

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.5.185>

IIBC 2016-5-28

## 터빈 발전기 부하용 XLPE 6.6kV 케이블의 절연층 절연상태와 습도의 상관관계

### Relationship Between Humidity and Insulation Status of XLPE 6.6kV Cables for the Load of Electric Turbine Generator

엄기홍\*

Kee-Hong Um \*

**요 약** 국내 발전소에서 운전 중인 XLPE 케이블(또는 CV케이블)은 많은 경우 포설된 지 40년에 이르고 있다. 설치 후 운전 상태에 있는 대부분의 CV 케이블은 6~8년의 기간이 경과하면 열화가 발생하기 시작하고, 근래에 포설한 케이블이라 할지라도 사고가 발생할 수가 있으며, 사고 발생으로 인하여 막대한 손실을 초래하게 된다. 사고를 미연에 방지하기 위하여 케이블의 동작상태를 정기적으로 감시 확인하여야 한다. 우리는 케이블의 사고를 체계적으로 감시 및 예방하기 위한 목적으로 측정 시스템을 개발하였다. 이 장비는 수 년 동안 충남 태안에 소재한 한국서부발전주식회사(Korean Western Power Co. Ltd.)에서 케이블의 동작 상태를 감시하고 있다. 이 논문에서 시스템의 기능 및 동작 원리를 소개하고, 터빈 발전기 부하용 XLPE 고압케이블의 절연층 절연상태와 습도의 상관관계를 제시한다.

**Abstract** The high-power 6.6 kV XLPE (or CV) cables at Korean electric power stations have been in operation for the last 40 years. Most of the XLPE cables starts deteriorating in 6-8 years from the operating instant of time, some cables may be breakdown at any moment even though they were installed in recent years, causing huge socioeconomic losses. In order to prevent unexpected cable accident, the operating status of power cables should be monitored in regularly, timely bases. We have invented a device in order to systematically monitor and prevent an abrupt accidents of high-power cables in operation at power station. It has been installed at Korean Western Power Co. Ltd. at Taean, and operating normally for the last 4 years. In this paper, we introduce the functions and operating principles of the measuring device, and present the relationship between humidity and insulation status of XLPE cables for the load of electric turbine generator.

**Key Words** : Megger, Humidity sensor, Insulation resistance, Neutral ground reactor, Central monitoring system

## 1. 서 론

국내 화력발전소의 절반이 충청남도에도 있다. 화력발전소에 의하여 생성되는 온실가스, 미세먼지 등의 환경오염과 건강문제 등의 사회적 비용을 줄이기 위하여 화력발전소를 모두 철폐하자는 주장이 제기되고 있으나, 현실

적으로 실행하기 어려울 뿐 만 아니라 전기를 생산하기 위한 비용이 비교적 저렴하다는 등의 이유로 인하여 화력 발전이 차지하는 비중은 지속될 것이다<sup>[1]</sup>. 화력 발전은 단시간 내 최대 출력을 낼 수 있어서 급격한 전기수요의 증가에 효과적으로 대응할 수 있는 장점이 있으나, 화석 연료를 사용하여 다량의 질소산화물, 황산화물, CO<sub>2</sub>

\*정회원, 한세대학교 IT학부(교신저자, 주저자)  
접수일자 : 2016년 9월 17일, 수정완료 : 2016년 10월 4일  
게재확정일자 : 2016년 10월 7일

Received: 17 September, 2016 / Revised: 4 October, 2016 /

Accepted: 7 October, 2016

\*Corresponding Author: um@hansei.ac.kr

Dept. of Information Technology, Hansei University, Korea

를 대기 중으로 배출하여 지구 온난화의 주원인이 된다. 한국전력 산하 발전 공공기관인 서부발전은 꾸준한 기술의 발전에 의하여 연내 가동 예정인 석탄가스화(IGCC) 화력발전시설도 기존 석탄화력발전보다 배출물 중 황산화물을 90% 이상, 이산화탄소는 25%까지 저감하는 신기술을 개발하기 위한 많은 노력을 하고 있다<sup>[2,3]</sup>. 최근 안정적 전력수급을 위하여 화력발전에 대한 중요성이 더해가고 있다. 최근 우리나라의 1 년간 평균 전력소모량은 8,092 kWh 로서 1980년의 전력소모량에 비교하여 9배 만큼 증가한 바와 같이 전력 수요의 증가로 인하여 전력을 수급하기 위한 여건이 계속 악화되고 있는 추세이다<sup>[4,5]</sup>.

