

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.3.169>

IIBC 2015-3-25

22 kV 케이블의 누설전류 및 절연저항의 선형적 변화

A Linear Change of Leakage Current and Insulation Resistance of 22 kV Cables

엄기홍*, 이관우**

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

요약 이 논문은 사용한지 13년 지난 운전 중 22 kV 케이블시스템을, 7년 동안 절연저항을 측정하여 그 결과를 연구한 논문이다. 우리는 발전소에서 설치 운전 중인 고전압 케이블이 시간에 따라 성능이 악화되는 현상의 추세를 결정하는 수명지수를 파악하였다. 위한 논문이다. 케이블 시스템은 시간에 따라 절연 저항이 감소한다. 초기 케이블 시스템은 아레니우스 열화 곡선을 따른다. 초기에는 수명 지수 n 값이 9로 설계하였고, 이후 n 값을 상향하여 16으로 결정하였다. 이유는 고전압에서 케이블이 동작할 경우, n 값이 클 때 파괴특성이 높지 않고, n 값이 낮은 값에서 파괴특성이 높았기 때문이다. 그러나 전압열화에 의하여 와이בל 프롯을 따른 $v-t$ 특성에 의하여 n 값은 10~11의 값을 갖는 것을 확인하였다. 과거 케이블 설계 시 정한 $n=9$ 의 이론적 근거와 $n=16$ 으로 높아진 원인을 파악함으로써 누설 전류 및 절연 저항의 선형적인 변화를 확인하였다. 단기적으로는 운전 중 케이블 시스템의 진단 평가에 활용되며, 장기적으로는 발전소 부하에서 동작 중인 케이블 시스템의 설치 및 운영에 있어서 원가를 절감하기 위한 노력에 기여하고자 한다.

Abstract This study is to predict the life exponent by measuring, over 7 years, the insulation resistance of high-voltage cables in 22 kV operation for 13 years. We found out the lifetime index in order to determine the time-dependent trend of deteriorating performance of power cables. The insulation resistances decreased according to elapsed time. We found that: the initial measurements of the cable systems were in agreement with the deterioration properties of the Arrhenius Law. By analyzing the life curve of the cable system, we also verified that the value of the life exponent (n) in the $v-t$ characteristics defined by Weibull distribution has values from 10 to 11. When designing the cable system, the initial value of life exponent was chosen as 9 without any grounding. We have verified that the theoretical grounding based on the design safety of $n=9$ was actually the best one available. In the short term, we apply our research result to the diagnosis and evaluation of the power cables. In the long run, however, we plan to reduce the cost of the installation and management of cable systems in operation at power stations.

Key Words : $\tan\delta$, Partial discharge, NGR, Filtering, Life exponent

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 시설의 부족현상에 대하여 전기에너지를 절약할 필요성이 꾸준히

*정회원, 한세대학교 IT학부

**정회원, (주)오성메가파워(교신저자)

접수일자 : 2015년 3월 14일, 수정완료 : 2015년 5월 14일

게재확정일자 : 2015년 6월 12일

Received: 14 March, 2015 / Revised: 14 May, 2015

Accepted: 12 June, 2015

**Corresponding Author: ygu9177@daum.net

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

준히 제기되고 있다^[1]. 전기 에너지를 생산하여 전달하는 데 있어서 관련 장비들의 효율성을 높여야 함은 당연한 과제일 뿐만이 아니라, 전력전달의 유일한 수단으로서 케이블은 신뢰성 있게 동작을 하여야 한다. 고전력 케이블의 사고로 인한 화재는 합선, 케이블의 제작 불량에 의한 구조적 결함, 포설 부적합, 접속부 단락사고, 굴곡점이 많은 무리한 설치, 취급 소홀, 열화현상 등에 의하여 발생하고 있다.

