

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.3.175>

JIIBC 2015-3-26

절연저항 측정 장치에 의한 지락사고 전류의 비변화

Nonchange of Grounding Current due to Equipment Measuring Insulation Resistance

엄기홍*, 이관우**

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

요약 산업화의 추세에 따라 수요가 급증하고 있는 고전력을 생산하기 위하여 시설장비 및 부하의 대용량화가 수반되고 있다. 전기설비의 규모는 점차 복잡해 지고, 대규모화 됨으로써 고도 정보화 사회로의 발전에 크게 기여하고 있다. 그러나, 발전 설비에서 불의의 사고가 발생하여 전기의 생산이 중단된다면, 전기에 의존하여 작동 중인 수 많은 장비가 지장을 받게 되고, 산업사회에 막대한 경제적 손실 및 장애를 초래하게 된다. 사고가 발생한 발전설비를 복구하기 위해서는 많은 시간과 비용이 소요되어 국가 산업 활동에 막대한 경제적 피해를 끼치게 된다. 사고를 미연에 방지하기 위하여 케이블의 동작 상태를 정기적으로 감시 확인하여야 하며, 우리는 절연 저항을 측정하기 위한 장비를 개발하여 (주)서부발전의 현장에 설치하여 운용 중인 바, 장비의 설치로 인한 지락 전류의 변동이 없으므로, 정확한 측정 결과를 확인할 수가 있었다. 이를 체계적 응용하여 열화 상태를 구체화하여 구현할 수 있는 사전 예방감시 기술을 연구 중에 있다.

Abstract With progress in industrialization, facilities for generating, delivering, and receiving high levels of electric power are in great demand. The scale of electric power equipment is increasing in both size and complexity. This has contributed to the development of our modern, high-tech and information-based society. However, if the generation of electric power is suspended due to unexpected accidents at power facilities or power stations, a range of equipment the operations of which are dependent on electric power can be damaged, causing substantial socioeconomic losses in an industrial society. A great deal of time and money would be expended to repair damaged facilities at a power station, causing enormous economic loss. In order to detect the deterioration processes of power cables, and to prevent the destruction of power cables, the operation status of power cables should be monitored on a regular basis. We have installed equipment at Korea Western Power Co., Ltd., located in Taean, in order to predict and prevent the destruction of power cables. This is an entirely new installation: a set of equipment invented specifically to measure the insulation resistance of power cables. Installation of the equipment does not cause the flow of earth fault current. This ensures accurate measurement of insulation resistance values by the equipment. We have been studying this equipment in order to develop preventive technology that would show the deterioration processes of power cables.

