

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.2.239>

IIBC 2017-2-34

고전력 활선 XLPE 케이블의 열화를 측정하기 위한 판정기준의 적용 및 절연상태 판정

Application of Judgement Criteria to Measure Deterioration and to Judge Insulation Resistance in High-Power Live XLPE Cables

엄기홍*

Kee-Hong Um *

요 약 전력 수요는 매년 증가추세에 있으며, 이에 따라 발전소에서 동작하는 모든 장비들과 대용량의 장거리 전력수송을 위한 장비들은 신뢰할 수 있는 수준에서 완전한 상태로 동작하여야 한다. 발전소에서 생산한 고전압 전력을 전달하기 위해 사용하는 케이블은 주로 6.6 kV XLPE 케이블(또는 CV케이블)이다. 제작 기술, 설치환경 및 사용조건에 다르겠지만, 케이블은 동작함과 동시에 열화과정이 진행된다. 접속재의 경우, 제조 결함이나 공사 결함이 있는 경우 대체로 동작 후 약 3 년 내에 고장을 일으키며, 그렇지 않는 경우 수명이 20-30 년을 지속하는 경우가 많다. 우리는 케이블의 열화 상태를 감시하기 위한 장비를 개발하여 충남 태안의 한국서부발전주식회사(Korea Western Power Co. Ltd.)에 설치하였다. 우리는 이 논문에서 케이블의 열화 판정의 기준을 설정하고, 기준에 따른 열화정도를 판정하고, 케이블의 대체여부를 결정함으로써 발전소에서 설치된 활선 케이블의 동작 상태를 감시한 결과와 케이블을 구성하고 있는 절연체와 방식층이 절연저항 특성에 미치는 영향 및 케이블의 동작에 미치는 영향을 연구한 결과를 제시한다.

Abstract The demand for electric power is increasing every year. All facilities operating at power stations and all facilities used in transmitting high volumes of electric power are therefore expected to operate with a high degree of reliability. 6.6 kV XLPE 100 SQ 1C cables are used to deliver high levels of generated electric power. Depending on the method of manufacture, installation environment, and usage conditions, the deterioration processes of power cables start from the instant of operation. Cable junctions may break down in three years from the start of operation due to manufacturing or construction defects. We have invented the first device in Korea to monitor the status of live cables and installed these at Korea Western Power Co., Ltd.. We have set the criteria to determine deterioration status and specified the degree of deterioration at which one should replace the cables. In this paper, we present the effect of insulation layer and sheath on the insulation resistance status in cables.

Key Words : XLPE (CV) cable, Thermoelectric power station, Insulation resistance, Weibull lifetime distribution

I. 서 론

우리 나라 2016.12. 기준에서 보면, 전기의 설비용량은 104,466 MW, 공급능력은 93,030 MW, 최대 전력은

79,970 MW, 평균전력은 63,124 MW이다. 총발전 전력량 46,964 GWh 이다^[1]. 2015년 기준으로 전력 의존율 중에서 석탄 발전이 39.3% 로서 가장 높다. 석탄 화력은 2016년 2월 기준 한국에는 11개 부지에 총 53기의 석탄화력발전

*정회원, 한세대학교 IT학부(교신저자, 주저자)
접수일자 2017년 1월 26일, 수정완료 2017년 3월 5일
게재확정일자 2017년 4월 7일

Received: 26 January, 2017 / Revised: 5 March, 2017 /
Accepted: 7 April, 2017

*Corresponding Author: um@hansei.ac.kr
Dept. of Information Technology, Hansei University, Korea

