

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.5.237>

IIBC 2014-5-33

운전 중인 고전압 케이블의 절연저항 측정 및 수명평가장치의 개발

Development of Equipment to Measure Insulation Resistance and Evaluate the Lifetime of High-voltage Cable in Operation

엄기홍*, 이관우**

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

요약 이 논문은 발전소에서 설치 운전 중인 6.6kV 고전압 케이블이 시간에 따라 성능이 악화되는 현상의 추세를 결정하는 수명지수를 파악하기 위한 논문이다. 우리가 연구한 케이블 시스템은 설치 후 13 년 동안 운전하고 있다. 삼상전력에 연결되는 변류기, 온도센서 LPF 등을 이용한 측정장치를 개발하여 케이블의 절연저항 변화 특성을 해석 하였다. 고전압 22kV 케이블과 비교하면 절연체의 두께가 더 두껍기 때문에 특성을 다르게 나타낸다. 동작시간이 경과함에 따라, 절연저항이 계속 감소하지 않음을 확인 하였다. 일정한 값으로 감소하다가 더 이상 감소하지 않고 상하 진동하는 특성을 나타내었다. 지난 13 년 동안의 열화과정을 파악할 수 없었지만, 시스템이 안정 상태에서 동작을 하였다라는 사실은 열화가 아직 발생하지 않았다는 의미이다. 이런 경우에는, 수명지수를 예측할 수 없기 때문에 케이블의 수명을 정량적으로 예측할 수 없음을 확인하였다.

Abstract In this paper, we find out the lifetime index in order to determine the time-dependent trend of deteriorating performance of 6.6kV high-voltage power cable in operation at a power station. The cable systems used in our study have been in operation for 13 years. With measurements for the 13 years, we analyzed the insulation resistances. By developing measuring equipment (comprized mainly of transformer, temperature sensor, and LPF) operating by the three-phase electric power, we analyzed the changing characteristics of insulation resistance of power cable. In contrast to 22kV cables, 6.6 kV cables have thicker insulation. Therefore the characteristics of 6.6kV cables are different from that of 22kV cables. The study found that as time passes, the insulation resistance does not decrease continuously; it decreases to a certain value, then does not decrease any more and shows properties of oscillation. We could not detect the process of deterioration in the preceding twelve years. The cable system showed great stability so that deterioration was not apparent. In this case, it is not possible to measure the future life indices of power cables because the lifetime indices are not predictable

Key Words : Underground cable, Insulation resistance, Partial discharge, Treeing deterioration, Loss tangent

1. 서 론

사회가 점점 고도 정보화 및 산업화의 사회로 발전함

에 따라 전력 사용이 점차 증대되고 있다. 관련 설비들은 대규모화될 뿐만이 아니라 높은 신뢰성의 바탕위에서 동작할 것을 요구받고 있다. 따라서 전기 설비의 안정화는

*정회원, 한세대학교 IT학부 (주저자)

**정회원, (주)오성메가파워 (교신 저자)

접수일자 : 2014년 8월 8일, 수정완료 : 2014년 9월 10일

게재확정일자 : 2014년 10월 10일

Received: 8 August, 2014 / Revised: 10 September, 2014

Accepted: 10 October, 2014

**Corresponding Author: ygu9177@daum.net

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

매우 중요한 과제이다. 전기의 생산 및 공급 과정에서 요구되는 높은 신뢰성은 산업 사회의 필수적인 요소라고 할 수 있다. 전력사용의 급증으로 인하여 부하가 다양화 및 대용량화되고 있으며, 이에 따라 전기의 생산 및 송배전을 감당하기 위한 설비는 점차 복잡화 및 대규모화 되고 있다. 따라서, 설비의 사고 및 정전 사고 등은 높은 전기적 의존을 가진 고도 산업사회에 막대한 경제적 손실 및 장애를 가져다 준다. 한편, 도시환경의 미화차원에서 지중 송배전선로는 점차증가하고 특히 전력 케이블은 주로 공장 또는 대도시의 도로 지반 하에 분포하고 있기 때문에 사고 시 복구에 많은 시간이 필요하며 교통 및 산업 활동에 막대한 피해를 끼치게 된다. 전력 공급의 기술 및 환경적인 필요에 따라, 케이블의 안전성은 필수 요건이다. 지중 케이블 중에서 가교 폴리에틸렌 (XLPE) 케이블은 (1)절연에 대한 내력이 탁월하다. (2)유지보수하기가 쉽다. (3) 우수한 전기적 및 절연적 특성을 갖는다. 는 등의 장점이 있어서 설치량이 점차 증가되고 있는 추세이다.

