

가스절연개폐장치(GIS)의 예방 진단 기술

■ 윤진열 / 한전 전력연구원 전력계통연구실

서 론

가스절연개폐장치(GIS : Gas Insulated Switchgear)가 최초로 개발되어 전력계통에 설치되어 운전을 시작한 이후 많은 변화를 거듭하여 오늘에 이르렀고, 우리나라는 한국전력에서 1980년대 초에 외국에서 수입하여 운전을 개시한 후 이제는 765 kV 변전소까지 국내에서 생산한 GIS를 설치하여 2002년부터 상업운전에 들어갔다.

GIS는 종전의 open terminal type 변전기기에 비해 여러 가지 장점을 갖추고 있다. 즉 기기 신뢰도가 높고 유지보수가 간편하며 고장이 적고 설치 공간이 작고 민감한 주변환경에도 설치가 가능하다는 점 등으로 인해 변전소 무인운전에도 유리하고 대도시 지역에 특히 적합하여 오늘날 우리나라뿐만 아니라 대부분의 국가에서 발전소와 변전소는 거의 다 GIS로 변전설비를 구성하고 있다. GIS가 많은 장점을 가지고 있기는 하지만 몇 가지 단점도 있다. 즉, 가격이 비싸고 고장이 한번 나면 전력계통에 미치는 영향이 크고 복구에도 많은 비용과 시간이 소요되며 재산상의 손실도 크다.

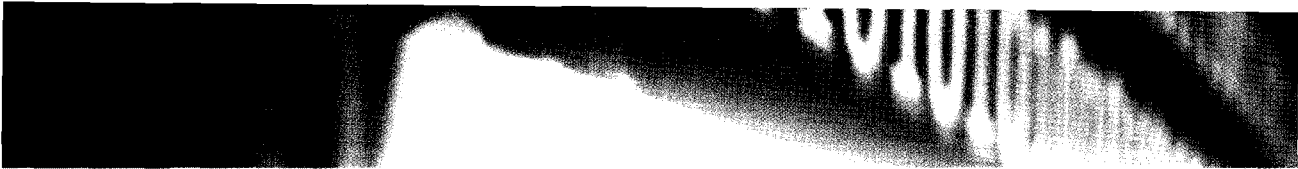
GIS는 원주형 금속전극으로 둘러싸인 기밀구조 내에 여러 종류의 전기기기를 내장하는 구조로 만들어져 있기 때문에 사용전압이 높을수록 고장발생 회수가 기하급수적으로 증가하는 경향이 있다. 또한 GIS 설계목표가 maintenance free이기는 하지만 실제 운전과정에서 이 목표가 달성되기는 현실적으로 불가능하다. 우

리나라의 경우 그동안 GIS 설비 수량이 꾸준히 증가해 왔을 뿐만 아니라 운전전압도 765 kV 까지 높아져 전력계통을 운영하는 데에 있어서 GIS가 일으키는 고장을 해결하는 일이 중요한 문제로 대두되고 있다.

국외로 눈을 돌려보면 GIS 고장을 예방하기 위한 연구개발을 꾸준히 진행해왔고 오늘날에 와서는 유럽과 일본에서 개발한 신기술이 상당한 수준까지 고장예방 실적을 거두고 있다. 그러나 아직은 최신품인테다 현장 적용역사가 짧아 설비 운전자가 만족할만한 수준까지는 도달하지는 못했으며 추가로 해결해야할 과제가 많이 남아있다. 아직은 GIS 고장예방 기술이 세계 모든 나라에서 적용할 만큼 보편화 된 수준까지는 도달하지 못하였다.

변전소 준공시에 GIS에 가하는 가혹한 전기적 시험 과정, 또는 설치 후 운전 중에 GIS에서 발생하는 고장은 흔히 있을 수 있지만 어느 나라나 할 것 없이 아직까지는 GIS 고장을 예방하기 위한 확실한 수단을 갖고 있지 못해 고장에 대해 거의 무방비 상태였다고 할 수 있다. 우리나라는 2002년부터 송전 최고전압을 765 kV로 운전하다보니 GIS 예방진단 기술을 개발할 필요성이 더욱 절실하게 되었다. 이러한 여건변화는 우리나라에서도 90년대 후반부터 GIS 예방진단기술을 개발하게 된 계기가 되었다.

