

<http://dx.doi.org/10.7236/IIIBC.2016.16.1.227>

IIBC 2016-1-31

## 와이블 수명지수에 의한 고전압 케이블의 전압열화 측정값의 선형성 확인

### Linearity Verification of Measured Voltage Deterioration of High Voltage Cable based on Weibull Lifetime Index

엄기홍\*, 이관우\*\*

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

**요약** 전력 수요량은 매년 증가추세에 있으며, 발전소에서 동작하는 모든 장비들과 대용량의 장거리 전력수송을 위한 장비들은 전력 소비자들이 기대하는 바 신뢰할 수 있는 수준에서 완전한 상태로 동작하여야 한다. 일반적으로, 고전력 송전을 위하여 사용되고 있는 케이블은 동작수명이 30년 이라고 제작 시에 선언된다. 케이블은 동작을 시작함과 동시에 성능이 악화되는 열화과정(케이블의 전기적 특성이 악화되는)이 시작된다. 열화로 인한 신뢰성의 손상이 발생함에도 불구하고, 동작상태의 신뢰성을 진단을 받지 않았기 때문에, 언제 불의의 사고를 초래할지 예측을 할 수 없을 만큼 위험한 상태에서 동작을 하고 있는 실정이다. 우리는 케이블의 열화과정을 진단하기 위하여 진단 장비를 제작하였고, 충청남도 태안의 (주)서부발전에 설치하여 시운전 하고 있는 중이다. 우리는 측정장비를 이용하여 추출한 데이터를 얻은 결과를 시간에 따라 변동 하는 그래프로 표시하여 분석한 특성을 이전 논문들에서 제시하였다. 이 논문에서는 이전 논문에서의 측정값으로 나타난 그래프가 Weibull 확률분포에 의한 열화 이론과 일치하는 지를 확인하고, 결과를 제시한다.

**Abstract** As the demand for electric power increases, all devices operating in power stations and all devices adopted in order to deliver distant loads need to be operating in perfect condition at the level of reliability expected by consumers. In general, the lifetime of cables used in delivering high power is declared to be 30 years from the time of production. Deterioration (which is the worsening of electric properties) starts from the very moment of operation. In spite of the reduction in reliability caused by deterioration, the reality is that cables often operate at considerable risk of accidents because the reliability of operation has not been diagnosed. We have invented a device to diagnose the deterioration processes of high-voltage power cables. It has been installed and is currently operating at Korea Western Power Co., Ltd., located in Chungnam, Korea. In previously published papers we have shown graphs obtained by plotting insulation resistances versus time, through analyzing the data extracted from operating cables using the devices we have invented. In this paper, we verify that the previously plotted graphs agree with the life time index of Weibull distribution of probability.

**Key Words** : XLPE, Deterioration, Partial discharge, Corona discharge, Weibull distribution

\*정회원, 한세대학교 IT학부(주저자)

\*\*정회원, (주)오성메가파워(교신저자)

접수일자 : 2016년 1월 6일, 수정완료 : 2016년 2월 2일

게재확정일자 : 2016년 2월 5일

Received: 6 January, 2016 / Revised: 2 February, 2016 /

Accepted: 5 February, 2016

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

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

## I. 서론

국민 1인당 평균 소모하는 전력량은 연간 8,092 kWh로서 1980년에 비교하면 약 9배 만큼 증가하였다. 예상보다 수요가 증가하고 이에 따라 전력을 공급하기 위한 전체적인 여건이 점점 나빠지고 있다<sup>[1]</sup>. 대도시로의 인구집중현상과 산업시설이 증가함에 따르는 전력수요를 대비하기 위하여 신뢰성있는 대용량의 장거리 전력수송을 위한 장비가 필요하다. 전기를 운영하기 위한 설비는 대형화, 중량화 및 고압화 되고 있으며 전력설비의 효율화와 고신뢰도를 확보하기 위한 사전 사고 예방을 위한 설비진단에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 고전압 전력을 전달하기 위하여 사용하고 있는 유일한 수단은 가교 폴리에틸렌 (XLPE, cross linking-polyethylene) 절연케이블 (CV cable)로서 약 40년 전 여러 장소에 설치되어 지금까지 동작해 오고 있다. 이러한 케이블들은 제작 시에 동작 수명이 30 년이라고 선언되었다<sup>[2]</sup>. 케이블은 설치, 동작시점 부터 성능의 저하를 가져오는 열화과정이 나타나게 된다. 열화로 인한 신뢰성의 손상이 발생함에도 불구하고, 동작 상태의 신뢰성을 진단을 받지 않았기 때문에, 언제 불의의 사고를 초래할지 예측불가의 위험한 상태에서 동작을 하고 있는 실정이다. 우리는 케이블의 열화과정을 진단하기 위하여 진단 장비를 제작하였고, 현재 (주)서부 발전에 설치, 시운전 하고 있는 중이다. 이전의 논문에서 측정장비를 이용하여 추출한 데이터를 해석하여 얻은 결과를 시간에 따라 변동 하는 그래프로 표시하였다. 이 논문에서는 그 그래프를 다시 살펴보고, Weibull 이론과 일치하는 지를 확인하고 결과를 제시한다.