우리나라에서는 송배전용 케이블로 XLPE케이블(CV 케이블)을 포설하기 시작한지 30년에 이르고 있으며, 이러한 CV 케이블은 설치한 후 설치환경 및 사용조건에 다르겠지만, 6-8년이 경과하면 열화가 발생하여 사고가 발생한다는 많은 절연과피사고 사례보고가 있다. 그리고, 근래에 포설한 케이블이라 할지라도 시공불량 및 기타 열악한 환경에 놓여있게 되면 단시간에도 사고를 초래할 수가 있어 설비 및 수용가에 원활한 전력공급 및 사고의 미연 방지를 위해 케이블의 열화상태를 정기적으로 진단할 필요가 있으며, 이를 위한 예방진단 기술의 연구가 필요로 하게 되었다^[1].

전력을 송배전하기 위한 수단으로서 사용되는 선로(cable)를 구별한다면, 가공선로[overhead cable, 架空線路] 와 지중선로[underground cable, 地中線路]가 있다. 고장 시 고장점을 비교적 쉽게 찾아 낼 수 있고, 설치비용이 저렴하다는 등의 이유로 가공 케이블이 사용되지만 도심 지역에서는 미관상 좋고, 기상 현상에 의한 자연 재해에 대해 안정적인고 전력공급의 신뢰도가 좋다는 이유로 설치 비용이 높더라도 점차 지중 케이블이 사용되고 있는 추세이다. 그러나, 지중 케이블 시스템에서는 사고가 발생할 경우 고장 위치를 찾기가 쉽지 않고, 고장이 발생한 시스템의 원상 복구를 하는 데 시간이 오래 걸리고, 비용 발생이 크게 된다. 따라서 지중케이블의 동작 신뢰성을 증가시키고, 사고가 발생하는 현상을 미리 예

측하고 방지하는 일이 매우 중요하다^[1,2,3].

발전기 탈락이나 선로개방 등의 예기치 못한 사고가 발생한 경우, 미리 설정되어 있는 조치(시스템의 분리, 부하 차단 등)를 직접 취함으로써 전력시스템을 안정화하기 위한 고급고장과급방지장치(Special Protection Scheme, SPS) 가 국내 총 34 곳에서 설치 운용되고 있다.

운전 중인 지중 선로, 특히 발전 선로로서의 6.6kV 지중 선로 시스템은 설치 장소와 동작의 중요성으로 인하여 매우 높은 안정성을 요구하는데, 그 이유는 사고가 발생할 경우 발전 중단 사태가 발생하고 주변 케이블을 과손하게 되므로, 원상 복구하기 위해서는 비교적 시간 및 비용 부담이 막대하여 국가적인 손실을 초래하게 된다. 따라서 발전소의 지중 송전 시스템의 사고 발생에 대비한 사전 예방이 최선이라 할 수 있다. 케이블을 구성하는 두 도체는 전기적으로 분리된 상태에서 동작을 해야 하고, 분리 상태를 유지하기 위하여 고체사이의 절연체를 삽입한다. 절연상태를 판단하여 케이블의 열화 정도를 파악하고자 한다. 본 논문에서 우리는, 설치 후 12년 경과한 케이블을 13년 동안 매 10일마다 평균하여 얻은 데이터를 해석하였다. 소수의 케이블의 경우 운전시간이 경과함에 따라 절연 저항의 변동양상이 진동형태를 나타냈으므로, 열화진행정도를 분별하기가 용이하지 않았다. 이 논문에서 우리는 케이블이 설치된 후 동작하는 과정에서 시간이 경과하면서 필연적인 현상으로서 발생하는 열화로 인하여 초래되는 사고의 발생시점을 예측함으로써 사회 경제적 손실을 방지하고자 한다.

