

가스절연개폐장치에 있어서 금속입자 존재시 임펄스전압에 대한 SF_6 가스의 절연특성

(Dielectric Characteristics of Gaseous SF_6 for Impulse Voltages
in Presence of a Metallic Particle in GIS)

이복희* · 이경옥** · 이창준***

(Bok-Hee Lee · Kyoung-Ok Lee · Chang-June Lee)

요 약

본 논문은 가스절연개폐장치내에 바늘모양의 금속입자가 존재하는 경우 $\pm 1.2/44[\mu s]$ 비진동성 임펄스와 $\pm 0.4[\mu s]/1.14[MHz]$ 진동성 임펄스전압이 인가되었을 때 SF_6 가스의 절연특성에 관한 것으로 절연파괴전압-시간 특성(V-t 특성) 및 절연파괴전압-압력 특성(V-p 특성)을 측정하고 검토하였다. 실험은 길이 10[mm], 반경 0.5[mm]인 바늘모양의 돌기물에 의해 형성된 불평등 전계이며, 가스압력이 0.1~0.5[MPa]인 범위에서 수행하였다. 그 결과 절연파괴는 정·부극성 모두 계단상 펄스에 의해 진전하는 리더메커니즘으로 발생하였다. 정극성의 진동성 임펄스전압이 인가되었을 때 절연파괴전압이 가장 낮았으며, 짧은 시간범위에서 V-t곡선의 감쇠가 현저하고 가스압력의 의존성이 적게 나타났다. 이에 반해 부극성의 경우 V-t 특성과 V-p 특성은 인가전압의 파형에 대한 의존성이 현저하였다.

Abstract

This paper deals with the dielectric characteristics of SF_6 gas gap stressed by $\pm 1.2/44[\mu s]$ non-oscillating impulse and $\pm 0.4[\mu s]/1.14[MHz]$ oscillating impulse voltages in the presence of a needle-shape metallic particle in gas-insulated switchgear(GIS). Breakdown voltage-time (V-t) and breakdown voltage-gas pressure (V-p) characteristics were investigated and discussed. The experiments were carried out under highly inhomogeneous field geometry with a needle protrusion whose length and radius are 10[mm] and 0.5[mm], respectively. The gas pressure ranges from 0.1 to 0.5[MPa]. As a result, it was found that the electrical breakdown for both the positive and negative polarity develops with steplike pulses in leader mechanism. When subjected to the positive oscillating impulse voltage, the minimum breakdown voltages appeared in all the gas pressure ranges and the V-t curves have a pronounced upturning at short times to breakdown and give a little dependence of the gas pressure. On the other hand, in the case of the negative polarity the dependence of the V-t and V-p characteristics on the wave shape of the applied voltages is known to be appreciable.

* 정회원 : 인하대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수

** 정회원 : 인하대학교 대학원 전기공학과 박사과정

*** 정회원 : LG산전(주) 연구원

접수일자 : 1999년 8월 24일

1. 서 론

현대 문화생활이 향상됨에 따라 전기에너지 수요의 급증으로 전력의 질적 향상과 공급의 고신뢰성의 욕구가 점점 가속화되고 있다. 대부분의 발전설비는 산업요충지나 인구밀도가 높은 도시로부터 원거리에 위치하므로 증가하는 전력수요에 부응하기 위해 전력송전압을 격상시키고 있다. 전력계통설비의 대용량 고전압화는 물론 콤팩트하게 설비를 교체하는 것은 불가피한 실정이다. 이를 위해 절연내력이 높으며 건식으로 주변환경과의 조화에 적절하고, 계통운영에 대한 안전성 확보의 측면에서도 용이한 SF_6 가스를 사용하는 절연시스템의 전력기기의 사용이 늘어나고 있다[1]. SF_6 (Sulfur Hexafluoride) 가스는 0.2~0.6[MPa]의 압력범위에서 아크에 대한 소호효과가 우수하므로 변압기, 가스절연개폐장치, 가스차단기 등에 사용되었으며, 최근에는 가스절연송전선로에서도 사용되고 있다[2]~[4].

차단기나 단로기 같은 개폐차단장치, 피뢰기, 모선 등을 밀폐된 금속용기 내에 설치하고, 소호능력이 우수한 SF_6 가스를 절연재료로 사용하면 변전설비를 보다 콤팩트화 할 수 있으므로 대규모의 변전소에 이용되고 있다.

