

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.4.159>

IIBC 2016-4-23

발전소에서 운전 중인 고전력 케이블의 절연저항의 변화를 감시하는 장치의 개발

Development of Equipment Measuring Insulation Resistance of High-Power Cables in Operation at Power Station

엄기홍*, 김보경**

Kee-Hong Um*, Bo-Kyeong Kim**

요 약 급증하고 있는 수요에 따른 고전력을 생산하기 위하여 발전소에서는 이에 대응하는 시설장비를 운영해야 한다. 규모는 점차 커지고, 기능이 다양해지고 있다. 발전소에서 불의가 사고가 발생하면 장비가 지장을 받게 되고, 막대한 경제적 손실 및 장애를 초래하게 된다. 사고 발생의 원인 중의 하나로서 케이블의 두 도체를 전기적으로 분리시키는 유전체의 기능이 약화되는 것이다. 케이블에 의한 사고를 미연에 방지하기 위하여 동작 상태를 감시 확인하여야 한다. 우리는 절연저항을 측정하기 위한 장비를 개발하여 서부발전(주)의 현장에 설치하여 운용 중이다. 변압기의 2차 측 와이(Y) 결선으로 연결된 모선은 생산된 전기를 외부 장치에 전송한다. 우리가 개발한 장비는 모선과 on/off 되는 케이블의 절연 저항을 측정하는 장비이다. 우리는 이 논문에서 하드웨어 구성을 위주로 우리가 개발한 장비를 소개한다.

Abstract In order to generate high electric power in increasing demand, power station should operate facilities to meet requirement. The scale of electric power equipment is increasing in both size and complexity. With unexpected accidents at power facilities or power stations happening, substantial socioeconomic losses in an industrial society is caused. A major cause of unexpected accidents is deterioration of dielectrics, isolating two conductors electrically. In order to detect the deterioration processes of power cables, the operation status of power cables should be monitored on a regular basis. We have invented and installed equipment at Korea Western Power Co., Ltd., located in Taean, in order to predict and prevent the deterioration status of dielectrics destruction of power cables. The main line in Y-connection to the secondary coils of transformer delivers electric power to the external devices. The equipment we developed is the one measuring insulation resistance of cables operation in on/off status with respect to the main line. We present the equipment in terms of operation and configuration of hardware side.

Key Words : XLPE, Insulation resistance, ac main line, Weibull plot, log scale

1. 서 론

최근 들어 화석연료를 사용하는 화력발전소에 의한 환경적인 문제가 논의되고 있으나, 전기를 생산하기 위

한 비용이 비교적 저렴하다는 등의 이유로 인하여 화력 발전이 차지하는 비중은 지속될 것이고, 달리 전기를 생산하기 위한 대안이 제시되지 않는 한, 국내 전력수급 비정상화와 더불어 안정적 전력 확보를 위하여 기존의 화

*정회원, 한세대학교 IT학부(교신저자, 주저자)

**정회원, (주)오성메카파워

접수일자 : 2016년 7월 2일, 수정완료 : 2016년 7월 22일

게재확정일자 : 2016년 8월 5일

Received: 2 July, 2016 / Revised: 22 July, 2016 /

Accepted: 5 August, 2016

*Corresponding Author: um@hansei.ac.kr

Dept. of Information Technology, Hansei University, Korea

석연료를 사용하는 화력발전소에 대한 중요성이 여전히 크다. 연간 국민 1인당 전력소모량이 8,092 kWh 로서 1980년에 비교하면 9배 만큼 증가하였으며, 높은 수요로 인하여 전력의 수급여건이 계속 악화되고 있다^[1].

발전소에서는 대부분의 경우, 운전 중인 고전압 케이블의 가동을 일정한 주기로 중지시키고 성능평가를 실시하고 있다.

운전 중인 케이블의 가동을 중지하지 않고 즉, 케이블의 운전 상태를 그대로 유지하면서 케이블의 절연상태를 확인한다면 경제적으로 이득이 되고 편리하게 될 것이다. 우리는 이 논문에서 발전소에서 설치 운영 중인 고압전력 케이블의 성능을 점검하기 위하여, 가동을 중지하지 않고 절연저항을 측정하는 장비의 설계를 소개한다. 발전소의 변압기 2차 측에 연결되어 동작하는 모션에는 상용 고압교류전압이 인가되고 있다.

II. 고압 전력케이블

흔히 쓰이는 절연재료 폴리에틸렌(PE) 와 가교 폴리에틸렌(XLPE)에 대하여 살펴본다^[2,3].