## II. 케이블의 열화

케이블의 열화는 제조하는 공정이나 가공, 보관, 운반 과정에서 또는 열, 빛, 방사선, 산소, 오존, 물, 미생물 등과 같은 여러 요소의 작용을 받아 성능 또는 기능 등의 특성이 악화되는 현상이다. 수명은 설치환경, 사고경력, 운전 경력 등에 따라 달라진다. 열화가 진행되면 케이블이 파괴되어 화재를 발생시킨다. 열화 원인은 다음과 같이 대별한다.

- (1) 열열화; 케이블에 열(heat) 에너지가 가해지면 물리적 변형 또는 화학적 변화가 나타나서 절연특성이 저하되는 현상이다. 열열화는 아레니우스 법칙을 따른다.
- (2) 전기적 열화; 내부에 전계가 집중되는 경우, 전계에 의하여 케이블이 열화되는 현상이다. 절연체의 과전 열화( $V-t$ ) 특성으로서 표시된다. 전압은 대기 전압 외에 이상전압 (뇌해, 개폐 서지 등)이 있다.
- (3) 환경적 열화; 설치된 주변 환경의 영향을 받아 케이블의 절연 특성이 변질 되는 현상이다. 오존, 부식, 흡습, 고체화 등이 있다.

고전압의 영향에서는 트래킹 열화에 의해 전기적 절연파괴를 초래한다. 열화의 과정은 아레니우스 열화, 와이블 열화, 부분방전 열화의 과정을 거친다. 열화 과정은 케이블이 설치 운영된 시점으로부터 진행된다. 열화가 계속 진행되면 절연 저항이 감소하여 케이블이 파괴된다. 부하 전류는 동작중인 전력 케이블에서 줄열을 발생시키는 열적 열화를 초래한다, 한편 이온발생에 의한 전류는 케이블에서 전기화학적 열화를 초래한다. 전력 전달 시스템에서 사고가 발생하면 대규모 정전사태가 발생한다. 따라서, 사고를 미연에 방지하는 작업이 매우 중요하다. 지중 전력전달 시스템을 진단하기 위하여  $\tan \delta$ 법, 부분 방전법, 절연저항법이 있는데<sup>[3]</sup>. 부분방전 열화에 대해 살펴본다.

## III. 부분방전 열화

### 1. 부분방전의 종류

부분방전 (partial discharge, PD) 은 두 전극을 전기적으로 연결시키지 않고 절연체의 결함에 의하여 일어나는 방전 즉, 두 개의 전극사이에 존재하는 절연체 일부에서 발생하는 전기적 충전 또는 스파크 현상이다. 절연시스템의 임의 지점에서 절연파괴가 발생하기 전에 발생한다. 케이블이 내부 아크 또는 PD현상이 발생하고 있는지를 진단하는 것은 중요하다. 고전압의 스위치기어 절연체에서 발생하여, 전자기파를 발생한다. 이 신호는 절연 재료의 내부나 경계면에서 진행하면서 감쇠가 일어나긴 하지만 절연체나 전기 부품을 통하여 진행한다<sup>[4]</sup>. PD 는 불완

