

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.4.205>

IIBC 2015-4-26

부하 전류가 케이블의 수명에 미치는 영향에 대한 연구

A study on the Effects of Load Current for Lifetime of Cable Systems

엄기홍*, 이관우**

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

요 약 발전소에서 설치 운영 중인 전력 케이블 시스템에서 사고가 발생함으로써 초래되는 경제적 손실은 매우 클 뿐만 아니라, 원상 복구하는 데 많은 시간과 비용이 필요하다. 이를 대비하기 위하여 사고를 예측하고 방지하는 기술이 필요하다. 우리는 발전소에서 운전 중인 케이블의 절연 저항을 측정하기 위하여 부하 전류와 온도와의 상관 관계를 확인 하였고, 진단 데이터를 분석 평가함으로써 케이블 시스템의 열화 상태를 파악하여 사고가 발생하기 전에 케이블 교체할 수 시기를 예측하게 하였다. 이 논문에서 우리는 운전 중인 6.6 kV 케이블에서 부하 전류가 수명에 미치는 영향에 대하여 연구한 결과를 소개한다. 케이블의 부하에 전류가 흐르면, 도체에 열이 발생하게 되고 케이블의 수명이 감소된다. 케이블의 부하 전류가 수명에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수명 이론을 적용함으로써 절연저항 및 전류 측정 장치를 개발하여 운전 중인 케이블에 설치하였다.

Abstract The economic losses resulted from the accident in the power cables at the power station is not only huge but also requires a great amount of time and expenses to restore to the former condition. In order to prevent these, it is necessary to invent and apply a technique to expect and prevent the accidents. In order to measure insulation resistances of power cables in operation, we derived the relations between load current and temperature. By analyzing data obtained from our measuring equipments, we showed the expected time to change deteriorated cables before accident occurs. We present a result of our study on the effects of the load current on lifetime of 6.6 kV cable systems in operation. With the current flowing through the load of the cable a heat is generated reducing the lifetime of the cable. In order to find out the effect of load current on the lifetime of cable systems, we applied the lifetime theory to the development of two equipments to measure insulation resistance and current of cable systems in operation.

Key Words : Load current, XLPE, NGR, Data manager, Arrhenius theory

1. 서 론

현대 산업 사회를 정상적이고 효율적으로 운용하기 위한 하나의 수단으로서 안정화 되고 신뢰성이 있는 전력을 생산·공급하기 위한 과학 기술이 뒷받침 되어야 할

필요가 있다. 케이블 시스템의 부하는 전력을 소비하는 장치이고, 전력의 회로망이 구성된 송배전 시스템에서 케이블의 부하 전류(load current)는 부하에 흐르는 전류이다^[1]. 발전소에서 발전기가 전력을 생산하는 기능을 하는 반면 부하는 소비하는 기능을 한다^[2]. 전기 에너지를

*정희원, 한세대학교 IT학부(주저자)

**정희원, 오성메가파워 R&D 소장(교신저자)

접수일자 2015년 7월 22일, 수정완료 2015년 8월 7일

게재확정일자 2015년 8월 7일

Received: 22 July, 2015 / Revised: 7 August, 2015 /

Accepted: 7 August, 2015

**Corresponding Author: gyu9177@daum.net

School of IT, Hansei University, Korea

생산하기 위해서는 원자력 및 석탄과 같은 화석 연료를 이용한 발전에 대부분 의존하고 있으며, 우리나라의 경우 전기의 공급량에 비하여 매년 7% 이상의 수요가 증가하는 추세이다. 이에 따라 전력 여유율의 감소에 의한 발전 시설이 부족한 실정이다. 효율적인 전기 에너지의 생산, 공급 및 활용을 위하여 더욱 효율적인 관리의 필요성이 제기되고 있다^[3].