II. 절연 저항

전기적인 장치(전기모터)에 사용되는 절연체의 저항을 절연 저항이라 한다. 단위는 MΩ이다. 유리나 운모와 같은 물질은 전류가 거의 흐르지 않으므로 절전체이다. 절연저항 테스트는 저항값이 충분히 커서 절연상태가 유지되는지를 확인하는 작업이다. 도전과 실드사이의 절연 저항을 측정하여 결함(열화)의 형태를로 판단한다. 저항값이 적으면(이론상 0 Ohm) 상태란 두 도체가 절연 상태를 유지 하지 못하고 도전상태라는 의미이다^[4,5].

전류가 절연체의 표면을 따라 흐르는 전류를 표면 절연 저항, 내부를 흐르는 전류를 체적 절연 저항이라고 한다. 절연저항은 인가전압이 높을수록, 주변의 온도나

습도가 증가할수록 감소하는 특징을 나타낸다. 절연상태가 유지되고 있다 하더라도, 고전압이 인가되거나, 사용되는 절연물질의 복잡한 인 특성을 나타낼 경우 케이블의 절연저항은 주위 환경의 영향을 많이 받게 된다. 따라서 절연 상태가 불규칙적으로 변화하게 된다⁶⁾.

절연저항은 여러 가지 요인에 의한 영향을 나타내어 매우 복잡한 특성을 갖게 된다.

III. 케이블의 열화 및 부분방전 측정법

1. 케이블의 열화

부분 방전(partial discharge, PD)이란 전기적으로 절연되어 있는 기체, 액체 및 고체 형태의 절연체 시스템에서 고전압을 인가하면, 주변 도체 사이의 간격에 영향을 주지 않은 상태에서 절연체가 파괴되는 현상이다. 부분방전이 발생하기 시작하면 초기 단계에서부터, 절연체의 특성이 점차 열화되기 시작하며, 지속되는 경우에 전기적인 파괴 현상이 나타난다. 특히 고전압 케이블이나 장비에서 부분 방전이 발생하면, 심각한 사고를 초래하며, 주변 장치가 거의 파괴되어 버린다. 고체 유전체에서 부분방전이 계속 누적되면 여러 가지 형태의 방전 채널이 형성되어 나뉘는 형태의 방전 흔적이 나타나는 이른바 트리잉 열화(treeing deterioration)를 나타낸다^{7,8)}.

정상적인 케이블에서는 부분 방전이 발생하지 않고, 열화가 발생한 케이블에서는 부분 방전이 발생하는 데, 이 부분 방전을 측정하여 케이블의 열화 정도를 진단하는 방법이 상기한 부분 방전 측정법이다⁹⁾.

케이블의 수명을 추정하는 과정에서 부분 방전법을 사용할 경우, 주변의 잡음 전압의 영향을 매우 크게 받기 때문에 데이터를 가공한다고 하더라도 케이블 수명을 정확하게 판정하는 것이 불가능하다. 케이블 열화과정은 아레니우스 열화, 전압열화, 부분방전 열화의 시간적인 순서를 거치게 되므로 부분방전이 발생하는 시점은 케이블 열화의 마지막 단계이다. 따라서, 부분 방전이 파악되는 케이블 시스템은 이미 수명이 얼마 남지 않은 것으로 판단하여도 된다. 부분방전 현상의 유무를 측정할 수 있는 신호의 진폭은 일정 임계치 이상의 값을 가져야 한다. 각각의 케이블 선로를 따라 돌아 다니면서 신호를 측정하는 과정에서 주변의 잡음으로 인한 간섭현상 때문에 실제 선로에서 부분방전법에 의한 열화를 측정하기란

매우 어렵다. 그러므로, 부분 방전 측정법에 의하면, 단지 케이블 시스템의 열화 여부만을 밝힐 수 있을 뿐 케이블 수명을 판정하는 것은 불가능하다.

