

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.4.165>

IIBC 2016-4-24

활선 고전력 케이블의 절연저항을 측정하기 위한 시스템 설계 및 측정결과

Development of System and Measured Results for Measuring Insulation Resistance of High-Power Cables in Operation

엄기홍*, 김보경**

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

요약 우리 나라에서 발전소가 전기를 생산하고 고전압 전력을 공급하기 위하여 채택한 XLPE 케이블(또는 CV케이블)은 포설된지 40년에 이르고 있다. 설치환경 및 사용조건에 다르겠지만, 설치 후 운전 상태에 있는 CV 케이블은 6~8년의 기간이 경과하면 열화가 발생하기 시작하고, 상태가 나빠지는 경우, 절연 파괴현상으로 인한 휴전 및 화재 사고가 발생한다는 많은 사례 보고가 있다. 근래에 포설한 케이블이라 할지라도 시공 불량이나 기타의 열악한 주변 환경으로 인한 악조건 상태에 노출되는 경우, 6~8년 미만의 시점에서 사고가 발생할 수가 있다. 사고를 미연에 방지하기 위하여 케이블의 동작상태를 정기적으로 감시 확인하여야 한다. 우리는 케이블의 사고를 체계적으로 감시 및 예방하기 위하여 측정 장비를 개발하였다. 이 논문에서 케이블의 절연 상태의 열화 상태를 감시하기 위하여 한국서부발전 주식회사(Korean Western Power Co. Ltd.)에 설치하여 운영 중에 있는 장비의 설계와 그 장비를 사용하여 측정한 결과, 케이블의 열화 과정을 나타내는 결과를 제시한다.

Abstract The XLPE(or CV) cables installed to deliver high electric power from generator at the power station have operating for the last 40 years in Korea. In 6-8 years from the time of initial operation, the cables in operation start a deteriorating process, depending on the installation and usage conditions. Some cables, even before 6-8 years from the installation, can cause accidents due to the faulty construction or other inadequate environments. In order to prevent cable accident in advance, the regular auditing of power cables are required. For a systematic realization of surveillance and prevention of accidents, we have invented a measuring device. In this paper, we present the device installed at Korean Western Power Co. Ltd., in order to detect the deterioration status of insulation resistances of dielectrics in the cables. We present that the measured results by the device we developed show the deteriorating processes in the cables in operation.

Key Words : Thermoelectric power plant, High-power cable, Insulation resistance, Neutral ground reactor, Y-connection

1. 서 론

최근 들어 화석연료를 사용하는 화력발전소(thermoelectric

power plant)에 의한 환경적인 문제가 논의되고 있으나, 전기를 생산하기 위한 비용이 비교적 저렴하다는 등의 이유로 인하여 화력 발전이 차지하는 비중은 지속될 것

*정회원, 한세대학교 IT학부(교신저자, 주저자)