지금까지 많은 학자들은 GIS의 결함을 검출하기 위한 방법을 다양하게 제시하여왔다^{1,2,3}. 아울러 현장에 적용하기에 적합한 기술을 선정하기 위한 검증 노



력이 CIGRE를 중심으로 진행되어 왔다. 그 결과 CIGRE 전문 분과그룹인 SC15, SC23, SC33에서 바람직한 GIS 예방수단으로 전기적 신호로는 UHF신호 진단법을 사용하고, 기계적 신호로는 음향신호 진단법을 병행할 것을 추천한 바 있다[4,5]. 또한 한국전력에서도 연구결과를 통해 GIS 고장예방 주 수단으로 UHF신호 진단법을, 보조수단으로 음향신호 진단법을 제시한 바 있다[6].

GIS 결함을 진단하는 수단을 상시감시 방식(시스템을 고정 설치하는 방식)과 이동감시 방식(휴대형 장비를 사용하는 방식)으로 대별한다면 UHF 진단법은 상시감시 및 이동감시 둘 다 적용이 가능한 반면 음향법은 신호 전파특성이 불리하여 이동감시 방법으로 적용하는 것이 일반적이다. 음향신호 방법은 UHF 진단법에 비해 기술적으로 간편하다보니 세계 여러 제작사에서 다양한 형태의 음향신호 진단장비를 개발하여 공급해 왔다.

UHF 신호 진단법은 GIS 내부에 있는 결함에서 일어나는 부분방전(PD : Partial Discharge)으로부터 발생하는 전자파를 검출하는 방법이고 음향신호 진단법은 결함에서 발생하는 기계적 신호음을 검출하는 방법이다 보니 2종의 진단기술은 GIS 내에서 발생할 수 있는 다양한 종류의 결함들 중에서 각각 상대적으로 보다 잘 검출할 수 있는 결함들이 있을 수 밖에 없다. UHF신호 진단법은 현장에 적용된지 10여년 정도로 역사가 오래 되지 않은 기술이지만 음향신호 진단법에 비해 상대적으로 검출할 수 있는 결함의 종류가 훨씬 광범위하다.

이 글에서는 유용성이 입증되어 근년에 들어와서 세계 각국으로 광범위하게 확산되고 있는 UHF 신호 진단법에 대해 기술의 원리와 센싱기술, 시스템기술, 결함원인분석 기술, 위험도 평가기술, 국내 적용현황 등에 대해 국내에서 이루어진 연구결과를 바탕으로 외국 기술도 부가하여 기술전반에 대하여 기술하고자 한다.

UHF PD신호측정 기술의 원리

GIS 내에 전기적인 결함으로는 도전성 파티클이나

부유전극, 돌출전극, 절연체 내 공극 등이 다양하게 존재할 수 있다. GIS 내 전극에 고전압이 인가되면 이러한 결함들은 대부분 부분방전 현상을 수반하게 된다. 이렇게 생성된 부분방전에 의해 전자파가 발생하여 밀폐공간 내에서 GIS 길이방향으로 빛의 속도로 전파하게 된다. 전자파는 TEM, TE, TM mode가 복합된 형태로 전파하면서 전파손실과 함께 반사, 굴절, 회절현상을 겪게 된다[7]. 이때 GIS 내부 혹은 외부에 설치된 안테나의 일종인 전자파 검출센서를 이용하여 부분방전의 존재를 검출할 수 있다.