케이블의 절연재료는 오랜 시간이 경과하면 전기적 특성이 저하하거나 접속부분이 탄화되어 발열 또는 트래킹 현상에 의하여 화재를 초래할 수 있다. 부분 방전에 의한 전도 전류는 줄열을 발생시켜 케이블의 열적열화를 일으키며 이온 전류에 의한 전류는 전기화학적으로 열화를 촉진하게 된다. 부분 방전에 의한 충격으로 절연물의 분자구조를 변화시키거나 산화 반응을 일으키며, 열적작용, 입자충격작용 및 이온에 의한 화학 작용이 발생하여 케이블을 열화 시킨다. 지중 송전 시스템을 설계할 때, 설치 후의 예상 수명을 30년으로 간주하고 있다. 그러나 설치 후 시간이 경과함에 따라 시스템의 동작 상태를 판단할 수 있는 방법은 없다. 케이블 등의 송전 시스템 설비의 사고가 발생할 경우 대규모 정전사태나 대형화재를 초래하게 되므로, 사고 발생을 미리 예측하고 예방하는 일은 매우 중요하다. 지중 송전 시스템 설비의 이상 상태를 진단하기 위한 방법에는 $\tan\delta$ 법, 부분방전(partial discharge, PD)법 및 절연저항법이 있다. $\tan\delta$ 법은 사선 진단법에서 주로 사용되고 있는 방법인데, 정전 상태에서 진단을 하기에는 한계를 드러내고 있다^[2]. 부분 방전 현상은 고체 또는 액체 상태의 절연시스템이 고저압을 받아서 절연과괴 되는 현상을 말한다. 부분 방전법은 시스템 사고 전에 발생하는 부분 방전 열화 현상을 측정함으로써 열화를 판단하는 방법이다^[3,4].

절연된 두 물체 간에 전기저항이 큰 절연 물체에 전압을 가했을 때, 이것의 표면과 내부에 소량의 누설전류가 흐른다. 이 때의 전압과 전류비를 절연저항이라고 한다. 보통, 단위는 메가옴($1\text{M}\Omega = 10^6 \Omega$)으로 표시한다. 절연저항(insulation resistance) 법은 절연의 기본적 특징을 갖는 절연저항을 측정함으로써 송전 시스템의 이상 유무를 진단하는 방법이다^[5]. 본 논문은 시간에 따른 절연 저항의 감소현상과 절연 열화현상을 비교함으로써, 수명 곡선을 이용하여 전압열화가 일어나는 과정을 확인하고 케이블 시스템의 사고를 예측하고 대비하기 위하여

연구한 논문이다. 또는, 고전압 케이블 시스템의 수명 열화곡선에서 열적열화, 전기적 열화 및 부분방전 열화를 각각 구분 할 수 있는데, 각각의 열화에 따라 절연 저항 특성은 모두 다르게 나타난다. 열적열화를 발생시키는 요인은 운전 중의 열팽창 수축, 지락, 단락에 의한 온도 상승 등이며, 케이블의 송전 전류에 의한 경우, 전류가 흐르면 발열 현상이 일어나서 케이블송전시스템의 온도 상승을 초래한다. 온도 상승에 의하여 전자 운동의 불규칙성이 증가하므로 케이블 시스템의 열화를 초래한다. 이는 절연 저항의 아레니우스적 열적 감소를 발생시키며, 절연 저항은 지수 함수 형태로 감소된다. 이 과정 후에는 이온의 축적, 운전전압, 과전압, 개폐서지 등에 의한 전기적 열화가 발생된다. 와이불(Weibull) 특성에 따르는 절연 감소를 발생시킨다. 전기적 열화과정이 끝난 다음에는 부분 방전 열화가 발생된다. 이는 기존의 열적 및 전기적 열화와는 전혀 다른 특성의 곡선으로 나타나는 데, 그 이유는 부분 방전에 의하여 케이블 절연 저항이 파괴되면서 트리가 일어나서 발생하는 것이라 생각된다. 본 논문은 설치 후 정상적으로 동작하고 있는 케이블의 절연 저항값을 측정함으로써 케이블의 수명 지수를 연구한 것이다. 우리가 실험에 사용한 케이블은 설치한지 13년 지난 케이블로서, 2500일(약 7년) 동안 10일 간격으로 절연 저항을 측정하여 분석하였다. 측정 결과, 절연 저항은 와이불 플롯의 특성을 따르는 곡선 형태로 나타남을 확인하였다.

II. 측정장치

운전 중인 케이블의 연결시스템에서 저항 접지계통을 이용하여 절연저항을 측정하기 위하여 두 가지 방법을 채택하기로 한다. 즉, (1)케이블 고압 도체에 DC 신호전압을 인가하는 방법과, (2)케이블 절연체를 통하여 흐르는 DC누설전류를 측정하기 위해 DC누설전류계를 연결하는 방법이 있다. 그림1은 DC신호전압 인가전 회로를 나타낸다. 여기서, 변압기 중성점에 연결된 NGR 과 대지 접지간에 지락전류가 흐를 수 있도록 매우 낮은 저항(저항)이 연결되어 있고, DC신호전압과 DC신호전압 제어용스위치가 저저항과 병렬로 연결되어 있다. 절연저항을 측정하기 위한 케이블의 슈스(sheath)로부터 대지접지까지 교류전류가 흐를 수 있도록 교류접지계를 연결하고,

교류접지계와 병렬로 DC 누설전류측정용 전류계를 연결하였다. 이 회로의 DC신호전압 제어용 스위치가 OFF 된 상태(즉 DC신호전압이 발생하지 않은 상태)에서 DC 누설전류계에 흐르는 I_o 전류를 측정한다^[6,7].