전한 절연과피로서 전극사이의 절연체의 일부를 파괴시키는 것이다. 완전한 절연과피와는 달리, 전극 사이의 낮은 저항에 의하여 절연과피 경로를 형성하지는 않으며 방전 임펄스를 발생시킬 뿐이다. 절연체가 자체 복원 특성이 있다는가 전계가 다시 형성된다면 펄스 형태의 PD가 나타난다. 기체 방전에 의한 PD는 펄스 없이도 발생할 수 있다<sup>[5]</sup>. 종류에는, 고체나 액체 절연체 내부의 보이드(void)나 공극에서 발생하는 내부방전(internal discharge), 종류가 다른 절연체의 경계면에서 발생하는 표면방전(surface discharge), 국부적으로 발생하는 외부방전(internal partial discharge) 코로나 방전(corona discharge) 세 종류로 구별한다. 코로나 방전(corona discharge)은 외부방전(internal partial discharge)이라고도 한다. 펄스 형태의 PD와 펄스 형태가 아닌 PD는 임의 형태의 전압신호로 나타날 수 있다. 내부방전의 위치는 절연체의 공극에서 발생하며, 제조과정에서 발생하거나, 절연체의 노화 상태를 말해 주므로, PD 측정기술은 고전압에서 중요하다<sup>[5]</sup>.

## 2. 활선 부분방전법 및 절연저항법

활선진단법은 케이블이 살아있는 상태에서 측정하는 방법이다. 현재 한국에서는 이 방법으로서 부분방전법과 절연저항법이 있다. 부분방전법은 케이블이 사고가 발생하기 전에 일어나는 부분방전을 측정하여 케이블 시스템의 이상여부를 확인하는 방법이다. 우리가 연구한 케이블은 13년 전에 설치하여 지금까지 운전하고 있다. 설치 후 6년이 되는 시점으로부터 약 2,500일의 기간에 걸쳐 10일 마다 절연저항을 측정하였고, 절연저항은 Weibull 특성을 나타 내고있음을 확인하였다<sup>[6, 7]</sup>.

## 3. 부분방전측정 방법

우리가 제작한 측정장비는 DC 전압 신호의 인가 유무를 이용한 접지저항 시스템이다. 동작 중인 전력케이블의 절연 저항을 측정하기 위하여 두 누설 저항을 다음과 같이 계산하였다<sup>[8]</sup>.

- (1) DC 전압신호를 인가하지 않은 상태에서 누설 전류를 측정한다.
- (2) DC 전압신호를 인가한 상태에서 누설 전류를 측정한다.
- (3) 위의 두 경우의 누설 전류의 차이를 계산한다<sup>[9]</sup>.

AC 접지 시스템은 케이블 쉬스(sheath)로 부터 접지로 연결하고 접지 저항을 지면에, dc 누설 전류를 측정하기 위한 전류계를 연결한다<sup>[10]</sup>. 이렇게 하는 이유는 단락 회로로부터 발생하는 부정적인 영향, 즉 절연 저항을 측정하는 도중에 발생할 수 있는 사고를 사전에 예방하려는 목적이다<sup>[11]</sup>.

## IV. 케이블의 절연저항 측정의 결과

우리들이 개발한 장비를 사용하여 케이블의 절연저항을 측정하여 분석한 데이터를 1 차 필터링함으로써 얻은 그래프를 이전의 논문에서 제시하였는데, 이를 다시 나타내면 그림 1과 같다<sup>[12]</sup>. 세 종류의 케이블 #1(6 kV BN), #2 (6 kV CV) 및 #3(6 kV CVT)를 임의로 선정하여 절연 특성을 측정하였다. 필터링 연산을 하여 얻어지는 그래프는 아래로 볼록한 감소형태의 지수함수의 꼴을 나타냄을 확인하였다. 자연 현상의 수명 곡선이 감소하는 지수함수임은 이미 알려져 있는 사실이다. 여기서는 이 그래프가 실제로 와이불 함수의 특성을 따르고 있는지를 확인하자.

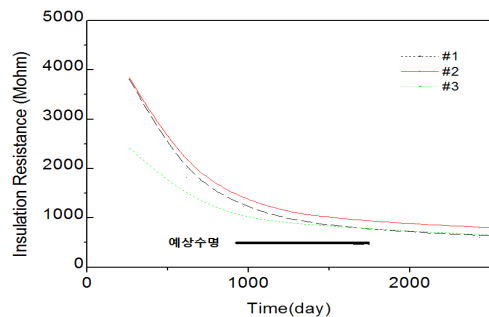


그림 1. 감소하는 케이블 절연저항

Fig. 1. Insulation resistance in decaying fashion

## V. 와이불 분포와의 일치

와이불 확률 분포는 Waloddi Weibull이 1937년 재료의 파괴강도를 분석하면서 고안한 확률분포로서 금속 및 복합 재료의 강도, 전자 및 기계 시스템의 수명 자료 해석, 고장률이 노후 등으로 시간에 따라 커지는 경우에 가장 흔히 쓰이고 있다.