그러나 GIS내에 설치되어 있는 단로기의 조작에 의한 충진전류의 차단 혹은 지락사고 발생시에도 과도서지전압이 발생한다. GIS의 조립 및 사용 중 내부에 설치되어 있는 기기의 조작으로 인하여 금속성 이물질이 혼입될 수 있는데, 이러한 금속성 이물질의 혼입으로 형성된 불평등전계 중에서 과도서지전압에 대한 SF_6 가스의 절연내력은 현저하게 저하되게 된다[5]. 따라서 금속성 이물질이 GIS내부에 존재하는 경우의 과도서지전압에 대한 SF_6 가스의 절연내력 특성을 파악할 필요가 있다[6].

따라서 본 논문에서는 가스절연기기의 운전 중에 발생할 수 있는 비진동성 임펄스전압과 진동성 임펄스전압에 대한 불평등전계 중에서 SF_6 가스의 절연특성을 분석할 목적으로 바늘모양의 돌기물에 의해서 형성된 불평등전계 중에서 SF_6 가스의 절연파괴전압-시간특성과 절연파괴전압-압력특성을 측정하고, 인가전압의 파형 및 극성과 가스압력의 의존성 등에 대하여 검토하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서는 모의 GIS 실험장치를 설계·제작하였으며, 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 실험용기는 내경 396[mm]의 스테인리스강을 이용하여 원통형으로 제작하였으며, 전극에 인가되는 실험전압을 측정하기 위한 전계센서를 전극계의 상단부에 설치하였다[7].

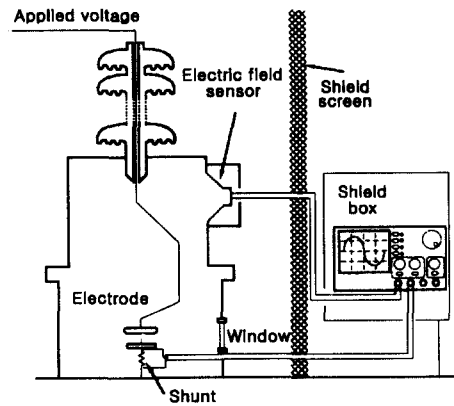


그림 1. 실험장치의 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus

실험에 사용된 바늘모양의 금속성 돌기물이 존재하는 전극계의 상세도를 그림 2에 나타내었다. 상부전극은 반경 45[mm]인 스테인리스강을 사용하였고, 하부전극은 반경 35[mm]인 동으로 제작하였다. 하부전극의 중앙에 인가전압의 변동에 따른 변위전류를 최소화시켜 전구방전전류를 정확하게 검출하기 위하여 바늘모양의 돌기물(길이 10[mm], 반경 0.5[mm])을 설치하고, 하부전극과 돌기물을 전기적으로 절연시켰다. 인가전압은 Marx 임펄스전압 발생장치를 이용하여 비진동성 임펄스전압을, 그리고 임펄스전압 발생장치에 공심형 인덕터($L=130[\mu H]$)와 콘덴서($C=25[nF]$) 및 방전 갭(직경 150[mm])을 구성하여 진동성 임펄스전압을 발생시켜 사용하였다. 이 때 비진동성 임펄스전압의 파형은 1.2/44[μs], 진동성 임펄스전압의 상승시간, 50[%]감쇠시간 및 진동주파수는 각각 0.4[μs], 44[μs], 1.14[MHz]이었다.

