

홍성기능대학 전기과
교수 김 경 화

GIS사고 예방진단법의 최근 동향

1. 서론

최근 산업사회의 발달과 더불어 전력 이용에 있어서도 신뢰성이 높은 양질의 전기에너지를 요구하게 되었고, 인구의 도시집중화 및 도시기능의 다양화로 인하여 특정한 좁은 지역에 대용량에너지의 공급을 요구하게 되었다. 이러한 전력수요에 부응하기 위해서 발전설비 뿐만 아니라 변전기기 역시 용량이 대용량화, 초고압화 되고 있는 추세이다. 따라서, 변전기기에서 사고가 발생하면 정전구역이 넓어지고, 공급지장 및 복구에 따른 경제적 손실 뿐만 아니라 정전으로 인한 생산 차질 및 사회에 미치는 영향이 커지게 되었다.

그러나, 전력설비의 대용량화 고전압화에도 불구하고 부지확보 차원에서 소형화 및 옥내화가 불가피하므로, 운전 및 보수의 간편화, 계통 운용의 신뢰성, 안전성 확보가 요구되는 운전특성이 매우 우수한 고압의 SF₆가스를 절연매체로 사용하는 변전기기의 사용이 늘고 있다.

고압 SF₆ 가스를 절연매체로 하는 대표적인 전력 기기인 가스절연개폐기(Gas Insulated Switchgear : GIS)는 높은 절연내력과 밀폐화에 의한

소형화, 고신뢰화, 환경조화 등의 장점을 가지고 있다.

GIS는 모선, 차단기, 단로기, 접지장치 등을 조합하여, 충전부를 스페이서로 지지하고, 높은 절연내력을 가지는 SF₆ 가스로 금속용기에 밀폐시킨 안전한 고신뢰성 기기이다. 이와 같은 장점 때문에 GIS는 1960년대 말 프랑스에서 변전소에 최초로 사용된 이래, 전세계에서 널리 사용 중에 있으며 국내에서도 22[kV]급에서 부터 345[kV]급에 이르기까지 운전 중에 있다.

그리고 GIS는 내부의 고전압 전극과 접지된 외함으로 구성된 동축원통형 전극으로 전극간은 준평등 전계를 형성하고 있어, 통상의 운전상태에서는 부분방전이 발생하지 않는 충분한 전계강도로 설계되어 있다. 그러나 GIS의 금속가공, 연마작업, 운반, 현장조립 및 가스 주입시 도체에서의 돌기, 스페이서의 크랙 및 금속이물 등이 발생할 수 있으며, 이러한 결함으로 전계가 균일화된 GIS 내에 국부적인 전계 집중현상이 발생하면 그곳에서 부분방전이 일어나서 절연파괴에 도달하기 까지 한다. GIS는 내부사고 발생시 대형사고로 진전될 뿐만 아니라 사고부분의 추정이나 복구작업이

어려우므로 GIS의 사고를 예방하여야하며, 또한 변전소 무인화를 뒷받침하기 위해서는 GIS에서 발생하는 이상(異常)의 징후를 초기단계에 찾아내는 것이 중요하다.

II. GIS 와 금속이물

1. GIS 사고원인

1-1. GIS 열화요인

GIS 열화의 요인은 크게 4가지로 구별할 수 있으며, 이들은 열적 열화, 전기적 열화, 기계적 열화, 환경적 열화로 구분할 수 있다. 열적 열화란 개폐기 접점부에서 발생하는 아크열에 의해 생기는 기계적 마모 또는 변질, 기타 부품의 열에 의한 변질 등을 지칭하는 것이며, 전기적 열화는 부품 일부분에서의 전계 집중에 의해 발생하는 방전에 의해 생기는 열화현상을 말한다. 기계적 열화는 기계적 스트레스에 의해 기기 구성 부품들이 고유의 기계적 응력을 잃어가게 되고, 그 결과 기계적 부조화에 의해 비틀림이나 마모 등의 현상을 가져오는 것을 말하며, 환경적 열화란 전술한 3가지 열화요인 외에 SF₆ 가스의 분해, 금속재료의 표면부식, 제어회로의 접점열화, 도료의 변화 등, 기기 사용에 따른 시간의 경과에 따라, 혹은 기기 설치 장소에 의해 지배받는 환경적 요인 등에 의한 열화를 말한다. 그 외에 위 4가지 요인들이 복합적으로 작용하는 경우를 들 수 있으며, 이 경우 단독 요인에 의한 열화보다 더욱 심한 열화를 가져오는 경우가 있다.