1. 와이블 분포의 누적함수

Weibull 확률함수의 누적분포함수(cdf)의 표현식은 다음과 같다<sup>[13, 14]</sup>.

$$F(t|V) = \begin{cases} 1 - \exp(-C \cdot t^a \cdot V^b) & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 지수

$$(-C \cdot t^a \cdot V^b) \quad (2)$$

를 고려한다. 식 (2)가 음의 실수임을 증명하고, 이로부터  $V$ - $t$ 특성의 관계식을 구한다. 와이블 분포에서 동일한 확률을 표시하는 곡선들(curves)은 그림2와 같이,  $\ln V$  vs.  $\ln t$  용지에 평행인 직선으로 표현됨이 알려져 있다.

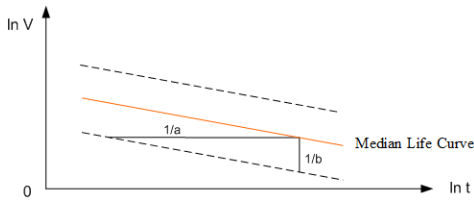


그림 2. 와이블 분포의 감소하는 일차 관계  
Fig. 2. Decreasing linear relationship in Weibull distribution

수명의 평균을 나타내는 Median Life Curve는

$$F(t) = 0.5 \quad (3)$$

이다. 식 (2) 와 (3) 으로부터

$$0.5 = 1 - \exp(-C \cdot t^a \cdot V^b) \quad (4)$$

를 얻는다. 식(4)로부터

$$\exp(-C \cdot t^a \cdot V^b) = 0.5 \quad (5)$$

로 되고, 식(5)의 양변에 ln를 취하여 정리하면 다음과 같다.

$$t^a \cdot V^b = \frac{1}{C} \ln 2 \quad (6)$$

다시 한 번 식(6)의 양변에 ln를 취하면,

$$a \cdot \ln t + b \cdot \ln V = Constant \quad (7)$$

이다. 식(7)에서, 변수 치환(change of variables)을 하기 위하여

$$X = \ln t, \quad Y = \ln V \quad (8)$$

를 도입한다. 따라서 식(8) 은

$$\begin{aligned} a \cdot X + b \cdot Y &= Constant \\ Y &= -\frac{a}{b} \cdot X + C \end{aligned} \quad (9)$$

로 된다. 식(9)에서 직선의 기울기를

$$\frac{1}{n} = \frac{a}{b}$$

라고 하면

$$Y = -\frac{1}{n} \cdot X + C \quad (10)$$

을 얻는다. 식(10) 은 기울기가  $(-1/n)$  이고  $Y$ -절편이  $C$  인 감소하는 직선을 나타낸다. 케이블의 수명을 결정하기 위하여 사용하는 Weibull 이론에 의하면 다음과 같다.

$$t \cdot V^{b/a} = C' (= constant) \quad (11)$$

2. 수명 지수

식(11) 의 지수를 변형하면

$$V^n \cdot t = C (= constant) \quad (12)$$

이다. 식(12) 는 전압 열화과정의  $V$ - $i$  관계식에 따른다. 여기서  $V$  는 전압,  $i$  는 전류,  $n$  은 수명지수(index of life time)를 나타낸다. 우리는  $n$  값을 연구하여 동작 중인 케이블의 열화특성이 식을 따른다는 것을 확인 하였다. 제조 초기에는  $n = 9$  로 특정되었으나, 동작하는 도중에  $n = 16$  으로 증가되었다. 지수함수의 감소 추세

를 우측으로 연장하여도 절연저항 기준값 500 Mohm 과의 교차지점을 찾기가 어려우므로 케이블의 예상 수명을 판단하기는 어렵다. 그림 3은 그림 2의 그래프를 해석하기 위하여 절연저항의 Log(Log) 값, 시간의 Log 값을 취하여 표시한 것이다<sup>[12]</sup>. 여기서 선형특징의 이론

$$Y = -\frac{1}{n} \cdot X + C$$

와 일치함을 확인 할 수가 있다. 그림 3의 그래프는 2,500 일동안 측정된 절연저항을 나타낸 그래프로서 기울기가 음(-)인 직선이다. 이 직선이 Weibull 분포특성을 따름을 증명한다. 그림을 이용하여 잔여수명을 예측할 수 있다. 즉, 절연저항이 선형으로 감소하므로 절연저항이 500 MΩ 이하로 감소하는 시점에서 케이블을 교체하여야 한다. 감소 추세를 예상하면 4,000일 되는 시점에서 저항의 한계값에 도달하므로, 안정적으로 운전할 수 있는 잔여수명은 1,500일 이라고 판단한다<sup>[12]</sup>.