가스절연개폐장치에 있어서 금속입자 존재시 임펄스전압에 대한 SF₆가스의 절연특성

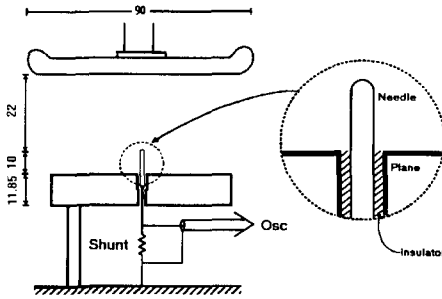


그림 2. 전극계의 구성
Fig. 2. Configuration of the electrode geometry

2.2 실험 방법

전극 조건을 일정하게 한 후에 가스압력 0.1~0.5 [MPa]의 범위에서 SF₆ (순도: 99.8%)가스의 절연과파 전압을 측정하였다. 전극에 인가되는 임펄스전압의 검출기인 전계센서의 감도는 비진동성 임펄스전압에 대한 저항분압기의 응답과 비교하여 교정하였다. 이 전계센서의 주파수대역은 40[Hz]~200[MHz]로 실험전압을 정확하게 측정할 수 있다[8]. 전구방전전류를 측정하기 위하여 바늘모양의 돌기물에 접속한 분류기의 저항은 50[Ω]이며, 분류기로 검출된 신호는 동축케이블을 통해 10:1 감쇠기를 거쳐 오실로스코프로 관측된다. 인가전압과 전구방전전류는 동시에 오실로스코프로 실시간 관측되고, GPIB케이블을 통하여 개인용 컴퓨터에 저장된다. 또한 측정용 케이블은 2중 메쉬선으로 차폐하였고, 실험에 사용된 모든 측정장치는 차폐함 안에 내장시켜 외부 잡음과 외란의 영향을 억제시켰다.

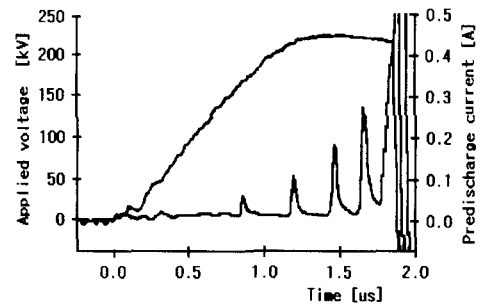
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 V-t 특성

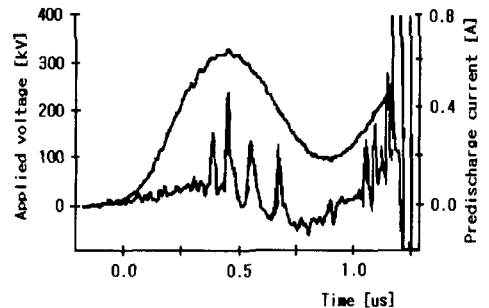
전력기기의 비진동성 임펄스전압 시험에서는 절연과파전압-시간 특성(V-t 특성)을 파악하는 것이 절연협조상 특히 중요하지만, 현재까지의 V-t 특성은 표준임펄스전압과 같이 잘 정의된 파형에 대해서 절연강도의 검토가 주로 이루어져 왔다. GIS내에 설치되어 있는 단로기의 조작에 의해서 발생하는 과도서지전압은 고주파 진동성분을 포함하고 있으므로 피뢰기와 보호협조면에서도 1[μs] 이하인 시간영역에서의

V-t 특성은 매우 중요하다. 특히 불꽃방전의 지연시간은 전력기구나 전력선로의 절연설계 및 보호장치의 협조체계 구성에서 중요한 자료가 된다[9]~[10]. 실험전압을 전극사이에 인가시킨 경우 충격전압의 순시값이 직류 절연과파전압 이상이 되더라도 곧바로 절연과파되지 않고, 어느 시간이 경과된 후에 절연과파가 일어난다. 이와 같이 전압을 인가한 순간부터 절연과파가 일어난 시점까지의 시간을 불꽃방전의 시간지연이라고 한다[11]~[13].

비진동성 및 진동성 임펄스전압과 전구방전전류 파형의 예를 그림 3에 나타내었으며, 전구방전은 리더의 계단상 진전에 의해서 이루어짐을 알 수 있다. 비진동성 임펄스전압이 인가된 경우에는



(a) 비진동성



(b) 진동성

그림 3. 인가전압과 전구방전전류의 파형
Fig. 3. The waveforms of the applied voltage and predischarge current