지중 케이블에서 사용되고 있는 가교 폴리에틸렌 (XLPE) 절연 케이블은 전기, 기계적, 물리 및 화학적인 특성이 우수하므로 전력케이블의 주류를 이루고 있다. 그러나 XLPE 절연 케이블을 포설 상태에서 운전하는 도중 여러 가지 요인으로 인한 열화가 초래되어 불의의 사고가 발생하고 있는 바, 이러한 사고를 사전에 예측하고 방지하는 필요성이 제기되고 있다^[4]. 그러나 효율적이고 신뢰성이 있는 기술을 사용하여 열화 현상의 진단을 위한 연구가 요구된다. 따라서, 본 연구에서 우리는 국내 지중 송전 케이블의 사고 및 고장의 원인을 파악하고 열화가 진행되는 상태를 분석함으로써 케이블의 수명을 예측하려고 한다. 부하 전류가 운전 중인 케이블의 수명에 큰 영향을 미치고 있지만, 어떤 형태로 어느 정도의 영향을 미치고 있는지를 측정하기 위한 방법이 지금까지 없는 실정이다. 케이블이 수명을 다하기 까지 거치는 열화 과정은 열열화, 전압 열화에 이어 부분 방전 열화를 과정이다. 열열화는 열로 인해 고분자 재료의 물성이 저하되는 현상이다, 지중에 설치하고 평균 10년 정도 지나면 열화 현상에 의하여 절연 특성이 급격히 악화된다. 케이블의 열화는 외적으로 나타나지 않고 서서히 진행하여 열화 상태를 쉽게 예측하기가 쉽지 않다. 열화의 원인으로는 전기적, 열적, 화학적, 기계적, 생물적 요인 등이 있다. 전압 열화는 절연 재료에 전압이 인가되는 경우에 발생하는 열화로서 절연체 내부 또는 절연체와 도체 사이의 공극이나 이물질 때문에 부분 방전이 발생하여 절연체가 열화 되는 현상으로서, 케이블이 장기간 사용되는 경우 발생한다. 열열화는 절연체가 허용 온도 이상으로 장기간 사용되면 열적 (thermal) 반응을 일으켜 절연 재료의 특성이 악화되어 발생한다. 열화에 의하여 절연 저항이 감소하게 된다. 이 연구에서 우리는 열화 과정이 전개 되는 이론을 바탕으로 하여, 케이블의 부하 전류가 수명에 미치는 영향을 확인하고, 부하 전류 및 절연 저항을 측정할 수 있는 장치를 개발하여 발전소에서 운전 중인 6.6 kV 케이블 시스템에 설치하여, 이론적인 값과 측정값

을 비교한 결과 일치함을 확인하였다^[5].

II. 측정 장치의 구성

그림 1은 운전 중 활선 상태에서 6.9 kV 케이블의 절연 저항 및 습도를 측정하는 시스템의 block diagram 을 나타낸다. 특히, 습도를 측정하기 위한 습도 센서는 옥외에 설치되는 NGR 접지반 판넬 외부에 부착하고, 습도 센서에 공급하는 전원 공급기와 습도 센서에서 출력되는 전압(1~4 V)이 약 260 m떨어진 절연저항 측정 장치로 정확한 신호를 전송해야만 한다. 따라서, 고압 케이블이 포설된 환경에서 노이즈(noise) 등에 영향을 최소화하기 위해 습도 센서 출력 전압을 4~20 mA의 신호 전류로 변환하여 절연 저항 측정 장치로 송신하기 위한 변환기를 NGR 접지반 내부에 장착하였고, NGR (중성 접지 저항기) 접지반에서 습도 측정 신호 4~20 mA 는 절연 저항 측정 장치의 습도 측정 A/D 를 통해 측정되도록 구성하였다^[6].

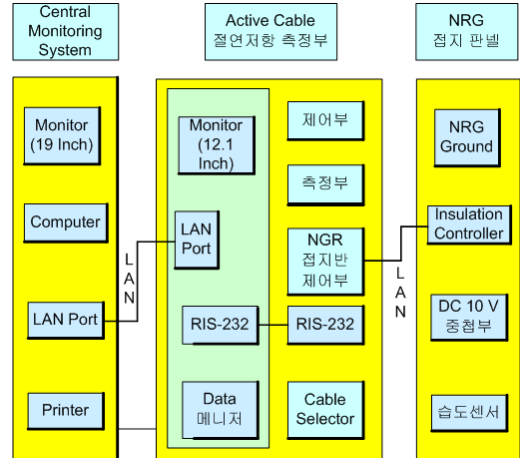


그림 1. 케이블의 절연저항 및 습도를 측정하는 시스템의 블록도
Fig. 1. System Block Diagram of Equipment for Measuring Insulation Resistance and Humidity