부분방전에 의해 만들어진 전자파의 주파수 대역은 수 MHz 에서부터 수 GHz에 이르기까지 방법위한 분포를 보인다. 변전소는 고전압이 인가된 설비들이 밀집된 공간이어서 코로나 방전 현상이 대기 중에서 활발하게 일어나며, 따라서 전자파 신호도 밀집되어 있다. 대기 중에 발생하는 코로나 방전은 대체로 수 백 MHz 이하 영역에 분포되어 있으므로 GIS 내부에 있는 부분방전 현상을 전자파 센서로 검출하려면 대기 중 코로나 방전의 주파수 대역보다는 높은 주파수 대역을 검출대상 주파수로 하는 것이 잡음 억제 측면에서 유리하다. 그러나 센서의 특성을 너무 높은 주파수 대역까지 확장시켜 놓으면 신호처리 측면에서 불리하므로 적절한 범위로 한정시킬 필요가 있다. 그러다보니 대부분의 UHF 신호용 센서의 검출대상 주파수 대역은

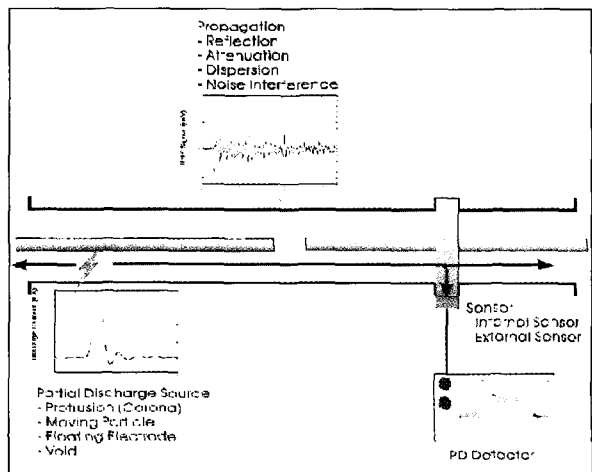


그림 1 UHF 신호측정기술의 원리

UHF 주파수 대역(300~3,000 MHz) 범위 내인 300 MHz ~ 2,000 MHz 범위로 한정하고 있다.

이러한 과정을 거쳐 검출된 전자파 신호는 진단시스템에서 적절하게 처리되어 사용자가 원하는 방법으로 표현하게 된다. 그림 1은 부분방전 발생과 전자파의 전파, 절연체 외부에 설치된 UHF 센서를 통해 GIS 내 부분방전 결합을 검출하는 원리를 개념적으로 설명하고 있다.

UHF PD 신호검출용 센서

UHF 부분방전신호 검출용 센서는 설치위치를 기준으로 크게 2종으로 대별할 수 있다. 하나는 GIS 내부에 설치하는 내장형이고 다른 하나는 GIS 외부에 설치하는 외장형이다. 외장형은 스페이스 표면에 설치하는 형과 점검창에 설치하는 형으로 나눌 수 있다. 이 외에도 드물기는 하지만 스페이스 제작시 에폭시 절연체 내부에 센서를 배치하는 형태도 있다. 내장형은 전자기적으로 차폐된 공간인 GIS 내부에 설치되므로 외장형에 비해 잡음 측면에서 유리하고 검출감도가 우수한 반면 GIS를 제작할 때부터 센서를 내장시켜야하는 불편함이 있다. 외장형은 운전 중인 GIS에도 설치가 가능하므로 편리하기는 하지만 잡음에 상대적으로 취약하고, 센서 감도 측면에서 불리하며, 미관도 내장형보다는 좋지 않다. 따라서, 신설 GIS는 내장형을 설치하고, 기설 GIS는 외장형을 사용하는 것이 일반적이다. 센서

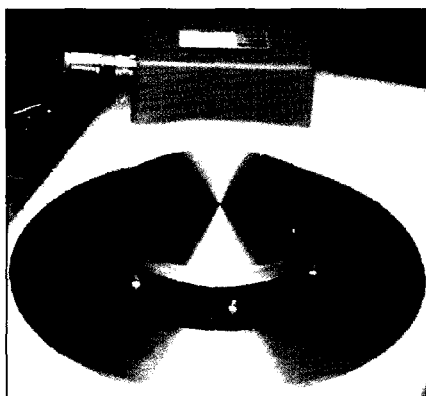


그림 2 내장형 센서(아래)와 외장형 센서(위)의 예



그림 3 외장형 센서 설치 모습

가 갖춰야 하는 성능 기준은 회사마다 사용여건이 다르고 기술방식이 서로 달라 차이가 있다. 예를 들면 영국 NGC (National Grid Company)는 effective height 크기로 센서감도 기준을 정하고 있으며 일본의 Hitachi사는 회사 내부에서만 통용되는 기준을 독자적으로 운영하고 있으며 그 내용은 알려지지 않고 있다.

