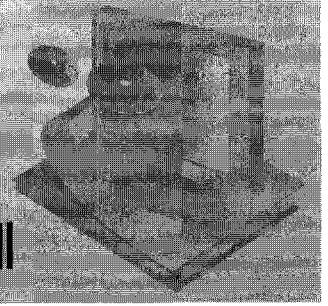


최신 전력케이블

활선 부분방전 측정 기법 및 현장사례



이영상 대표이사 ((주)넥시그마)

1. 서론

전기 의존도가 높은 고도 산업사회에 도시환경의 미화적 차원 및 공장의 효율적인 전력공급의 차원에서 전력케이블의 수요는 증가 추세에 있으나 대부분 도심과 산업단지 등 부하가 밀집되어 있는 지역에 전력을 공급하고 있는 경우가 많기 때문에 사고 시 복구에 많은 시간이 필요하며 교통 및 산업에 막대한 피해를 끼치게 된다.

최근 전력 케이블의 사고예방의 기법 중에 정전을 하지 않고 부하운전에 영향을 주지 않는 효과적인 사고 예방 진단 기법으로 부분방전 측정이 현장 산업계 중심으로 관심이 증가되고 있으며, 여수, 구미, 울산, 기흥 등의 대규모 산업단지에서 전력 케이블의 부분방전 활선 진단이 활발히 진행되고 있다.

최근 전력설비 활선 예방진단 분야는 다양한 분야의 과학기술의 접목으로 많은 발전과 좋은 제품들이 나오고 있다. 변압기의 경우 초음파 측정기법, 가스분석기법, 내압, 산가 등의 측정, Ultra High Frequency (이하 UHF) 센서를 절연유에 내장하여 전자파를 측정하는 기법 등을 현장 적용하여 가시적 효과를 보고 있으며, 가스절연개폐장치 (GIS)는 내장형, 외장형 UHF 센서를 이용하여 진단하는 기법으로 예방 진단이 체계화 되어 가고 있다. 그러나 전력 케이블의 경우는 오랜 연구를 통해 기법들은 체계화 되었으나, 실제 현장 적용하기에는 미흡한 부

분들이 많이 있어 좀 더 신중한 접근과 결과에 대한 분석이 필요하다 생각된다.

2. 활선 부분방전 측정 기술 개발 동향

전력케이블의 활선진단기법으로는 초음파센서를 이용하여 중간 접속재 부분을 측정하는 기법, C 커플러형태의 센서를 이용하여 정전용량을 측정하는 방식, HFCT를 이용하여 접지선에 흐르는 누설전류를 측정하는 방법 그리고 UHF센서를 이용한 방법 등 크게 4가지로 나누어 질수 있다.

초음파 센서를 이용한 기법은 초기 케이블 사고의 많은 부분이 중간접속재의 시공불량이나 소재 불량으로 인해 발생되어 도입된 기법이나 접속재 소재와 시공기술의 발전 등으로 인해 최근에는 거의 적용하지 않고 있는 기법으로, 실제 현장 적용에 있어서도 케이블 자체의 고유 진동, 초음파 센서를 직접 중간 접속재에 부착해야 하는 이유로 측정의 위험성, 현장 접근의 어려움, 신호 및 노이즈 구분의 어려움 등으로 인해 거의 사용되지 않고 있는 기법이다.

C 커플러 형태의 정전용량 센서를 이용한 방식은 독일의 L社 등의 제품이 있으나 측정은 쉬우나 신호 해석이 어렵고 주변 노이즈의 영향을 많이 받아, 초창기 다양한 분석메뉴와 화려한 화면으로 주목받은 후에 실제 현장 도입 후 진단 및 분석에 많은 어려움을 주기도 하였다.