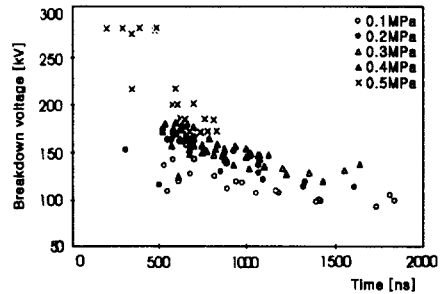
초기스트리머코로나에 의해서 형성된 리더가 인가 전압의 증가 또는 리더의 진전에 따라 리더펄스는 점차 커지게 되며, 결국 전극사이를 교락하여 절연파괴에 이르는 것으로 볼 수 있다. 진동성 임펄스전압이 인가된 경우 전구방전전류에는 미세하지만 인가전압의 변동에 따른 변위전류가 검출되었으나 펄스상의 리더전류와는 충분히 구분할 수가 있다. 초기스트리머코로나에 의한 리더의 형성과 이의 진전에 의해 절연파괴가 일어남을 쉽게 알 수가 있다. 그러나 비진동성 임펄스전압이 인가되었을 때와 같이 리더전류가 진전됨에 따라 점차적으로 증가하는 것이 아니라 인가전압의 변동에 따라 리더전류의 펄스의 크기도 변화하거나 리더의 진전이 중단되기도 하는 형태의 전구방전양상이 관측되었다. 절연파괴가 리더메커니즘에 의해서 이루어짐을 전구방전전류의 파형으로부터 알 수 있었다.

그림 3에서 나타낸 바와 같이 비진동성 임펄스전압 또는 진동성 임펄스전압이 인가된 경우 절연파괴가 반드시 인가전압의 피크값 또는 피크값의 부근에서만 절연파괴가 일어나는 것은 아니다. 따라서 본 연구에서는 SF₆ 가스의 V-t 특성을 평가하기 위한 기준으로써 한국공업규격 및 국제전기위원회(IEC 60-2)규정에 의거하여 설정하였다. 즉, 절연파괴시간은 전압이 인가되어 절연파괴가 일어나기까지의 시간을, 그리고 절연파괴전압은 절연파괴 이전에 시험 갭에 인가된 최대전압을 취하는 방법을 적용하였다. 이와 같은 방법으로 절연파괴특성을 얻게 되면 50%섬락전압보다 좀더 구체적인 특성을 얻을 수 있기 때문에 가스절연개폐장치의 절연설계 및 평가에서 보다 효과적이라고 생각된다.

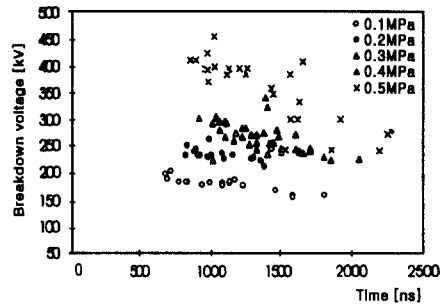
3.1.1 가스압력 의존성

그림 4와 그림 5는 가스압력을 파라미터로 하여 나타낸 비진동성 및 진동성 임펄스전압에 대한 V-t 특성을 각각 나타내었다. 전반적으로 볼 때 부극성인 경우가 정극성일 때보다 압력 의존성이 현저하고, 동일한 조건에서의 절연파괴전압도 높게 나타났으며, 절연파괴전압의 편차도 크게 나타났다. 이러한 차이는 주로 초기전자의 발생메커니즘과 전구방전의 진전양상이 다르기 때문인 것으로 분석된다. 정극성의 경우 초기전자는 부이온이나 수분 등 불순물로부터의 탈리작용에 의해서 공급되어지며, 이들의 초기전자에 의해서

형성된 리더의 진전으로 절연파괴에 이르게 된다. 또한, 리더의 발생전압 및 진전이 가스압력에 크게 의존하지 않기 때문에 절연파괴전압의 편차도 그다지 크지 않게 나타난 것으로 추정된다.



(a) 정극성



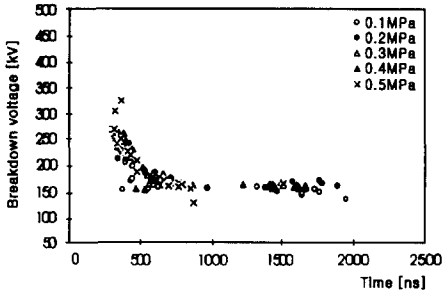
(b) 부극성

그림 4. 비진동성 임펄스전압에 대한 V-t 특성의 가스압력 의존성

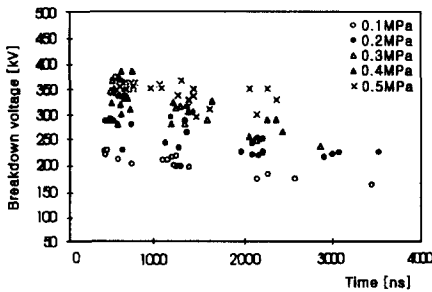
Fig. 4. Dependence of the V-t characteristics for the non-oscillating impulse voltage on the gas pressure