표 1은 우리가 제작하여 설치 운영 중인 측정 시스템에서 주요 장치인 활선 cable의 절연저항 측정장치, NGR 접지반, CMS의 수량, 크기 및 용도를 나타내고 있다.

표 1. 절연 저항 측정 장치 및 습도 측정 장치 수량 및 용도
 Table 1. Quantities, sizes, and Applications

No	장치명	수량	Size	용도
1	활선 Cable 절연저항 측정장치	1Set	W1,600xD600 xH2,350mm	절연저항 및 습도측정
2	NGR접지반	1Set	W1,000xD950 xH2,350mm	DC신호전압 인가 및 습도센서 내장
3	CMS	1SEet	W600xD650x H1,800 mm	DATA 모니터링

III. 시스템의 구조 및 성능

우리가 제작하여 발전소에 설치하여 운전 중인 시스템의 구조 및 성능을 설명하기로 한다.

1. 활선 6.9 kV CABLE 절연 저항의 측정 장치

가. 케이블의 절연 측정 장치

이 장치는 측정 대상이 되는 케이블의 절연 본체, 방식 층 및 고압 모선 계통의 절연 저항을 154/6.9 kV 변압기의 2차 측 중성점에 연결된 중성 접지 저항기(NGR)와 케이블의 차폐 접지회로를 선택하여, 계통 또는 케이블 차폐에 측정 전압을 인가하는 장치이다^[7].

자동 또는 수동으로 측정한 케이블의 절연 상태 값을 CRT(cathode-ray tubes) 및 현장 측정 장치에 내장된 data 매니저용 12 inch 크기의 모니터에 표시할 수 있는 장치이다.

표 2는 절연 저항(insulation resistance, IR) 측정 장치를 사용하여 유효한 값을 측정할 수 있는 저항의 범위를 나타낸다^[8].

표 2. 절연 저항 측정 장치의 측정 범위
 Table 2. Measuring Ranges of IR Measuring Devices

측정 대상	측정 저항 범위
본체 절연층	10 ~ 10,000 Megaohm
외피 방식층	1 ~ 4,000 kiloohm

나. 케이블 접지선택장치

이 장치는 측정 대상이 되는 케이블 단말부의 금속 차

폐 접지선과 접지 모선 사이에 연결되어 있으며, 측정 장치 전면의 panel PC 데이터 매니저를 조작함으로써 필요한 케이블을 선택한다. 평상시에는 금속 차폐 접지선의 접지 회로를 직접 접지하고, 절연 저항 측정 시점에서는 capacitor 를 통하여 접지를 선택할 수 있는 장치이다

다. NGR 접지반 선택 제어 장치

이 장치는 154/6.9 kV 변압기의 2차 측 중성점에 연결된 NGR과 접지 모선간에 설치된 NGR 접지반을 측정하는 장치의 전면내 내장 설치되어 있다. 데이터 매니저에서의 조작에 따라 154/6.9 kV 변압기의 2차 측 중성점에 연결된 NGR과 접지 모선간의 접지 회로를 평상시에는 직접 접지로, 절연 저항 측정 시점에서는 저항을 통한 접지를 선택할 수 있는 장치이다.

라. 데이터 매니저

이 장치는 6.9 kV 케이블 모니터링 시스템의 표준 설비 중 중앙 감시 장치에 해당되는 장치로서, 측정 장치의 전면내 부착되어 자동 측정 및 선택측정 동작에 의하여 data를 저장 및 송수신한다. LAN을 통하여 측정 장치 옆에 부수적으로 설치되는 Central Monitoring System (CMS)에서 측정 data의 관리가 가능토록 구성하였다. 데이터 매니저는, 필요성이 없기 때문에 인쇄 기능을 갖지 않도록 구성하였다^[9].