전소가 가동 중이다. 이 중에서 보령화력 1, 2기, 서천화력 1, 2기, 영동화력 1, 2기, 삼천포 화력 1, 3기, 호남화력 1, 2 등 30년 이상 노후한 석탄 발전소 10기를 2015년까지 폐지하기로 하였다^[2]. 10년 넘은 발전소 8기는 증기 터빈 등의 주요 부품을 교체함으로써 발전기의 효율을 높여서 성능을 개선하기로 하였다. 20년 미만 발전소 35기는 순환펌프 용량을 늘여 오염물질을 줄이기로 하였다. 그러나 화석연료(석탄, 석유, LPG)를 사용하기 때문에 온실 가스 배출 문제가 있다. 정부는 오는 2030년까지 증가할 것으로 예상되는 온실가스 총량의 37%인 3억 천 5백만 톤을 감축한다는 목표를 세우고, 충남지역의 발전소에 대해서 오염물질 저감목표를 강화하기로 하였으며, 2018-2031 기간에는 추가로 건설하지 않기로 하였다^[2]. 화력발전은 미세먼지, 황산화물, 질소 산화물 등에 의한 환경오염의 주원인이라는 단점에도 불구하고 저비용으로 안정적인 전력수급에 기여한다는 장점이 있기 때문에 화력발전에 의존할 수 밖에 없으며, 아직 확실한 대안이 없는 실정이다. 최근에 들어 화력 발전소는 환경설비를 개선함으로써 단점을 보완하기 위한 많은 노력을 하고 있다. 2017-2018년 사이에는 환경보강 설비를 보강하기로 하였다. 따라서, 현시점에서 정부가 취해야 할 최선의 조치는 화력 발전을 지속적으로 이용하되 그 대신 뒤따르는 부작용을 최소화 하는 방향의 정책을 수립해야 할 것이다. 정부는 점차적인 환경개선을 위하여 2015 대비 2030년 까지 미세먼지 24%, 황산화물 16%, 질소 산화물 5%를 감축할 계획을 세우고 있다. 2016년 전체 발전 설비중에서 28%를 차지하였으나, 2029년에는 26.2%로 줄이기로 예상하고 있다^[3,4]. 고전력 (high-power)을 생산 및 공급하기 위하여 발전소에서 필수적으로 사용되는 장비들 중의 하나로서 6.6 kV 케이블이다. 고압 케이블은 전기적, 열적 특성이 우수한 가교 폴리에틸렌을 절연체로 하는 가교 폴리에틸렌 절연 비닐 시스 케이블(XLPE 케이블 또는 CV케이블)이 주류를 이루고 있다. CV케이블은 도체, 내부 반도전층, 가교 폴리에틸렌 절연체, 외부 반도전층, 차폐 동테이프 및 비닐 시스로 구성되어 있다. 발전소의 케이블 등의 발전설비에서 불의의 사고가 발생하여 전기의 생산이 중단된다면, 막대한 사회경제적 피해를 초래하게 된다^[5]. 우리는 발전소에서 설치된 활선 케이블 6 kV CV 100 SQ, 1C 의 동작 상태를 감시하였다. 케이블의 외피(방식층, oversheath)는 절연층을 화학적 또는 기계적으로 보호해 주는 기능을 한다. 케이블을 구

성하고 있는 절연체와 방식층이 절연저항(insulation resistance) 특성에 미치는 영향, 케이블의 동작에 미치는 영향을 연구하였다

II. 절연 저항

1. 절연저항의 정의

이상적인 완전 부도체 또는 절연체에는 전기가 전혀 흐르지 않는다. 그러나 실제 전기적인 제품에서 사용되는 절연체는 약간의 전류가 흐르는 특성을 갖는다. 절연체의 양끝에 직류 전압을 인가하면, 절연체를 통하여 미소한 전류가 흐르게 된다.

이 경우 절연체에 인가한 전압과 절연체를 흐르는 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 한계치 이하로 감소하면 누전이나 화재 등의 위험 상황이 발생할 수 있다. 전류가 절연체의 표면을 따라서 흐르는 전류에 의한 것을 표면절연저항, 내부를 흐르는 전류에 의한 것을 체적절연저항이라고 한다. 인가전압이 높을수록, 주변의 온도나 습도가 증가할수록 감소하는 특징을 나타낸다. 전력 케이블에서 절연 저항의 단위는 보통 MΩ이 쓰인다^[6,7]. 일반적인 wearout 고장 특성을 설명하기 위하여 다양한 형상모수 조건을 갖는 와이블(Weibull) 수명분포(lifetime distribution)를 채택한다. 와이블 분포는 1937년 와이블(Waloddi Weibull)이 재료의 파괴강도를 분석하면서 고안한 확률분포로서 금속 및 복합재료의 강도, 전자 및 기계 시스템의 수명 자료를 해석하기 위하여 가장 흔히 쓰이고 있다. 고장률이 노후 등으로 시간에 따라 커지는 경우에 사용한다. 발전소 케이블의 절연 저항의 열화변동 추세는 와이블 확률 분포 특성을 따른다^[8,9].