참고로 한국전력 765 kV 변전소 GIS에 적용하는 내장형 센서가 갖추어야 할 주요성능 일부를 발췌하면 다음과 같다.

- 주파수 범위는 300~3,000MHz 범위에서 밴드 폭은 연속하여 1,000 MHz 이상
- 감도는 감시영역에서 결보기방전 10 pC 의 방전이 발생시 0.01 W 이상의 출력을 가질 것
- 센서 자체가 GIS 설비고장 요인으로 작용하지 않아야 할 것
- 센서의 수명은 자신이 설치되는 GIS의 수명보다 길 것
- 센서의 감도시험은 CIGRE TF 15/33.03.05에서 제시한 방법[10] 혹은 이와 동등한 방법을 적용하되 10 pC 이상을 검출할 수 있을 것 등이다.

UHF 부분방전 센서의 배치

GIS 내에 부분방전 현상을 빠짐없이 검출하기 위해서는 센서의 감도뿐만 아니라 센서의 배치가 최적으로 이루어져야 한다. 즉 센서의 감도가 좋으면 배치간격을 키워도 되지만 센서감도가 낮을 경우 배치 간격을 작게 해야 한다. 물론 신호전파 손실이 큰 구간인 차단부와 같은 데에는 배치 간격을 작게 하는 데에는 한계가 있다. 따라서 최적의 센서 배치라 함은 GIS 내 부분방전을 빠짐없이 검출하면서도 센서 수량을 최소한으로 배치하는 기술이며 이는 GIS 운영자의 입장에서는 대단

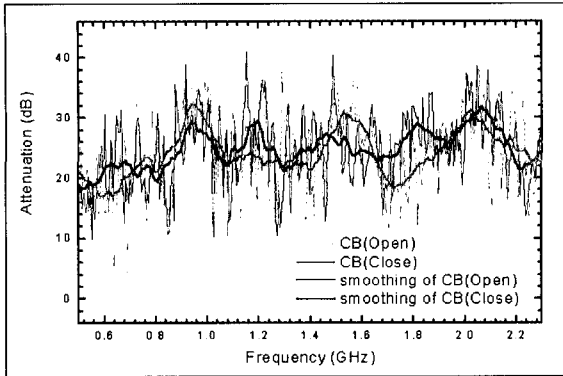
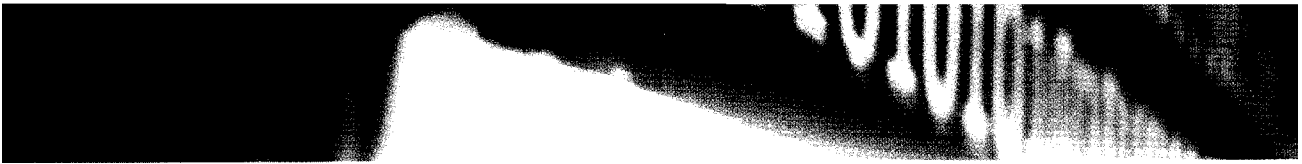