(1) 폴리에틸렌 (PE) 의 분자 구조는 그림 1. (a) 와 같다. (b)와 같이 화학적으로 선형 결합된 분자들은 고온에서 쉽게 변형된다. 직선형으로 단일 결합된 탄소(C) 원자들이 배열되어 있고 양측에는 수소원자 단일결합 되어 있다. PE는 110-115°C에서 녹아 버리기 때문에 일반적으로 도체 온도를 70°C이내로 하여 사용하여야 한다^[2].

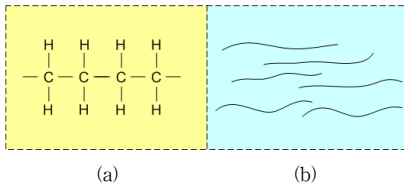


그림 1. 폴리에틸렌(PE)의 화학적 구조
(a) 분자 구조 (b) 선형결합 구조
Fig. 1. Chemical structure of PE;
(a) Molecular structure, and
(b) Non-cross-linked structure

(2) 절연 재료 PE 의 단점을 개선하기 위하여 1950년 대 미국에서 개발된 재료 가교폴리에틸렌(XLPE, cross-linked polyethylene)은 고압 케이블의 절연재료로서 가장 흔히

쓰이는 재료이다. XLPE는 고압상태에서 폴리에틸렌 (PE) 에 유기 과산화물을 첨가하여 가교 반응을 시켜 화학 구조를 망상상태로 변환시키는 화학적 변화과정을 거쳐서 완성한 재료이다^[3]. 분자간의 결합을 단단히 하여 녹는점 (melting point)를 상승시켜 절연체 내 도체의 허용 전류를 높인다. 더 높은 전압에 적용하기 위해 꾸준히 기술개발 되고 있으며, 현재 400kV XLPE 은 이미 상용되고 있다. 선형 분자들 끼리 연결시켜 주는 과정을 가교 (架橋, cross-link 서로 연결) 라고 한다. 가교 시키면 기계적, 열적으로 특성이 크게 개선되어 도체의 온도를 90°C까지 높여도 거의 변형되지 않는다. 더 높은 전압에 상용하기 위해 기술이 개발이 꾸준히 있으며 500 kV XLPE 케이블까지 상용화 되었다. XLPE의 단점은 재사용할 수 없다는 것이라서 환경 유해 물질로 취급 받는다는 점이다. 주요한 장점은 유전손실이 매우 적다는 것이다. 종이 절연체를 사용하는 케이블에 비하여 여 수 십배, PVC 절연체를 사용하는 케이블에 비하여 수 백배 손실이 적다.

그림 2 는 3 차원 공간의 구조로 결합되어 있는 XLPE 를 나타낸다^[3].

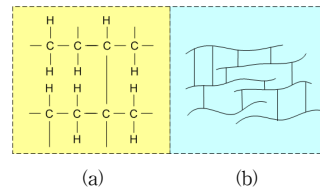


그림 2. XLPE 의 화학적 구조
(a) 분자구조 (b) 망상결합 구조
Fig. 2. Chemical structure of XLPE;
(a) Molecular structure, and
(b) Cross-linked structure

전기적 화학적 특성이 우수하여 전력케이블의 절연체로서 널리 사용되고 있으며, 최근 가교 기술의 발달로 500kV 급 OF 케이블도 송전 능력, 중량, 열특성, 유지 관리비용, 포설 비용 등의 이유로 생산되고 있다. 장점들로서는 열경화가 높고 가열 변형이 적다, 내열성, 내수성 및 내약품성이 강하다, 낮은 포설비용, 저렴한 재료비, 가볍다..등이다. 전기용량(capacitance) 또한 적어서, 충전되는 전류양도 적고 또한 누설전류도 적다^[4].

XLPE의 중심도체로 사용되는 재료에는 동(Cu)과 알루미늄(Al)이 있다. 동(Cu) 도체는 전도도가 매우 크고 비교적 값이 저렴하고, 가공하기 쉽기 때문에 도체의 재

료로서 가장 흔히, 대부분의 케이블에서 상되고 있다. 순도 99.96%~99.86% 수준의 것을 사용하고 있다. 알루미늄(Al)은 동에 비해 비중이 1/3, 전기 전도도가 2/3 비교적 전도성이 우수하며, 가격도 저렴하여 동(Cu) 다음으로 많이 사용된다^[5].