Key Words : Dielectric breakdown, Earth ground, Circuit breakers, GPT, NGR

*정회원, 한세대학교 IT학부

**정회원, (주)오성메가파워(교신저자)

접수일자 : 2015년 2월 28일, 수정완료 : 2015년 4월 28일

게재확정일자 : 2015년 6월 12일

Received: 28 February, 2015 / Revised: 28 May, 2015

Accepted: 12 June, 2015

**Corresponding Author: ygu9177@daum.net

Director of R&D Center, Osungmega Power Ltd., Korea

I. 서 론

국내 전력수급 비상상황과 더불어 안정적 전력확보를 위하여 기존의 화석연료를 사용하는 화력발전소에 대한 중요성이 더해 가고 있다. 현재 국민 1인당 전력소모량이 연간 8,092 kWh 수준으로 1980년에 비교하면 9배 만큼 증가하였으며, 예측보다 높은 전력의 수요로 인하여 수급여건이 계속 악화되고 있다^[1]. 발전소가 전기를 생산하고 고전압 전력을 공급하기 위하여 유일하게 채택 사용하고 있는 가교 폴리에틸렌 (XLPE, cross linking-polyethylene) 절연 케이블 (CV cable 이라고도 함)은 국내 여러 곳에서 약 40년 전에 포설되어 지금까지 사용되어 오고 있다. 설치 환경 및 사용 조건에 따라서 다르겠지만, 설치 후 운전 상태에 있는 CV cable 은 6-8년의 기간이 경과하면 정상적인 동작을 저해하는 열화 상태가 나타나기 시작하고, 상태가 더 나쁘게 진행되는 경우, 절연 파괴현상으로 인한 정전 및 화재 사고가 발생한다는 많은 사례 보고가 있다. 근래에 포설한 케이블이라 할지라도 시공 불량이나 기타의 열악한 주변 환경으로 인한 악조건 상태에 노출되어 있는 경우, 그 전의 임의적인 시점에서 사고가 발생할 수가 있다. 일반적으로 고압 전력 케이블의 열화상태를 파악하기 위하여 사용하는 방법으로서 사전상태에서는 $\tan\delta$ 법이 있다. 그러나 이 방법은 활선상태를 중지한 상태에서 측정하여야 한다는 선제 조건으로 인하여 측정 작업을 하는데 많은 제약이 따른다. 우리는 이 논문에서 고압전력 케이블의 가동을 중지해야만 한다는 문제점을 해결하기 위하여 케이블이 운전하고 있는 상태를 그대로 유지하는 조건에서 절연저항을 측정하는 기술을 소개한다. 케이블이 정상적으로 운전 가동하고 있는 상태에서는 케이블 도체와 대지 간에 교류의 상용 전압이 인가되고 있는데, 이 전압 신호에 DC 신호 전압을 중첩하여 인가했을 때 케이블 도체와 동테이프 간에 절연체를 통하여 흐르는 DC 누설 전류를 측정하여 절연 저항을 측정한다. 전력 케이블이 갖추어야 할 필수 요건들로서는 높은 절연성을 갖는 절연체에 의하여 두 도체가 전기적으로 분리되어 있어야 하며, 안전하고 신뢰성 있는 상태를 유지하면서 전력을 공급할 수 있어야 한다. 그 이유는 케이블이 한번 설치되면, 중간에 교체가 매우 어려울 뿐만 아니라 만일 누전이나 단락이 되는 경우 대부분 화재가 발생하기 때문에 전력 케이블은 정해진 수명을 지켜야 하는 것은 필연적인 요소이

다. 그리고 케이블을 제작한 회사에서는 건축 설계에 맞추어 케이블의 정상적인 수명 30년을 보장한다고 공시한다. 그러나, 케이블이 실제로 30년이란 기간에 제대로 동작하고 있는지, 그 기간 보다 더 사용할 수 있는지, 또는 훨씬 전에 파괴될지 등의 사태는 예측 또는 판단하기 어렵다^[2].

고압 전력을 전달하기 위하여 사용되는 XLPE 케이블은 유기 가황제를 사용하여 폴리에틸렌을 가교시켜서 망상상태 구조로 변환시키는 화학적 변화과정을 거쳐서 완성한 재료이다^[3]. 현재까지 사용되고 있는 XLPE 절연 케이블은 우수한 절연 특성을 가지고 있어서, 개발된 지 40년이 되고 있어서 대부분 초기 설치된 케이블은 교체 시기에 해당된다. 안정성 및 신뢰성을 기초한 동작 특성을 유지 하면서 고압의 전기를 공급할 수 있기 위해서는, 케이블을 제조하기 위한 재료와 기술이 우수해야 하만 한다. 현장에 설치한 후, 운전 과정에 있어서 철저한 유지, 보수, 관리를 함으로써 케이블 자체의 열화 특성 뿐만 아니라, 주변 환경의 인위적 또는 자연적인 변화로 인하여 케이블의 정상적인 동작에 악영향을 끼치게 될 경우 예기치 못한 정전사고가 초래하게 된다. 사고가 발생할 경우, 케이블 시스템이 붕괴되고, 정전현상이 발생하여 막대한 피해가 초래된다. 그러나 지금까지 이런 사고를 막기 위하여 여러 진단 시스템이 개발되어 왔다. 지금까지 남아 있는 방법으로는 사전상태의 케이블 진단방법으로는 $\tan\delta$ 법이 사용되어지고 있으며, 활선상태에서는 부분방전방법이 널리 행하여지고 있다^[4]. 이상적인 방법은 부분방전법이다. 그러나, 부분방전법은 케이블 시스템의 길이가 길기 때문에, 또는 부분방전이 특정한 지점에서만 발생하기 때문에 사고 지점을 정확히 찾기는 매우 어렵다. 우리가 개발한 절연 저항법은 활선 상태에서 케이블 전체를 점검대상으로 하기 때문에, 비정상적인 동작 현상을 바로 확인하고 진단할 수 있다. 사고가 발생한 후에 수습하려면 이미 발생한 막대한 사회경제적인 손해를 보전해야 하며, 새로운 시설과 비용을 투자하여 원상회복을 하여야 한다. 따라서, 사고가 발생할 가능성이 큰 시점을 신속하고 정확하게 예측하고, 사고 발생을 방지하기 위한 신뢰성 있는 대책을 수립, 대응함으로써 실제 초래될 불의의 사고를 미리 방지해야 한다.