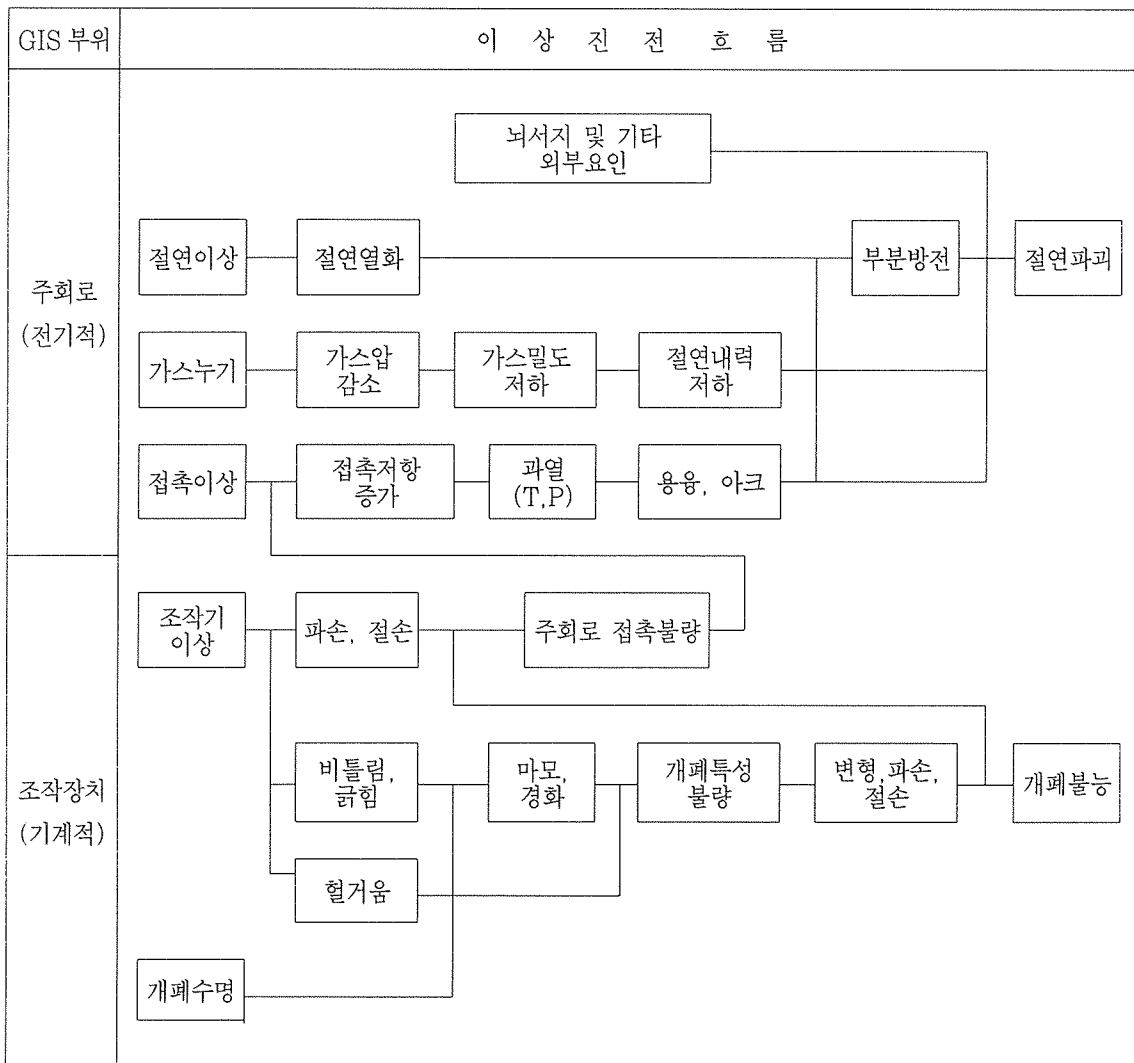
1-2. GIS 열화과정

GIS의 열화요인에 의해 GIS는 각 부위별로 다

음과 같은 과정을 거쳐 본래의 기능을 상실하거나 운전에 지장을 초래하게 된다.

주회로 열화는 절연이상과 기밀(氣密)이상, 접촉이상 등으로 열화가 진행된다. 절연이상에 의해 기기는 절연내력을 잃으면서 부분방전을 일으키게 되고, 부분방전이 계속될 경우 섬락사고에 이르게 된다. 기밀이상은 가스누출을 일으키게 되고, 가스 밀도 저하의 과정을 거쳐 절연내력 저하현상을 보이게 된다. 즉 부분방전 혹은 절연파괴의 과정을 거쳐 기기 사고에 이르게 된다. 주회로 접촉자에 이상이 발생하면 접촉저항 증가에 의해 접촉부 과열현상을 수반하게 된다 이때 접촉부 주위의 공간은 온도와 압력의 상승을 가져오게 되며, 접촉자 용융, 아크의 발생에 이어 부분방전 또는 절연파괴로 진전된다.

조작장치 열화는 조작기구 이상과 개폐수명 한계 도달, 조작회로 이상에서부터 열화가 진행된다. 조작기구 이상에 의해 기구부는 파손, 절손이 생겨 날 수 있고, 이것은 다시 주회로 접촉불량을 유발하게 되거나, 기기 개폐동작 불가상태로 진행된다. 조작기구 이상은 부품의 비틀림, 절손, 헐거움 등으로 마모, 경화의 과정을 거쳐 개폐특성을 변화시키게 되며, 조작기구부가 개폐수명 한계에 도달하게 되면, 기구부 마모, 경화에 의해 개폐 특성을 변화시킨다. 그 외에도 조작기구부 제어회로에 이상이 생길 경우 이들이 과열, 손상되어 개폐특성 불량으로 이어지면서 기기 개폐 동작이 불가능하게 된다. 보조점접 열화에 의해서도 조작회로 손상을 가져와 기기 개폐특성 불량을 유발시킨다. 그림 1은 앞에서 설명한 열화과정을 요약하여 정리한 것이다.