2. 측정 대상 XLPE 케이블

일반적으로 전송선로 케이블은 케이블을 운전시키는 입력단 전압의 크기에 따라 저압 (50/60Hz, 110 ~ 440V), 케이블과 (특)고압(50/60Hz, 3.3 kV ~ 22kV) 케이블로 구분한다. 우리는 충남 태안에 소재한 “한국서부발전(주)”에서 발전기가 생산하는 고전력을 운반하기위하여 설치

되어 운전 중인 6.6 kV 고압 배전선로 (CV cable)를 대상으로 선택하여 진단하였다. 실제의 절연저항은 케이블의 사용조건, 설치된 장소의 주변환경, 온도 또는 절연체의 종류에 따라 성능이 달라지므로 케이블의 수명이 달라진다. 온도가 높아지거나 습기가 있으면 절연상태는 저하한다.

III. 6 kV급 XLPE 절연케이블의 판정기준값

일반적으로 케이블 제조사에서 케이블을 출하할 때, 수명이 약 30년이라고 공시하지만 실제 케이블이 설치되어 동작한 시점으로부터 30년 시점 이전에 파괴될 수도 있다. 파괴의 원인 중에서 주요한 원인으로 간주되는 절연층 절연저항과 방식층 절연저항을 해석하였다.

1. 절연층 절연저항 판정기준

절연 저항 테스트는 절연체의 저항값이 충분히 커서 절연 상태가 유지되는 지를 확인하는 테스트이다. 케이블의 중심 도선과 실드 사이의 절연 저항을 측정하여 결함(열화)의 형태를 판단한다. 저항값이 적으면(이론상 0 Ω)상태란 두 도체가 절연 상태를 유지 하지 못하고 도전(conducting) 상태라는 의미이다^{[10],[11]}. 일반적으로 고압 전력 케이블의 절연상태를 파악하기 위해 측정 대상이 되는 고압전력 케이블에 인가되는 입력전기를 차단한 사선(휴전)상태에서 케이블의 도체와 대지 간에 직류전압을 인가하여, 케이블의 절연체를 통하여 대지로 흐르는 누설전류를 이용하여 절연저항을 측정하기 위한 장비로서 메거(megger)를 사용하고 있다. 절연체 저항 측정은 1,000 ~ 5,000 V 메거를 사용하고, 각 도체와 차폐 동테이프(대지)간 절연저항을 심선별로 측정한다. 비닐 시스 절연저항 측정은 차폐 동테이프와 대지 간 절연저항을 일반적으로 1,000 V 이하의 메거로 측정한다. 좋은 절연은 저항값이 크고, 나쁜 절연은 저항값이 적다. 케이블의 가동을 반드시 중지시켜야 하기 때문에 경제적 손실이 필연적으로 발생한다. 고압전력 케이블의 가동을 중지해야만 한다는 문제점을 해결하기 위하여, 표 1 에 보인 바와 같이, 우리는 20 여년 동안의 전문적인 현장 경험과 발전소 현장 엔지니어들과의 연구결과에 의하여 판정기준을 4 등급으로 구분하기로 하였다.