안정성 및 신뢰성에 기초한 동작 특성을 유지 하면서 고압의 전기를 공급할 수 있기 위해서는, 케이블을 제조하기 위한 재료와 기술이 우수해야 한다. 발전소에 설치한 후, 운전하는 동안 철저한 유지, 보수, 관리를 함으로써 자체의 열화과정 뿐만 아니라, 주변 환경요인으로 인하여 케이블이 정상적인 동작을 못할 경우, 예기치 못하게 초래되는 정전사고를 미연에 방지해야 한다. 사고가 발생할 경우, 케이블과 그 주변 시스템들이 붕괴되고, 정전이 발생하여 막대한 피해가 초래된다. 지금까지 케이블 사고를 방지하기 위하여 여러 진단 시스템이 개발되었다. 사선상태의 케이블 진단방법으로는 $\tan\delta$ 법이 사용되어지고 있으며, 활선상태에서는 절연저항법(직류 중첩법)과 부분방전방법이 널리 행하여지고 있다^[6]. 케이블 제작사에서는 케이블의 정상적인 수명 30년 이라고 공시한다. 그러나, 케이블이 실제로 30년이란 기간에 제대로 동작하고 있는지, 그 기간 보다 더 사용할 수 있는지, 또는 훨씬 전에 파괴될지 등의 상황을 예측 또는 판단하기 어렵다^[7]. 전력 케이블은 높은 절연성을 갖는 절연체에 의하여 두 도체가 전기적으로 분리되어 (electrically isolated) 있어야 한다. 여러 요인들에 의하여 동작 중인 케이블의 특성이 나빠지게 되어 대형 사고가 발생한다. 케이블의 동작을 결정짓는 주된 요인은 절연체의 특성이다. 차단기를 통하여 모선에 on/off 상태를 유지하는 6.6 kV XLPE 케이블은 발전소가 전기를 생산하여 공급하기 위하여 유일하게 채택 사용되고 있는 전달 수단이다. 모선으로부터 on/off 상태를 선택하여 동작하는 6.6 kV 케이블이 on 되어 있는 경우를 활선상태라고 하고 off 되어 있는 경우를 정전(사선)상태라고 하고 한다. 우리는 이 논문에서, 상용 전압이 인가되는 상태에서, 활선 상태에 있는 케이블을 확인하고, 케이블이 정상적으로 운전 가동하고 있는 상태에서 케이블 도체와 대지 간에 교류 신호에 dc 50V 신호를 중첩하여 인가했을 때 케이블 도체와 동 테이프 간의 절연체를 통하여 흐르는 dc 누설 전류를 측정하여 절연 저항을 측정하기 위하여 우리가 개발한 장비를 소개한다.

III. 측정대상 XLPE 케이블의 등가구조

그림3에서 XLPE 케이블과 그 등가회로를 나타내었다. 중심도체와 쉴드 접지선 사이에 존재하는 저항을 절연층 절연저항(R_i), 절연층이 열화할 때 발생하는 기전력을 절연층 국부기전력(E_i) 2가지 등가 소자로 나타낼 수 있고, 쉴드와 대지접지 사이에 존재하는 저항을 방식층 절연저항(R_s), 방식층의 열화 시에 발생하는 방식층 국부기전력 E_s 2가지의 부분으로 나타 낼 수 있다. 절연체의 절연층 국부기전력 E_i 와 외피방식층의 방식층 국부기전력 E_s 의 극성과 크기는 케이블의 주변 환경, 주변 물질의 종류, 또는 열화상태에 따라 다르다.

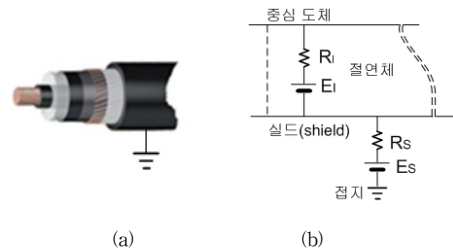


그림 3. 절연저항 측정을 위한 XLPE 케이블
 (a) 외부에서 본 형태 (b) 등가 회로
 Fig. 3. XLPE cable for measuring insulation resistance;
 (a) Appearance of XLPE cable, and
 (b) Equivalent circuit

