 교류 도체 실효저항,  $R_{th}$ 는 전열 저항을 각각 나타낸다. 도체 온도는 케이블 재질에 따라 달라지며, XLPE의 경우에는 90°C에서 30년 수명을 보장한다고 주장한다. 주위 온도는 열이 방사하여 떨어지는 최종적으로 도달하는 온도를 뜻한다. 대기 중의 온도는 지상에서 가장 더운 날의 온도를 선택하게 되어, 40°C를 선택하고 있으며, 토양의 경우에는 25°C를 선택하고 있다.  $T_d$ 는 교류전류가 흐를 경우에 상승하는 온도이다. 그러나 직류 전류가 흐를 경우에는 0이다. 실효저항은 교류 전류가 흐를 경우에 발생하는 최대 저항이다.

## III. 케이블의 열화과정의 순서

### 1. 아레니우스 열화

온도에 의한 화학적 반응속도의 영향을 받는 시스템의 자연 수명을 계산하기 위하여 ‘아레니우스(Arrhenius) 법칙’을 이용한다. 온도와 반응률 상수(reaction rate),  $r(T)$ 의 관계를 나타내는 아레니우스 방정식은 다음과 같이 표시된다<sup>[6]</sup>.

$$r(T) = A \cdot \text{Exp}\left(\frac{-E}{k \cdot T}\right) \quad (2)$$

식 (2)에서

$r(T)$ ; 절대 온도  $T$ 에 대한 반응률 상수

$A$ ; 실험을 통해서 얻어내는 상수

$E$ ; 활성화 에너지 (J/mol)

$T$ ; 절대 온도 ( $T = 273 + ^\circ\text{C}$ )

$k$ ; 볼츠만 상수 ( $8.617 \times 10^{-5}$  eV/K)

이다. 식 (2)의 양변에 로그를 취하면

$$\ln r(T) = \ln A + \left(\frac{-E}{k \cdot T}\right)$$

이므로,  $\ln r(T)$ 는  $T^{-1}$ 에 의하여 감소하는 선형관계를 나타내고 있다. 상수  $A$ 를 소거하기 위하여 온도  $T_1$  및  $T_2$ 일 때의 표현식을 구하면 다음과 같다.

$$\ln r(T)_1 = \ln A - \frac{E}{k} \cdot \frac{1}{T_1} \quad (3)$$

$$\ln r(T)_2 = \ln A - \frac{E}{k} \cdot \frac{1}{T_2} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)로부터

$$\begin{aligned} \ln r(T)_2 - \ln r(T)_1 &= \frac{E}{k} \cdot \left\{ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right\} \\ \ln \frac{r(T)_2}{r(T)_1} &= \frac{E}{k} \cdot \left\{ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right\} \\ \frac{r(T)_2}{r(T)_1} &= \text{Exp}\left\{ \frac{E}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

를 얻을 수 있다. 식 (5)에 의하여, 가속인자 (acceleration factor, AF)와 시간과의 관계를 나타내는 아레니우스 법칙에 의하면 두 온도 차( $T_2 - T_1 > 0$ )에 의한 AF는 아래와 같이 표현된다<sup>[7]</sup>.

$$AF = \text{Exp}\left\{ \frac{E}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right\} \quad (6)$$

식 (6)에서,  $T_1$ 과  $T_2$ 는 절대온도이다. 수명을 예측하기 위해서는 AF를 이용하여 계산할 수 있다. Taylor series로 정리하면 다음과 같이 표시된다.

$$AF = \text{Exp}\left\{ \frac{E}{k T_1 T_2} (T_2 - T_1) \right\} \quad (7)$$

식 (7)에서,

$$\tau = \frac{kT_1T_2}{E}$$

라 놓으면,

$$AF \approx e^{-\frac{T_2 - T_1}{\tau}} \quad (8)$$

를 얻는다<sup>[7]</sup>. 식 (8)은 아레니우스 열화(Arrhenius deterioration)의 정의식으로서, 반응의 속도가 온도에 따라서 증가하는 형태, 즉 온도 영향을 받고 있는 전력케이블의 열화 상태를 나타낸다.