그림 4 차단부에서의 방전신호 전파손실 예

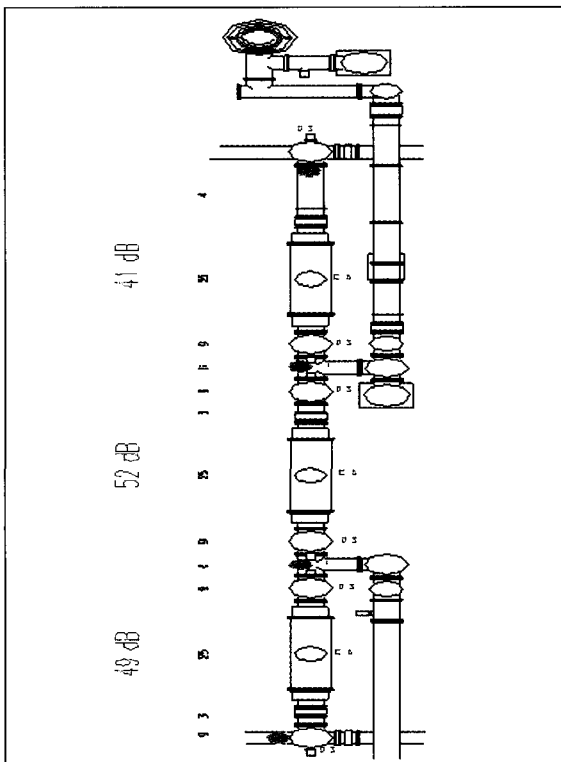


그림 5 GIS에 배치한 센서 최적위치 상세도

히 중요하다. 왜냐하면 센서마다 후단에는 신호처리 장치가 신호케이블을 통해 연결되므로 센서 개수는 설비 투자비와 유지보수비용에 큰 영향을 줄 뿐만 아니라, 변전소 미관에도 영향을 준다. 센서 배치는 진단장치 공급자와 운영자 간에 상호 이해가 상반되므로 민감한 부분에 해당한다.

센서 위치를 선정하는 방법으로는 실제로 센서를 설치할 GIS의 다양한 모양을 갖는 구간마다 전자와 전파 손실 크기를 실측하여 데이터를 확보한 후 센서의 감도와 신호 케이블의 손실, 신호 처리장치의 최소입력 신호크기를 고려하여 정해야 한다. 그림 4는 GIS 차단부에서 발생하는 전파손실을 측정 한 하나의 예이고 그림 5는 센서 배치 위치가 표시된 GIS 일부를 보이는 그림으로서 각 구간별 숫자는 해당구간 전파손실의 평균 크기를 나타내고 있다.

UHF PD 예방진단 시스템 기술

예방진단 시스템은 여느 시스템과 마찬가지로 하드웨어 부분과 소프트웨어 부분으로 나눌 수 있다. 하드웨어는 GIS 센서마다 근처에 설치된 신호처리장치와 이들 장치들이 연결된 network 회로, 변전소 건물 내에 있는 컴퓨터와 제어장치, 변전소 외부 원격지로 연계시키기 위한 장치 등으로 구성되는 것이 일반적이다. 소프트웨어는 신호의 취득과 처리, 저장, display, 원격지 수송 등의 기능을 담당하는 것을 기본적으로 갖추고 있으며 결함종류를 분석하는 기능을 포함하여 더욱 진전된 기능을 갖춘 제품도 공급되고 있다.

결함종류 분석기술

예방진단 시스템은 GIS 내부에 결함이 발견되었을

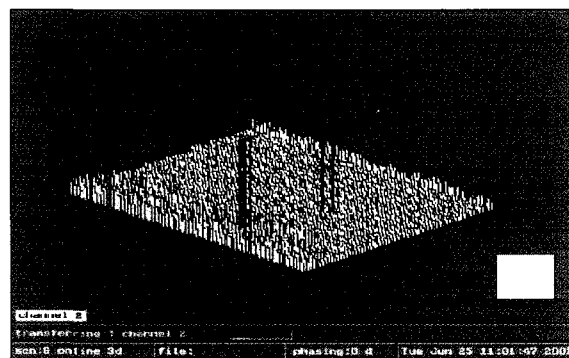


그림 6 Corona와 부유전극 복합결함을 인가전압 위상에 대해 50 cycle동안 표시

때 이 결함의 종류를 파악하는 기능을 추가적으로 갖춰야 한다. 결함의 종류에 대한 정보는 GIS를 개방하여 결함을 제거하고자 할 때 매우 중요한 자료로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 고장으로 진전될 가능성과 고장이 언제쯤 발생할 것인가를 평가하는 데에도 중요한 자료가 된다.