고전력을 생산 및 공급하는 과정에서 발전소의 발전 설비에서 불의의 사고가 발생하여 전기의 생산이 중단된다면, 막대한 사회경제적 피해를 초래하게 된다<sup>[6]</sup>. 전류가 흐르는 고전력 케이블의 온도가 증가하여 절연물질이 변형됨으로써 도체와 도체 또는 도체가 케이블 트레이 등이 접촉하여 절연 저항이 감소하면 케이블의 동작기능이 악화된다. 고장을 일으키는 케이블의 온도는 400~600°C, 평균 열유속은 12.3 kW/m<sup>2</sup>이다. 시간에 따른 케이블특성은 IEEE 383의 기능상실온도 기준 330°C 및 열유속 11 kW/m<sup>2</sup>, 기능상실 온도 390~460°C 및 평균 열유속 12 kW/m<sup>2</sup>보다 높은 내화 성능과 우수한 특성을 가지고 있는 것으로 분석되었다는 보고가 있다<sup>[7]</sup>. 케이블의 화재가 발생할 경우 단락, 접지, 단선 등의 고장이 발생하여 설비와 기기는 기능을 상실한다. 발전소의 설비와 기능은 다중설계, 계열간 독립 및 분리 원칙에 따라 운영되고 있다. 기기 오동작과 오지시 또는 잘못된 계측을 유발할 수 있으며 안전정지 기능을 저해할 수 있다<sup>[8]</sup>.

측정대상이 되는 고압전력 케이블에 인가되는 입력전기를 차단한 사선(휴전)상태에서 케이블의 도체와 대기 간에 직류전압을 인가하고, 이 때 케이블의 절연체를 통하여 대지로 흐르는 누설전류를 이용하여 절연저항을 측정하는 장비가 있다. 이 장비가 메가(megger)이다<sup>[9,10]</sup>. 그러나, 메가를 사용하여 절연저항을 측정하기 위해서는 케이블의 가동을 반드시 중지시켜야 하기 때문에 경제적 손실이 발생한다. 고압전력 케이블의 가동을 중지해야만 한다는 문제점을 해결하기 위하여, 우리는 이 논문에서 케이블의 운전 상태를 그대로 유지하는 상태에서 즉, 운전상태에서 습도가 절연저항(insulation resistance) 특성에 미치는 영향, 케이블의 동작에 미치는 영향을 연구하였다.

## II. 습도 측정 설계

### 1. 습도센서 선정

습도는 대기 중에 포함되어 있는 수증기의 양과 그 때의 온도에서 대기가 함유할 수 있는 최대수증기량(포화수증기)의 비를 백분율로 정의한 물리량이다. 습도를 측정하는 방법은 물리적 방법, 화학적 방법 및 전기적 방법 등이 있다. 전기를 사용하여 습도를 측정하는 습도센서(humidity sensor)에는 현재 가장 많이 사용되고 있는 정전용량형 및 전기저항형 습도센서가 있다. 정전용량형 습도센서는 전기저항형 습도센서에 비해 습도변화에 따른 응답속도가 늦다는 단점이 있긴 하지만 감도가 높고, 신뢰성이 우수하고, 선형특성이 양호하여 온도보상을 할 필요가 없고, 전자회로에 쉽게 연결하여 동작한다는 장점이 있기 때문에 일반적으로 사용된다. 우리는 이 논문에서 채택한 습도측정장치 시스템은 정전용량형 습도센서(HMI500LF)이다. 습도센서를 구동시키기 위하여서는 DC 5V 짜리 1개의 전원이 필요하며, 출력은 Analog 전압으로 출력되어 다른 인터페이스와 쉽게 응용할 수 있으므로 전기적으로 쉽게 습도측정회로를 구성할 수 있게 된다. 측정이 가능한 습도의 범위는 0~100% 이다.

### 2. 습도 측정부 설계

#### 가. 습도센서 특성 검토

습도센서 HMI500LF는 습도를 검지하여 전기적 신호로 출력하는 장치이다. 수분의 물리흡착으로 다공성 세라믹스(ceramics)와 고분자 전해질 등의 전기저항과 전기용량이 변화하는 특성을 이용한다. 출력전압은,

$$v = 25.690 \times h + 1078.476 \text{ [mV]}/$$

로 주어진다. 여기서  $h$ 는 습도이다. 이 관계식에 의하여 주어진 습도에 의한 습도센서의 출력전압을 구할 수 있다.

#### 나. 습도센서 출력의 원격지 송신 문제 검토

(1) 한편, 습도센서의 위치와 습도센서의 출력을 읽어들이는 측정부는 약 260m 떨어져 있고, 포설되어 있는 고압 케이블들의 루트를 통해 연결되어야 하며, 습도센서의 출력값이 1~4V 범위의 작은 전압이므로, 습도센서 현장 주변의 노이즈로 인한 측정값의 변동 및 오차를 고려해야 한다.

