

GIS의 절연특성과 현장시험법

김 덕 수*

(*효성중공업(주) 기술연구소 부장)

1. 개 요

송변전 설비가 초고압화, 대용량화됨에 따라, GIS(가스절연개폐장치)의 채용에 의한 변전소의 설비 전체가 일체화되는 경향이 현저하며, 국내에서도 1980년도부터 GIS가 보급되기 시작하여 현 시점에서는 신설 변전소의 대부분이 GIS화 될 전망이다. 이러한 GIS는 밀폐화와 무부수 관점에서 가능한 소형, 경량화 되어져 있지만, 초고압 대용량 기기인 만큼 현지 수송 등을 위하여 분해, 수송, 현장 재조립을 하여야 하기 때문에 UNIT별로 분할하여 구성되도록 제조되어지고 있다. GIS는 그 구조상 내부에 금속성 PARTICLE이 존재하게 되면 절연 저하가 일어나게 되므로 GIS 내부에 금속 PARTICLE이 혼입되는 것을 방지하는 것이 매우 중요하다. GIS의 제작 과정에서 뿐만 아니라 현지 설치 작업시에도 방진 조립 구조로 하여 방진 대책을 실시하여 금속성 PARTICLE이 존재하지 않도록 작업 관리에 만전을 기하고 있지만, 최종 단계에서도 금속성 PARTICLE이 잔존하지 않는 것을 검증할 필요가 있다. 이러한 관점에서, 여기서는 GIS화와 더불어 발생하고 있는 단로기의 충전전류 개폐시 발생하는 高周波(수MHz~수십MHz) SURGE 전압인 VFT(VERY FAST TRANSIANT VOLTAGE)를 포함한 SURGE 전압 및 AC 전압하에서의 GIS 내부에 금속성 PARTICLE이 존재한 경우에 그 잔존 형태별로 절연 내력에 미치는 영향을 현시점에서 연구

발표된 논문들을 기초로 서술하고, 절연 내력 검증을 위한 시험 방법에 대하여 정리하고자 한다.

2. 청정조건하에서 SF6 가스절연특성

2.1 AC 및 파두장이 긴 개폐 IMPULSE

SF6 가스의 압력이 1~2Kg/cm².abs 정도에서는 AC 및 파두장이 긴 개폐 IMPULSE에 대한 절연 파괴 전압은 거의 일정하며 절연파괴 전계의 하한치는 스트리머 이론에 준한 다음과 같은 이론적 절연파괴 전계의 Ed와 거의 일치한다.

$$Ed = (1 + 0.175/PR) \text{ KV/cm}$$

R(cm) : 최대 전계를 발생시키는 전극 부분의 곡률 반경

$$P(\text{Kg/cm}^2.\text{abs}) : \text{SF6 가스의 압력}$$

압력이 3Kg/cm².abs 이상으로 되면 절연파괴 전압의 편차가 증가하고 상기식에 준한 이론치 보다 낮은 상태로 저하하는 현상이 있다. 이 현상은 전극 면적 및 표면조도에 관계되는 것으로 파악되어 있다.

전극 표면적이 크면 클수록 절연파괴 전계의 이론치는 저하된다. 그림.1은 4Kg/cm².abs하에서의 횡

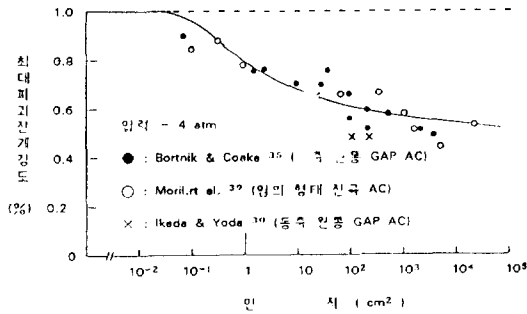


그림 1. SF₆기스의 파괴전계의 전극면적효과

축을 음극의 고전계부의 표면적으로 한 최대 파괴 전계강도의 그래프로서 이를 잘 나타낸다.

2.2 뇌-IMPULSE

뇌 IMPULSE의 경우는 그림.2의 V-t 특성에서 보는 바와 같이 뇌-IMPULSE 영역까지는 평탄한 특성을 가지고 있으므로 GIS의 절연 설계는 실질상 뇌-IMPULSE 시험전압에 대한 사항을 고려하면 충분하다.