HFCT를 이용한 진단기법은 다양한 방식으로 많



은 제품이 나와 있는 방식이다. 케이블 절연 열화 시 발생하는 누설전류가 접지선으로 흐르는 것을 20 Mhz-30 Mhz의 HFCT를 이용하여 접지선에서 측정하는 방식으로 측정의 위험성도 적으며, 낮은 주파수 대역인 까닭에 하드웨어적인 처리가 용이하여 폭넓게 현장 적용되고 있다. 그러나 이 방식은 주변의 순환 전류 등이 흐르지 않는 실험실 환경에서는 아주 뛰어난 측정 기법이나 실제 현장에서는 다양한 원인으로 인해 접지선에 순환 전류들이 흐르고 있는 까닭에 실제 부분방전에 의해 발생하는 누설전류와 순환전류의 구별이 쉽지 않다. 이런 단점을 보완하기 위해 일부 진단장비 제작사에서는 케이블 R, S, T 접지선에 HFCT 3개를 동시에 걸어 측정되는 신호의 동시성과 차이점을 구별하여 분석하기도 하며, 주파수 FFT분석 통해 진성 부분방전 신호와 노이즈를 구별하기 위한 노력을 하기도 하며, 측정 신호의 파형 모양을 보고 구분 하는 시도를 하기도 하나 해석에 어려움이 많다.

그림 1은 국내 산업계에서 케이블 부분방전 활성 측정에 많이 사용하고 있는 스위스 O사의 제품의 부분방전 분석 화면이다. 이 제품은 R, S, T상 접지선에 HFCT를 동시에 걸어 측정신호의 벡터 차이를 이용하여 분석하는 장치이다. 케이블에 상시 흐르는 순환전류인 경우 3상 접지선 모두에 같은 위상으로 전류가 흐를 것이고, 방전신호의 경우는 3상에서 동시에 발생하기는 드물며 한상에만 신호가 크게 나올 것이라는 가정 하에 만들어 진 장비이다.

그림 2는 전력케이블에 측정 시 노이즈인 경우 3

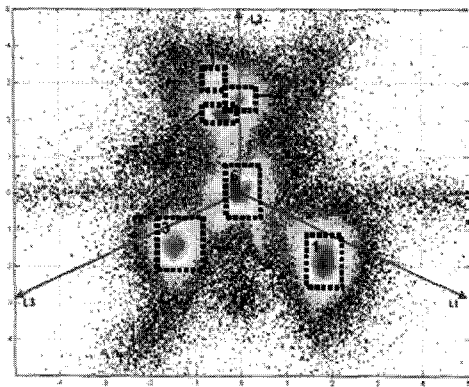


그림 1. 스위스 O사의 PD분석 화면.

상에 동시에 노이즈 신호가 들어와 3상의 벡터의 합은 제로가 되어 노이즈로 판단하는 화면이며, 그림 3은 실제로 R상 케이블에 부분방전이 발생한 경우로 R상 접지선에서 측정된 HFCT 신호는 크게 나오나, 나머지 상의 신호는 상대적으로 적게 나오거나, 측정되지 않아 벡터의 합이 제로가 아닌 특정 점으로 이동하게 되어 이것을 근거로 부분 방전신호로 판단하는 방식이다. 그러나 방전량이 클 경우 3상에서 동시에 측정될 수도 있으며, 현장 접지선에 순환전류가 방전신호보다 많이 흐르는 경우에는 측정이 힘들 수 있는 단점이 있다.

그림 4는 이태리 T사의 부분방전 분석 화면이다. 이 제품 역시 기본적으로 HFCT를 이용하여 측정 및 분석을 한다. T사 제품의 특징으로는 크게 두 가지로 Time-Frequency joint Map (이하 TF 기법)을 그려 분석하는 기법과 결합의 위치 파악이 가능하다고 주장

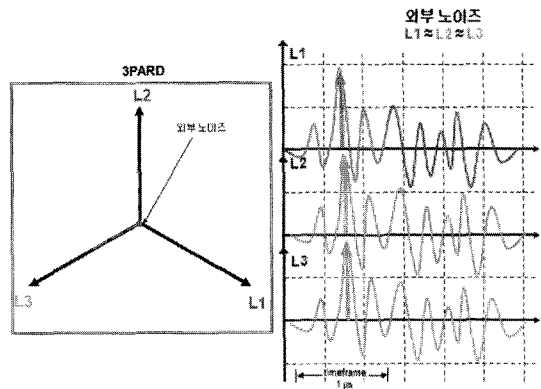


그림 2. 노이즈인 경우 3상 HFCT 측정데이터.