한편, 부극성의 경우에는 초기전자가 주로 음극표면으로부터의 전계방출에 의해서 공급되어지며, 초기코로나는 초기전자 뿐만 아니라 대단히 불규칙하게 발생하는 정이온이나 광자에 의한 2차전리작용을 수반하면서 성장하게 된다. 부극성의 절연파괴전압은 초기코로나 혹은 2차전리작용에 의해서 발생한 공간전하에 의한 전계완화작용의 영향뿐만 아니라 공간전하의 재결합 또는 부차작용도 방전의 진전과정에 크게 영향을 미치게 된다. 즉, 초기전자의 공급에 의한 통

계적시간지연과 공간전하에 의한 전계완화작용에 관련되는 형성시간지연의 불규칙성 때문에 절연파괴전압의 편차가 크게 나타난 것으로 해석할 수 있다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 5. 진동성 임펄스전압에 대한 V-t 특성의 가스압력 의존성
Fig. 5. Dependence of the V-t characteristics for the oscillating impulse voltage on the gas pressure

리더의 진전에 영향을 미치는 공간전하의 효과 때문에 정극성의 V-t 특성은 부극성에 비하여 가스압력의 의존성이 적게 나타났다. 정극성의 경우 스트리머 코로나에 의해서 발생하는 공간전하는 수명이 비교적 짧은 정이온인데 비해서 부극성의 경우에는 부이온의 공간전하가 주종을 이루게 된다. 정·부이온의 가스압력에 따른 공간전하작용의 영향이 전구방전의 진전에 반영된 것으로 볼 수 있다. 그림 5에서 나타난 바와 같이 정극성의 진동성 임펄스전압에 대한 V-t 특성은 거의 가스압력에 의존하지 않으며, 짧은 시간영역에서

급격히 강해지는 특성을 보이고 있다. 가스압력을 높게 하여 절연내력의 향상을 도모하는 경우가 있으나 정극성의 진동성 임펄스전압에 대한 SF₆가스의 절연파괴전압은 가스압력에 따라 거의 변하지 않으므로 SF₆가스절연시스템의 절연설계에 있어서 주목하여야 할 사항이라고 볼 수 있다.

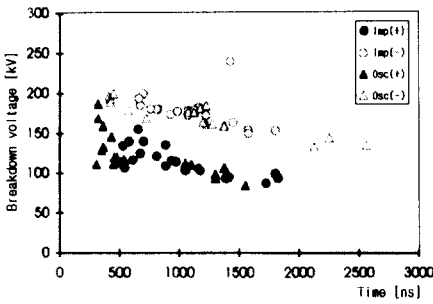
3.1.2 인가전압의 파형 및 극성 의존성

V-t 특성곡선을 정·부극성 임펄스전압의 파라미터로 하여 가스압력의 변화에 따른 특성으로 나타낸 것이 그림 6이다. 정극성의 절연파괴전압은 가스압력에 따라 다소 다르지만 부극성 절연파괴전압의 40~70[%]정도로 낮았다. 그리고 최소절연파괴전압이 나타나는 시간영역은 부극성이 정극성보다 대략 0.8~1 [μs] 긴 시간영역으로 이동하였다. 특히 부극성의 진동성 임펄스전압을 인가한 경우에 시간지연은 가장 길게 나타났다. 이와 같은 특성의 차이도 초기전자의 공급메커니즘과 정·부극성의 리더 형상 및 진전양상이 다른 것이 주요 원인이며, 더욱이 부극성에서는 코로나안정화작용이 현저하기 때문에 최종적인 절연파괴전압이 대단히 높게 나타난 것으로 여겨진다.