2.3 V.F.T(VERY FAST TRANSIANT VOLTAGE)

GIS의 단로기 개폐시 발생하는 진동성 IMPULSE 인 VFT(수MHz~수십MHz)에서는 동축원통($\phi 21\text{mm}/\phi 75\text{mm}$) 4.5Kg/cm².abs에서 실험한 결과 주파수가 높을수록 양극성 모두 절연파괴 전압이 높으며, 동축원통의 실험 결과, 일정한 파미장을 가진

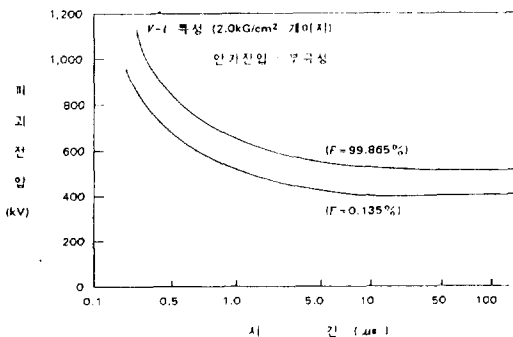


그림 2. 70KV GIS 모델 V-t 특성

구 분	2.4MHz	289KHz
정 극 성	523KV	475KV
부 극 성	426KV	393KV

단일 IMPULSE의 경우는 PEAK치까지 도달시간이 짧을수록 절연파괴 전압치가 저하한다.

3. 금속성 PARTICLE의 절연성능에의 영향

GIS의 제작 및 설치 과정에서 금속 이물질이 혼입되지 않도록 충분히 관리를 하고 있지만 혼입되는 경우가 발생할 수 있으며, 만약 혼입되었을 시는 GIS의 절연특성에 큰 영향을 미치므로 여기서 그 영향을 정리하여 이물질 관리에 도움이 되도록 하고자 한다.

3.1 도체 표면의 돌기 형상 금속 PARTICLE 부착된 경우

3.1.1 AC 전압 경우의 영향

금속성 PARTICLE이 존재시의 AC에서의 영향은 그 길이에 대해서 그림.3에서 보는 바와 같이 절연 파괴 전압이 현저히 저하됨을 알 수 있다. 4.5Kg/cm².abs 압력하에서 PARTICLE 길이가 3mm인 경

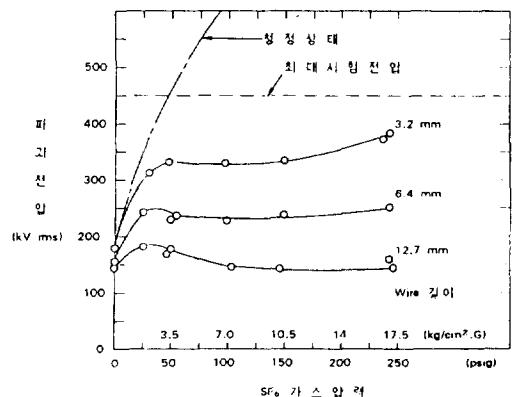


그림 3. 중공원통형 전극(ID 76mm/OD 254mm) 파괴전압(이물질 크기 : 동선 0.45mm Dia)

우 절연파괴 전압이 청정시의 60% 정도이며, 압력이 2.0Kg/cm².abs까지는 압력 증가에 따른 절연파괴 전압이 높아지지만, 2.0Kg/cm².abs 이후부터는 절연파괴 전압이 일정함을 알 수 있다.

3.1.2 IMPULSE 및 VFT 파형인 경우

GIS는 일반적으로 원통 형상으로 구성되어 있으므로 동축원통 형상에서의 실사용압력 근방인 4.5Kg/cm².abs에서의 절연 특성을 보면 그림.4와 같으며 가스 압력 특성은 그림.5와 같이 다음과 같은 특성을 가지고 있다.

1) 단일 IMPULSE 전압(일반 IMPULSE 파형)에서는 파형이 PEAK까지의 도달 시간이 짧을수록 청정 조건상에서는 절연파괴 전압이 올라 가지만, 돌기 금속 PARTICLE이 도체 표면에 부착된 경우는 절연파괴 전압이 저하하여, PEAK까지의 도달 시간이 2μs 정도까지 이 현상이 발생하나, PEAK까지 도달 시간이 2μs에서의 절연파괴 전압은 진동성 IMPULSE와 거의 비슷하다.