II. 지락 사고 전류

케이블 중 일부가 직접 또는 간접으로 대지 (earth ground, 접지)로 연결된 경우로, 즉 케이블과 대지간의 절연 상태가 악화됨으로써 ark 또는 도전성 물질의 영향으로 전기 회로 시스템 또는 기기의 외부에 위험한 전압이 나타나거나, 전류가 흐르게 되는 상태를 말한다. 이렇게 하여 흐르는 전류를 지락 사고 전류 (earth fault current) 라 한다. 정상 시에 비해 전류의 피크(peak) 치가 매우 크기 때문에 인체 감전, 누전 화재 또는 기기의 손상 등을 초래하는 원인이 된다. 지락 전류에 의하여 유도되는 위험 전압의 한계 값 이내로 떨어뜨리기 위해 통신선에 유도 대책을 강구하여야 한다. 전기 설비를 설계 설치하기 위하여 고려해야할 가장 중요한 요소 중의 하나로서 지락(grounding) 현상이긴 하지만 현재까지 관련 분야의 기술자들이 별로 관심을 기울이지 않고 있으며, 그 결과 케이블 열화로 인한 사고가 발생할 경우 막대한 손실을 초래하는 원인 중의 하나이다. 삼상시스템에서 발생하는 전류 지락은 한 개 또는 그 이상의 상도체로부터 비정상적인 전류가 대지로 흐르는 현상이다. 지락 전류를 방지하기 위하여 시스템에 공급되는 전류를 차단하는 것이며, 누설 전류가 대지로 유입되는 현상이 감지될 때 한하여 차단된다. 미리 정의한 임계치 전류 값을 초과 할 경우 전력 시스템에서 지락 현상을 감지하기 위한 보호 장비가 있어서 차단기(circuit breakers)가 동작하게 되어 있다. 지락 전류의 영향에 대해서는 1970 년대에 와서야 조금씩 중요성을 인식해 오고 있는 실정이다^[5]. 내부의 전기적인 구조가 간단한 시스템인 경우에는 발생한 지락 전류를 간단히 발견할 경우도 있으나, 복잡한 시스템인 경우, 사용하는 측정 장비 자체에 의하여 인한 지락 전류가 발생하기도 한다^[6]. 절연과피로부터 발생하는 지락 사고는 주로 (a) 절연체의 경년열화(습도, 대기오염, 외부 물체와 절연 열화로 인하여 손상된 절연), (b) 기계적 충격이나 절연 펑크에 의한 물리적인 손상, (c) 과도 전압 충격 또는 정상 전압에 의한 열화, 및 (d) 단락 사고의 인한 지락 등으로 분류 있다. 우리가 개발한 측정 장비를 발전소에 설치하여 실험한 바에 의하면, 장비를 설치하기 전후에 지락 전류의 변화가 거의 발생하지 않았으며, 이 결과 우리가 개발한 측정 장비는 운전 중인 고전압 케이블의 원래의 동작에는 아무런 나쁜 영향을 끼치지 않고 유효하게 동작하고 있음을

알 수가 있다.