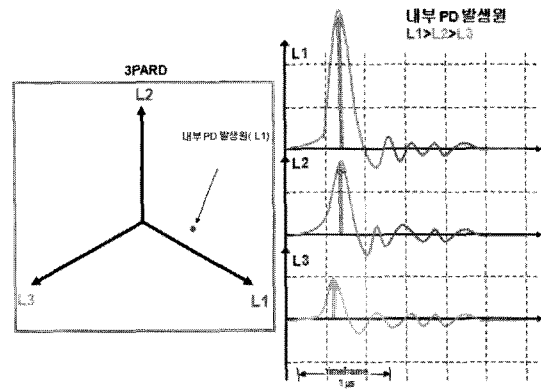


그림 3. L1 (R상)에 부분방전 발생 시 HFCT 측정데이터.

하고 있다. TF 기법은 부분방전 신호 해석하는 가장 최근의 기법으로 PRPD (Phase Resolved Partial Discharge, 패턴 분석), 신경회로망을 이용한 분석법, 카오스 분석법 이후에 나온 분석법으로 시간과 방전 주파수의 상관성을 분석한 것으로 부분방전 신호인 경우 그림 4의 A 부분처럼 특정 영역에 집중해서 점이 찍혀지며 노이즈 신호인 경우는 점이 산재되어 있는 것을 볼 수가 있다. 유럽을 중심으로 약 5-6년 전부터 연구되었던 것으로 이 분석기법 역시 노이즈와 신호가 섞여있는 현장 적용에는 판정의 어려움이 있다.

그림 5와 그림 6은 T社 제품의 HFCT를 통해 측정된 부분방전신호와 노이즈신호를 보여주고 있다. 앞에 언급한 것처럼 HFCT를 이용한 분석의 기법 중에 측정신호의 파형 모양을 가지고 분석하는 것으로 부분방전 신호의 경우 그림 5와 같이 큰 신호 뒤에 잔펄스들이 생기는 삼각파 형태의 파형을 대부분 가지고 있으며, 노이즈 신호인 경우 그림 6과 같이 삼각파의 형태가 아닌 중간 부분의 신호가 큰 형태의 파형을 보이고 있다. 추가로 T社 제품은 HFCT를 전력설비 구간별로 걸어 각 CT에서 입력되는 방전신호의 시간 차이를 비교해서 방전원의 거리를 알아낸다고 주장하고 있다. 그러나 정전상태에서의 케이블 결합의 위치에 대한 파악 등은 많은 연구를 통해서 정립화되어 현장 적용이 되고 있으나, 활선상태에서는 신뢰성 있는 연구 결과와 제품은 아직 나와 있지 않는 상태이다. 실제 케이블 제작사에서도 고장점에 대한 탐지 장비는 실제사고가 발생된 이후 고장 개소를 파악하기 위한 장치로 사용하고 있는 실정이다. 따라서 활선 상태의 방전원의 거리를 알아낸다는 것은 현재의 기술수준에서는 산업체에 적용 시 많은 논란과 어려움이 있을 것이라 생각된다.

UHF 센서를 이용한 부분방전 진단 기법은 최근 각광받는 진단기법으로 이미 가스절연개폐장치(GIS)에 적용을 통해 검증되었고, 새롭게 대용량 유압변압기에 적용하려 하고 있는 기법이기도 하다. UHF 센서를 이용한 진단은 측정이 간단하고 파형의 분석이 이미 많은 사례를 통해서 표준화되어 있어 약간의 전문지식을 습득한 관리자라도 쉽게 부분방전 신호의 해석이 가능한 기법이라 말할 수 있겠

다. 이 기법은 현재도 지속적으로 연구 및 활발히 발전 및 제품화되어 가고 있는 것으로 이 기법을 이용하여 케이블 활선 진단에 적용되어 방전의 여부 및 방전의 종류파악이 가능하여 방전의 위치의 개략적 추정이 가능케 하는 기법이라 할 수 있겠다.