일반적으로 배전선로 케이블은 케이블을 운전시키는 입력단 전압의 크기에 따라 저압(50/60 Hz, 110~220 V) 케이블과 고압(50/60 Hz, 3.3~22 kV) 케이블로 구분한다. 우리는 충남 태안에 소재한 “한국서부발전(주)”에서 발전기가 생산하는 고전력을 운반하기 위하여 설치되어 운전 중인 6.6 kV 고압 배전선로 (CV cable)를 대상으로 선택하여 진단하였다. 케이블을 구성하고 있는 도체의 전기적 분리를 제공하기 위하여 절연체를 삽입하고, 삽입된 절연체의 전기적인 저항(electric resistance)을 절연 저항 (insulation resistance, 단위 MΩ) 이라 한다. 저항값이 충분히 커서 절연 상태가 완벽하게 유지되는 형상이 이상적인 경우이다. 절연상태가 유지되는 지를 확인하기 위한 장비가 메가(절연저항계, megger)이다. 케이블에서, 도선과 쉴드사이의 절연 저항을 측정하여 결함 (열화)의 형태를 판단한다. 저항값이 적으면 (이론상 0 Mohm)상태란 두 도체가 절연 상태를 유지 하지 못하고 도선 (conducting) 상태라는 의미이다^[8,9].

IV. 케이블의 절연저항 측정시스템

그림 4는 6.6 kV 상용교류전압을 운전 중인 고압 모선에 대하여 on/off 동작을 하는 차단기 (SW 2) 에 의하여 on 상태인, 즉 활선상태의 케이블의 절연저항을 측정하기 위하여 우리가 제작하여 운영 중인 회로 시스템을 나타낸다.

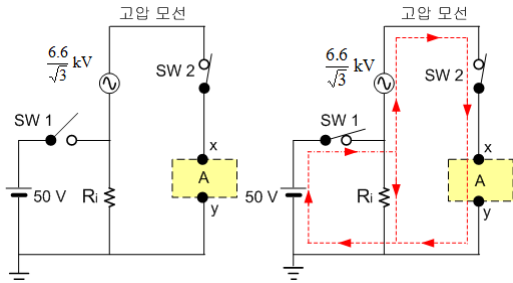


그림 4. 절연저항 측정을 위한 회로 시스템의 개념
 (a) dc 신호 전압 인가 전 (b) dc 신호 전압 인가 후
 Fig. 4. Conceptual circuit system for measuring insulation resistance;
 (a) Without the dc voltage signal applied, and
 (b) With the dc voltage signal applied

그림 5는 그림 4의 블랙박스 A의 내부를 나타내고 있다.

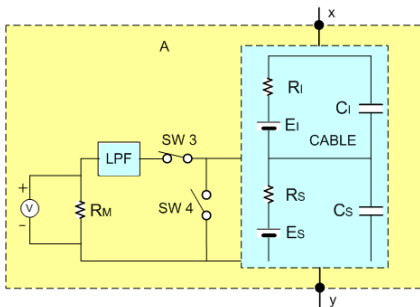


그림 5. 그림 4의 블랙박스 A의 내부 시스템
 Fig. 5. Circuit system for black box A of figure 4

측정 대상인 케이블과 측정기가 단자 x, y로 연결되어 있다. 스위치(SW1)가 off위치로 된 상태 (즉, dc 신호 전압이 고압 모선을 따라 측정 대상 케이블에 인가되기 전의 상태)에서 dc 누설전류계에 측정되는 dc누설 전류를 I_o 라 하고, SW1을 on위치로 옮긴 상태에서 (즉, dc 신호 전압이 고압 모선을 따라 측정 대상 케이블에 인가된 후의 상태에서) dc 누설 전류계에 측정되는 흐르는 dc누설

전류를 I_{dc} 라 한다. 두 종류의 전류, 즉 dc 신호전압 인가 전후의 차이 값 즉 $I_{dc} - I_o$ 의 누설 전류의 값으로 dc 신호 전압에 대한 비율을 계산하면 절연 저항 값을 알 수 있게 된다. 따라서, 절연 저항을 측정하는 동안 먼저 잡음 및 초기 조건에서의 절연 저항을 측정하고, 그 후 dc 전압을 인가하여 초기값과 dc전압 인가 후 누설 전류의 차이를 이용하여, 케이블 시스템의 이상여부를 판단한다^[10].

변압기 2차 측의 교류상용모선 (ac main line)과 차단기에 의하여 연결되어 있는 (즉, on) 상태의 케이블은 활선상태에 있다고 하고, 개방되어 있는 (즉, off)상태의 케이블을 정전상태(사선상태)있다고 한다. 활선상태에 있는 케이블의 중심도체로 모선을 통해 dc 50V가 입력된다. 그 결과 절연층 절연저항 R_1 과 절연층 국부기전력 E_1 를 통해 직류누설전류가 흐른다.

