

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.5.231>

IIBC 2014-5-32

아레니우스 방정식의 가속인자를 만족하는 절연저항특성 분석에 의한 케이블 수명평가 연구

A Study on Cable Lifetime Evaluation Based on Characteristic Analysis of Insulation Resistance by Acceleration Factor of the Arrhenius Equation

엄기홍*, 이관우**

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

요 약 오늘 날 산업이 발전함에 따라 전력에 대한 수요량이 증가하고 송전 용량이 커야할 필요성이 점차 요구되고 있다. 관련 설비들은 대규모화될 뿐만이 아니라 높은 신뢰성으로써 동작할 것을 요구받고 있다. 따라서 전기설비의 안정화는 매우 중요한 과제이다. 특히, 전기의 생산 및 공급 과정에서 요구되는 높은 신뢰성은 산업 사회의 필수적인 요소라고 할 수 있다. 설비의 사고 및 정전 사고등은 높은 전기적 의존을 가진 고도 산업사회에 막대한 경제적 손실 및 장애를 가져다준다. 우리는 이 논문에서 발전소에서 고전압의 생산 및 송배전의 유일한 전송 수단으로 사용하고 있는 고전압용 전력 케이블(power cable) 시스템의 안정된 동작을 판단하기 위하여, 아레니우스 인자를 따르는 절연 저항의 시간에 따른 변화추세를 파악하고, 열화의 마지막 단계로서 발생하는 파괴에 의한 케이블의 수명을 예측하고자 한다.

Abstract With the development of industry these days, the demand for electric power increases and the larger capacity for power transfer is required. The scales of facilities should become larger; and the relative systems are required to operate with a higher degree of reliability. Therefore, stabilization of electric power systems is an important issue. The high degree of reliability required in the process of production and supply of electric power is an essential part of industrial society. Accident such as blackouts causes a hugh amount of economic losses to the high-tech industrial society dependent upon electric power. In this paper, in order to determine a stable operation of high-voltage power cable, used as a unique means of delivering electric power generated at a power station, we figure out the time rate of change of insulation resistance following a decay accelerating factor Arrhenius equation. With the data from the insulation resistance, we can determine the lifetime of power cable in operation.

Key Words : XLPE, Insulation Resistance, Lifetime, Accelerated life testing, Arrhenius equation, Weibull deterioration

1. 서 론

전력공급의 기술 및 환경적인 이유로 인하여 요구되

는 전력망의 지중 케이블은 설비의 안전성이 요구되고 있다. 지중 케이블 중에서 가교 폴리에틸렌 (XLPE) 절연 케이블은 절연 내력이 우수하고, 유지보수하기가 쉽

*정회원, 한세대학교 IT학부(주저자)

**정회원, (주)오성메가파워(교신 저자)

접수일자 : 2014년 8월 8일, 수정완료 : 2014년 9월 8일

게재확정일자 : 2014년 10월 10일

Received: 8 August, 2014 / Revised: 8 September, 2014

Accepted: 10 October, 2014

**Corresponding Author: ygu9177@daum.net

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

고, 우수한 전기적 및 절연적 특성을 갖는다는 등의 여러 장점이 있어서 전력케이블의 많은 부분에서 사용되고 있다. 안정을 유지하면서 필요한 전기를 지속적으로 공급할 수 있기 위해서는, 케이블의 제조의 재료와 기술이 우수해야 할 뿐만 아니라 운전에 있어서 신뢰성이 보장되어야만 하며, 설치 후의 철저한 유지, 보수, 관리를 함으로써 불의의 사고가 발생하기 전에 최대한 예측을 빨리하여 대책수립을 하여야 한다. 결과적으로 전력 시스템은 전력에 대한 수요를 충족하기 위하여 신뢰성 있게 운전해야 한다. 사고가 발생할 경우, 시스템의 붕괴현상이 불가피하고, 정전현상이 발생하여 발전소 및 수요자들에게 피해를 끼치게 된다. 또한 복구하기에 시간이 오래 걸리고, 설치 비용도 비싸므로 사전 사고 예방이 중요하다. 그러나 증가하는 전력수요에 부응하기 위한 전력 시스템의 규모는 커지고 장비는 점점 복잡한 형태를 갖게 된다. 이에 따라, 시스템의 정상적인 동작을 저해하는 현상들이 나타나게 된다. 이러한 현상의 원인은 주파수 불안정성, 전압 불안정성, 발전기의 진동, 전기의 과도현상교란에 의한 비동기 특성등이 있다^[1,2,3]. 케이블을 구성하는 두 도체는 전기적으로 분리된 상태에서 동작을 해야 하고, 분리 상태를 유지하기 위하여 도체 사이에 삽입되어 있는 절연체의 상태를 판단함으로써 케이블의 열화 정도를 파악하고자 한다.