2. 부분 방전 측정법

동작 전압의 크기에 따라, 정상 상태에서 운전 중인 전송선로 케이블을 저압 (50/60Hz, 110~220V) 케이블과 고압(50/60Hz, 3.3~22kV) 케이블 두 가지 종류로 구분한다. 사선 상태에 있는(즉, 입력단 전압원을 개방시킨 상태에서, 동작을 하지 않은 상태인)케이블의 전기적인 특성을 판별하기 위하여 주로 사용되고 있는 방법에는 사선진단법과 활선진단법이 있다. 전력 케이블 시스템을 진단하기 위한 기술은 CV 케이블 설치 때부터 직류성분법, 저주파 중첩법, 교류 측정법, 초음파법등 의 연구가 진행되어 왔으나, 현재 주로 연구되어 사용되는 방법은 부분방전법, 손실 탄젠트 (loss tangent, $\tan\delta$)법 및 절연 저항법이다. 부분방전(측정)법은 케이블 시스템의 일부를 구성하고 있는 절연물의 표면이나 내부에서 발생하는 부분방전의 상태를 측정하는 방법이다. 부분방전현상은 케이블이 운전을 시작한 시점으로부터 약 1-3년 사이에 발생하기 시작하며, 케이블이 열화되는 시간적인 마지막 단계에 나타나게 된다. 따라서 선로의 수가 많기 때문에 측정해야할 시간적인 제한이 따르게 되고, 부분방전으로 인하여 발생하는 잡음의 영향을 최소화하기 위한 필터링 연산이 용이하지 않다. 선로를 진단하기 위하여 정전을 시켜야 한다는 불편한 조건이 전제되고 있어서 사용범위가 매우 제한적이므로 케이블이 갖고 있는 한 문제점을 사전에 발견하기란 쉬운 일이 아니다.

최근 유럽에서 개발된 $\tan\delta$ 법은, 열화된 케이블 시스템에서 유전율의 차이가 발생한다는 사실을 확인함으로써 케이블의 열화정도를 판단하는 방법이다. 지금도 연구 중에 있으며, 최근에 사선 상태에서 사용 중에 있다. 절연저항법은 25년 전에 개발되어 사용해 왔다. 케이블의 포설조건과 상태, 제조사, 및 접속제에 따라서 열화 상태가 각각 다르게 나타나기 때문에 그 동안 열화판정기준이 없었는데, 최근에야 비로소 객관적인 열화 판정기준을 정하게 되었다. 케이블의 절연 저항은 외부 온도, 계절, 부하전류 및 습도에 따라 변동되는데, 열화가 진행되면 점차 감소되는 특성을 갖는다. 그러나 극단적인 안정 상태에 도달하게 되면, 케이블 열화가 어느 상태에서 일정한 값을 유지하고, 더 이상 진전되지 않는 경우도 있다.

IV. 실험 장치

1. 실험 장치 시스템의 동작 원리

그림 1은 6.6kV 케이블의 절연 저항을 측정하기 위하여 구성된 회로시스템으로서 고정형 절연저항 측정장치이다. 케이블에 운전전압이 가하여진 상태에서 DC전압 50V를 추가로 인가함으로써, 증가한 누설 전류를 이용하여 절연 저항을 측정하였다. 운전 중인 케이블의 절연저항을 측정하기 위하여, 케이블 고압 도체에 DC 신호전압을 인가하는 방법을 보여준다^[1].