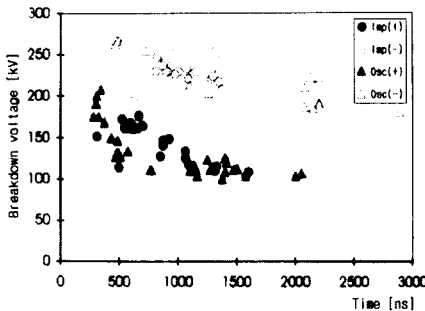
또한 정극성의 경우 수명이 약 10~30[ns]인 부이온으로부터의 탈리작용에 의해서 발생하는 초기전자에 의하여 발단되는 리더의 진전으로 절연파괴에 이르기 때문에 전구방전은 대단히 빠른 속도로 진전하게 된다. 그러나 부극성의 경우 초기코로나에 의해서 발생한 정이온은 바늘모양의 돌기물 끝부근에 집중되어 잔류하게 되며, 방전공간에도 전자의 부착작용에 의해서 생성된 부이온이 존재하게 된다. 이러한 현상은 전구방전전류에 이온성 전류성분이 많이 포함되어 있다는 것으로도 알 수 있다. 이온의 이동속도는 전자의 이동속도에 비하여 대단히 느리므로 코로나안정화작용의 시간도 대단히 길어진다. 결국 부극성의 경우는 공간전하의 전계완화작용에 의해서 형성시간지연이 길어지기 때문에 절연파괴에 이르기까지의 시간지연이 길게 되며 절연파괴전압도 높게 나타난 것으로 생각된다.

절연파괴전압의 편차는 파두시간이 짧은 영역에서 크고, 부극성의 경우가 현저하게 나타나며, 가스압력이 높을수록 이러한 현상이 두드러지게 나타난 것도 초기코로나에 의한 공간전하의 전계완화작용의 영향이라고 볼 수 있다. 바늘모양의 돌기물이 존재하는 경

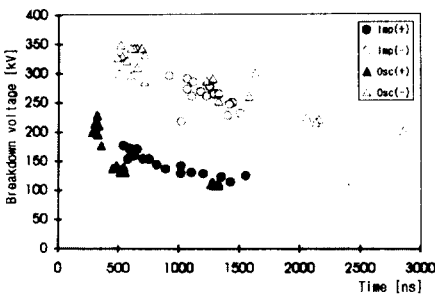
우 절연파괴까지의 소요되는 시간분포는 거의 균일하게 나타났으며, 진동성 임펄스전압에 대한 진동의 피크값 부근에서 데이터가 집중되어 있다는 것이 특징이다[14]. 또한 진동성 임펄스전압이 인가된 경우 절연파괴까지의 시간지연이 가장 길게 나타났다. 그림 3에 나타난 전구방전전류의 파형으로부터 알 수 있는 바와 같이 비진동성 임펄스전압을 인가시킨 경우는 리더의 진전과 더불어 리더펄스의 크기가 증가하며 절연파괴에 이를 때까지 지속적으로 진전하게 된다.



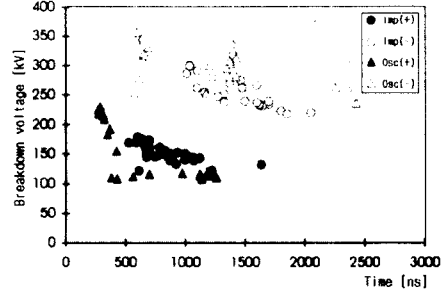
(a) 0.1MPa



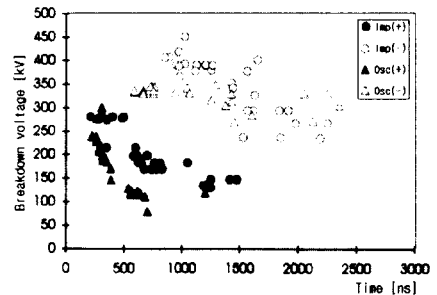
(b) 0.2MPa



(c) 0.3MPa



(d) 0.4MPa



(e) 0.5MPa

그림 6. V-t 특성의 인가전압의 극성 의존성
Fig. 6. Dependence of the V-t characteristics on the polarity of the applied voltages

이에 반해 진동성 임펄스전압을 인가시킨 경우는 인가전압의 변동에 따라 전구방전전류인 리더전류의 크기도 변동하며, 리더의 진전이 중단되기도 하기 때문에 절연파괴까지의 시간지연이 길어진 것으로 볼 수 있다. 인가전압의 변동이 있을 때 인가전압이 리더의 진전에 요구되는 전압보다 작은 경우 리더의 진전이 중단되지만, 변위전류에 의해 에너지공급이 지속되므로 리더의 상태가 소멸되지 않고, 다시 전압이 증가하면 리더의 진전이 재개되는 형태로 전구방전이 일어나며, 이것에 의해 최종적으로 절연파괴에 이르게 된다.