그림 1은 저자들이 약 4년 동안 설치운영 하고 있는 전력 케이블 #1 (3 kV/BN) 및 #2 (3 kV/CV)의 절연저항 변동에 의한 열화 추세를 나타내고 있다. 운전을 시작한 후 약 2.5년 경과한 시점에서 두 케이블이 나타내는 절연저항의 값이 반전함을 보여주고 있지만, 전체적인 변동추세는 감소하는 1차함수의 꼴을 나타낸다. 두 직선을 연장한다면 절연저항의 임계값을 파악 파악함으로써 케이블 수명을 예측할 수 있다. 우리가 발전소에 진단 장치를 설치하여 고압케이블의 열화 특성을 분석한 바, 아레니우스 열화 이론과 일치하여 특성 변화를 나타내고 있음을 증명할 수 있었다.

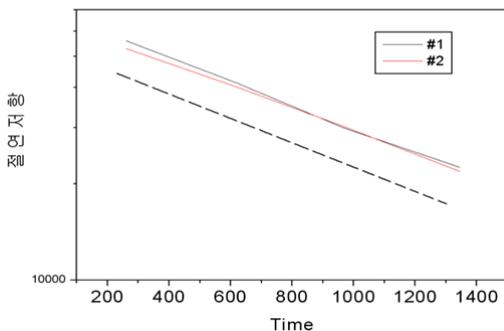


그림 1. 아레니우스 열화에 의한 절연저항과 수명감소  
 Fig. 1. Insulation and lifetime decrease following the trend of Arrhenius deterioration

## 2. 와이블 열화

와이블 확률분포(Weibull distribution, WD)는 금속 및 복합재료의 강도, 전자 및 기계 시스템의 고장률이 노후 등으로 시간에 따라 커지는 경우 수명 자료를 해석하기 위하여 가장 흔히 쓰이고 있다. 확률의 pdf 와 cdf parameter에 의한 시간에 따라 WD의 특성과 일치하는

절연저항의 변화를 보여준다.

그림 2는 저자들이, 약 4년 동안의 기간 동안 동작하고 있는 세 종류 전력 케이블 #1 (6 kV BN), #2 (6 kV CV) 및 #3 (6 kV CVT)의 절연저항이 변동하는 특성을 관찰하고, 열화 곡선의 형태로 표시한 그래프이다. AD가 끝나는 시점에서 열화가 나타나기 시작하며, 시간 축을 Log 스케일로, Y축을 log(log) 스케일로 하면 선형성을 나타낼 수 있다<sup>[8]</sup>. 시간이 경과함에 따라 절연저항의 열화 특성은 AD에서 WD로 변동하는 과정을 나타내고 있다. 즉, 절연특성의 감소현상은 정상적인 AD에서 과도상태의 열화인 WD를 따르는 것을 확인할 수 있었으며 아레니우스 열화 이론과 일치하여 특성 변화를 나타내고 있음을 증명할 수 있었다.

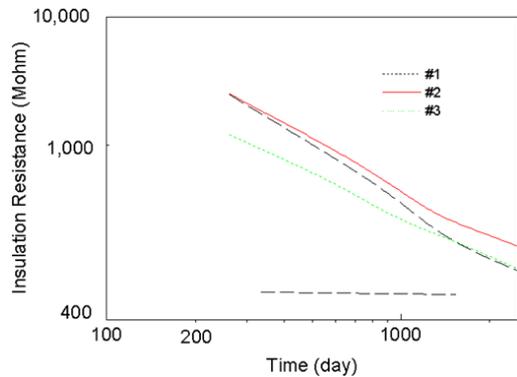


그림 2. 와이블 열화를 따르는 절연저항과 시간과의 관계  
 Fig. 2. Insulation and lifetime following the trend of Weibull deterioration

## 3. 케이블 열화의 원인

케이블의 열화 요인은 크게 4 가지로 나누어 볼 수 있다.