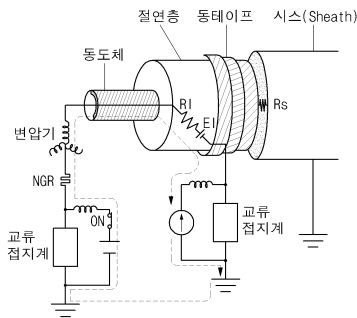


그림 1. 6.6kV 케이블의 절연저항 측정장치 회로
Fig. 1. Circuit to measure insulation resistance of 6.6kV cable

그림 2는 운전 중인 고전압 케이블의 절연 측정장치의 다이어그램을 나타낸다. 삼상 전력선(R1, S1, T1)에 연결되어 있는 세 개의 변류기(O1, O2, O3)와, 각각의 변류기에 연결되어 있는 부하전류 검출부와, 부하전류 검출부에 연결되어 있는 제1 신호변환부와, 삼상 전력선의 케이블 외피에 설치되어 있는 온도센서와, 온도센서에 연결되어 있는 제2 신호변환부와, 제1 신호 변환부 및 제2 신호 변환부에 연결되어 있는 입력선택 아날로그 스위치와, 상기한 입력 선택 아날로그 스위치에 연결되어 있는 필터와, 필터에 연결되어 있는 아날로그디지털 변환기와, 삼상 전력선(R1, S1, T1)의 누설전류를 검출하기 위한 누설전류 센서와, 누설전류 센서에 연결되어 있는 절연저항 산출부와, 아날로그 디지털 변환기와 절연저항 산출부에 연결되어 있는 데이터 처리부와, 데이터 처리부에 연결되어 있는 표시부와, 데이터 처리부에 연결되어 있는 제1 메모리와, 표시부에 연결되어 있는 제2 및 제3 메모리로 설계되어 있다.

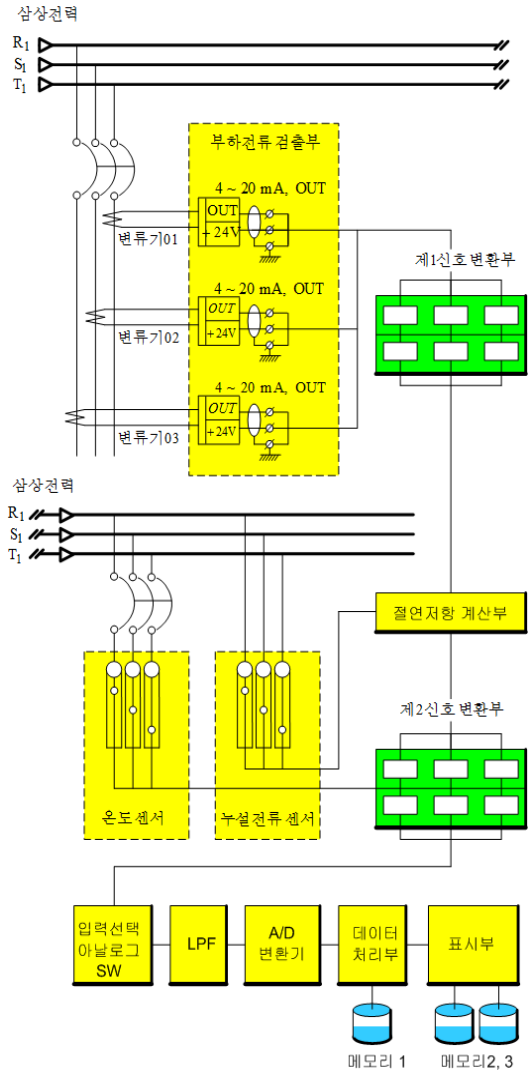


그림 2. 운전 중인 고전압 케이블의 절연 측정장치의 구성
Fig. 2. Configuration of equipment to measure insulation resistance in the high-voltage cable in operation

2. 측정결과

그림 3은 특정 제조사에서 제작한 세 개의 케이블(즉, “케이블 #1”, “케이블 #2”)을, 수분의 영향을 거의 받지 않는 매우 안정적인 장소에 설치하고, 운전한 시점으로부터 약 13년(4,750일) 동안 측정하여 얻은 데이터(#1, #2)의 절연저항을 나타내고 있다^[10]. 두 케이블(#1, #2)은 저항의 차이가 있으므로, 동작 안정도의 차이가 있음을 알 수 있다.