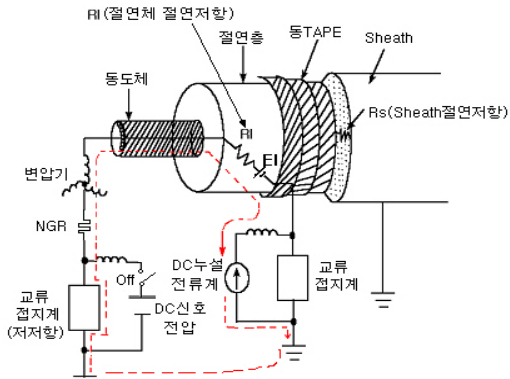


그림 1. DC신호전압 인가 전의 접지 저항시스템
 Fig. 1. Resistance grounded system without DC signal applied

그림 2는 DC 신호전압을 인가한 후에 동작하는 회로를 나타낸다. DC 신호전압 제어용 스위치가 ON된 상태(즉 DC신호전압이 NGR 측으로는 상태)에서 DC 누설전류계에 흐르는 I_{dc} 전류를 측정하여 $I_{dc}/(I_{dc} - I_o)$ 의 계산식에 의해 절연체 절연저항을 계산한다^[5,6].

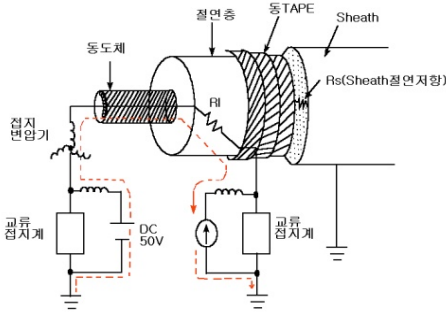


그림 2. DC신호전압 인가 후의 시스템
 Fig. 2. Resistance grounded system with DC signal applied

III. 측정 결과

그림 3은 측정장치를 이용하여 10일 간격으로 2500일

(7년) 측정하여 얻은 데이터를 분석하였다. 직류 전압 50V 인가하여 케이블 스위 부분에서 측정된 누설전류에 의하여 저항값을 계산하였다.

측정 시료는 전압 열화가 진행되는 케이블 3종류를 필터링 한 후에 얻은 2종류의 데이터를 분석하여 케이블의 절연 저항을 시간에 따라 측정된 결과이다. 시간이 경과할수록 절연 저항이 주기적으로 변동하면서 감소함을 확인 할 수 있었다. 2,000일 부근에서는 절연저항이 측정 되지 않았음을 보여 주고 있다.

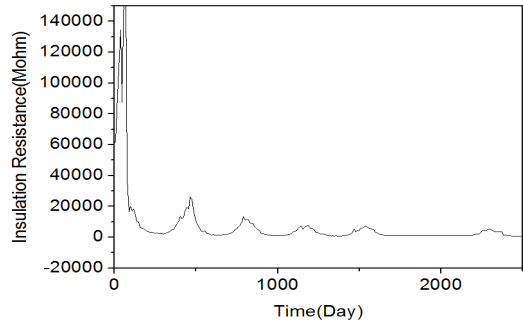


그림 3. 불규칙하게 변하는 케이블 절연저항
 Fig. 3. Insulation resistance changing in irregular fashion

그림 4는 그림 2의 그래프를 필터링하여 얻은 그래프이다.

필터링한 목적에는 여러 가지가 있는데, 여기서는 케이블 수명 곡선을 구하기 위하여 필터링하였다. 필터링한 후 케이블 수명 곡선을 평가하였다. 그러나, 이 그래프는 아래로 볼록한 감소형태의 지수함수의 꼴을 나타내고 있다. 지수함수의 감소 추세를 우측으로 연장하여도 절연저항 기준값 500 Mohm 과의 교차지점을 찾기가 어려우므로 케이블의 예상 수명을 판단하기는 어렵다.