**정회원, (주)오성메가파워

접수일자 : 2016년 7월 9일, 수정완료 : 2016년 7월 29일

게재확정일자 : 2016년 8월 5일

Received: 9 July, 2016 / Revised: 29 July, 2016 /

Accepted: 5 August, 2016

*Corresponding Author: um@hansei.ac.kr

Dept. of Information Technology, Hansei University, Korea

이고, 달리 전기를 생산하기 위한 대안이 제시되지 않는 한, 국내 전력수급 비상상황과 더불어 안정적 전력 확보를 위하여 기존의 화석연료를 사용하는 화력발전소에 대한 중요성이 여전히 크다. 최근 들어 대한 민국 1 년간 평균 전력소모량이 8,092 kWh 로서 1980년에 비교하면 9배 만큼 증가하였다. 이와 같이 전력 수요의 증가로 인하여 전력을 공급하기 위한 여건이 계속 악화되고 있는 추세이다^[1]. 산업화의 추세에 따라 수요가 급증하고 있는 산업현 장에서의 고전력(high-power cable)을 생산 및 공급하기 위하여 시설장비 및 부하의 대응량화가 수반되고 있다. 전기설비의 규모는 점차 복잡해지고, 대규모화 됨으로써 고도 정보화 사회로의 발전에 크게 기여하고 있다. 그러나, 발전 설비에서 불의의 사고가 발생하여 전기의 생산이 중단된다면, 전기에 의하여 작동 중인 수 많은 장비가 지장을 받게 되고, 산업사회에 막대한 경제적 손실 및 장애를 초래하게 된다. 사고가 발생한 발전 설비를 복구하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요되어 국가 산업 활동에 막대한 사회경제적 피해를 초래하게 된다. 일반적으로 케이블 온도가 증가하여 절연물질이 변형됨으로써 도체와 도체 또는 도체가 케이블 트레이 등과 접촉하여 저항이 1,000 Ω 이하로 떨어지면 기능이 상실된다. 케이블의 전기적 고장을 일으키는 온도는 400~600℃, 평균 열유속은 12.3 kW/m²이다. 시간에 따른 케이블특성은 IEEE 383의 기능상실온도 기준 330℃ 및 열유속 11 kW/m², 기능상실 온도 390~460℃ 및 평균 열유속 12 kW/m²보다 높은 내화 성능과 우수한 특성을 가지고 있는 것으로 분석되었다는 보고가 있다^[2]. 화재가 발생할 경우 안전정지 케이블은 단락, 접지, 단선 등 전기적 고장으로 케이블에 고장이 발생하여 그 결과로 안전정지계통의 설비와 기기는 안전정지 기능을 상실할 수 있다. 발전소 안전정지계통의 설비와 기능은 다중설계, 계열간 독립 및 분리 원칙에 따라 운영되고 있다. 케이블 화재의 경우 기기 오동작과 오지시 또는 잘못된 계측을 유발할 수 있으며 운전담당자의 상황 판단에 오류를 일으켜 안전정지 기능을 저해할 수 있다^[2].

일반적으로 고압전력 케이블의 절연상태를 측정하기 위해서는, 측정대상 케이블에 인가되는 입력전기를 차단한 사선(휴전)상태에서 케이블의 도체와 대지 간에 직류 전압을 인가하고, 이 때 케이블의 절연체를 통하여 대지로 흐르는 누설전류를 이용하여 절연저항을 측정하는 메가(megger)를 사용하고 있다^[3,4]. 그러나 사선(휴전)상태

에서 메가를 사용하여 절연저항을 측정하기 위하여 케이블의 가동을 반드시 중지시켜야 한다는 조건은, 경제적 손실을 감수하여야 한다는 이유로 문제점이 항상 제기되고 있다. 고압전력 케이블의 가동을 중지해야만 한다는 문제점을 해결하기 위하여, 우리는 이 논문에서 케이블의 운전 상태를 그대로 유지하는 상태에서 절연저항(insulation resistance)을 측정하기 위한 기술, 측정하기 위한 시스템 설계 및 시스템을 이용하여 측정된 결과를 제시한다.

II. 절연저항 대상 케이블 시스템 조사

절연저항을 측정하기 위한 대상으로 선택한 고전압 케이블 시스템에 대한 기본 조건을 다음과 같이 부과하였다.

1. 전압 : 6.9kV
2. 계통 : 저항접지계통
3. 6.9kV GPT 또는 3PT의 수량 : 없음
4. NGR (Neutral Ground Reactor) 정격 : 1,000A /30sec/ 4Ω
5. 대상 케이블 : 9개 회선 / CV 1 Core
6. TR 및 NGR위치 : 옥외
7. 절연저항 측정대상 케이블 위치: 옥내

절연저항 대상으로 선정된 케이블은 9회선으로 전부 굵기가 100SQ 인 단심(single core) 케이블이다. 포설조건은 기중과 관로이다. 우리는 9회선 모두에 대한 절연저항을 측정하였다. 우리는 그 중에서 예를 들어 하나의 회선에 대해서만 이 논문에서 제시하기로 한다. 이 케이블은 판넬 3SW01-11B, 명칭 TR Blower #C 인 케이블이다. 절연저항 측정장치를 발전소의 6.9kV 케이블에 설치하기 전의 계통회로는 참고문헌 [5]에서 제시한 바와 같다^[5].

1. 절연저항 및 습도측정 시스템의 설계조건

절연저항 측정장치 및 습도측정장치 시스템을 설계하기 위하여 부여된 조건은 다음과 같다.

1. 모선 6.9kV의 케이블의 운전상태에서 문제점이 발생하지 않도록 구성한다.