기종 : IIE사, PANEL PC (AFL-12A-D525)

- CPU : Intel Atom D525 1.8 GHz
- HDD : 160 GB
- Monitor : 12.1 VGA TFT
- Port : USB, COM, 유선 LAN

2. NGR 접지반

이 장치는 154/6.9 kV 변압기(TR)의 2차측 중성점에 연결된 NGR 과 접지 모선과의 사이에 접속하여, 측정 장치에 의하여 제어된다. 상시에는 Y-결선의 중성점의 NGR 하단이 대지 접지로 직접 연결되고, 측정 시에는 Y-결선의 중성점에 연결된 NGR 하단과 접지 간에 0.4 Ω 저항이 삽입되어 신호 전압 DC 10 V가 TR의 Y-결선의 중성점에 연결된 NGR 을 통하여 각 케이블의 도체에 인가할 수 있는 장치이다^[10]. AC 통전 능력은 1,000 A-30 sec에 견딜 수 있을 정도이어야 한다. 이 장치에는 옥외의 습도를 측정할 수 있는 습도 센서가 부착되어, 측정된

습도 측정 신호를 측정 장치로 송신하는 기능도 구비되어 있다.

3. 중앙 모니터 시스템 Central Monitoring System (CMS)

이 장치의 데이터 매니저(PANEL PC)는 전기실 옥내에 설치되어 활선 6.9 kV 케이블의 절연 저항을 측정하여 저장한다. CMS 는 데이터 매니저에 저장된 절연 측정 Data 를 감시실에서 LAN을 통하여 Monitoring 하는 장치로서 인쇄할 수 기능이 있도록 구성하였다.

4. 측정 장치 제작

우리가 개발하여 설치 운영 중인 절연 저항 측정 장치의 견보기 형태를 보이면 그림 1과 같다.



그림 2. 절연 저항 측정 장치
Fig. 2. Equipment for Measuring IR

절연 저항 측정 장치는 운전 중인 6.6 kV 케이블 시스템의 9회선에 설치하여 운영 중이고, 온도 전류 측정 장치는 27set 를 설치하여 운영 중이다. 현재 두 장치의 시운전을 마치고 데이터 측정 및 추출 중에 있다.

5. 측정 이론

케이블의 도체에 전류가 흐르면, 열이 발생된다. 이 열은 케이블 절연체의 열화를 가져오게 되는 데, 절연 재료에 따라 허용온도가 정하여져 있다. 운전 중인 케이블의 열화에 미치는 요인은 여러 가지가 있다. 대표적인 것으로 부하 전류, 주위 온도 및 습도인데 케이블 허용 전류는 아래의 식으로 주어진다.

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

식 (1)에서, I : 허용전류, T_1 : 도체 온도, T_2 : 주위 온도, T_d : 유전체온도상승, r : 교류 도체 실효저항, R_{th} : 전열 저항이다^[11].

즉, 이 식에 의하여 케이블 허용 전류가 산출되긴 하지만, 케이블 수명을 30년 보장한다는 주장의 정당성 여부를 확인할 수 있는 방법은 여태까지 없다. 그러나, 이 식에 의하면, 전기 절연체 Y-종의 경우, XLPE 에서 T_1 이 90° 인 상태에서의 케이블이 연속 운전할 경우에 30년의 수명이 보장하는 것으로 정의되어 있다. 도체 온도 T_1 는 아레니우스 이론 (즉, 도체의 온도가 10° 상승하면, 수명이 반으로 감소한다는 이론)에 의하여 결정된다. 그러나, 실제 상황의 경우, 와이블 분포(Weibull distribution) 함수의 이론에 의하여 수명을 측정할 수 있다^[1]. 실제 상황에서의 케이블 수명을 예측할 수 있는 장치는 그림 2에 나타난 바와 같다.