2) 절연파괴 전압은 돌기물의 길이가 길면 길수록 저하한다. PEAK까지 도달 시간이 0.185μs인 진동성 IMPULSE는 단일 IMPULSE 파형에서의 비율보다 절연파괴 전압이 낮아져 청정조건 시에 비하여 돌기물 길이가 1mm에서 약 45%, 3mm에서는 약

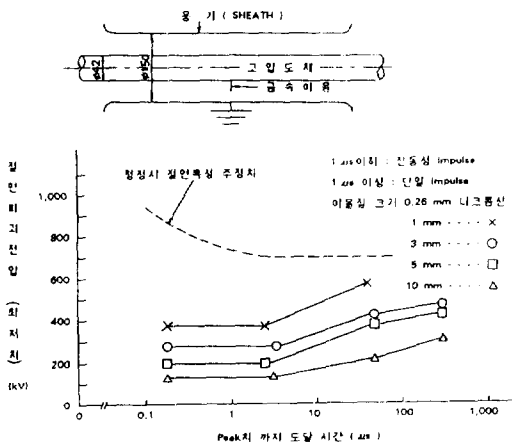


그림 4. 인가전압 Peak치 까지의 도달시간과 절연 파괴전압 특성

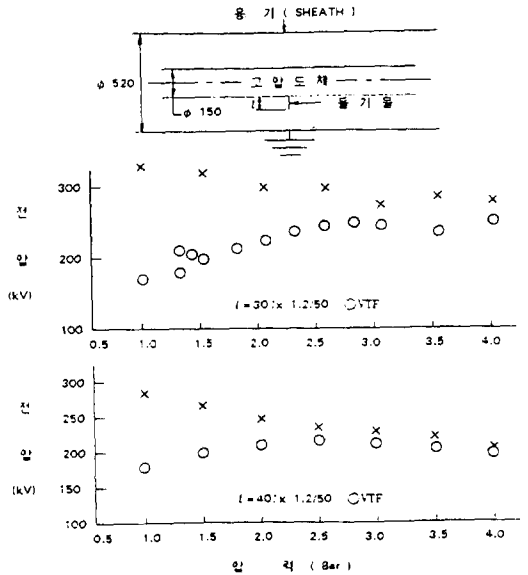


그림 5. SF₆ 가스 압력과 50% F.O 전압

30%, 5mm에서는 약 20%로 저하함을 알 수 있다.

3) 단일 IMPULSE 전압은 가스 압력이 높아질수록 절연파괴 전압이 저하하는 경향이 있다. 진동성 IMPULSE에 있어서는 1Kg/cm².abs에서 최저가 되고, 3Kg/cm².abs까지는 가스압력이 증가할수록 절연파괴 전압이 크게되며, 3Kg/cm².abs~4Kg/cm².abs영역에서는 거의 비슷하다.

상기 1)~3)까지의 특성을 고려하여 GIS의 설계시는 금속 PARTICLE의 근사치를 설정하여 절연파괴 전압을 가정하고 반복 계산하여 최종 허용 이물질의 크기를 구할 수 있다.

3.2 금속성 PARTICLE이 자유 상태로 놓여 있는 경우

금속성 이물질이 자유 상태로 놓여 있을 경우는 금속성 이물질이 전계에 의한 정전력에 의하여 운동하여 절연 특성에 영향을 주기 때문에 AC인 경우는 고압 도체측으로 이동하여 절연 특성에 영향을 미쳐 절연파괴 전압치가 저하하지만, IMPULSE성 전압인 경우는 금속 이물질에 가하여지는 에너지가 단시간으로 금속성 이물질이 운동을 하지 못하므로 큰 영향은 거의 없다. 실제 GIS의 운전 상태에서는 AC 전압이 인가되어 있는 과정에서 낙뢰에 의한 IMPULSE 전압과 단로기등의 개폐에 의한 VFT등