결함 종류를 파악하는 일보다도 선행되어야 할 일이 측정된 신호에서 잡음을 구별하는 기술과 이를 제거하는 기술이다. 근래에 시중에 공급되는 진단 시스템은 잡음 처리 성능에 의해 제품 성능이 평가받을 정도로 잡음 처리 또는 억제기능은 중요하다. 잡음을 처리하는 방법은 매우 다양하며 제작사마다 자기 특징적인 방법을 사용하고 있다.

결함의 종류를 분석하는 방법은 여러 제작사들이 다양한 방법을 복합적으로 사용하고 있다. 기본적으로는 PRPD(Phase Resolved Partial Discharge)와 PRPS(Phase Resolved Pulse Sequence), 통계처리, Trend 분석법을 사용하고 Neural Network을 적용하는 것이 보편화 되

어있다. 그림 6은 PRPS의 한 예를 보인 그림으로 1초 동안 발생한 부분방전 신호를 인가전압 위상 대비 신호크기를 보여주고 있다.

결함위치 판정법

GIS 내에 결함이 발견되었다면 결함의 위치를 정확히 알아내는 일은 중요한 일이다. 왜냐하면 GIS 내 결함 대부분은 지극히 미세하므로 결함을 제거하기 위해 GIS를 개방하였을 때 결함을 짧은 시간 내에 찾아내기란 여간 어려운 일이 아니다. 결함을 찾아내어 제거하는 데에 소요되는 시간은 전력계통 신뢰도에 심대한 영향을 끼친다. 결함의 위치를 찾아내기 위하여 2개 이상의 센서에 부분방전 신호가 도착하는 시간차를 이용하여 위치를 계산하는 방법을 적용하고 있다. 이 방법은 정확도가 높기는 하지만 고성능 오실로스코프로 현장에서 일일이 측정해야하는 수고가 따른다. 그림 7은 2개의 센서에 도착하는 신호의 시간차로부터 부분방전 발생위치를 계산하는 방법을 설명한 그림이다. 그림 8은 두개의 센서에서 실제로 측정된 신호가 시간차를 가지고 있음을 보여주고 있다. 이 외의 방법으로는 신호가 전파하면서 GIS 내 여러 부품과 기기들을 거치면서 생기는 손실 크기를 이용하여 2개 이상의 센서에서 검출된 신호 크기로 위치를 산정하는 방법이 있다. 이 경우에는 위치 판정 기능을 진단시스템 내에 내장시킬 수 있는 이점이 있기는 하지만 신호 전파 경로 전부에 대한 손실크기에 대한 정확한 데이터를 확보해야만 가

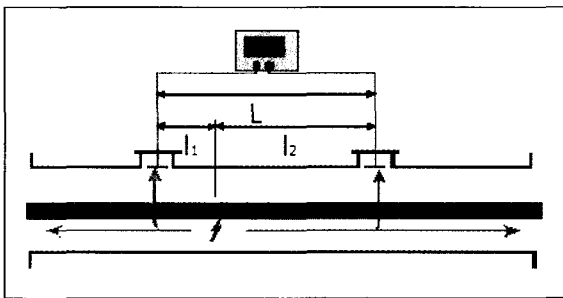


그림 7 부분방전 위치계산 개념도
 $l_1 = (L - 0.3\Delta t) / 2$ [m], Δt : [ns]