3.2 V-p 특성

불평등전계 중에서 SF_6 가스의 V-p 특성은 인가전압의 파형 및 극성, 불평등전계의 정도, 돌기물의 형상 및 반경, 그리고 돌기물 길이의 치수 등 여러 가

지 요인의 영향을 받는다[15]. 가스압력은 방전공간내에서의 전자나 이온의 거동특성에 영향을 미치게 되므로 V-p 특성은 절연파괴기구의 해석에서 중요한 요소가 될 것으로 생각된다. V-t 곡선의 절연파괴전압 중에서 최소절연파괴전압을 취하여 가스압력의 변화에 따른 V-p 특성을 그림 7에 나타내었다.

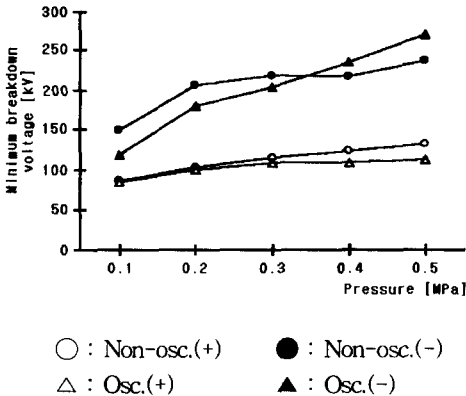


그림 7. 최소절연파괴전압-가스압력의 특성
Fig. 7. The minimum breakdown voltage vs. gas pressure characteristics

부극성의 비진동성 및 진동성 임펄스전압 모두에서 정극성인 경우보다 최소절연파괴전압이 현저하게 높음을 알 수 있으며, 특히 0.2[MPa] 이상의 가스압력에서는 극성에 따른 최소절연파괴전압의 차이가 약 100 [kV] 정도를 나타내고 있다. 이와 같이 인가전압의 극성에 따라 최소절연파괴전압의 차이가 크게 나타나는 것은 초기전자의 발생메커니즘과 전구방전의 진전에 대한 공간전하효과에 의한 전계완화작용의 극성 의존성이 다르기 때문인 것으로 생각된다. 또한 부극성의 경우 진동성 임펄스전압의 최소절연파괴전압은 가스압력의 상승과 더불어 거의 선형적인 증가 양상을 나타내고 있지만, 비진동성 임펄스전압에서는 0.3[MPa]의 가스압력까지는 약간 증가를 보이다가 그 이상의 가스압력에서는 거의 일정한 경향을 나타내고 있다. 정극성의 경우는 비진동성 임펄스전압에 대한 최소절연파괴전압은 미세한 단조 증가를 나타내었다. 즉, 정극성의 경우 절연파괴전압의 가스압력 의존성이 적은 이유는 리더의 진전이 가스압력에 거의 영향을 받지

않기 때문인 것으로 볼 수 있다. 즉, 스트리머코로나의 발생전압, 스트리머의 리더로의 천이 및 리더의 진전에 요구되는 전압이 가스압력에 영향을 적게 받는 것으로 생각할 수 있다[16].

결국 이러한 현상은 정극성의 경우 부이온이 스트리머코로나의 발생과 더불어 바늘모양의 돌기물을 통하여 사라지고 정이온의 공간전하가 지배적이며, 부극성의 경우에는 정이온보다 수명이 긴 부이온이 지배적인 영향을 미치는 결과에 기인된다고 볼 수 있다. 따라서 정극성과 부극성의 절연파괴전압과 절연파괴까지의 시간지연이 각각 다르게 나타나는 것은 공간전하의 전계완화작용의 정도와 정·부극성 리더진전에 필요한 에너지가 다르기 때문이다. 따라서 GIS의 절연설계와 성능평가에서 뇌임펄스전압시험 이외에 운전중에 발생하는 과도과전압에 대한 SF₆가스의 절연특성의 평가와 시험을 병행하는 것이 보다 합리적이고 효과적인 것으로 판단된다.

4. 결 론

GIS내에 바늘모양의 금속성 돌기물이 존재하는 경우를 모의한 불평등전계 중에서 비진동성 및 진동성 임펄스전압에 대한 SF₆가스의 절연특성을 측정하고 분석·검토한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 불평등전계 중에서 리더의 계단상 진전에 의해서 절연파괴를 일으켰으며, SF₆가스의 절연특성은 인가전압의 파형 및 극성과 가스압력 등에 따라 변화하였다.