2. NGR접지선이 대지접지로부터 분리되지 않도록 구성한다.
3. 지락 시 계통에 설치된 NGR을 통하여 대지접지로 흐르는 전류 (최대1000A, 30sec)를 견딜 수 있도록 설계한다.
4. 케이블 스위스 접지선이 대지접지로부터 분리되지 않도록 구성한다.
5. NGR은 옥외에 위치하고 있으므로 dc신호전압 인가 장치는 옥외에 위치하도록 구성한다.
6. 절연저항 측정대상 케이블의 스위스접지는 옥내 전기실에 있으므로, 절연 측정부는 옥내에 위치하도록 구성한다.
7. 케이블의 다양한 포설환경과 계절환경에 따른 변하는 습도를 측정하기 위한 습도센서를 옥외 및 옥내에 위치하도록 설치 구성한다.

우리는 이 논문에서 절연저항 측정 장치에 관한 설계를 소개한다. 습도측정장치 시스템에 관해서는 다음 회회에 제시하기로 한다.

2. 절연저항 측정 시스템 설치 후의 접지선 연결

가. 시스템 설치 전 NGR측 접지

그림 1은 발전소에서 운용 중인 케이블의 절연저항을 측정하기 위한 장치를 설치 적용하기 전의 NGR 연결접지선을 검토한 것이다. 편의 상, 삼상 Y-결선(Y-connection)과 모선, Main NGR을 포함하는 부분을 주회로(main circuit) A, 접지 부분은 B로 구별하여 표시하였다. 주회로 A는 그림 2, 3에서 사용되는 회로이다. 그림에서, Main TR의 6.9kV측 Y결선의 중성점이 NGR 저항기를 통하여 NGR 연결 접지선이 대지접지로 연결되어 있고, 지락발생 시에 NGR을 통하여 흐르는 전류는 최대 1,000A 30sec이다^[6]. NGR 연결접지에서 사용된 저항의 값이 4ohm이므로 저저항(low resistor) 접지방식에 해당하는 것이다. 저저항 접지방식은 직접접지(direct ground) 방식과 비교하면, 지락전류(grounding current, 地絡電流)를 제한함과 동시에 과도안정도(즉, 케이블 시스템이 안정된 상태에서 운전을 하고 있는 동안 때 갑자기 고장, 사고와 같은 급격한 외란이 발생하여도 평형상태를 여전히 회복하여 운전을 계속 할 수 있는 능력)를 향상시키는 접지방식이다^[7].

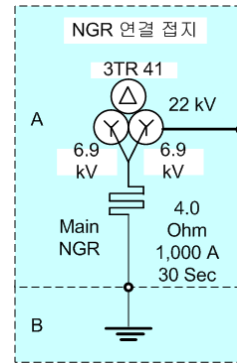


그림 1. 절연저항 측정장치 설치 적용전 NGR연결접지선 연결 상태. 주회로는 A, 접지 부분은 B로 구별하여 표시하였음

Fig. 1. Insulation resistances of cables
 (a) Insulation resistances in decaying fashion
 (b) Insulation resistances with axes in log scales

그림 1의 회로에서 지락사고가 발생할 경우 NGR에 흐르는 전류는 최대 1,000A, 30sec이다. TR중성점과 대지접지간의 저항은 4.0 ohm 이다.

나. 시스템 설치 후 NGR측 접지

참고문헌 [6]에서 제시한 바와 같이, 운용 중인 케이블에 대한 절연저항 측정 장치를 설치 적용한 후에 Main TR의 6.9kV측 Y-결선(Y-connection)의 중성점과 NGR 저항의 하단과 절연저항측정장치용 별도의 판넬(직류신호전압인가용 NGR접지반)을 통하여 대지접지로 연결된 상태와 회로동작을 보여 주고 있다^[7].

측정 시에는 NGR하단이 매우 낮은 저항 $R_1(0.4 \Omega)$ 을 통하여 대지 접지로 연결되도록 구성되어 NGR이 항상 대지접지로 연결되는 상태(즉 절연저항 측정장치 설치 적용전의 상태)와 거의 같은 구성이 되는 반면, 상시(즉, 측정하지 않을 때)에는 NGR하단이 normal close인 전자접촉기(MG1)을 통하여 대지접지로 연결된다. 전자접촉기는 조작부가 솔레노이드 타입 액추에이터인 장비이다. 솔레노이드 타입의 조작기는 투입 동작이 완료된 후에도 투입을 유지하기 위해 전류를 지속적으로 인가해 주어야 한다^[8]. 동작 상태는 다음과 같다.