II. 절연 저항

절연체 양단에 직류 전압을 인가했을 때, 절연체를 통하여 미소한 전류가 흐르게 된다. 이 경우 인가전압과 전류의 비(ratio)를 절연저항(insulation resistance, IR)이라 한다. 절연저항은 전기기기 (예: 전기회로, 전력 케이블 등)의 절연에 의한 열화현상을 판단하기 위한 물리량이며, 값이 감소하면 누전이나 화재 등의 위험상황이 발생할 수 있다. 전류가 절연체의 표면을 따라서 흐르는 전류를 표면절연저항, 내부를 흐르는 전류를 체적절연저항이라고 한다. 인가전압이 높을수록, 주변의 온도나 습도가 증가할수록 감소하는 특징을 나타낸다. 전력 케이블에서 절연 저항의 단위는 보통 MΩ이 쓰인다. 절연상태가 유지되고 있다하더라도, 고전압이 인가되거나, 사용되는 절연물질의 복합적인 특성을 나타낼 경우 케이블의 절연저항은 주위 환경의 영향을 많이 받게 된다. 따라서

절연 상태가 불규칙적으로 변화하게 된다^[4,5]. 그러므로 절연저항은 여러 요인에 의한 영향을 나타내어 매우 복잡한 특성을 갖게 되므로 간단히 표현하기가 쉽지 않다. 복잡한 특징을 단일한 값으로 표현할 경우, 표현식은 여러 가지 특성을 포함하고 있다. 또한 전기절연물의 동작 시간이 흐를 수록 열화현상으로 인하여 절연저항이 감소하게 된다. 일정 값 이하의 값에 도달하게 되면 전기절연물은 파괴에 이르게 된다. 파괴에 이르기 전에 절연저항은 일정한 열화 곡선을 그리게 된다. 고전압 시스템에서 절연저항이 낮게 될 경우, 지금까지는 케이블이 불량하기 때문이라고 단순하게 판정하였다. 그러나, 절연물의 주위환경 및 주변온도, 전류, 습도등의 영향을 크게 받아서 절연저항의 값이 변동하기 때문에 측정된 절연저항 값을 사용하여 열화판정을 평가하기 위한 데이터로 참조하기에는 신뢰성이 약하다는 문제가 있었다. 그러므로, 열화판단을 위한 하나의 참고자료로서만 사용되었다. 또한 절연 저항의 값이 작은 경우는 쉽게 측정할 수 있으나, 고압 전원에 의한 절연저항은 측정하기가 매우 어렵다는 이유로 지금까지 실시된 적이 없었으나, 저자들은 이 값을 분석하여 데이터로 작성하였다. 운전 중인 고전압케이블 시스템에서 얻어 낸 절연저항 데이터는 매우 불규칙하므로 이 데이터의 의한 절연저항특성을 쉽게 파악할 수가 없었다. 그러나, 불규칙한 결과를 초래하는 잡음의 원인 요소를 제거함으로써, 절연저항은 시간에 따라 감소된다는 일반적인 특성을 정량적으로 확인할 수 있었다. 또, 절연저항은 일정한 규칙성을 갖고 있음을 증명할 수 있었다. 즉, 초기의 열화곡선은 랜덤열화 즉 불규칙적인 열화곡선인 아레니우스(Arrhenius) 열화특성을 나타냄을 확인하였고, 열화가 끝나는 시점에서는 전압열화특성을 나타냄을 확인하였다^[6]. 전압열화 곡선 이론은 케이블 시스템의 고장 특성을 파악하기 위해 가장 널리 사용되고 있다.