- (1) 전기트리 열화; 절연체 내의 이물질 등에 국소적 고전계가 가해질 때 발생한다.
- (2) 기계적 열화; 절연체의 팽창, 수축으로 인하여 케이블이 반복적인 변형을 받음으로써 차폐층이나 시스가 손상하여 절연 성능이 저하되기 때문에 발생하는 열화이다.
- (3) 수트리 열화; 내부, 절연체내의 이물 등 국소적으로 전계가 집중하는 결함 및 수분 존재 하에서 장시간 전계가 걸리면 집중부에서 수 트리가 발생, 더욱 진전되며 경우에 따라서는 절연과피에 이른다.

(4) 물리화학적 변화; 고온 또는 산소에 노출됨으로써 절연체의 분자구조가 변하여  $\tan\delta$ 의 증가, 물리적 특성의 변화에 기인하며 부설환경이 나쁜 저압케이블에서 볼 수 있다. 온도 상승, 열 신축 등에 의해서 열적으로 연화되어 버리거나, 기계적인 손상 및 변형을 일으켜서 전기적 요인과 복합작용으로 열화가 발생하여 열에 의해서 재질 자체가 화학적으로 변화하기도 한다. 열화 형태로는 차폐층에서 과열 열 신축에 의한 금속피로로 인한 파괴 단선이 된다. 열적 열화의 프로세스로는 과열에 의한 산화, 분해를 통하여 발생하는 생성물의 이온 때문에 절연 성능이 저하하게 된다. 따라서, 차폐층의 저항이 증가 되고 절연저항이 저하된다. 이러한 변화 특성에 의하면, 전력 케이블이 동작하는 동안 초기에는 열열화 과정을 따른다는 사실을 확인할 수가 있었다<sup>[9]</sup>.

#### IV. 온도 및 전류 측정 장치 동작 원리

줄열이 외부로 방산될 때, 케이블 도체에 표면까지 발생하는 열적 저항에 의하여 온도의 기울기 층이 발생하게 된다. 온도를 감시하기 위한 시스템으로서 기존에 설치된 광섬유를 이용한 분포온도측정시스템(distributed temperature sensor, DTS) 시스템은 케이블 접촉저항이 발생하는 경우에 접촉 저항에 의하여 집중발열이 일어나게 되는 데, 집중발열은 케이블 시스템의 특정 부분의 온도를 높게 되므로, 케이블 이상여부를 감지할 수 있게 된다. 그러나, 상시 온도 감시 시스템은 특정 발열을 일으키지 않고, 높은 범위의 절연저항 및 부하전류와 상관관계가 있으므로 이를 정밀 측정할 경우, 절연저항 시스템의 정밀도를 높일 수 있고, 부하전류와 상관관계를 이용하여 장기적으로는 케이블 시스템의 수명을 예측할 수가 있다. 케이블 상시온도를 측정하기 위해서는, 부하전류가 흐를 때 도체의 온도를 측정하는 것이 가장 이상적이다. 도체의 온도를 측정할 경우, 전류가 흐르지 않는 광파이버를 도체 내부에 삽입하는 것이 가장 이상적이나, 광파이버 접속, 광전력 복합케이블의 포설, 도체 접속의 기술적 어려움 및 고비용문제로 아직까지 상용화되지는 않고 있다. 따라서, 케이블의 표면의 온도를 측정하고, 이를 도체온도로 환산하였다. 먼저 운전 중인 케이블 시스템

의 표면 온도를 측정하고, 다음에 실험실에서 사이즈가 동일한 케이블의 도체에 전류를 흘려서 도체 온도를 측정한다. 이 때, 표면온도를 측정하여 표면 온도가 같은 경우 도체온도를 역산하는 측정장치를 사용하고 있다. 운전 중인 6.6 kV 케이블 시스템의 부하전류 및 온도측정장치를 설치하고, 운전 중인 케이블시스템에서 얻어지는 데이터를 바탕으로 분석하였다.