(2) 포설된 고압 케이블 주변 현장에서 발생하는 노이즈 영향을 배제하기 위하여, 당초에는 무선통신방식을 적용하는 방식을 검토하였다. 그러나, 무선통신 시스템에 의하여 전기설비가 오동작이 우려될 뿐만이 아니라, 설치 비용이 크게 소요되었다(수백 만원). 따라서, 무선통신방식을 대신, 습도센서 출력전압을 4~20mA의 전류로 변환하여 측정부로 출력하는 방식을 채택하여 그림 1과 같은 시스템으로 구성하였다.

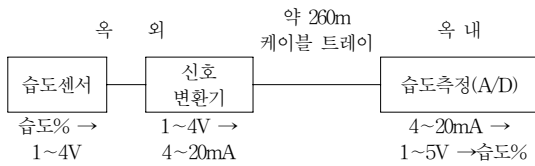


그림 1. 습도측정 및 신호변환  
 Fig. 1. Humidity measurement and signal transformation

(3) 센서출력전압 1~4V를 전류4~20mA를 변환하는 신호변환기를 설치하고, 습도측정 입력부에서 저항 250Ω을 사용하여 1~5V로 변환하고 A/D변환부에서 측정된 값을 검토한 결과, 센서출력전압을 신호변환기를 거쳐 A/D변환부에 입력 되는 전압에 대한 특성은 그림 2와 같다.

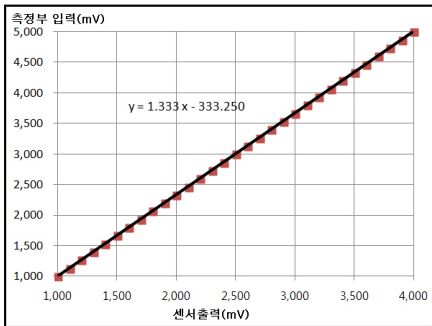


그림 2. 센서 출력전압[mV]에 대한 측정부 입력전압[mV]  
 Fig. 2. Sensor output vs. A/D converter input

최종적으로 습도를 측정하기 위한 A/D변환부의 입력 전압에 대한 습도특성은 그림 3과 같고 습도(%)값은  $0.02919 \times \text{입력전압(mV)} - 32.289$ 의 계산식으로 얻어진다. 이 계산식을 software적으로 처리하면 습도를 계산할 수 있게 되었다.

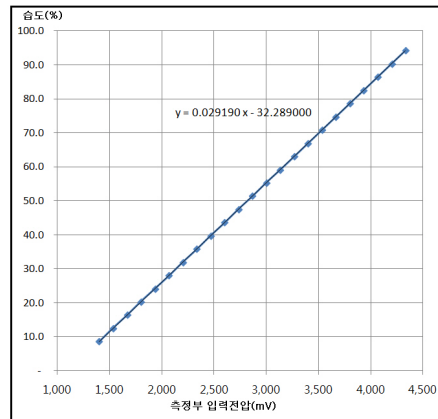


그림 3. 측정부 입력전압[mV]에 대한 습도[%]  
 Fig. 3. Input voltage[mV] vs. humidity[%]

### III. SYSTEM의 기능 및 동작원리

#### 1. 시스템의 기능

- (1) 6.6kV의 고압모선으로부터 케이블을 분리하지 않은 활선 상태에서 10,000MΩ 이하의 케이블 절연저항에 걸리는 신호전압 DC 10V를 교류상용전압 신호에 중첩인가하여 자동 및 수동으로 측정된 값을 표시함.
- (2) 6.6kV고압도체와 차폐간의 본체 절연저항은 물론, 차폐와 대지간의 외피방식층의 절연저항도 측정 가능함
- (3) 일반적으로 (특)고압모선계 전체의 절연저항도 동시에 활선상태에서 가능함.
- (4) 단심, 3심 모두 적용할 수 있다.
- (5) 단말접속재의 이상유무도 확인가능.
- (6) 측정장치에 내장된 데이터매니저(panel PC)에 의해 cable 전체 또는 선택한 일부의 cable 측정을 할 수 있고, 데이터 매니저 및 원격지의 PC에서 cable의 잔존수명도 예측할 수 있는 기능을 구비함
- (7) 습도 변화에 따라 변동하는 케이블의 절연상태를 파악할 수 있는 기능 구비

#### 2. 시스템의 동작원리

- (1) 본체 절연층의 절연저항 측정 154/6.6kV 변압기의 2차 측 중성점에 연결된 NGR과 접지 단자 사이에 신호전압 DC10V를 인가하여 6.6KV Cable도



### 3. 각 케이블별 습도에 따른 절연층 절연저항 data와 습도data간 검토

그림 5는 9회선 케이블 중 No.7 Feeder Cable의 예를 들어 7개월(2015.02.06.~2015.09.06.)의 기간 동안 측정 장치를 사용하여 얻은 결과를 나타낸다. 측정기간에 따라 습도와 절연층의 절연 저항이 변동하는 형태를 확인할 수 있다. 습도는 약 30%~90%의 범위에서 변동하지만 절연층의 절연 저항은 거의 변동하지 않음을 확인하였다.