IV. 측정 결과

그림 3은 시간의 변화에 따르는 부하 전류와 수명과의 상관 관계를 나타내고 있다. 이 그래프에 의하면, 케이블이 설치되어 운전하는 동안 열화가 진행될 경우, 절연 저항이 감소되는 현상과 케이블 수명과의 관계를 파악할 수가 있다. 그래프 A는 500 amp의 부하전류가 흐를 경우, 1000일 지난 후에 예상 수명이 3,000일 남은 경우를 보여주고 있다. 동작 시간이 증가함에 따라 절연 저항은 점차 감소하며, 임계 저항값에 도달할 경우 케이블의 수명은 다하게 된다.

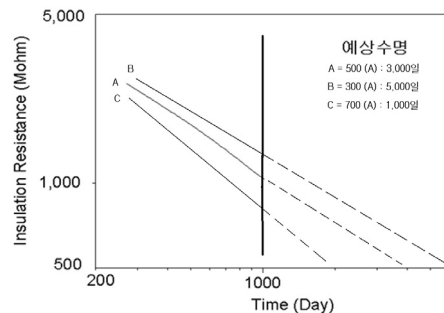


그림 3. 시간의 변화에 따르는 부하 전류와 수명과의 상관 관계도

Fig. 3. Relations between Insulation Resistance and Expected Lifetime of Power Cables as a Function of Time

부하 전류가 A의 경우보다 클 경우, 예를 들어 700 amp일 경우 1,000일 지만 경우에는 1,000일이 남게 되며, 경우 그래프 B와 같이 되어 케이블 수명은 A 보다 증가하게 된다. 반대로 부하 전류가 적게 흘러 500 amp일 경우에는 케이블 수명 그래프는 C와 같이 되어 수명은 5000 일이 남게 된다. A의 경우 보다 감소하게 된다. 따라서, 이 이론에 의하여 케이블 부하 전류의 변화에 따른 케이블 수명 곡선을 예상할 수 있으며, 실제 설치한 측정 장치 및 보조적인 측정 장치가 추출한 데이터를 분석함으로써 부하 전류와 수명과의 상관 관계를 유도할 수 있다.

V. 결론

우리는 (주)한국서부발전에서 운전 중인 고전력 케이블의 동작상태를 진단하기 위한 측정 장치를 설치·운용함으로써, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다

1. 운전 중인 6.6 kV 케이블 시스템의 수명 평가를 할 수 있는 측정 장치를 실제 운전 중인 발전소에 설치하였으며, 현재 동작 중에 있다.
2. 운전 중인 6.6 kV 케이블 시스템에서 부하 전류와 수명과의 상관 관계를 확인할 수 있는 이론을 얻었다.
3. 부하 전류는 도체의 단면적에 의존하므로 실측정 데이터와 이론이 정립된다면, 케이블 시스템을 선정할 경우 원가 절감이 가능, 경쟁력이 향상을 기대할 수 있다.

References

- [1] G. G. Karady, K. E. Holbert, "Electrical Energy Conversion and Transport: An Interactive Computer-Based Approach," 2nd Ed. John Wiley and Sons, 2013.
- [2] T. H. Glisson, "Introduction to Circuit Analysis and Design." USA: Springer, 2011.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] K. W. Lee, "A Study on evaluating the life exponent in voltage deterioration of 22kV high-voltage cables in operation", 2012 Summer Conference KIEE.
- [6] M. Löhning, G. Fettweis, "The effects of aperture jitter and clock jitter in wideband ADCs. " Computer Standards & Interfaces archive, 29 (1): 2007.
- [7] http://www.samilresistor.co.kr/02/sub02_6_op.asp
- [8] <http://wps.aw.com/wps/media/objects/877/898586/topics/topic07>.
- [9] Joji Thomas Philip "Central monitoringsystem put off till December, telecom test lab to October". The Economic Times, June, 2013.
- [10] S. William, "Elements of Power System Analysis." 3rd ed., McGraw Hill, New York, 1975.
- [11] 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.

저자 소개

엄기홍(정회원)

• 제 15권 제 4 호 참조

이관우(정회원)

• 제 15권 제 4 호 참조

※ Remark : 이 논문은 한국전기학회 추계학술대회 (2014) 에서 발표했던 내용을 보충한 것이다.