III. 케이블의 열화

1. 아레니우스 열화의 이론적 배경

온도에 의한 가속인자를 파악하기 위한 기본모델은 아레니우스 법칙에 기반을 두고 있다. 부품 시스템의 수명을 산출하는 기준으로 '아레니우스의 법칙'이 널리 활용되는데, 온도에 의해 제품 또는 부품의 수명을 가속하

는 경우, 온도가 10도 낮아지면 수명이 2배로 늘어나고, 온도가 10℃씩 상승할 때마다 수명이 반감된다는 경험적인 법칙을 이용하여 온도 변화에 따르는 수명을 예측할 수 있다. 이 경험 법칙은 활성화 에너지로 설명되는 아레니우스 법칙을 근사화한 공식이다. 아레니우스 법칙은 온도와 시간의 변화에 따르는 가속모델을 나타내며, 가속수명시험(accelerated life testing, ALT)에서 가장 유용하게 사용되고 있다. 반응을 상수(reaction rate)와 온도와의 관계를 나타내는 아레니우스 방정식은 다음과 같이 표시된다⁷⁾.

$$\lambda = A \cdot \text{Exp}(-E/k \cdot T) \quad (1)$$

방정식 (1)에서 A 는 실험을 통해서 얻어내는 상수이고,

- E ; 활성화에너지
- T ; 절대 온도 ($T = 273 + ^\circ C$)
- k ; 볼츠만 상수 ($8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)

이다. 식 (1)은 전력케이블의 열화 반응이 진행되는 경도를 나타내는 반응률이다. 그래서 지수함수적 감소인자 $\text{Exp}[-E/(k \cdot T)]$ 에 따르는 감소형태의 열화를 나타낸다.

가속 인자 (acceleration factor, AF)와 시간과의 관계를 나타내는 아레니우스 방정식 즉, 아레니우스 법칙에 의하면 두 온도 차($T_2 - T_1 > 0$)에 의한 AF는 아래와 같이 표현된다⁸⁾.

$$AF = \text{Exp}\left\{\frac{E}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right\} \quad (2)$$

식 (2)에서, T_1 과 T_2 는 절대온도($273 + ^\circ C$)이다. 수명을 예측하기 위해서는 AF를 구해야 하며, 이 식을 이용하여 계산할 수 있다. 이를 정리한 후, Taylor series로 정리하면 다음과 같이 근사적으로 표시된다.

$$\begin{aligned} AF &= \text{Exp}\left\{\frac{E}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right\} \quad (3) \\ &= \text{Exp}\left\{\frac{E}{k}\left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}\right)\right\} \\ &= \text{Exp}\left\{\frac{E}{k T_1 T_2}(T_2 - T_1)\right\} \end{aligned}$$

식 (3)에서,

$$\tau = \frac{k T_1 T_2}{E}$$

라 놓으면,

$$AF \approx e^{\frac{T_2 - T_1}{\tau}} \quad (4)$$

의 식을 얻는다⁸⁾. 식 (4)은 아레니우스(Arrhenius) 열화의 정의 식으로서, 반응의 속도가 온도에 따라서 어떤 형태로 증가(increase)하는지를 규정하고 있다. 여기서는 온도 영향을 받고 있는 전력케이블의 열화 상태를 나타낸다. 저자들이 발전소에 설치하고 운영 중인 고압케이블을 진단하고 열화 특성을 분석한 바

아레니우스 법칙에 의한 특성 변화를 나타내고 있음을 증명할 수 있었다. 케이블 절연 저항의 감소는 수명판정 결과 지수함수적인 감소를 나타내는데, 이는 케이블의 수명이 열 열화와 같은 무질서도(randomness)에 따른 결과로 예상된다. 즉 아레니우스 식과 같이 전자이온의 무질서도에 의한 열화와 같다.