III. 절연저항 측정의 개념

전기적인 장치(전기 모터)에 사용되는 절연체의 저항을 절연저항 (단위는 MΩ) 이라 한다. 절연 저항 테스트는 저항값이 충분히 커서 절연 상태가 유지되는지를 확인하는 작업이다. 도선과 실드사이의 절연 저항을 측정하여 결함(열화)의 형태를 판단한다. 저항값이 적으면(이론상 0 Ohm) 상태란 두 도체가 절연 상태를 유지하지 못하고 도전(conducting) 상태라는 의미이다^[7,8,9].

그림 1 은 운전 중인 케이블의 절연저항을 측정하기 위한 회로 시스템의 전체적인 개념을 나타낸다. 스위치(SW)가 1위치로 된 상태(즉, DC 신호 전압이 인가되지 않은 상태)에서 DC 누설 전류계에 흐르는 DC 누설 전류 I_0 를 측정하고, SW를 2위치로 옮긴 상태에서(즉, DC 신호 전압이 인가되기 후의 상태에서) DC 누설 전류계에 흐르는 DC 누설 전류 I_{dc} 를 측정하면, DC 신호 전압 인가 전후의 차이 값 즉 $I_{dc} - I_0$ 의 누설 전류의 값으로 DC 신호 전압에 대한 비율을 계산하면 절연 저항 값을 알 수 있게 된다. 따라서, 절연 저항을 측정하는 동안 먼저 잠음 및 초기 조건에서의 절연 저항을 측정하고, 그 후 DC 전압을 인가하여 초기값과 DC 전압 인가 후 누설 전류의 차이를 이용하여, 케이블 시스템의 이상여부를 판단한다.

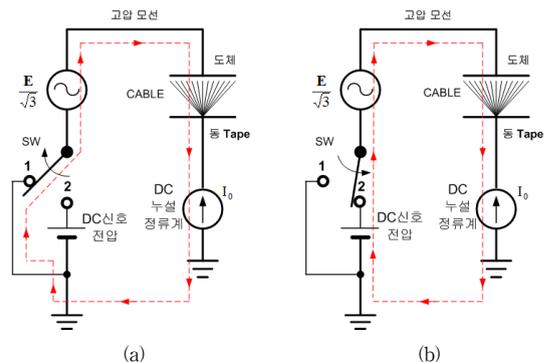


그림 1. 절연저항 측정을 위한 회로 시스템의 개념

(a) DC 신호 전압 인가 전 (b) DC 신호 전압 인가 후
 Fig. 1 Conceptual circuit system for measuring insulation resistance;

(a) Without the DC voltage signal applied, and (b) With the DC voltage signal applied

IV. 케이블의 절연저항 측정시스템

1. 측정 대상 케이블

동작 전압에 따라 전송선로 케이블은 저압(50/60 Hz, 110~220 V) 케이블과 고압(50/60 Hz, 3.3~22 kV) 케이블로 구분한다. 우리가 연구한 케이블은 충남 태안의 (주)서부 발전소에서 설치되어 운전 중인 6.6 kV에 의한 고전력을 송전하는 초고압 지중 송전선로 (CV cable)를 운전 상태에서 진단하였다. 우리가 측정을 위하여 설치한 케이블은 전압 6.9 kV의 저항 접지 계통 즉, 비접지계통의 고압측의 모선에 PT를 설치한 계통에 대한 접지 전위 변압기 (ground potential transformer, GPT), 또는 3PT, NGR (neutral ground resistor) 정격 1 kA-30 sec, 4Ω인 고전압용 발전 케이블이다. GPT는 변압기의 1차 입력단자의 의 한쪽(U-side)을 전원의 선로에 접속하고, 다른 한 쪽 (V-side)을 대지 (ground)에 직접 접속하여 사용하는 계기용 변압기이다. 3상일 경우, 1차를 V-접속하여 중성점을 대지에 직접 연결하여 사용한다. 이 케이블은 실제 발전소 운영에 전원을 공급하는 유일한 케이블이며, 발전소 운영에 핵심적인 역할을 담당하고 있다.