(그림 1) GIS 열화과정

1-3. GIS내 부분방전

GIS는 SF₆ 가스를 절연매체로 하고 금속용기 속의 고전압 도체는 고체절연물로 절연이 되어 있다. 그리고, 조작기구로부터의 구동력을 고체절연물을 통해 고전압가동부에 전달하여 주회로를 개폐하고 있다. GIS에서 부분방전이 발생하는 요인으로는 첫째, 고체절연물 내부 공극의 존재와 둘째,

둘째, 돌기의 존재 셋째, 혼입 금속이물의 존재, 넷째 금속 구성부품의 접촉 불량 등에 의한 것으로 분석된다.

대부분의 GIS 내부고장은 절연파괴 전에 부분방전의 과정을 거치게 되는데 부분방전 발생확률을 신경회로망으로 계산한 연구결과의 한가지 예를 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉

요인별 부분방전 발생확률

결 합	확 률 [%]	부분방전 발생원
전극에 금속이물 부착시	5.23	금속이물
외함에 금속이물 부착시	3.21	금속이물
금속이물 자유운동시	0.67	금속이물
스페이서에 금속이물 부착시	79.57	금속이물
스페이서 내 공극 존재시	10.06	공 극
고전압 전극에 돌기 존재시	1.26	돌 기
계	100.00	

표 1에서 결함을 금속이물이 없을시와 있을시로 나누면 금속이물이 없을시 공극에 의한 방전은 공극 기체의 유전을 및 파괴전압이 고체절연물의 그것들 보다 낮기 때문에 발생된다. 공극은 고체 절연물의 제조에 기인하는 잔류공극외에 고체절연물과 연결부의 열응력 등에 의해 균열이 형성되는 것으로 생각된다. 또한 돌기존재시의 방전은 개발 시험 단계에서 통상 개선되어 사용중에는 특별한 문제가 되는 것은 없다.