표 1. 고전압 6.6 kV 케이블의 XLPE 열화 판정기준 4 등급
 Table 1. The four classes of insulation resistances to determine the deterioration status of high voltage 6.6 kV cables

판정	절연저항값 (MΩ)	조치
양호	1,000이상	양호하므로 그대로 운전시킴
경주의	300이상~1,000미만	사용 계속상태에서 절연저항치의 저하 여부 계속 추적
중주의	30이상~300미만	절연상태가 좋지 않은 상태로 진행되고 있으므로 Cable 교체 계획
엄중주의	30미만	즉각 교체

고전압 6.6kV CV 케이블의 경우, 절연체 절연저항 1,000 MΩ 이상의 경우는 절연층 절연상태가 양호한 케이블, 30 MΩ 미만의 경우는 케이블의 절연상태가 심각하게 열화된 상태이므로 즉시 교체하는 것을 권장하기로 하였다.

2. 방식층 절연저항 판정기준

케이블 연피의 부식을 막기 위하여 연피 위에 방식성 아스팔트, 고무, 합성 고무 등의 재질로 씌운 것을 방식층(oversheath) 이라고 한다^[12]. 비닐 시스 절연저항이 1,000kΩ 이하로 되면 주의 상태라고 간주하고, 불량위치를 탐색하여 불량부분의 상태에 따라 수리 또는 교체 검토를 권장한다.

표 2. 고전압 6.6 kV 케이블의 방식층 열화 판정기준 2 등급
 Table 2. The two classes of insulation resistances to determine the deterioration status of oversheath in high voltage 6.6 kV cables

판정	절연저항값 (kΩ)	조치
양호	1,000이상	양호하므로 그대로 운전시킴
경주의	1,000미만	불량위치 탐색하여 불량부분의 상태에 따라 수리 또는 교체 검토

IV. 케이블의 절연층 및 방식층 데이터 분석

우리는 충남 대안 소재 화력 발전소 서부 발전 주식회사에서 수년 동안 동작하고 있는 여러 개 케이블 중에서 9 개의 케이블을 선택하여 연구를 진행하였다. 케이블별 절연 측정 데이터를 추출하여 우리가 제작한 장치를 저

장된 데이터 중 1개의 케이블의 측정사례를 기술한다. 각 케이블별 측정 data분석은 2014년 9월 중순부터 2015년 9월 중순까지 약 12개월 (1년)의 data를 사용하여 data분석을 실행하였다. 편이상 하나를 No.01 이라고 칭하고 이 케이블의 상태를 감시한 결과 양호하여 교체할 필요가 없음을 확인하였다. 양호판정을 내린 근거를 제시한다.

1. No.01 케이블의 1일 측정 Data 사례

가. No.01 케이블의 측정 data의 화면 표시

그림 1은 절연저항 측정장치에서 No.01 케이블에 대해 매일 절연상태를 측정하여 저장된 data를 화면에 표시한 상태를 나타낸 것으로, 절연층은 전부 10,000 MΩ 이상의 값으로 양호한 상태에 있고, 방식층은 전부 4,000 kΩ 이상의 값으로 양호한 상태에 있고, 누설전류의 표준 편차값은 0.2 이하의 값으로 양호한 상태에 있다. 따라서, 이 케이블은 양호한 상태에서 동작하고 있으므로 수리 또는 교체할 필요가 없다.

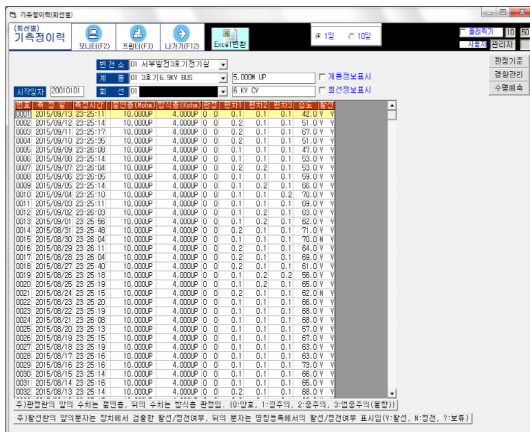


그림 1. No.01 케이블의 측정이력 data (1일data)
Fig. 1. Measured record insulation resistance of No.01 feeder(daily data)

나. No.01 케이블의 절연층 측정 data의 trend

그림 2는 No.01 케이블의 절연층 절연저항 data를 12개월간 매일 측정된 data의 trend를 그래프화한 것으로, 절연층 data(맨위 실선)값이 전부 10,000이상 표시되어 있으며, 절연층의 양호 경계치 1,000 MΩ 이상의 값으로 매우 양호한 상태에 있다는 것을 보여주고 있다.