광섬유를 이용하여 전력케이블의 온도분포를 측정하는 방식이 있다. 이 방식은 전력케이블의 내부나 외부에 광섬유를 연결하고, 광섬유의 Raman 산란 특성을 이용하여 광섬유 주위의 온도를 측정하는 것이다. 측정된 온도는 최고 전력 수요 시 허용 가능한 최대 전류를 계산하거나, 케이블의 온도변화를 추정하여 지락 사고 등의 발생하게 될 위치를 파악하는데 활용할 수도 있다. 전력케이블을 감시하기 위하여 현재 연구되고 있는 대부분의 방식들은 광케이블이나 PLC (power line communication)와 같은 유선망을 이용하여 데이터를 전송하게 된다. 이러한 경우에는 통신망을 구축하기 위하여 많은 비용이 소요된다는 문제점을 갖게 된다. 이런 문제점을 해결하기 위하여, 유선망 대신 무선 통신을 이용하여 전력케이블을 감시할 수 있도록 연구가 이루어지고 있다. 일차적으로 발전소에서 적용 가능성을 확인하기 위하여, 전류센서의 동작특성을 활선상태에서 측정하였다.

통상의 전류센서는 이차 측이 개방되면 위험하지만, 우리가 사용한 측정센서는 Hall 방식의 전류측정 방식을 사용하기 때문에 개방되어도 문제가 없는 방식을 채택하였다. 발전소에서의 적용 가능성을 일차적으로 확인하기 위하여, 전류센서를 활선 상태에서 측정하였다. 그림 3은 부하전류 및 온도 측정 시스템을 나타낸다.

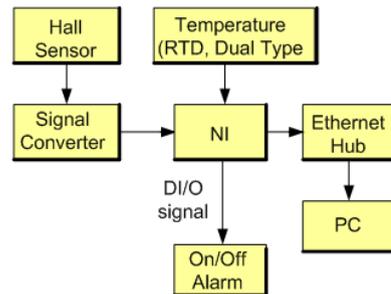


그림 3. 부하 전류 및 온도 측정시스템의 구성

Fig. 3. Configuration of system for measuring load current and temperature

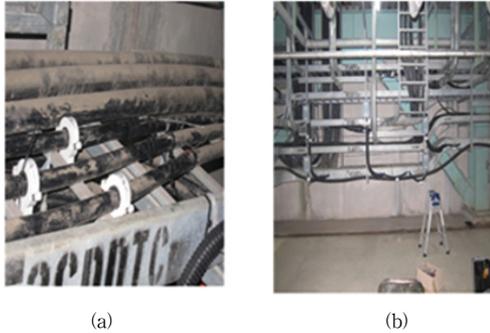


그림 4. 센서: (a) 전류센서; (b) 온도 센서  
Fig. 4. Sensors (a) Current sensor ; (a) Temperature sensor

그림 4는 발전소에서 설치운영하고 있는 전류 및 온도 센서 시스템을 보여 주고 있다. 케이블 단말로부터 접속 부의 불완전 접촉에 의한 발열의 영향을 받지 않도록 5 m 떨어진 위치에 전류 홀센서(hall sensor)를 설치하였다<sup>[10]</sup>. 전류센서에 DC 24 V의 전원 전압을 가하면, 신호 전류 4~20 mA 는 신호 변환장치에 의하여 전류 수치로 변환하고, NI 를 사용하여 데이터화 하여, 컴퓨터 모니터에 표시하였다. 그림에서 회색 보이는 3 개의 장치가 케이블 표면에 부착된 전류센서이다. 센서의 입력단에 DC 24V 의 전원 전압을 가하면, “온도센서 PT100 ”에 의하여 4~20 mA 로 나타난다. 이를 신호 변환장치를 통하여, 전류 신호를 수치로 변환한다.