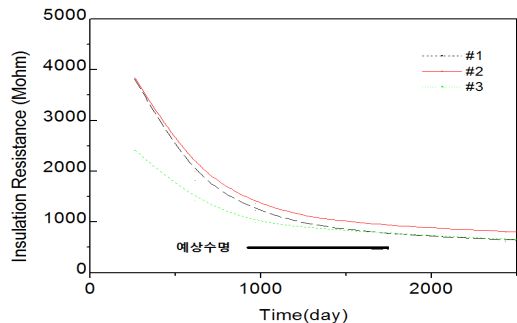


그림 4. 감소하는 케이블 절연저항
 Fig. 4. Insulation resistance in decaying fashion

그림 5는 그림 4의 그래프를 해석하기 위하여 절연저항의 $\text{Log}(\text{Log})$ 값, 시간의 Log 값을 취하여 표시한 것이다. 여기서 선형특징을 확인 할 수가 있다. 이 그래프를 이용하면 절연저항 의한 수명을 정확하게 판단할 수 있다. 여기서 선형특징을 수식으로 나타내면,

$$\text{Log}[\text{Log}(R)] = -a \cdot \text{Log}(t) + b \quad (1)$$

식 (1)을 정리하면,

$$\text{Log}(R) \cdot t^a = \exp(b) = k \quad (2)$$

이다. 식 (2)에서 $\text{Log}(R)$ 을 케이블의 선로전압 V 에 대응시키고 $1/a$ 로 하면 와이블 플롯 함수로 대치시킬 수가 있다^[8].

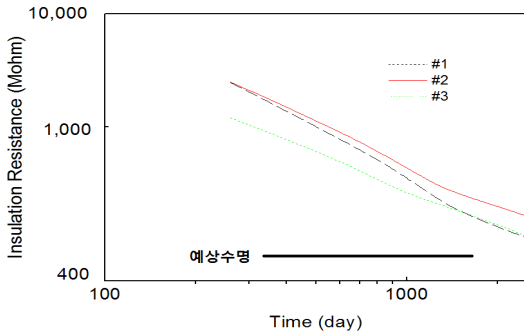


그림 5. x- 및 y-축을 log 스케일로 표시한 절연저항의 변화
Fig. 5. Changing insulation resistance with x- and y-axes in log scales.

케이블시스템에 관련 사항은 22 kV 지중전력케이블, 접속재, 포설공사, 접지 시스템 및 변압기 2차 권선등이 관련되어 있으므로 열화가 진행되어지는 과정은 지중 송전선로시스템 한 부분으로 보아야 한다. 케이블에서 발생하는 초기의 열화는, 케이블 내부에 존재하는 전하의 운동 무질서도의 증가에 의한 현상이라고 볼 수 있는데, 지수함수 형태로 감소를 하는 아레니우스 열화 특성을 따른다. 전하가 무질서하게 운동하는 상태가 지속되는 시간이 어느 정도 경과하면 전하가 과도하게 쌓이게 되는데, 이 전하가 서로끼리 영향을 미쳐 반발함으로써 전압 열화현상을 초래하게 된다. 전압 열화는 관계식

$$V^n \cdot t = Constant \quad (3)$$

을 따라 진행된다. 우리가 연구한 열화는 케이블의 활선 상태에서 식 (3)을 따른다는 현상을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 예상 수명을 논의한 것이 아니고 수명지수 n 값을 고찰하였다.

초기에는 n 값이 9로 설계하였으나, 이후 n 값이 상향되어 16으로 상향하였으나 이는 고전압에서의 n 값의 파괴특성이 높아져가 아니라, n 값이 낮은 값에서는 높았기 때문이다. 그러나 전압열화에 의하여 와이블 프롯을 따른 V-t 특성에 의하여 n 값은 10~11의 값을 갖는 것을 확인하였다. 과거 케이블 설계시 초기 n 값을 9로 하였는데, $n=9$ 의 이론적 근거와 16으로 높아진 원인을 파악하는 한편, 설계안전율을 바탕으로 한 초기 $n=9$ 의 값의 이론적 근거를 확인하였다. 운전 중인 케이블인 경우, 케이블의 열화를 초래하는 요인은 여러 가지가 있다. 대표적인 요인으로서 부하전류, 주위 온도 및 습도인데, 이 요인들을 측정하였다면 좀 더 효율적인 데이터를 얻을 수 있었을 것으로 예상된다. 케이블의 허용전류는 식

$$I = \sqrt{\frac{T_1 - T_2 - T_d}{r \cdot R_{th}}} \quad (4)$$

를 사용하여 구해진다. 식 (4)에서 각각의 물리량은 다음과 같다.