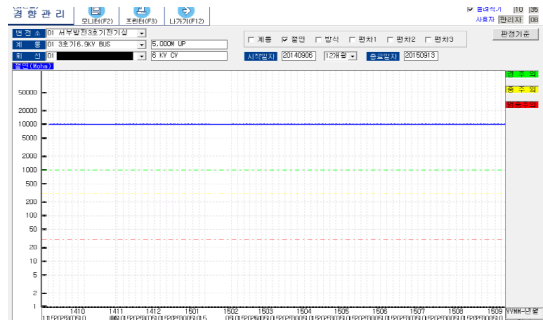


그림 2. No.01 케이블의 12개월간 절연층 절연저항 1일 측정 data의 trend
Fig. 2. Measured record insulation resistance of No.01 feeder in 12 months (daily data)

다. No.01 케이블의 방식층 측정 data의 trend

그림 3은 No.01 케이블의 방식층 절연저항 data를 12개월간 매일 측정된 data의 trend를 그래프화한 것으로, 방식층 data(위쪽 실선)값이 전부 10,000이상 표시되어 있으며, 방식층의 양호 경계치 1,000 kΩ 이상의 값으로 매우 양호한 상태에 있다는 것을 보여주고 있다.



그림 3. No.01 케이블의 12개월간 방식층 절연저항 1일 측정 data의 trend
Fig. 3. Measured record insulation resistance of No.01 feeder in 12 months (daily data)

2. No.01 케이블의 10일 평균 Data 사례

가. No.01 케이블의 절연층 수명예측 graph

그림 4는 No.01 케이블의 절연층 절연저항을 매일 측정된 data를 10일 평균한 값의 trend를 그래프화한 것으로, 절연층의 양호 경계치(중앙의 파선) 1,000 MΩ 보다 매우 높은 50,000 MΩ 이상의 값을 나타내고 있어, No.01 케이블의 절연체의 절연상태는 매우 양호한 상태에 있다는 것을 보여주고 있다.

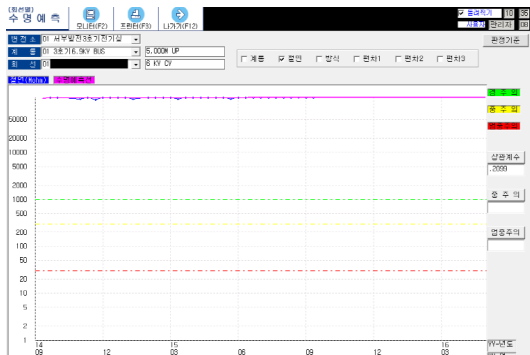


그림 4. No1 케이블의 수명예측 graph(절연층) (10일평균 data)

Fig. 4. Expected lifetime of No.01 feeder via insulation resistance measured data,10 days average

나. No.01 케이블의 방식층 수명예측graph

그림 5는 No.01 케이블의 방식층 절연저항을 매일 측정 한 data를 10일 평균한 값의 trend를 그래프화한 것으로, 절연층의 양호 경계치(직선 파선) 1,000 kΩ 보다 매우 높은 20,000 kΩ 이상의 값을 나타내고 있어, No.01 케이블의 방식층의 절연상태는 매우 양호한 상태에 있다는 것을 보여주고 있다.