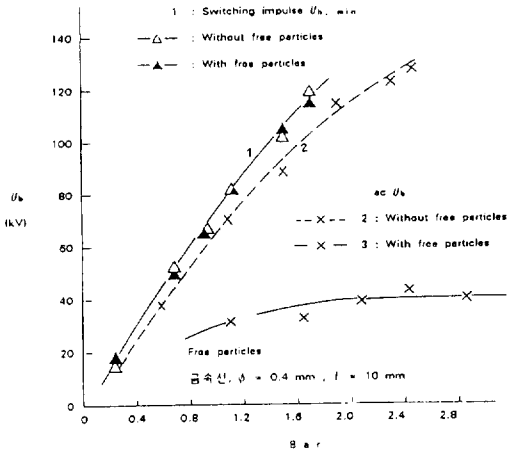


그림 6. 자유상태 금속 이물질 존재시의 개폐 Impulse(360/150 μ s)의 상용 주파 전압 절연 특성 (50/20mm 중공원통전극)

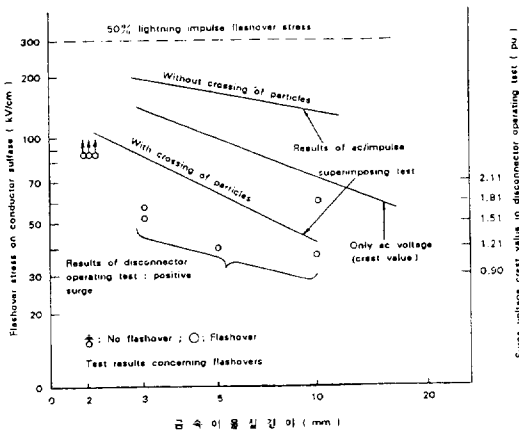


그림 7. 자유상태 금속 이물질 길이외 D.S Surge 및 AC 뇌 IMPULSE 중첩절연특성(금속성 이물질 : 0.25mm ϕ 가스압 4Bar)

이 중첩되어 인가되어 AC의 영향을 받게되므로, 금속 이물질의 길이가 크게 되면 AC만 인가되었을 경우보다 절연파괴 전압이 더욱 낮아져 절연특성을 크게 저하시킨다.

상기와 같은 절연특성 변화는 그림.6 및 그림.7에서 잘 나타나 있다. 여기서 금속성 이물질이 정전력에 의하여 그림.8과 같이 부상하여 이동되어 지므로 금속성 이물질이 기립, 부상하여 이동되지 않게 하려면 SHEATH내면의 전계를 낮출 필요성이 있다. AI는 동, 철재류, 은보다는 저전계에서 부상하므로



그림 8. 금속성 이물질의 부상경위

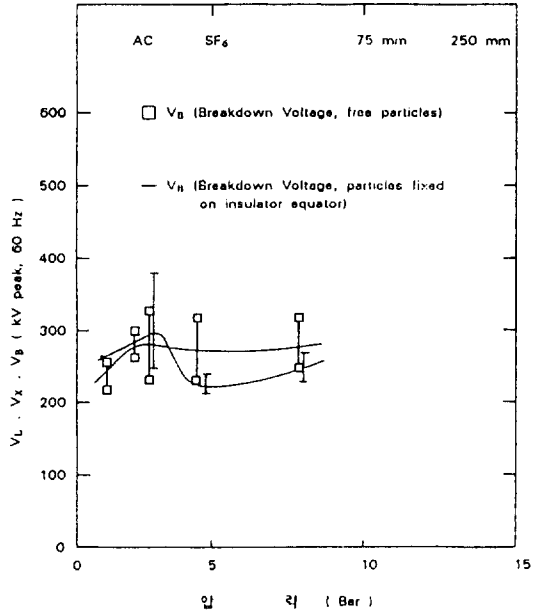


그림 9. 75/250mm 원통전극 형상에서의 이물질(AI 0.45mm ϕ , 6.4mm l) 부착된 경우의 절연 파괴 전압

AI의 PARTICLE에 유의하지 않으면 안된다. AI인 경우 부상할 수 있는 전계 조건은 금속 PARTICLE의 직경을 $d(\text{mm}\phi)$ 로 볼때 개략 $d=0.51E^2$ 정도이다.