2. 중성점 접지저항기 시스템

그림 2는 발전소에서 동작 중인 송전 케이블에 대한 중성점에서 접지저항기 시스템의 절연 저항을 측정하기 위한 장치의 겉보기 형태를 나타내고 있다.



그림 2. 절연 저항 측정 장치의 외관
Fig. 2. Appearance of equipments for measuring insulation resistance

그림 3은 운전 중인 케이블의 절연저항을 측정하기 위한 장치를 설치하여 지락 사고 전류의 피크치를 감소시키기 위하여 설치 운전 중인 NGR의 연결 접지선을 나타내는 회로 시스템이다. 중성점을 적당한 저항값으로 접지시켜 접지 사고 시에 흐르는 접지 전류를 제한하

면서 arcing접지 현상을 방지하고 접지 계전기를 동작시켜 고장 회선을 선택 차단하도록 하는 저항기 비접지 시스템의 임의 중성점을 만들어 접지하여 측정시 발생할 수 있는 지락전류를 절연저항 시스템에서 보호하기 위함이다^[10,11].

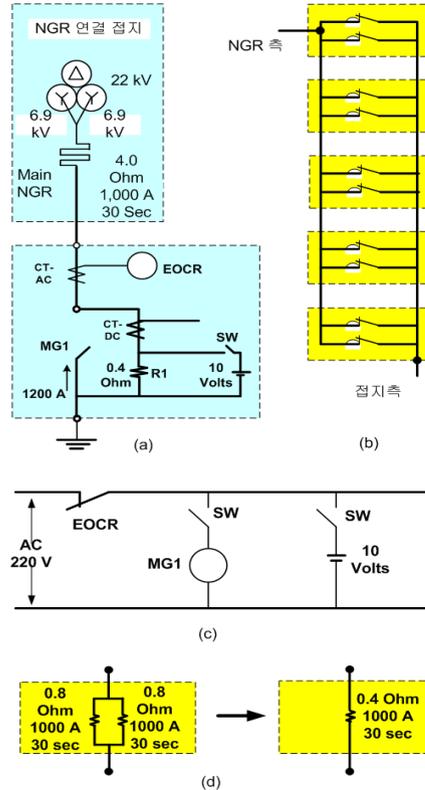


그림 3. NGR 접지 회로시스템; (a) NGR 연결 접지선 회로 시스템, (b) MG1 구성 (c) 케이블 절연 DC 10 V 계통절연, (d) 저항 R1의 사양

Fig. 3. NGR ground circuit system; (a) circuit system for NGR connected ground line, (b) Configuration of MG1, (c) DC 10 V system of cable insulation, and (d) Specification of resistor R1

V. 측정의 결과

그림4는 절연 저항 측정 장치를 설치 적용한 시점을 기준으로 전후의 지락 사고 고장 저항에 대한 NGR 측 pickup 지락 전류량의 변화 추세를 나타낸 것이다. 전류는 지락 사고가 발생하면, 피크 전류량이 증가하게 되는데 절연 저항 측정 장치는 사고에도 계통에는 전혀 영향을 미치지 않도록 설계되어야 한다.