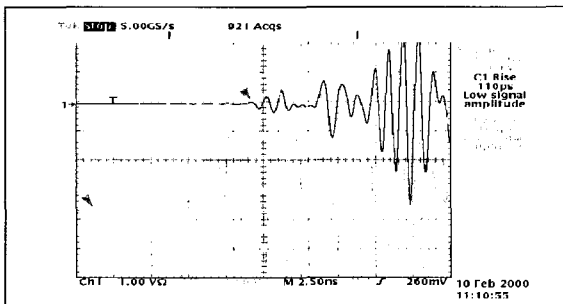


그림 8 두 센서에 도착한 신호의 시간차 예

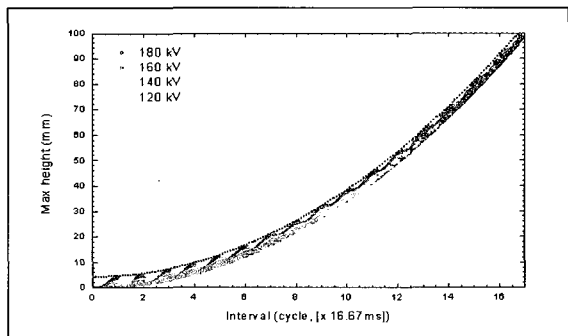
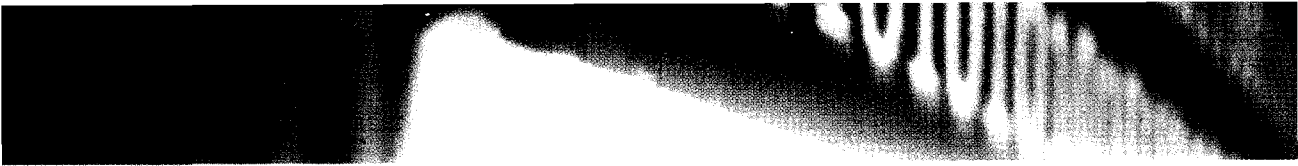


그림 9 도전성 파티클의 바닥과의 충돌 시간간격으로부터 최대 상승높이 계산



능하다는 단점이 있다.

위험도 평가 기술

결함의 종류와 위치가 판명되었다면 GIS 고장으로 연결될 가능성과 고장발생 때까지의 시간을 예측하는 위험도 평가 능력은 전력계통 운영 측면에서 매우 필요하다. 고장발생 위험도를 평가하는 데에는 결함의 종류와 결함의 위치가 중요한 요소로 작용한다. 이 분야는 가장 어려운 기술로서 국내외적으로 크게 진전을 이루지 못하고 있다. 그 이유는 결함의 종류는 다양하고 결함의 위치도 다양하며 결함이 놓인 전기적, 환경적 조건도 다양하기 때문이다. 도전성 파티클 결함을 예로 들면, 자유롭게 움직일 수 있는 도전성 파티클이 GIS 하부 바닥에 놓여있을 때 일정 전계크기 이상이 가해진 조건에서는 파티클은 전압이 인가된 중앙 도체를 향해 튀어 오르는 운동을 하게 된다. 이 때 파티클이 중앙도체를 향하여 튀어 오르는 높이가 절연과피 고장을 유발하는 데에 결정적 요소로 작용한다^{8,9)}. 이 높이는 전계의 세기와 파티클 재질, 전극 표면처리 등 여러 요소에 의해 결정되어진다. 그림 9는 도전성 파티클이 바닥 충돌할 때의 시간간격으로 파티클 상승높이를 산출한 그림이다. 이 그림을 이용하면 PD 신호발생 간격으로부터 손쉽게 파티클의 상승높이 계산이 가능하므로 고장발생 위험정도를 판단할 수 있다. 이 경우와는 다르게 파티클이 스페이스 표면에 위치한 상태라면 파티클의 재질과 전계뿐만 아니라 부착위치, 부착방향 등 여러 요소가 고장유발에 대한 변수로 작용하므로 고장예측은 매우 어렵다.

국내적용 현황

한국전력은 1990년대 후반부터 7개 변전소에 영국 DMS사의 UHF PD 상시감시 시스템을 도입하여 시범 운전에 들어가는 한편 765 kV 변전소 GIS에 UHF 상시감시 시스템을 적용할 목적으로 연구에 착수하였다. 지금까지의 연구개발 노력이 성과를 거두어 센서설계

및 제작, 센서 배치기술을 국산화하고 검출된 신호를 해석하는 기술을 확보하여 고장을 예방한 실적이 많으며 위험도 평가기술 분야도 상당한 진전을 이룸에 따라 보다 연구범위를 확대하여 연구를 계속하고 있다. 또한 시범운전 실적을 종합한 결과 상당한 성과가 있었다고 판단하고 2004년부터는 GIS 신설시에 예방진단 기능을 부가할 수 있도록 사전 준비를 갖추는 것을 GIS 구매규격으로 정할 계획이다. 현재 국내에서는 예방진단 시스템을 국산으로 개발하기 위한 연구와 다양한 종류의 고성능 센서를 개발하는 연구, 현장에서 검출된 다양한 형태의 UHF 신호를 해석하는 연구 등이 산업계, 학계, 연구소에서 활발하게 진행되고 있다. 현재의 추세대로 라면 우리나라는 불과 수년 내에 GIS 예방진단 분야에서 국제적으로 뒤지지 않는 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 전망된다.