3.3 금속 이물질이 절연물 연면에 부착된 경우

일반적으로 GIS 내부의 절연물은 EPOXY 재료를 성형시킨 절연물을 사용하는데 절연물의 연면 전계는 가스 공간의 전계보다도 낮게 설계되어 있지만, 그 재료가 유기물이므로 마찰등에 의하여 정전기를 가지게 되어 설치 및 운반시 이물질이 절연물 연면에 부착되거나 자유 상태의 PARTICLE이 이동하여 절연물 연면에 부착되면 절연 저하를 일으킬 염려가

있다. 지금까지 발표된 논문에 의하면 청정 조건상에서 절연 SPACER를 가지고 있는 GIS의 경우 V-t 특성은 μsec 이하에서도 일반 기종의 V-t 특성보다 평탄하기 때문에 VFT와 같은 $1\mu\text{s}$ 이하의 파형에 대한 절연 특성은 SPACER를 가진 경우에는 다소 저하된다.

금속성 PARTICLE이 자유 상태로 놓여 있는 상태와 절연물 연면의 고전계 부위에 부착된 상태에서의 절연 파괴 전압은 AC인 경우에는 그림.9와 같이 통상 사용압력인 5bar에서 20%정도까지 차이가 있음을 알 수 있고, DC 전압을 인가한 경우는 현저한 차이가 나 금속 PARTICLE이 절연물 연면에 부착되면 절연파괴 전압이 낮아진다.

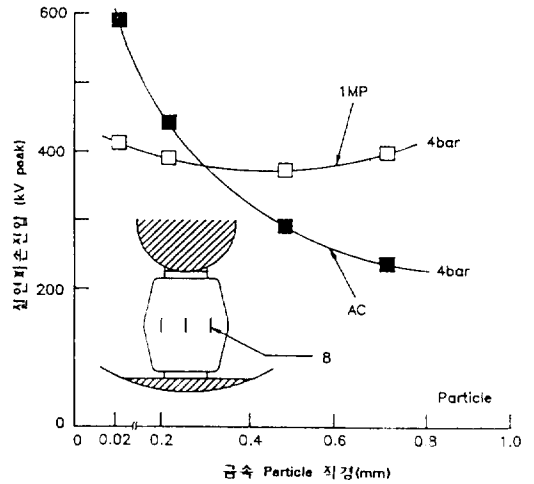


그림 11. 금속 Particle 직경과 절연파괴특성(연면)

3.4 금속성 PARTICLE 존재하의 절연특성

상기 3.1~3.3에서 검토한 바와 같이 GIS 중의 금속성 PARTICLE 존재하의 절연성능은 금속 이물의 크기, 위치, GAS 압력, 파형등의 여러가지 인자에 의하여 영향을 받음을 알 수 있고 어떤 파형에서도 금속 이물질이 존재하면 절연 특성은 저하하고 특히 VFT와 같은 PEAK까지 도달 시간이 짧은 파형에서는 그 영향이 현저하고, GAS 압력이 증가하더라도 금속성 PARTICLE이 도체측에 부착되면 절연파괴 전압이 오히려 IMPULSE 파형인 경우($1.2 \times 50\mu\text{s}$)

는 다소 저하함을 알 수 있다. (그림.5 참조)

즉 청정 조건상에서는 GIS의 단로기의 개폐에서 발생하는 VFT성 전압은 그 크기가 3.0Pu 이하인 만큼 뇌-IMPULSE 시험치를 초과하지 않아 문제가 없지만, 이물질의 존재시는 큰 영향을 미칠수가 있다. 또한 이물질의 크기가 작은 경우의 절연 내력은 교류 전압하에서는 절연 저하가 크게 일어나지 않으나 IMPULSE성 전압하에서는 영향이 큰 것을 알 수 있고, 교류 전압하에서는 금속성 PARTICLE이 기중 이동되어 절연저하를 야기시키는 것을 알 수 있다. (그림.10 및 그림.11 참조)