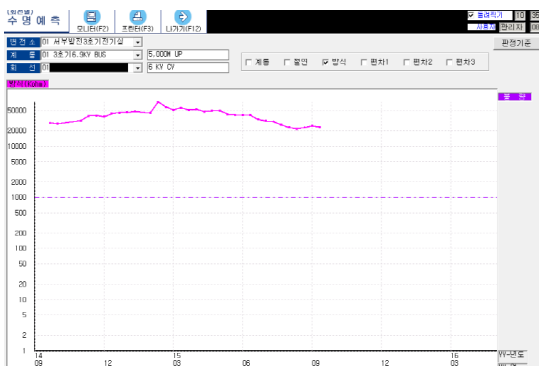


그림 5. No1 케이블의 수명예측 graph(방식층)(10일평균data)
 Fig. 5. Expected lifetime of No.01 feeder via insulation resistance measured data,10 days average

V. 결론

케이블 시스템의 사고 원인들 중의 하나로서 XLPE의 절연 상태의 악화로 인한 절연 파괴현상이 발생하는 것이다. 고전력 케이블 시스템의 상태가 나빠지는 경우, 절연 파괴현상으로 인한 사고가 발생한다. 우리는 이 는

문에서, 충남 태안의 한국서부발전주식회사(Korea Western Power Co., Ltd.)에서 설치되어 동작 중인 6.6 kV 케이블의 열화 상태를 감시하기 위하여 우리가 개발한 장비를 설치하였다. 장비를 사용하여 고전력 케이블의 절연층 및 방식층 절연저항을 측정하였다. 절연층(청색 실선) 및 방식층(적색 실선) 값이 전부 10,000 MΩ 이상 표시되어 있으며, 절연층의 양호 경계치 1,000 MΩ 이상이고, 방식층의 양호 경계치 1,000kΩ 이상의 값으로 매우 양호한 상태에 있다는 것을 보여주고 있다.

References

- [1] The Monthly Report on Major Electric Power Statistics, Korea Electric Power Corporation, December, 2016.
- [2] <http://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LPOD&mid=tvh&oid=052&aid=0000941512>
- [3] <http://www.hankyung.com/news/app/newsview.php?aid=2016070594441>
- [4] <http://www.hankyung.com/news/app/newsview.php?aid=2016070467591>
- [5] K. H. Um, B. K. Kim, "Development of System and Measured Results for Measuring Temperature of High-Power Cables in Operation", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol.1 6, no. 4, pp. 165-170, Aug. 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.4.165>
- [6] K. H. Um, K. W. Lee, "A Study on Cable Lifetime Evaluation Based on Characteristic Analysis of Insulation Resistance by Acceleration Factor of the Arrhenius Equation", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol.1 14, no. 5, pp. 231-236, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2014.14.5.231>
- [7] Y. K. Park, Y. S. Cho, K. W. Lee, K. H. Um, D. H. Park, "Load Current and Temperature Measurement for Measuring the Insulation Resistance of 6.6 kV Cable", J. KIEEME, vol.28, no. 1, pp. 46-50, 2015.

- [8] K. H. Um, K. W. Lee, "Linearity Verification of Measured Voltage Deterioration of High Voltage Cable based on Weibull Lifetime Index", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol.1 16, no. 1, pp.227-232, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.1.227>
- [9] M. S. Kim, "The Usefulness of Hard Time Task for Weapon System in Considering Shape Parameter of Weibull Life Time Distribution and Maintenance Cost", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS), Vol. 17, No. 1, pp. 274-283, 2016.
- [10] <http://www.pat-testing-course.com/blog/faqs/insulation-resistance-test/>
- [11] IEEE-Std-43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery", IEEE Power & Energy Society, p. 18, Mar, 2000.
- [12] J. N. Kim, C. W. Ha, K. S. Lee, "The Effects of Multi-Bonding Methods for Cable Covering Protection Unit", The Korean Institute of Electrical Engineers(KIEE), vol. 50A, no. 10, pp. 489-492, 2001.

저자 소개

엄 기 흥(정회원)



- 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
 - 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>

※ The author wishes to express his thanks to Professor Dae-Hee Park(Won Kwang University) and President Bo-Kyeong Kim(Osung Mega Power Co., Ltd.). Without their help and guidance, this work would have been impossible to complete.

※ This work was supported by Hansei University Research Fund of 2017.