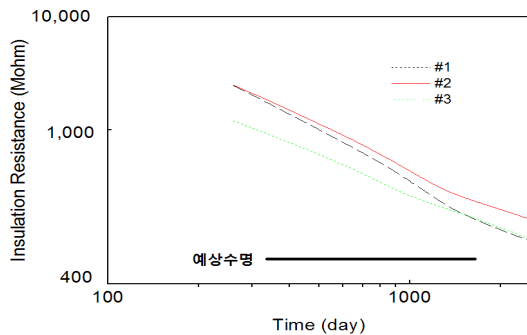


그림 3. x- 및 y-축을 log 스케일로 표시한 절연저항의 변화

Fig. 3. Changing insulation resistance with x- and y-axes in log scales.

## VI. 결론

우리가 개발한 측정장치를 발전소의 고전압케이블에 설치하여 데이터를 획득, 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 케이블 시스템에서 얻은 데이터를 분석하여 열화추세를 반영하는 그래프를 얻었다.
2. 겉보기에 무의미한 그래프를 두 차례 필터링 연상을 거친 결과에 의하면, 감소하는 일차함수의 특징

을 나타 내었다.

3. 선형 특징을 나타내는 그래프는 와이불 분포 이론과 일치함을 확인하였다.
4. 동작 중인 케이블 시스템의 예상수명을 판단할 수 있게 되었으므로, 노후한 케이블을 사고발생 전의 적정시점에서 교체할 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. Mori, Y. Inoue, T. Yoshimitsu, Y. Ishikawa, H. Yoshida, T. Sueki, F. Aida, "Voltage deterioration of XLPE wires in water under gamma ray irradiation," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, Issue 3, pp. 466-472, Sep., 1989.
- [3] K. H. Um, K. W. Lee, "Developing Equipment to Detect the Deterioration Status of 6.6 kV Power Cables in Operation at Power Station," The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication(IIBC), Vol. 14, No. 4, pp. 197-203, Aug., 2014.
- [4] Electrical Power Engineering, Power Lab II, Experiment: Partial discharges, University of Technical Darmstadt High Voltage Department, Summer Semester 2011.
- [5] G. Paoletti, A. Golubev, "Partial Discharge Theory and Applications to Electrical Systems", Pulp and Paper, 1999. Industry Technical Conference Record of 1999 Annual IEEE, 21-25 June 1999, pp. 124-138, Seattle, WA, USA /10.1109/PAPCON.1999.779355
- [6] M. N. Sharifa, M. N. Islamb, "The Weibull distribution as a general model for forecasting technological change," Technological Forecasting and Social Change, Vol. 18, Issue 3, pp. 247-256,

Nov. 1980.

- [7] <http://www.weibull.com/hotwire/issue14/relbasics14>.
- [8] 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.
- [9] <http://www.netaworld.org/standards/ansi-neta-ats>
- [10] J. Bird, Electrical Circuit Theory and Technology, Routledge, p. 549, 5ed., 2013.
- [11] K. W. Lee, Y. H. Whang, Y. C. Weon, K. H. Um, J. H. Lee, D. H. Park, "Developing a Diagnosis Equipment to Determine the Relationship between Load Current and Lifetime of 6.6kV Cables in Operation," The Korean Institute of Electrical Engineers(KIEE), Fall Conference, 2013.
- [12] K. H. Um, K. W. Lee, "A Linear Change of Leakage Current and Insulation Resistance of 22 kV Cables", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol.14, No. 4, pp. 169-173, Jun 30, 2015.
- [13] Papoulis, Athanasios Papoulis; Pillai, S. Unnikrishna Probability, Random Variables, and Stochastic Processes (4th ed.). Boston: McGraw-Hill. ISBN 0-07-366011-6. 2002.
- [14] [http://www.statsoft.com/Textbook/Survival - Failure-Time-Analysis](http://www.statsoft.com/Textbook/Survival-Failure-Time-Analysis)

**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)오성메카과워 연구소장
- <주관심분야 : 전기전자재료>

※ Remark : 이 논문은 2nd International Conference, ICCPND 2015 (Yanbian, China, June 30-July 4) 에서 발표했던 논문을 보충하여 작성한 것이다.