2. 운전 중인 케이블의 절연저항이 변동하는 특성

케이블 시스템의 수명평가는 일정한 통계시스템을 가지고 행하여진다. 지금까지 일반적으로 많이 사용되는 고장 평가 시스템은 절연저항의 변화로 나타나는 와이בל(Weibull) 열화는 아레니우스(Arrhenius) 열화 과정을, 파괴에 의한 와이בל 열화를 통계로 하여 케이블 시스템의 수명을 파악하였다. 수명곡선은 초기의 아레니우스 열화에 이어, 와이בל 평가가 후기에 진행되기 때문에 단순한 와이בל 법칙으로만 수명평가를 하는 것은 정확한 수명평가는 아니다. 그러므로 케이블 수명 평가를 하는 작업은 매우 어려웠다. 그러나 케이블 수명은 아레니우스 열화 곡선을 바탕으로 케이블 열화곡선을 그렸고, 이를 와이בל 열화 이론으로서 수명을 평가하는 이중적인 이론을 적용하게 되었지만, 이는 완전한 수명평가 곡선을 의미하는 것은 아니었다.

열화 수명곡선은 먼저 아레니우스 열화과정을 거쳐서 와이בל 열화과정을 거치는 것을 수명평가 곡선을 통하여 확인 할 수 있었다. 여기서 아레니우스 열화 이론 및 와이

블 이론과 데이터를 비교하고자 한다.

그림 #1 는 저자들이, 약 13년 동안의 기간 동안 동작하고 있는 4 종류(#1, #2, #3 및 #4)의 전력 케이블의 절연저항이 변동하는 특성을 관찰하고, 열열화 곡선의 형태로 표시한 그래프이다. 케이블을 설치하고 운전을 시작한 후 시간 1100 일이 경과한 시점에서 케이블 #1, #3이 나타내는 절연저항의 감소비율이 #3, #4의 경우와 비교하여 완만하므로 수명이 더 길다는 사실 즉, 그래프를 우측으로 연장해 보면, x -축 (여기서는 Time(Day) 축)과 교차하는 값이 더 크므로 수명이 더 길다는 사실을 예측할 수가 있다.

절연저항의 LOG 값을 취할 경우 절연저항은 시간에 따라 거의 선형적으로 감소하는 아레니우스 특성에 따라 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 변화 특성에 의하면, 전력 케이블이 동작하는 동안 초기에 발생하는 열화는 열열화 과정을 따른다는 사실을 확인할 수가 있었다^[9].

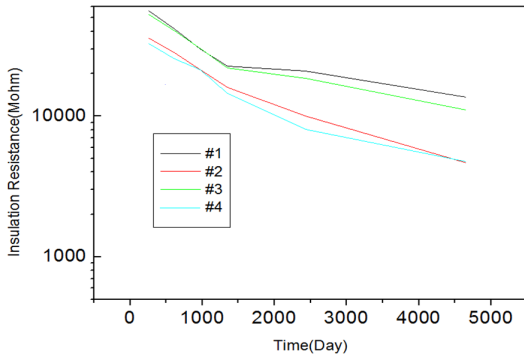


그림 1. 열열화를 따르는 절연저항과 수명
Fig. 1. Insulation and lifetime following the trend of heat deterioration

3. 아레니우스 열화의 실현

그림 2 는 시간이 경과함에 따라 와이블 열화특성을 나타내면서 변동하는 절연저항을 보여주는 그림이다. 이러한 특성은 아레니우스 열화가 마무리되는 시점에서 실현되고 있음을 보여 준다. 와이블 열화의 특성을 편리하게 파악할 수 있도록 하기 위하여, x -축을 시간(time)의 Log 스케일로, y -축을 $\log(\log)$ 스케일로 선택하면, 그림에 보인 바와 같이 선형적인 특성을 나타냄을 확인할 수 있다^[10].

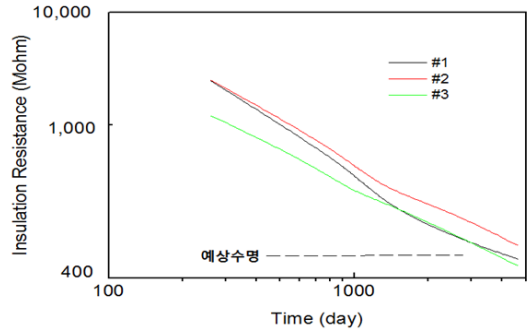


그림 2. 와이블 열화를 따르는 절연저항과 시간과의 관계
Fig. 2. Insulation resistance vs. time following the trend of Weibull deterioration

4. 아레니우스 열화에서 와이블 열화로 변화

그림3은 시간이 경과함에 따라 절연저항의 열화 특성이 아레니우스 열화에서 와이블 열화로 변동하는 과정을 나타내고 있다. 그래프에서 절연저항이 완만하게 감소하는 추세를 나타내고 있으나, 특정 시점에서는 급격하게 감소하는 현상을 확인할 수 있었다. 이 시점을 그래프에서 작은 원(small circle)으로 표기 하였다.