## V. 결 론

우리는 (주)서부발전(Western Power)에 설치하여 운전 중인 케이블에서 발생 중인 온도를 측정하였고, 케이블의 수명에 미치는 영향을 확인하였다.

1. 6.6 kV 케이블 9회선에 대한 도체 및 절연저항 측정장치를 설치하여 데이터 획득하는 중이다.
2. 운전 중인 케이블의 도체온도를 직접 측정할 수가 없어서, 표면온도를 도체온도로 환산하여 계산하였다.
3. 지금까지 운전 중 도체온도가 케이블 시스템에 수명 평가에 미치는 영향을 평가한 적 없으나, 이 방법을 통하여 케이블 도체온도에 의한 평가 방법 찾았다.

4. 향후 케이블 제조, 설치 및 운영의 원가절감효과 기대한다.

## References

- [1] J. S. Lee, “Design and Structural Analysis of Electric Saver Box,” Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society Vol. 13, No. 6 pp. 2435-2440, 2012.
- [2] J. McCalley, O. Oluwaseyi, C. Singh, K. Jiang “System Protection Schemes: Limitations, Risks, and Management,” Final Project Report, Power Systems Engineering Research Center, Iowa State University, 2010.
- [3] K. H. Um, K. W. Lee, “Study of Lifetime Evaluation Based on Insulation Resistance Following the Failure Rate Acceleration Factor of the Arrhenius Equation”, Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol.14, no. 5, pp. 231-236, Oct., 2014.
- [4] P. M. Anderson, B. K. LeReverend, “Industry experience with special protection schemes” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, Issue: 3 pp. 1166-1179, 1996.
- [5] F. J. Wyant, S. P. Nowlen, “Cable Insulation Resistance Measurements Made During Cable Fire Tests” Sandia National Laboratories, June 2002.
- [6] Nelson, W., “Accelerated Life Testing - Step-Stress Models and Data Analyses”. IEEE Transactions on Reliability, vol. R-29, Issue 2, pp. 103 - 108 June 1980.
- [7] C. Raymond., “Physical Chemistry for the Biosciences. Sausalito”, pp. 311-347, University Science Books. 2005.
- [8] G. C. Philip, “A Generalized EOQ Model for Items with Weibull Distribution Deterioration”, pp. 159-162, University Science Books. 2005.
- [9] K. W. Lee, K. H. Um, “A Study on the Deterioration Process of 22kV Power Cables in Operation”, Journal of the The Institute of Internet,

Broadcasting and Communication, vol.13, no. 3, pp. 127-133, Jun 2013.

- [10] O. Petruk, R. Szweczyk, J. Salach, M. Nowicki, "Digitally Controlled Current Transformer with Hall Sensor", Advances in Intelligent Systems and Computing(Springer) pp.641-647, 2014.

## 저자 소개

### 엄 기 홍(정회원)



#### 학력

- 한양대학교 전자공학과(BS)
- NYU (New York University), Polytechnic Institute of Engineering, Dept. of Electrical & Computer Engineering (MS)
- New Jersey Institute of Technology (NJIT), Dept. of Electrical & Computer Engineering (PhD)

#### 경력

- TA, RA, & Lecturer at NJIT (NJ, USA)
  - RS Microwave Co. Inc. (NJ, USA) 연구원
  - Princeton University (NJ, USA) 물리과 연구원
  - Adjunct Professor, NJIT
  - 강남대, 상명대, 한양대 강사
  - 현재 한세대학교 IT 학부 교수
- <주관심분야 : 안테나, 마이크로파, 전기전자재료>

### 이 관 우(정회원)



#### 학력

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

#### 경력

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

※ Remark : 이 논문은 전기전자 재료학회 하계 학술대회 (2014.11.14.)에서 발표했던 논문을 보충하여 작성한 것이다.