(2) V-t 특성에서 부극성의 경우 가스압력 의존성이 높고, 절연파괴전압이 높으며, 절연파괴전압의 편차도 크게 나타났다.

(3) 정극성의 진동성 임펄스전압을 인가한 경우 절연파괴전압이 가장 낮았으며, V-t 특성의 가스압력 의존성이 거의 나타나지 않았다.

본 연구에서 분석한 결과는 GIS의 설계나 절연협조 및 SF₆가스를 절연체로 사용하는 전력설비에 관련된 기술개발 및 연구분야에서 기초지식으로써 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] 李福熙, "高電壓大電流工學", 淸文閣, pp. 64~69, 1993年.
- [2] B. H. Lee, et al, "Dielectric Characteristics of SF_6 Gas under Fast Transient Overvoltages in a Non-Uniform Electric Field", Proc of 11th Int. Conf. on Gas Discharge and Their Application, pp. 1-34-307, 1995.8.
- [3] B.H. Lee and K.O. Lee, "Breakdown Characteristics of SF_6 Gas under VFTOs in Non-uniform Field", Proc. of the Korea-Japan Joint Workshop on Plasma Technologies and Applications, pp. 81~88, 1998.
- [4] S. Yanabu, Y. Murayama, S. Matsumoto, " SF_6 Insulation and its Application to HV Equipment" IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. 26, No. 3, pp. 358~366, 1991.
- [5] L. Niemeyer, L. Ullrich and N. Wiegart, "The Mechanism of Leader Breakdown in Electronegative Cases", IEEE Trans., Vol. E-24, No.2, April, 1989.
- [6] 吉田 外, "直流500KVGIS用遮斷器の絶縁特性", 電學論, 116卷, 10号, pp.1266~1271, 平成8年.
- [7] 이복희 외, "가스절연개폐설비에서 급준성 과도과전압의 측정장치", 전기학회 논문지, Vol. 43, No. 10, pp. 1721~1728, 1994.
- [8] 이복희 외, "불평등전계중에서 과도과전압에 대한 SF_6 가스의 절연특성", 한국전기전자재료학회 추계학술대회 논문집, pp. 306~309, 1995.
- [9] N. Wiegart, et al., "Inhomogeneous Field Breakdown in GIS" The prediction of Breakdown Probabilities and Voltages", Proc. of IEEE PES., 87 WM-192-8, 1987.
- [10] N. Wiegart, et al., "Inhomogeneous Field Breakdown in GIS", Proc. of IEEE PES., 87 WM-190-0, 1987.
- [11] I. M. Bortnik and V. P. Vertikov, "Discharge Development in SF_6 ", Proc. of 3 th ISH, Paper No.32-11,1979.
- [12] G. Riquel, Z. Y. Ren and L. Lefrancois, "Comparison between VFT and lightning impulse breakdown voltages for GIS insulation in presence of defects on live-conductors", Proc. of 6th ISH, Paper No.23-09, 1989.
- [13] H. Hiesinger, "Statistical time-lag in case of VFT breakdown", Proc. of 6th ISH, paper No.32-23, 1989.
- [14] B.H. Lee, et al., "Dielectric Characteristics of SF_6 Gas Stressed by VFTO in Inhomogeneous Field, Proc. symp. of KIEE, pp.282~284, 1996.
- [15] K.O. Lee, B.H. Lee, D.K. Jeon, "Prebreakdown Phenomena of SF_6 Gas in a Non-uniform Field Disturbed by a Metallic Protrusion", Proc. of the spring symposium of KIEEVE, pp.137~141, 1996.
- [16] 이복희 ; "부성가스중에서 침-평판간극의 전구방전현상" 전기학회 논문지, Vol.41, No.12, pp.1477~1484, 1992.

◇ 저자 소개 ◇

이 복 희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~1989년 일본 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수, 1999년 Cincinnati대학 방문교수, 1990년~현재 인하대 공대 전자전기컴퓨터공학부 교수.

이 경 옥 (李京沃)

1960년 5월 24일생. 1987년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.

이 창 준 (李昌峻)

1971년 5월 7일생. 1995년 인천대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 LG산전(주) 연구원.