V. 측정의 결과

그림 6는 우리가 제작한 측정장치를 이용하여 얻은 원시 데이터를 필터링하여 얻은 그래프로서, 독립변수 시간 $t[day]$ 에 따라 아래로 볼록한 형태를 유지하면서 감소하는 지수함수이다^[11]. 시간에 따라 절연저항이 감소하는 추세가 지속되어도 절연저항이 나빠지는 임계값 500 Mohm과의 교차점을 찾기가 어려우므로 케이블의 예상 수명을 판단하기가 쉽지 않다. 교차점을 쉽게 구하기 위하여 해석하기 위하여 그림 6 (a)의 그래프를 변형하여 즉, 시간의 Log 값, 절연저항의 Log(Log) 값,을 취하여 그림 6 (b)를 얻었다. 이 그림에서는 절연저항이 감소하는 특징이 선형특징을 나타냄을 확인 할 수가 있으므로, 교점을 구하면 절연저항에 의한 수명을 정확하게 판단 할 수 있다. 선형특성을 수식으로 나타내면,

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

이므로, 식 (1)을 정리하면,

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

이다. 식 (2)에서 $\text{Log}(R)$ 을 케이블의 선로전압 V 에 대응시키고 $1/a$ 로 하면 와이بل 플롯 함수로 대치시킬 수가 있다.^[12]

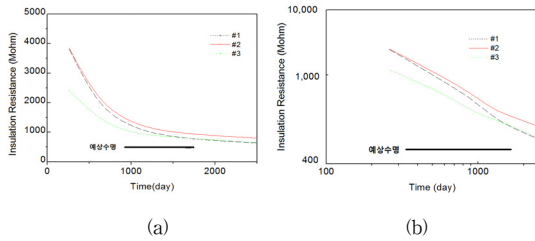


그림 6. 케이블 절연저항
 (a) 지수함수로 감소하는 케이블 절연저항
 (b) log 스케일로 표시한 절연저항의 변화
 Fig. 6. Insulation resistances of cables
 (a) Insulation resistances in decaying fashion
 (b) Insulation resistances with axes in log scales

IV. 결 론

우리는 발전소 내에서 사용되고 있는 고전력 6.6 kV 케이블의 동작특성을 진단하기 위하여 절연저항 측정장비를 국내 최초로 개발하였다. 이 장비를 한국서부발전(주)에 설치하여 케이블을 감사함으로써 안전하고 신뢰성 있는 환경에서 운전할 수 있도록 일조하였다. 설치 후 계속 데이터 획득 중에 있으며 케이블 시스템의 열화 과정을 확인 할 수 있다. 향후 케이블 시스템을 제작하기 위한 비용, 운영 원가 절감에 크게 기여할 것으로 예상된다.

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] <http://blog.naver.com/jspark916?Redirect=Log&logNo=220172998426>.
 [3] http://www.dsecable.co.kr/cgi/view.php?&bbs_id=bd03&page=&doc_num=4.
 [4] <http://enjt.blog.me/120106535094>.
 [5] www.leadercable.com.my/dl/leader-xlpe.pdf.
 [6] K. H. Um, K. W. Lee, "Analysis of Deterioration Characteristics of 6.6kV Power Cable Systems in Operation by Filtering Processes", Journal of the

The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol.14, no. 4, pp. 205-211, Aug 2014.
 [7] 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.
 [8] <http://www.pat-testing-course.com/blog/faqs/insulation-resistance-test/>
 [9] IEEE-Std-43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery", IEEE Power & Energy Society, p. 18, Mar, 2000.
 [10] Baldwin Bridger, Jr., "High-Resistance Grounding", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-19, No. 1, Jan./Feb 1983.
 [11] K. H. Um, K. W. Lee, "Nonchange of Grounding Current due to Equipment Measuring Insulation Resistance", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol. 15, no. 3, pp. 175-180, June, 2015.
 [12] K. H. Um, K. W. Lee, "A Linear Change of Leakage Current and Insulation Resistance of 22 kV Cable", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol. 15, no. 3, pp. 169-173, June, 2015.

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>

김 보 경(정회원)



학력

- 학사 : 부산대학교 전기공학과 경력
- 대한전선(주) 근무
- (주)성완전기 근무
- 메가파워테크 대표
- 전력케이블 절연진단 업무 20년 이상 수행중

- 현재 : (주)오성메가파워 대표

<주관심분야 : 절연진단, 전기전자재료, 활선 케이블>