동작 중인 22kV 케이블의 절연두께는 8mm정도인 반

면, 6.6kV 케이블의 절연 두께는 4mm 이므로, 절연과피 내전압이라기보다는 제작된 기계적 특성에 의하여 열화 특성의 값이 더 작음을 확인할 수 가 있다.

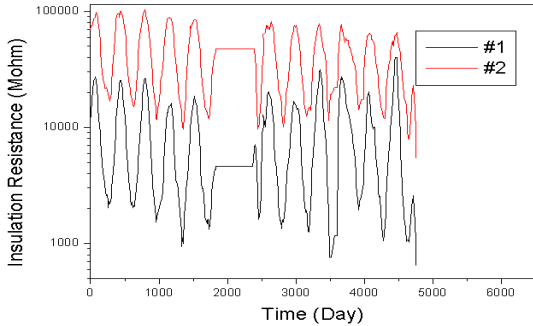


그림 3. 동작시간에 따른 케이블 절연 저항의 변화
 Fig. 3. Changing of insulation resistance of cable with operating time

시간에 따른 케이블 절연 저항의 변화는 운전시점으로부터 1500일까지와 4750일 후의 기간에서, “케이블 #1”, “케이블 #3”은 1,000-10,000 Mohm, “케이블 #2”는 10,00-100,000 Mohm, 까지의 범위에서 규칙적인 상하 진동의 주기함수를 나타내고 있다. 상세한 특징을 파악하기 위하여 필터링 작업을 하기로 한다.

그림 4는 필터링 후, 작은 값(약10,000-15,000 Mohm) 범위에서의 절연 저항 변화이다. 측정 시점으로부터 4,000 일이 경과하여도, 저항값이 감소변화 되지 않고, 진동현상만을 나타내고 있음을 확인할 수 있다^[10].

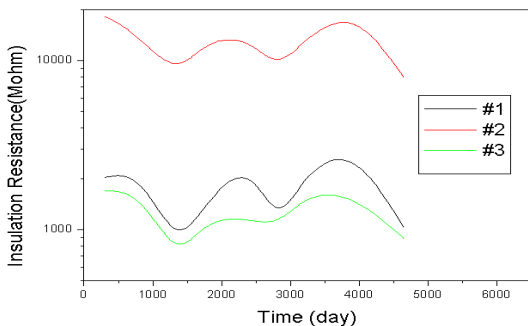


그림 4. 필터링 후에 작은 값의 범위에서 절연 저항 변화
 Fig. 4. Variation of insulation resistance of cable after filtering (in the range of small value of insulation resistance)

“케이블 #1” 및 “케이블 #3”은 1,000-2, 000 Mohm, “케이블 #2”은 8,00-12,000 Mohm, 까지의 범위에서 규칙적인 상하 진동의 주기함수를 나타내고 있다. 세 케이블 모두 저항값의 변화를 나타내지 않고 있다.

그림 5는 약 13년 동안 케이블을 측정하여 얻은 값을 필터링 하고, 큰 값(10,000-100,000 Mohm)의 절연 저항을 나타낸다. 케이블 시료 #1 의 절연저항은 아래니우스 열화에 의한 완만하게 감소하는 추세를 보이고 있으며, 아직 열 열화 단계에 의한 감소현상을 나타낸다. 반면, #2 및 #3번 시료는 뚜렷한 감소 특성을 나타내지 않고 있으므로, 초기치가 어디에서부터 시작되었는 지를 알 수 없으며, 현재 상태에 의하면 열화가 진행 중이라고 판단하기가 곤란하다.