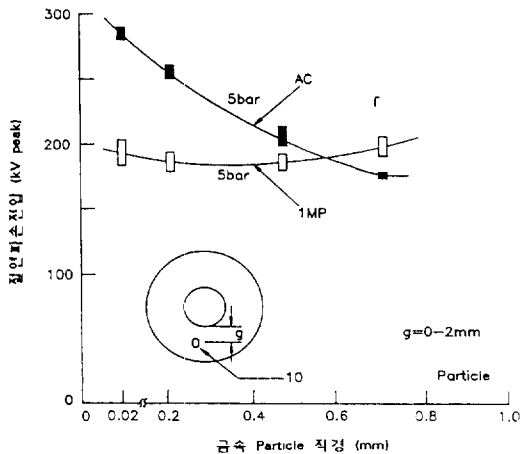


그림 10. 금속 particle 직경과 절연파괴특성 (가스공간)

4. 금속성 PARTICLE을 고려한 절연 시험 방법

4.1 시험 항목별 금속 PARTICLE 검증 능력

GIS는 공장에서 조립되어 절연 시험을 거쳐, 해체, 수송하여 현지에서 재조립하므로 절연 성능면으로 보면 공장에서 절연 내전압 시험을 실시하고 있으므로 설계 구조적으로는 문제가 없다고 보지만, 수송, 현장 설치 작업등에 의하여 금속성 PARTICLE의 혼입등으로 인하여 절연 저하를 발생시킬 요소는 존재하고 있다.

GIS 내부가 청정 조건이라면 뇌 IMPULSE, VFT, 개폐 SURGE, AC등에서도 아무런 문제가 없지만 금

표 1. 현장시험의 종류와 검증 능력

시험법		A (다회수개폐)	B (교류전압)	C (진동성IMPULSE)	D (장기과전)
검증목적		<ul style="list-style-type: none"> · 개폐특성 · 개폐후의 부분방전 (무가압 상태에서 50회 개폐후)	<ul style="list-style-type: none"> · 부분방전 · 과전개폐 (1.5E 30분인가)	<ul style="list-style-type: none"> · 진동성 IMPULSE (BIL의 0.8배의 진동성 IMPULSE)	<ul style="list-style-type: none"> · 과전개폐 · 부분 방전 (수일~수개월 운전전압으로 과전)
절연물	파손, 크랙	—	◎	○	○
	기공	—	◎	—	○
	표면 오손 흡습	—	◎	○	○
금속 PARTICLE	0.4φ 정도의 PARTICLE	○	◎	◎	○
	0.02φ 정도의 PARTICLE	—	—	◎	○
도체, SHIELD 등의 조립	볼트 조립	○	○	—	◎
	오손, 조립누락	○	○	○	◎
	접촉불완전	○	○	—	○
	FLOATIG	○	○	—	◎

◎ : 현저한 효과가 있음

○ : 효과가 있음

속성 PARTICLE이 존재하면 제3장에서 검토한 바와 같이 절연저하의 영향이 큰 바 공장 시험이나 현장 설치후의 현장 시험시는 이러한 관점에 유의하여 시험을 하여야 한다. 시험은 형식시험, 검수시험, 현장시험으로 대별할 수가 있으며 형식 시험은 기본 설계 성능을 확인하기 위하여 있는데, 뇌-IMPULSE 내전압 시험을 비롯 하여 각종 절연시험 항목이 중요한 항목으로 되어 있지만 검수시험은 제조 과정상에서 발생할 수 있는 도체, SHIELD 등의 전극, 절연물, 조립등의 결함 존재 여부를 확인 및 검증하는 중요한 시험으로 되어 있다. 또한 상기와 같은 제조상의 결함이 없음을 확인하였다 할지라도 GIS의 운반, 설치 과정에서 이물질 혼입등의 결함이 없음을 확인하기 위하여는 현장시험이 필요하

다. 이러한 관점에서 이물질의 혼입 여부를 최종적으로 CHECK하기 위해서는 현장 내전압 시험이 필요하다. GIS 설계시는 일반적으로 TANK측의 표면전계는 운전 전압을 기준으로 6KV rms/cm 정도이고, IMPULSE 기준으로는 도체측(교압측) 표면전계는 150KV/cm 정도로 되어 있는데, 이 경우 상용주파 내전압으로 검출 가능한 것은 이물질 길이가 5mm 정도의 크기이며, 운전 전압의 1.5배에서의 부분 방전 시험으로는 10PC 기준시 2mm 정도 크기의 이물질 검출이 가능하다. 금속 PARTICLE 직경의 크기에 따라, 그림.10,11과 같이 AC인 경우는 직경이 작아 지면 코로나의 선단 전계의 완화 작용으로 절연파괴치는 상승하나, IMPULSE인 경우는 큰 변화가 없다.