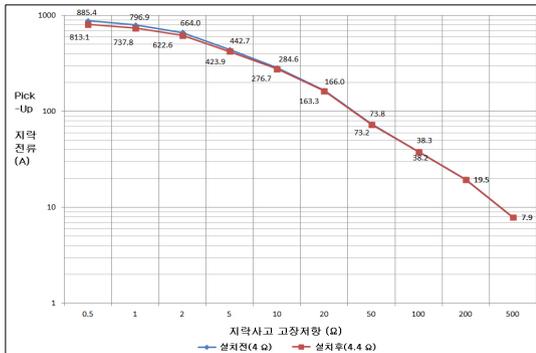


그림 4. 절연저항 측정장치 설치 적용전후의 지락전류량
 Fig. 4. Earth currents before and after the installation of equipment for measuring insulation resistance

표 2는 절연 저항 측정 장치를 설치하기 전과 후의 파라미터 변화를 비교한 것이다. 표에서 알 수 있듯이, 기존 계통과 측정 장치를 설치한 후 계통의 지락 전류는 큰 차이를 나타내지 않는다. 만약 큰 차이를 발생할 경우에는, 접지 시스템은 오동작을 일으키게 되며, 다른 시스템에 문제를 일으킬 수 있다.

표 1. 절연저항 측정장치 설치 적용전후 파라미터 변화
 Table 1. Comparison of parameter changes before and after the installation of equipment for measuring insulation resistance

	설치 전	설치 후
NGR전류/ 시간정격	1 kA, 30sec	1 kA, 30sec
TR 중성점과 접지간 저항	4.0 Ω	측정하지 않을 때 : 4.0 Ω 측정시: 4.4 Ω 단, 측정시 NGR 에 흐르는 전류가 50 A 이상 흐를 때는 상시로 환원; 4.0 Ω 되도록 구성
시간정격	1 kA, 30sec	측정시저항: 1 kA, 30sec 상시 : 1.2 kA 단시간정격: 4 kA, 30sec
지락사고 고장저항		지락전류
0 Ω (완전지락)	995A (=3,984/4.0)	905A (=3,984/4.4)
0.5 Ω	885A	813A (-8.9%)
1 Ω	796A	737A (-8.0%)
2 Ω	664A	622A (-6.7%)
5 Ω	442A	423A (-4.4%)
10 Ω	284A	276A (-2.9%)
20 Ω	166A	163A (-1.7%)
참고) 변압기 및 선로 도체의 임피던스는 수Ω정도이지만, 여기서는 무시하여 검토		

VI. 결론

우리는 발전소 (주)서부발전에서 근간을 이루고 있는 6.9 kV 케이블 시스템의 진단을 위한 장비를 국내 최초로 설치함으로써 안전하고 신뢰성 있는 환경에서 운전할 수 있도록 일조하였다. 그 결과 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

1. 절연저항 측정 장치를 설치하여 데이터 획득 중에 있으며 케이블 시스템의 열화 과정을 확인 할 수 있다.
2. 지금까지 시도한 적이 없는 운전 중인 케이블의 부하 전류를 측정하여, 부하 전류와 수명과의 상관 관계를 확인 할 수 있는 시스템의 설치가 가능하였다.
3. 이는 향후 케이블 시스템의 도체 사이즈 절감을 할 수 있고 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] 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.
- [3] http://www.dsecable.co.kr/cgi/view.php?&bbs_id=bd03&page=&doc_num=4.
- [4] 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.
- [5] Grainger, John J. (2003). Power System Analysis.

Tata McGraw-Hill. p. 380. ISBN, 978-0-07-058515-7.

- [6] Paul, Furse, Cynthia and Gunther, Jacob. "Analysis of Spread Spectrum Time Domain Reflectometry for Wire Fault Location." IEEE Sensors Journal. December, 2005.
- [7] <http://www.pat-testing-course.com/blog/faqs/insulation-resistance-test/>
- [8] IEEE-Std-43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery", IEEE Power & Energy Society, p. 18, Mar, 2000.
- [9] <http://ecmweb.com/ops-amp-maintenance/basics-insulation-resistance-testing>
- [10] Baldwin Bridger, Jr., "High-Resistance Grounding", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-19, No. 1, Jan./Feb 1983.
- [11] John Foster, William Brown, & Larry Pryor, High Resistance Grounding in the Cement Industry - A User's Experience, IEEE Cement Industry Conference, May 19-24, 1985.

저자 소개

엄기홍 제 15 권 3 호 참조

이관우 제 15 권 3 호 참조