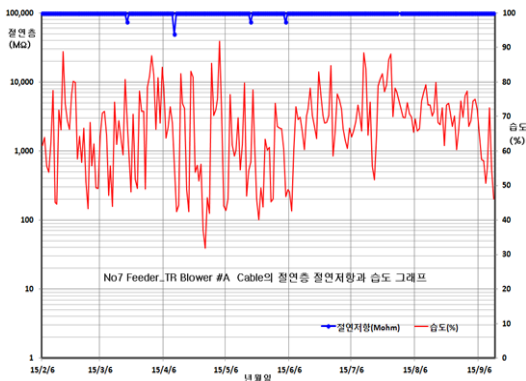


그림 5. No.7 Feeder: 측정일에 따라 변동하는 습도와 절연층 절연저항  
 Fig. 5. No.7 Feeder: Humidity and insulation resistance of insulation layer changing with time

그림 6은 No.7 Feeder의 습도 변화 31%~91%에 따라 변동하는 동안 절연층 절연저항의 변동형태를 나타내고 있다.

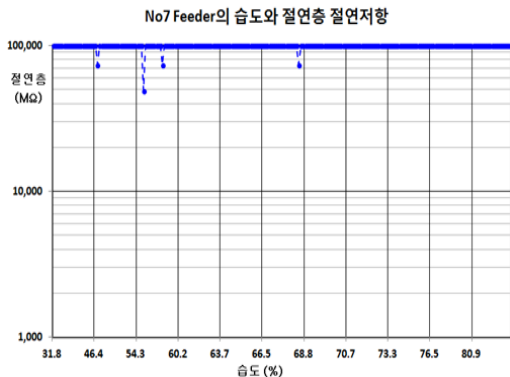


그림 6. No7 Feeder의 습도에 따라 변동하는 절연층 절연저항  
 Fig. 6. No.7 Feeder: insulation resistance of insulation layer changing with humidity

위 데이터를 분석한 결과, 약 7개월 이상의 기간 동안 습도의 data가 변화하여도 절연층 절연저항은 거의 변화 없음을 확인하였다. 습도의 변화에 따른 절연층 절연저항의 그래프를 보면 습도의 변화에 따라 절연층 절연저항이 변화한다고 판단할 수 없다. 따라서 No.7 Feeder는 절연층 절연상태는 습도의 영향이 없음을 알 수 있다. 절연층 절연상태의 data를 보면 습도의 data에 따라 절연층 data가 변화하고 있다고 말할 수 없다.

## V. 결론

발전기에서 생산된 고전력을 전달하기 위하여 단심(single-core) XLPE 케이블이 사용되고 있다. 케이블은 설치 동작시점으로부터 여러 가지요인에 의하여 열화 현상이 나타나기 시작한다. 우리는 충청남도 태안에 위치한 화력발전소인 한국서부발전(주)에서 운전하고 있는 고전력 케이블을 선택하여, 습도가 케이블의 절연상태에 미치는 영향을 연구하였다. 습도의 변화에 따른 절연층 절연저항의 그래프를 보면 습도의 변화에 따라 절연층 절연저항이 변화한다고 판단할 수 없다. 따라서, 케이블의 절연층 절연상태는 습도의 영향 있다고는 판단할 수 없음을 확인하였다.

## References

- [1] K. H. Um, B. K. Kim, "Development of Systems and Measured Results for Measuring Insulation Resistance of High-Power Cables in Operation", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol. 16, no. 4, pp. 165-170, Aug. 2016.
- [2] 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.
- [3] <http://news.mk.co.kr/newsRead.php?no=281938&year=2016>
- [4] 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.
- [5] The Ministry of Knowledge Economy, “The 5th Basic Plan of Long-Term Electricity Supply”, pp.11-20, 2010.
- [6] 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.
- [7] H. S. Lim, Y. K. Bae, M. K. Jee, “Cable Functional Failure Temperature Evaluation of Cable Exposed to the Fire of Nuclear Power Plant”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, vol.26, no. 1, pp. 142-148, Feb 2012.
- [8] H. S. Lim, Y. K. Bae, M. K. Jee, “Cable Functional Failure Temperature Evaluation of Cable Exposed to the Fire of Nuclear Power Plant”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, vol.26, no. 1, pp. 142-148, Feb 2012.
- [9] [http://www.davis.com/Assets/manual\\_pdfs/20022-38-45.pdf](http://www.davis.com/Assets/manual_pdfs/20022-38-45.pdf)
- [10] <http://hl2kvx.tistory.com/5158>

## 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>

※ 이 논문은 2016년 학술연구활동에 대한 한세대학교의 지원을 받았음