상기와 같은 관점에서 금속 PARTICLE을 검출하기 위하여는 부분 방전 시험을 현지설치후 1.5E 정도의 현장 내전압과 병용하여 실시하는 방법이 좋은 방법이다.

4.2 현장 시험 방법

이상에서 언급된 사항을 토대로 현장 설치후의 금속 PARTICLE에 의한 절연 내력 검증을 위한 현장 특성 시험의 종류와 검증방법은 표 1과 같으며 전압 파형별로 아래와 같은 특징을 가지고 있다.

4.2.1 교류 내전압 시험과 인가 시간

IEC 517에서는 현장 내전압 시험치로서 AC 내전압치의 80%로서 1분 혹은 저감시험 방법으로 $1.1 \times u/\sqrt{3}$ 로서 10분으로 추천하고 있지만, 현장 AC 내전압(AC 내전압치의 80%)만으로 금속성 PARTICLE을 발견하기 어려운 점을 고려하고, GIS 내부 바닥에 잔존하는 금속성 PARTICLE의 부상 개시 전압을 고려하고 금속성 PARTICLE의 잔존에 의한 부분 방전이 발생하고 있는 상태에서의 SF6 가스중의 절연 파괴 전압-시간특성(V-t 특성)이 $V \propto t^{-1/4}$ 라는 실험적 자료를 근거하면 1.5E의 전압으로 30분 가량 인가하면(개략 $n=34 \sim 62$ 정도임) 1.0E로서 50년 이상의 수명으로 환산되므로 1.5E의 전압으로 30분 인가하고 1.0E~1.1E에서 개폐시험등을 병용하며, 가능하다면 부분방전 시험을 병용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다. 하지만 현장 여건상 부분 방전시험은 BACK-NOISE가 크고 차폐가 불가능하므로 부분 방전량의 판독에 문제가 있으므로 향후 계속 연구해야될 과제이다.

4.2.2 IMPULSE 시험과 시험 전압

금속 PARTICLE의 크기와 형상에 따라 절연강도가 변하므로 금속 PARTICLE의 영향을 고려한다면 직경이 작은 금속 PARTICLE은 교류 전압만으로는

완전한 확인이 어려움에 확실한 신뢰성 향상을 위하여는 IMPULSE 전압으로 검증할 필요도 있다. IEC 517에서는 실제 운전중에 GIS에 침입하는 뇌-SURGE 및 GIS 내부의 단로기등의 개폐에 의하여 발생하는 개폐 SURGE를 고려하여 뇌-IMPULSE 내전압치의 80%로 추천하고 있다. 하지만 현실적으로는 IMPULSE 시험 장치는 크기등을 인한 이동상의 문제와 현지 설치조건상의 문제가 있어 시험기기의 축소화, 현장시험 설비의 전용화등의 문제점을 안고 있다. 이러한 관점에서 시험기기의 크기를 줄이기 위한 목적으로 외국에서는 진동과 IMPULSE 시험 장치를 개발하여 일부 UHV 계통에서는 사용하는 경우도 있지만 국내에서는 이러한 시험 설비를 보유하고 있지 않은 상태이다.

5. 결 론

GIS 구조상 내부에 금속 PARTICLE이 존재하면 절연 내력의 저하가 발생하므로 금속 PARTICLE이 내부에 혼입되지 않게 제조, 운송, 설치시에 방진관리를 하는 것이 최선책이나, 최종단계에서 금속성 PARTICLE이 내부에 잔존하지 않음을 확인하기 위해서는 현장 내전압 시험이 필요하다. 현장 내전압 시험은 현장의 여건에 따라 가능한 경우도 있고 불가능한 경우도 있는 여러가지 요소가 있으므로 시험방법의 선택은 현지 여건, 경제성, 전원설비, 시험기의 크기등을 고려하여 GIS의 제조회사와 구매자간의 사전 협의를 하여 진행시켜야 하겠다.



김덕수(金德秀)

1951년 12월2일생. 1974년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1976년 효성중공업(주) GCB & GIS의 개발 및 설계. 현재 효성중공업(주) 기술연구소 창원분소 수석연구원.