1. 상시(절연저항 측정하지 않을 때) : NGR하단이 전자접촉기(MG1) 통하여 대지접지로 연결 ($I_{In}; 1,200A$,

- I_{th} 120A 접점 10개 병렬)
- 측정시 : 최대 0.4 Ω (0.8Ω 2개 병렬) 저항을 통하여 접지로 연결 (1개당 저항은 1,000A 30sec정격이므로, 최대 2000A, 30sec까지 통전가능)
 - 측정시 저항을 통하여 50A이상의 전류가 흐르면 상시 상태로 환원
 - M/C (MG1) normal close 가 10개 병렬로 구성하여 NGR하단을 접지로 연결 (I_{th} ; 1200A, 단시간 정격 약 4000A, 30sec)
 - 저항 (R_1) 값 : 0.4Ω / 1000A / 30sec

III. SYSTEM 구성

그림 2는 절연저항 측정장치의 설치적용 전의 지락계통회로에 대해서 설명하고 있다. 그림 3은 절연저항 측정장치의 설치적용 후의 지락계통회로에 대해서 설명하고 있다. 두 그림에서, 블랙 박스 A는 그림 1에서의 주회로(main circuit)를 나타낸다.

우측 단자는 6.9kV 교류 상용전압 모선에 연결되고, 아래 쪽 단자는 접지단자이다. 평상시에는 NGR접지선이 normal close 전자접촉기의 접점을 통하여 대지 접지로 연결되고, 측정시에는 NGR접지선이 1,000A/30sec용량의 저저항 R_1 (0.4 Ω)을 통하여 접지와 연결되도록 구성되어 측정 시에도 측정장치 설치적용전과 거의 같은 구성이 되도록 하였다.

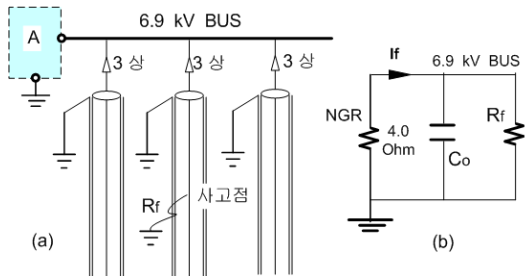


그림 2. 케이블의 절연저항 측정장치 설치 전의 지락 시스템
(a) 모선에 연결된 측정 대상 케이블 3 회선
(b) 등가회로 (R_f ; 지락고장저항)

Fig. 2. Grounding system before the installation of system for measuring Insulation resistances of cables
(a) Three cables connected to the 6.9 kV bus.
(b) Equivalent circuit to the system in figure (a)

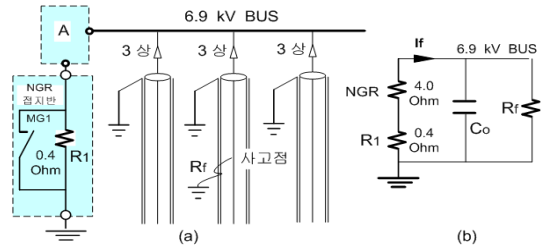


그림 3. 케이블의 절연저항 측정장치 설치 후의 지락 시스템
(a) 모선에 연결된 측정 대상 케이블 3 회선
(b) 등가회로 (R_f ; 지락고장저항)

Fig. 3. Grounding system after the installation of system for measuring Insulation resistances of cables
(a) Three cables connected to the 6.9 kV bus.
(b) Equivalent circuit to the system in figure (a)

절연저항 측정장치의 설치 전후의 NGR 연결을 비교 검토한 자료는 참고문헌 [6]에 제시하였다.

IV. 측정의 결과

측정 메뉴 화면 측정장치에 내장된 데이터매니저에서 임의로 선택한 계통절연, 케이블 본체절연, 방식절연값을 측정하여 전면에 설치되어 있는 모니터에 표시한다. 절연저항 측정장치를 구동하면 데이터 매니저(판넬컴퓨터)의 software의 초기화면이 나타나고, 초기화면에서 측정 메뉴를 선택하여 결과 그래프를 얻는다.