결 론

지금까지 GIS 예방진단기술에 대한 소개와 함께 UHF PD신호 진단기술에 대하여 기술의 원리와 센서 기술, 센서 배치, 진단시스템, 결함종류 분석, 결함위치 판정, 위험도 평가기술과 국내 적용현황, 국내 기술수준에 대해 간략히 설명하였다.

이상적인 GIS 예방진단 장비라 한다면 최소의 비용과 규모로 설치되어 결함은 빠짐없이 검출할 수 있어야 하며, 검출된 신호가 결함신호인지 잡음인지를 명확히 식별할 수 있어야 한다. 만일 검출된 신호가 결함에 의한 것이라면 결함의 종류와 결함의 상세위치, 위험한 정도, 후속 필요조치 등에 대한 정보를 운전자에게 제공할 수 있어야 한다.

그동안 국내에서는 이상적인 기술목표를 향하여 꾸준히 연구해 왔으며 이제는 센서기술이나 센서 배치, 신호해석기술 등에서 세계적 수준에 도달했다고 볼 수 있으나 진단시스템 기술이나 결함 종류 분석, 위험도 평가 분야는 아직은 미비한 점이 상당부분 있다. 현재 산업계, 학계, 연구계에서 연구개발을 활발히 하고 있으므로 수년 내에 만족할 수준까지 도달할 수 있을 것

으로 전망되며 아울러 이 분야에 국제경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] P. Coventry, B. F. hampton and C. J. Jones, "Ten Yesars Experience with the UHF Method of GIS Partial Diacharge Monitoring", Sixty-Fourth Annual International Conference of Doble Clients, Apr.21-25, Boston, 1997.
- [2] A. G. Sellars, O. Farish and B. F. Hampton, "Assesing the Risk of Failure due to Particle Contamination of GIS using the UHF Technique", IEEE Trans. on Dielectric & Electrical Insulation, Vol. 1, No. 2, April 1994.
- [3] D. Kopetjtkova, T. Molony, S. Kobayashi and I. M. Welch, "A Twenty-Five Year Review of Experience with SF6 Gas Insulated Substations", CIGRE Session Papers, 23-101, 30 Aug.-5 Sept., 1992.
- [4] "Insulation Co-ordination of GIS : Return of Experience, On Site Tests and Diagnostic Techniques", Joint Working Group 33/23.12, Electra No.176, p67-97, Feb. 1998.
- [5] "Partial Discharge Detection System for GIS : Sensitivity Verification for the UHF Method and the Acoustic Method", Task Force 15/33.03.05 of Joint Working Group 15.03 on behalf of SC15 & SC33, Electra No.183, p75-87, Apr. 1999.
- [6] "변전설비 진단기술 개발연구", 한전 전력연구원, p115-121, 1998. 1
- [7] B. F. Hampton, J. S. Pearson, C. J. Jones, T. Irwin, I. M. Welch and B. M. Pryor, "Experience and Progress with UHF Diagnostics in GIS", CIGRE Paper 15/23.03, Paris, 1992.
- [8] A. H. Cookson and O. Farish, "Particle-initiated breakdown between co-axial electrodes in compressed SF6 ", IEEE Trans Power Apparatus and Systems, Vol 92, No 3, pp 871-876, 1973.
- [9] A. G. Sellars, O. Farish, and B. F. Hampton, "Assesing the risk of failures due to particle contamination of GIS using the UHF technique", IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 1, No 2, Apr. 1994.
- [10] CIGRE Task Force 15/33.03.05 of Working Group 15.03, "Partial Discharge Detection System for GIS: Sensitivity Verification for the UHF Method and the Acoustic Method", lectra, No. 183, pp. 75 - 87, April, 1999.