금속이물이 있을시는 전극, 외함, 스페이서에 금속이물이 부착하여 부분방전에 관여하고 있는 경우이다. 품질관리가 잘되고 있는 GIS에서는 이러한 현상이 잘 일어나지 않지만 제작시 품질관리가 잘되지 않거나, 현장에서 작업중 침상 이물이나 볼트·와사류의 혼입 등이 발생하는 경우도 있다.

2. 금속이물이 절연열화에 미치는 영향

GIS 섬락사고는 절연결함에 의한 주회로 열화가 대부분을 차지하고 있다. 금속이물은 GIS 제작, 조립, 설치, 운전과정에서 그 혼입을 완전히 피할

수 없으며, GIS 절연파괴 사고의 주된 원인으로 작용하고 있다.

2-1. GIS내 이물의 종류

GIS내 이물의 종류는 절연성 이물, 먼지, 금속분말, 선형 또는 구형 금속이물 등으로 나누어진다. 절연성 이물은 가해진 전원의 종류에 따라 기립, 진동을 하는 경우도 있으나, SF₆ 가스의 절연 성능에는 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 미소한 금속이물이 함유된 이물질의 경우는 금속이물과 동일한 현상을 나타낸다. 또한 먼지는 금속 입자를 함유하고 있는 먼지만이 SF₆ 가스의 절연 성능에 영향을 미친다.

금속분말의 경우 지름이 30(μm)정도의 극히 작은 가루형태는 미소량일 경우 SF₆ 가스절연에 영향을 미치지 않으나, 수량이 많을 경우 가스절연 성능에 영향을 미치게 된다. 또한 선형이물은 가늘고 길수록 절연파괴전압이 낮아지고 구형이물은 직경이 클수록 절연파괴전압이 높아지는 성향을 보인다.

2-2. 금속이물의 생성

생산에서 설치까지 각 공정별로 금속이물이 발생, 혼입할 수 있는 경우를 열거하면 다음과 같다.

금속가공, 연마작업, 조립과정에서 금속이물이 발생할 수 있고, 또한 도전부 도금처리 과정에서 불량한 도금이 금속이물의 생성요소로 작용할 수 있으며, 부적절한 공구사용, 과도한 토크에 의한 볼트 채부 과정 등에서도 금속이물이 생성될 수 있다.

각 기기별 또는 GIS 부분별 조립과정에서 주변 환경 불량, 부적절한 공구사용, 도전부 외부 노출 관리 미흡, 공장내 이동운반시 관리미흡, 부품적재 및 보관상의 결함, 도전부 세정작업 시기 및 방법 부적절 등에 의해 금속이물이 생성될 수 있다. 또한 도체 도킹(docking) 작업, 가스 파이프 세정, 가스 주입과정, 부상 조립과정에서 금속이물이 생성 또는 혼입 될 수 있다.

시험종료 후 운송을 위해 해체한 다음의 도전부 노출관리, 시험과정에서 발생한 이물 제거 및 확인 소홀, 외함 덮개등 운반장구 관리 소홀, 운송과정

에서의 진동관리 및 운송 중 발생할 수 있는 각종 기계적 스트레스 관리 부적절 등에 의해 금속이물이 생성 또는 혼입 될 수 있다.

현장설치시 설치환경, 작업원 숙련도, 적정공구 사용, 내부청소, 가스 파이프 및 가스주입관리, 현장 용접관리 등이 부적절할 경우 금속이물 발생 가능성이 높아진다.

III. GIS 사고현황

최근 7년간 170[kV] 및 362[kV] GIS에서 일어난 고장발생 현황을 살펴보면 표 2와 같다.