1. 회선별 1일 측정data Trend

그림 4는 feeder별로 매일 측정된 절연층과 방식층의 절연 저항값이 변동하는 추세를 data를 그래프로 표시한 것이다.

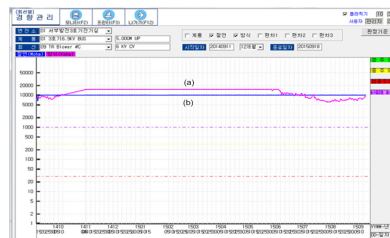


그림 4. 케이블의 절연층과 방식층 절연저항 Trend
(a) 케이블의 절연층 절연저항
(b) 케이블의 방식층 절연저항

Fig. 4. Insulation resistances of insulation layer and sheath of cables
(a) Insulation resistances of insulation layer
(b) Insulation resistances of sheath

2. 회선별 수명예측

그림 5는 feeder별로 매일 측정된 절연층 data를 10일 평균하여 절연층의 향후 절연상태의 변화를 나타낸 것이다. 시간이 경과함에 따라 감소하는 추세를 나타내고 있다.

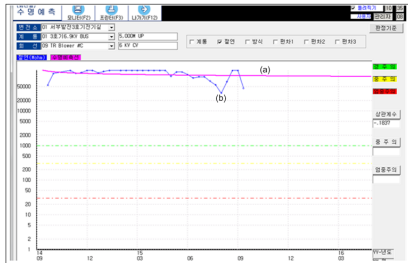


그림 5. 케이블 절연저항의 변화
 (a) 절연층 절연저항의 변화 예측추세선
 (b) 10일 평균 절연층절연저항 data

Fig. 5. Decaying insulation resistances of cables
 (a) Insulation resistances in decaying fashion
 (b) Insulation resistances of sheath

그림 6은 매일 측정된 feeder별로 방식층 data를 10일 평균하여 방식층 data를 그래프화한 것이다.

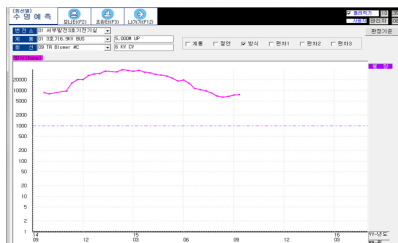


그림 6. 케이블 방식층의 절연저항
 Fig. 6. Insulation resistances of cable sheath

V. 결론

발전기에서 생산된 고전력을 전달하기 위하여 단심 XLPE 케이블이 사용되고 있다. 케이블은 설치 후 동작 시점으로부터 열화 현상이 나타나기 시작한다. 열화 현상이 누적되면, 절연체의 특성이 악화됨으로써 화재가 발생한다. 우리는 충청남도 태안에 위치한 화력발전소인 한국서부발전(주)에서 운전하고 있는 고전력 케이블을 선택하여, 우리가 개발한 측정장비를 설치하여 케이블의 절연상태를 감시하였다.

그 결과, 케이블이 열화되는 과정을 체계적으로 확인

함으로써 불의의 사고를 미연에 방지할 수 있는 토대를 마련하기 위한 일부의 역할을 하였다.

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] 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.
- [3] http://www.davis.com/Assets/manual_pdfs/0022-38-45.pdf
- [4] <http://hl2kvx.tistory.com/5158>
- [5] K. H. Um, K. W. Lee, "Developing Equip,emt to Detect the Deterioration Status of 6.6 kV Power Cables in Operation at Power Station", Journal of the The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, vol.15, no. 4, pp. 197-203, Jun 2014.
- [6] 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. 4, pp. 175-180, Jun 2015.
- [7] J. W. Yeom, "Designing a Monitoring System for Neural Grounding Resistor Using Programmable System-on-Chip", Master's Dissertation, Pukyong National University, Feb. 2008.
- [8] <http://www.schneider-electric.com/>

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
- ㈜성완전기 근무
- 메가파워테크 대표
- 전력케이블 절연진단 업무 20년 이상 수행중

- 현재 : (주)오성메가파워 대표

<주관심분야 : 절연진단, 전기전자재료, 활선 케이블>