$I[A]$: 허용전류, $T_1(^{\circ}C)$: 도체 온도,

$T_2(^{\circ}C)$: 주위 온도, $T_d(^{\circ}C)$: 유전체온도상승

$r[\Omega/m]$: 교류 도체 실효저항,

$R_{th}[\Omega/m]$: 전열 저항이다.

물리량 $r[\Omega/m]$, $R_{th}[\Omega/m]$ 및 $T_d(^{\circ}C)$ 는 케이블이 포설되어 있는 경우에는 상수로 생각할 수 있다. 이 경우에는 부하전류와 도체온도, 주위 온도만 알면 부하전류와 케이블 수명과의 상관 관계를 얻을 수 있다. 케이블의 수명에 영향 주는 하나의 요인은 도체의 온도이다. 케이블에 전류가 흐를 경우 도체에는 오옴열이 발생되는데, 이 열은 절연체의 열분해, 용융 및 가교 밀도를 증가시키는 결과를 초래한다. 일반적인 경우 케이블 온도가 약 $10^{\circ}C$ 올라가면, 열열화에 의한 수명은 절반으로 줄어드는 것으로 알려져 있다. 절연저항이 매우 높은 경우의 수명평가곡선은 대체적으로 열열화를 따름을 확인할 수 있다. 설치 후 12년 정도 경과했기 때문에 부하전류 및 온도에 대한 센서가 부착되어 있지 않은 케이블 시스템을 분석하여 수명판정 곡선을 얻었다는 사실이 하나의 아쉬운 점이라 하겠다. 앞으로의 연구에서는 절연저항을 측정하기 위해 부하전류 및 온도를 감지하는 센서가 부

착하고, 부하전류에 의한 수명변화와 도체저항에 의한 수명변화의 상관관계를 유도할 계획이다. 이 측정시스템은 현재 3.3 kV~22 kV의 직접접지 계통, 저항접지 계통 및 비접지 계통[Δ 결선]에 적용할 수 있으며, 발전소 계통에도 적용가능하다. 이 측정 장비는 국내 일반 수용가에 약 40 set 정도 설치되어 있지만, 대단위 수용가(한전 및 발전소)에는 설치되어 있지 않다.

IV. 결론

본 논문에서는, 사용한지 13년 지난 운전중 22 kV 케이블 시스템의 열화진단을 검토하였으며 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 절연저항값이 적은 경우, 운전 중인 22 kV 케이블의 열화는 전압 열화의 특성을 나타내며 와이בל 함수의 분포를 따른다.
2. 수명이 절반 정도 남아있는 케이블 시스템의 경우, 절연저항을 log log 로, 수명을 log 로 변환하여 나타낸 열화수명곡선은 선형 특성을 나타낸다.
3. 부하전류, 온도 및 습도 센서를 부착하면 부하전류와 수 명과의 상관관계를 얻을 수 있다.

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. Bird, Electrical Circuit Theory and Technology, ISBN-13: 978-1466501096, Routledge; pp.549, 5ed., 2013.

[3] <http://www.ipcc.co.uk/about-partial-discharge/>

[4] K. H. Um, K. W. Lee, "Analysis of Deterioration Characteristics by Filtering Processes at 6.6kV Power Cable Systems in Operation", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol.14, no. 4, pp. 205-211, Aug 2014.

[5] <http://ecmweb.com/ops-amp-maintenance/basics->

insulation-resistance-testing

[6] 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." KIEE 2013, Fall Conference.

[7] K. W. Lee, K. H. Um, "A Study on the Deterioration Process of 22kV Power Cables in Operation" Journal of IIBC, vol. 13, no. 3, pp. 127-133, June 2013.

[8] Kwan-Woo Lee, "A Study on Remain life with Aging in 22kV CV Cable", KIEE, pp. 19-21, 2003.

저자 소개

엄 기 홍(정회원)



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

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

이 관 우(정회원)



- 학사 : 한양대학교 전기공학과
- 석사 : 원광대학교 정보통신공학부
- 박사 : 원광대학교 정보통신공학부
- LG 전선 연구소
- 일진 전선 연구소
- 호원대학교 전기전자재료공학부 겸임 교수

- 원광대학교 외래 교수
- 현재 : (주)오성메카과워 연구소장
- <주관심분야 : 전기전자재료, 설비진단>