국내의 GIS 사고 발생 집계결과를 보면, 고장의 대부분은 이물질 혼입에 기인하고 있다.

아래의 표 3은 CIGRE Working Group 23에서 10년 주기로 조사하여 집계 결과를 발표한 것으로 대상기간은 1965년부터 1990년까지 25년간 이고 대상국가는 전세계 34개국을 대상으로 하여 조사한 것이다.

<표 2> 국내외 GIS 사고 발생 현황

구 분	이물질혼입	조립불량	지지애자불량	오조작	기타	계
170[kV]	4	1	2	6	1	14
362[kV]	3	2	-	-	-	5
계	7	3	2	6	1	19
[%]	[37]	[16]	[10]	[32]	[5]	[100]

<표 3> 외국의 GIS 사고발생 비율

불량 원인	제작	설치	기기 설계	절연 설계	경년 열화	운전	전기 설계	환경	과전압 과부하	기타	계
점유율 [%]	22	20	13	11	7	5	3	3	2	13	100

위의 표에서 보듯이 국내 사고의 경우와 외국 사고의 경우 제작업체의 과실이 차지하는 비중이 대략 60(%)이상 인 것을 볼 때, GIS의 품질은 제작업체에 의해 거의 좌우됨을 알 수 있다. 이는 GIS 사고원인은 GIS의 설계, 제작, 조립, 시공 과정에서 대부분 발생하고 있음을 의미하며, 또한 결함들을 완전히 배제하는 것이 불가능함을 의미하는 것이다. 따라서 여러 결함들에 의해 나타나는 현상들을 사고로 이어지기 전에 파악 하므로써, 사고예방조치를 가능하게 하는 기술을 개발하여 적용하는 것이 필요 할 것이다.

IV. GIS 예방진단법

가스절연 개폐장치는 전계 해석 기술의 고도화 및 SF₆ 가스의 우수한 절연특성등에 의한 신뢰성 향상과 소형 축소화에 의한 경제성 향상이라는 두 가지 측면에서 실용화 연구가 진행되어 왔다. 또한, 선진 각국에서도 GIS에 대한 이상진단 알고리즘 및 장치를 개발중이나 아직까지 신뢰성이 확보 되지 않았으며, 더욱이 현장 적용시 주변의 잡음으로 인하여 실용화에는 상당한 연구가 필요한 상태이다.

GIS의 설치 및 정기점검시 유입될 수 있는 금속 이물의 검출에는 금속이물에 의해 발생한 부분방

전을 외피 전극법 및 전자파를 측정하는 방법과 초음파 센서를 이용한 측정 방법이 있으며 또한, 금속이물이 인가전계에 대응한 정전력을 받아 부상하여 왕복운동을 할 경우 외함에 충돌하여 발생하는 충돌신호와 음향신호를 진동가속도계와 초음파센서로 측정하는 방법이 있다. 여러 가지 방법중 GIS 내부의 금속이물을 측정하기 위한 예방진단 기법으로 진단방법의 특성 및 신뢰성과 현장설치 상태 등을 고려할 때 어느 한가지 방법만으로는 불충분하다. 따라서 여러 가지 진단결과를 종합 분석하고, 시간기준정비(Time Based Maintenance) 보다 최근에 관심이 집중되는 상태기준정비(Condition Based Maintenance)로 하는 것이 바람직하다. 그리고 점검시 짧은 시간동안에 최대한의 정보를 추출하는 것이 보다 중요하다.

또한 GIS내의 혼입 금속이물은 SF₆ 절연내력을 청정시에 비하여 현저히 저하시켜, 절연사고를 빈번히 유발시킨다는 것이 보고되고 있으며 금속이물이 존재하면 SF₆ 가스의 우수한 절연특성이 상당히 감소되므로, 이러한 현상에 대해 활발한 연구가 이루어지고 있다. 주된 연구 대상은 절연성능을 감소시키는 파라미터의 영향, 절연성능 감소 메커니즘, 절연내력을 향상시키는 방법 및 금속이물을 감지하는 방법 등이다.