그림 7은 한국 N社 UHF 센서를 이용하여 케이블 진단 측정 화면이다. UHF 센서를 이용한 진단 기법은 PRPD 분석기법을 이용하여 주기적으로 발생하는 방전신호를 누적하여 분석하는 기법으로 부분방전원에 따라서 다양한 모양이 표현되어 쉽게 방전신호의 판단이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그림 7

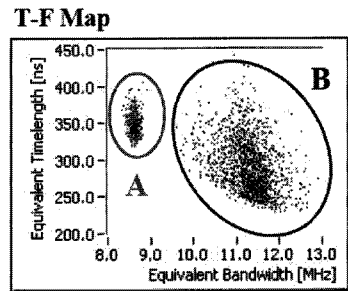


그림 4. 이태리 T社의 부분방전 분석화면.

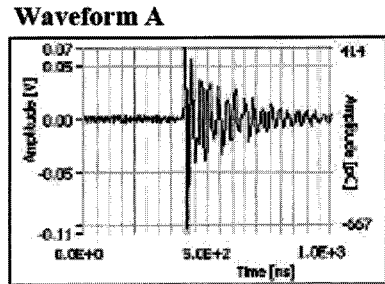


그림 5. HFCT 부분방전 신호.

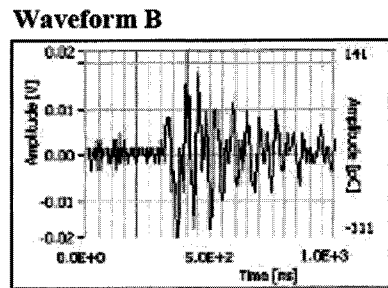


그림 6. HFCT 노이즈 신호.



은 실제 현장에서 측정된 화면으로 케이블 절연체 (XLPE) 내부 보이드 (Void) 결함을 발견한 예이다.

그림 8과 9는 UHF 측정기법을 이용하여 부분방

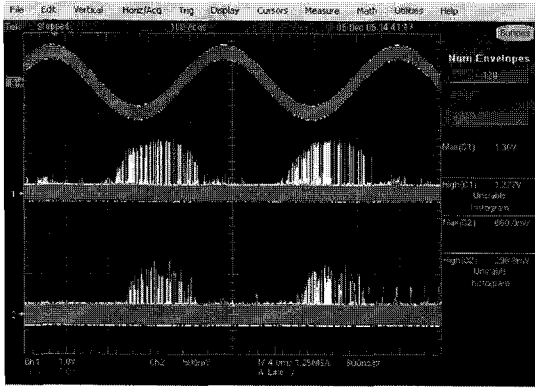


그림 7. 한국 N社 제품의 부분방전신호 분석화면 (보이드 방전).

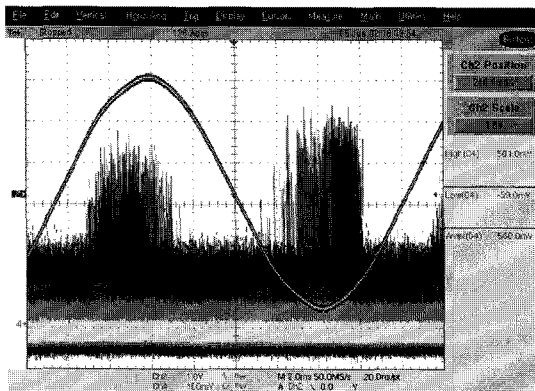


그림 8. 코로나 방전 측정화면.