즉, 절연특성의 감소현상은 정상적인 아레니우스 열화에서 과도상태의 열화인 와이블 열화를 따르는 것을 확인할 수 있다. 이는 지금까지의 케이블 수명평가의 기준으로서, 정상상태 열화인 아레니우스 열화에 의한 수명평가는 와이블 열화의 파괴 데이터를 기준으로 수명평가를 하는 것과 실제 발생하는 열화과정과는 큰 차이를 보인다. 즉 열화특성을 단일로 평가하는 것과 복합으로 수명평가를 하는 경우에는 큰 차이가 있을 수 있다.

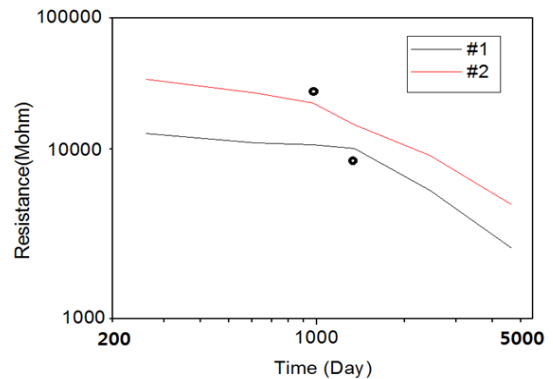


그림 3. 아레니우스 열화에서 와이블 열화로 넘어가는 과도상태열화
Fig. 3. Transient deterioration; from Arrhenius to the Weibull

V. 결론

지금까지의 이론의 결과와 절연저항의 테이터를 분석한 결과가 일치하지 않기 때문에, 실제 설치 후 동작하는 케이블의 수명평가에서도 큰 차이를 보인다. 이를 요약하면 다음과 같다.

1. 와이블 이론을 적용하여 케이블의 수명 평가를 하였지만, 실 열화는 아레니우스 열화과정을 거친 후에 와이블 열화를 따른다. 그러므로 케이블 수명이론의 수정 보완이 필요하다.
2. 케이블의 절연저항은 주변환경(온도 및 습도 등)에 의한 영향을 많이 받으므로 주변환경과 케이블의 상호 작용 관계를 보강하여 절연 저항값을 구하여야 한다.
3. 발전소에서 운전 중인 중력 케이블의 상태를 진단하기 위하여, 활선상태의 케이블을 진단하는 기술은 여태까지 없었으나 저자들에 의하여 활선상태의 케이블을 진단하기 위한 장비가 처음으로 개발되어 현재 시운전 중이며 정상적인 동작특성을 나타내고 있음을 확인하였다.

References

- [1] M. Zima, "Special Protection Schemes in Electric Power Systems", Literature survey, EEH Power System Laboratory, June 6, 2002.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] A. O. Desjarlais, "Which Kind Of Insulation Is Best?". Oak Ridge National Laboratory, May 5, 2013.
- [5] F. J. Wyant, S. P. Nowlen, "Cable Insulation Resistance Measurements Made During Cable Fire

Tests" Sandia National Laboratories, June 2002.

- [6] K. W. Lee, B. K. Kim, Y. S. Mok, K. H. Um, K. J. Lee, D. H. Park, "A Study on the Deterioration Process of 22kV High-voltage Cables and Evaluating the Remaining Life of Cables in Operation", Fall Conference, KIEE, 2012.
- [7] 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.
- [8] C. Raymond, "Physical Chemistry for the Biosciences. Sausalito", pp. 311-347, 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] K. W. Lee, K. H. Um, D. H. Park, "Test Operation of Equipment for Evaluating the Relationship Between Load Current and Lifetime of 6.6kV Cable in Operation." 2014 Summer Conference, KIEE, Yongpyung, Korea.

저자 소개

엄기홍(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>