고전압 시험에서 매우 큰 전압을 인가하더라도 케이블이 파괴되지 않는 경우가 있는데, 전력 케이블 시스템이 매우 안정된 경우라 생각할 수 있다. 마찬가지로 전력 케이블 시스템이 매우 잘 설치되어 있다면, 운전 중에 열화가 잘 일어나지 않을 수 있다는 사실을 측정 데이터로부터 확인할 수 있었다. 활선 22kV 에 대한 연구결과와 비교하여, 6.6kV 본 논문은 활선 6.6 kV 전력 케이블 시스템의 열화 과정을 분석하였다. 그 결과 활선 상태에서 케이블 열화는 열열화, 전압열화, 부분방전 열화의 순서를 따르는 것을 확인할 수 있었다^{[10][11]}.

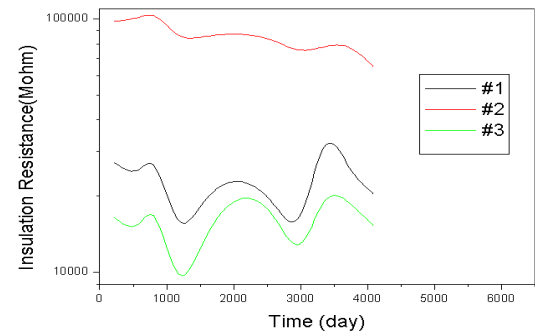


그림 5. 필터링 후에 큰 값의 범위에서 절연저항 변화
 Fig. 5. Variation of insulation resistance of cable after filtering (in the range of small value of value of insulation resistance)

V. 결 론

본 논문에서, 우리는 발전소에서 설치한 후 12년 동안 운전 중에 있는 6.6kV 케이블을 13년 동안 매 10일마다 측정하여 얻은 데이터를 해석한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 활선 22kV 에 대한 연구결과와 비교한다면, 6.6kV 케이블 시스템은 절연두께가 두껍기 때문에 설치 동작시작 후, 보다 안정적인 운전을 하고 있다
2. 활선상태에서의 케이블 중 일부는 설치가 잘되어 열화가 발생하지 않았으며, 초기의 열화는 열열화임을 확인할 수 있었다.

Remark : 이 논문은 한국전기전자재료학회 추계 학술대회 (2013)에서 발표했던 내용을 보충한 것이다.

References

- [1] K. W. Lee, K. H. Um, "A Study on the Deterioration Process of 22kV Power Cables in Operation" Journal of IIBC, vol. 13, no. 3, pp. 127-133, June 2013.
- [2] J. D. Glover, M. S. Sarma, T. J. Overbye, "Power System Analysis and Design (Fifth ed.)", Cengage Learning. Stamford, CT, USA, 2012.
- [3] B. H. Wayne, F. D. Donald, "Standard Handbook for Electrical Engineers (15th Edition)", McGraw-Hill, ISBN 978-0-07-144146-9, 2007.
- [4] <http://www.pat-testing-course.com/blog/faqs/insulation-resistance-test/>
- [5] IEEE-Std-43-2000, "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery", IEEE Power & Energy Society, p. 18, Mar, 2000.
- [6] F. J. Wyant, S. P. Nowlen, "Cable Insulation Resistance Measurements Made During Cable Fire Tests", Sandia National Laboratories, June 2002.
- [7] IEC 60270:2000/BS EN 60270:2001, "High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements",

2001.

- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Partial_discharge.
- [9] N. Kikuta, "Automatic Discrimination System of Partial Discharge Signal Using Fuzzy Filtered Synapse Network", Technical Report, vol 97, pp. 38-45, Oct. 1999.
- [10] K. W. Lee, K. H. Um, D. H. Park, "A Study on the Life Index due to the Voltage Deterioration of 22kV Cable Systems in Operation", Summer Conference KIEE, 2012.

저자 소개

엄 기 흥(정회원)

- 제 14권 5호 참조

이 관 우(정회원)

- 제 14권 5호 참조