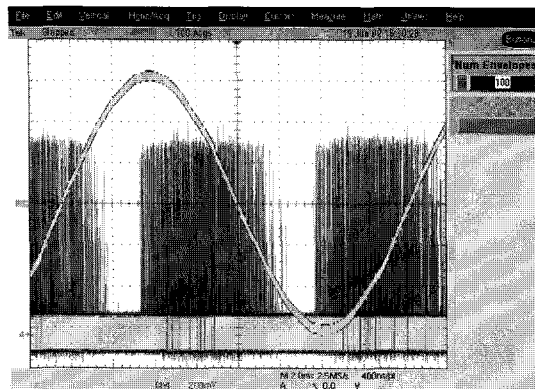


그림 9. 플로팅 방전 측정화면.

전을 측정한 예로 그림 8은 코로나 방전이 발생하였을 때의 PRPD 패턴이며, 그림 9는 케이블 접속부에 볼트가 느슨해졌을 때 발생하는 부분방전의 전형적인 파형의 예이다. 그림 7~9를 비교해 봤을 때 측정 파형의 모양만 보고서도 쉽게 부분방전 여부 및 결함의 원인을 파악할 수 있는 장점이 있다.

3. 현장 전력케이블 활선 부분방전 측정 예

대규모 공장 등 수용가 전기 관리자들의 가장 큰 관심사 중의 하나는 전력 케이블의 효과적인 관리라 할 수 있겠다. 국내에서는 대규모 공단의 대기업 중심으로 전력케이블의 활선 진단이 활발히 이루어지고 있다. 다음의 사례들은 필자가 직접 UHF 센서를 이용한 케이블 진단 기법을 이용해서 측정하여 개선된 사례들이다.

3.1 중국 광저우 OO 공장 케이블 부분방전 측정신호

그림 10은 부분방전이 발생하지 않는 건전 상태 케이블의 UHF 측정신호이며 그림 11은 실제 현장에서 측정된 부분방전 신호로 플로팅 부분방전 형태를 나타내고 있다. 이곳은 측정 이후 플로팅 방전임을 관리자에게 알렸고, 2주 후 전기관리자는 정전 후 케이블 접속부의 볼트 조임을 점검 후 느슨해진 것을 발견하여 조치하였고, 그 후 다시 2주 후 재측정을 통해서 그림 12와 같이 부분방전 원인을 해소하여 사고를 예방한 사례이다.

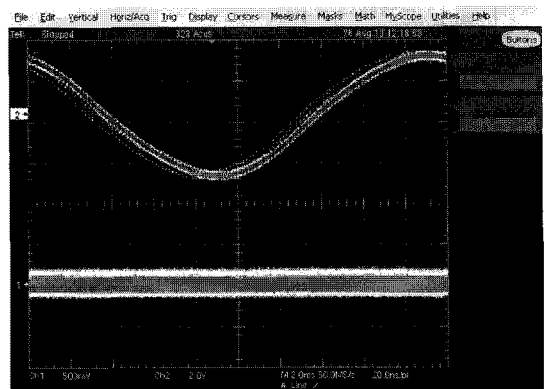


그림 10. 케이블 건전상태에서의 신호.

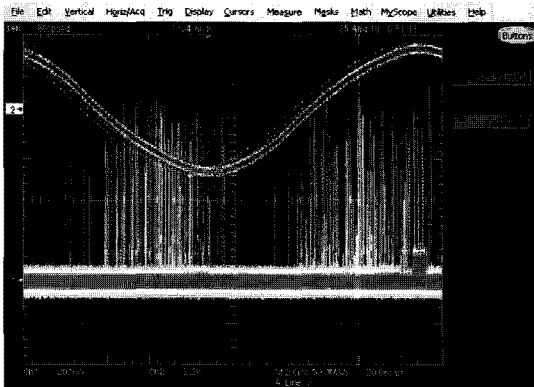


그림 11. 플로팅 부분방전 발생신호.

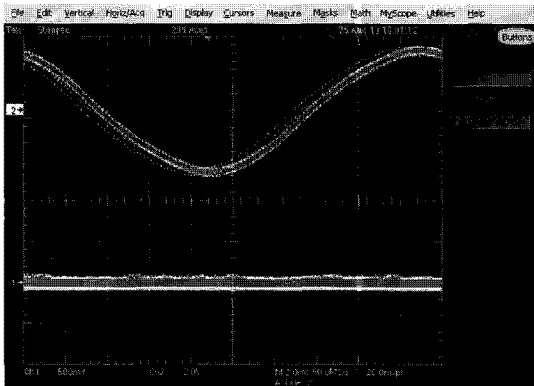


그림 12. 점검 후 측정화면.

3.2 대만 T반도체 공장 케이블 진단 부분방전 측정 신호

그림 13은 케이블 내부 보이드 방전이 발생되고

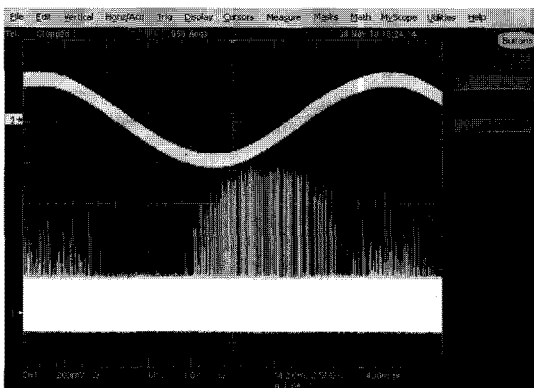


그림 13. 보이드 방전 측정화면.

있는 측정 신호로 케이블 절연물에서 발생하는 방전 초기 형태입니다. 값은 미약하나 절연물의 사고는 급속히 진행되는 경우도 있어서 3개월 내 재측정 후 동일 신호 발견 시 정전 작업 후 케이블 교체토록 제안한 곳입니다.

3.3 구미 OO 공장 케이블 진단 부분방전 측정신호

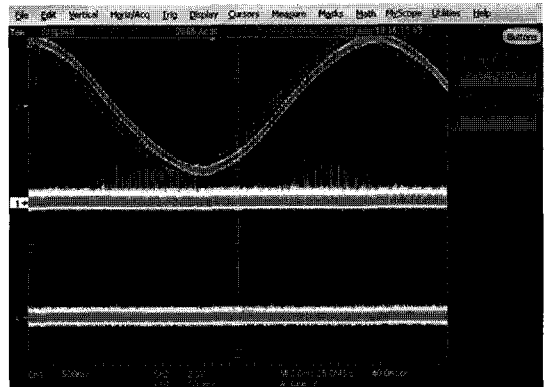


그림 14. 보이드 방전 측정 화면 .

구미 OO 공장 케이블 UHF 측정화면으로 보이드 방전이 발생하고 있는 화면으로 3개월 내에 재측정 후 이상 발생 시 케이블 교체가 가능하면 교체 하며, 그렇지 못한 경우 상시 온라인 감시장치를 설치하도록 제안한 곳이다.

4. 전력케이블 위험도 분석 및 효과적인 관리 기법

정전이 불가능한 전력케이블을 효과적으로 관리 하고 위험도를 분석하는 것이 중요하다

아래는 필자가 실제 현장 진단을 통해서 전기관리자들에게 제공하고 있는 분석 및 관리기법이다.

위험도는 5단계로 체계적으로 분석이 필요하다. 각 등급에 대해서 설명하면 A등급은 어떠한 신호도 발견되지 않는 정상 상태의 신호이며 B등급은 신호가 측정이 되었으나 분석결과 노이즈 신호로 부분방전이 발생되고 있지 않다는 것이며, C등급부터는 부분방전이 발생되고 있으며 이에 따른 등급별 대책을



표 1.

위험도 등급	A등급	B등급	C등급	D등급	E등급
판정 기준	부분방전 신호 측정 안됨, 정상		부분방전 신호 지속 측정됨		
	잡음 신호 측정 안됨	잡음 신호 측정됨	코로나 방전 초기, 중기	코로나 방전 중기	코로나 방전 말기
			플로팅 방전 초기	플로팅 방전 중기	플로팅 방전 말기
절연물 방전 초기	-	절연물 방전 중기, 말기			
등급별 대책	-	-	<ul style="list-style-type: none"> 정전 후 배전반 내부 분진 제거(Air), 케이블 헤드 절연 테이핑 처리 점검 및 보강, 볼트 조임 점검 정전 작업 불가 경우 온라인 장비 도입하여 지속감시 필요 On-Line 도입 불가 경우 6개월 단위 PD 진단 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 정전 후 점검 방법은 C등급과 동일 정전 불가 시 반드시 온라인 장비 도입하여 지속감시 On-Line 도입 시까지 1개월 단위로 PD 진단 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 즉시 정전 후 원인 파악 필요 사고 위험 대

설명하고 있다. 방전의 종류에 따라서도 위험도를 각각 달리 평가하였다. 또한 1회성 측정이 아니라 이상 신호 발생된 개소에 대해서는 등급별로 1개월에서 6개월 사이에 재측정의 기준도 마련하였고 즉시 정전이 불가능 한 경우 On-line장비를 부분 적용하여 효과적으로 관리할 수 있게 표시 하였다.

5. 결론

전력 케이블의 효과적인 관리를 위해서는 부분방전 활성 진단기법이 활발히 적용되고 있고 새로운 장비들이 많이 나오고 있다. 그러나 대부분의 장비들은 HFCT와 C커플러를 기본 센서로 하는 장비로 접지선을 통한 분석의 한계로 인해서 측정은 쉽지만 분석이 어려운 점이 있다. 따라서 전력 케이블의 효과적인 진단을 위해서는 다양한 기법들 (HFCT, UHF)을 적용하여 상호 체크해서 파악하는 것이 효과적이다. 이를 통해 각각의 기법들이 공통적으로 부분방전이라고 분석되었을 때 비로소 조치하는 것이 바람직하다 생각된다. 또한 케이블 온라인 장비

의 전면적 공장 도입을 통한 예방 진단은 현재의 국내 · 외 제품 수준을 고려하여 좀 더 신중한 검토가 필요하다 생각되며, 대규모 공장 등에 온라인 장비를 적용코자 할 때에는 1차로 진단 전문회사를 통한 활성 케이블 부분방전 진단으로 이상개소를 파악하고 이상 개소를 파악 후, 그 개소의 정전 작업 시까지의 사고 위험에 대비 감시 목적으로 적용하거나, 이상 개소로 파악되었으나 정전이 불가능한 개소에 대한 감시 차원에서 일부 도입을 하는 것이 바람직하다 생각된다. 케이블 예방진단은 중요성에 비해서 아직 많은 노력이 필요한 분야이다. 적절한 진단기법의 선정과 전문 진단회사 선정 그리고 신뢰성 있는 온라인 장비의 도입, 전문가의 적절한 판단 등의 복합적인 요소들의 결합으로만이 사고 예방과 신뢰성 있는 현장적용이 가능하다 생각된다.

참고 문헌

- [1] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment"
- [2] B. F. Hampton and R. J. Meats, " Diagnostic measurement at UHF in gas insulated substations". IEE Proc., Vol 135, Pt. C, No. 2, Mar., 1988.
- [3] 윤진열, 박기준, 구선근 " GIS 부분방전 검출기술 연구" TR.98PJ04.]2002.407
- [4] TechImp Diagnostic and Asset Management Technology Homepage

저자약력



성 명 : 이영상

◆ 학 력

- 1997년 광운대학교 공과대학 전기공학과 공학사
- 1999년 광운대학교 대학원 전기공학과 공학석사
- 2010년 광운대학교 대학원 전기공학과 공학박사

◆ 경 력

- 2005년 - 현재 (주)넥시그마 대표이사
- 2010년 - 현재 (주)한국전기기술 기술이사