

불평등전계 중에서 SF₆ - N₂ 혼합기체의 절연파괴 특성

이복희 · 이경옥*
인하대학교

Breakdown Characteristics of SF₆ - N₂ Mixtures in Nonuniform electric Field

Bok-Hee Lee · Kyoung-Ok Lee
Inha University

Abstract - Impulse breakdown voltage characteristics of sulphur-hexafluoride/nitrogen (SF₆ - N₂) mixtures were presented. The applied voltages were the positive and negative lightning impulse (1.2/44μs) and oscillating impulse (0.4μs /2.08MHz) voltages. The predischage current was observed to clarify the breakdown mechanism. The electrode system was consisted of plane to plane configuration with a needle-shaped protrusion whose length and diameter are 10mm and 1mm. The measurements were carried out at the gas pressure of mixtures up to 0.5MPa with nitrogen concentrations varying from 5 to 20%. The electrical breakdown in SF₆ - N₂ mixtures develops with steplike pulses in leader mechanism. The minimum breakdown voltages for the negative lightning and oscillating impulse voltages were higher than those for the positive.

1. 서 론

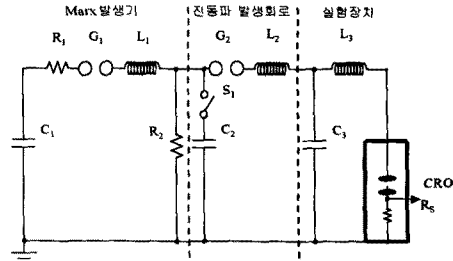
SF₆ 가스의 절연내력은 전극표면 거칠기에 매우 민감하고, 기체절연개폐장치 안에 금속성 이물질이 존재하던지 혹은 돌기부가 있게 되면 급순성 과도과전압에 의한 SF₆ 가스의 절연내력이 대단히 저하되는 문제점을 내포한다[1]. SF₆-기체혼합물들은 순수 SF₆ 가스보다 약 1.1~2.5배 정도까지 높은 절연강도를 나타내고 있지만, C_xF_y, CO₂계 혼합기체들의 경우 독성 불순물을 포함하거나, 아크가 발생하면 기존의 절연물에 이들 기체로부터 탄소(C)가 생성·침적되어 전도층을 형성하는 등의 문제가 발생하는 것으로 보고되어 있다[2]. 따라서 순수 SF₆ 가스에 N₂ 가스를 혼합한 SF₆ - N₂ 혼합기체는 액화온도가 낮고, 경제적이며, 무독성 및 비가연성 등의 화학적 안정성을 갖기 때문에 기술적 적용에 대한 연구로서 매우 유망한 대상으로 새롭게 대두되고 있다. SF₆ - N₂ 혼합기체는 순수 SF₆ 가스에 비해서 이물질의 존재와 전극표면 거칠기 등에 의한 강한 국부전계가 존재할 때 상대적으로 덜 민감하고, 보다 낮은 용점과 저비용의 경제성 등에서 장점이 있다.

그러므로 본 연구에서는 금속성 이물질이 GIS 내부에 존재하는 경우를 모의한 불평등전계 중에서 N₂ 가스를 SF₆ 가스에 일정한 혼합비율로 첨가시킨 SF₆ - N₂ 혼합기체에 대한 절연파괴전압특성을 측정·분석하였다. 이 때 실험전압은 가스절연기기의 운전 중에 발생할 수 있는 정·부극성의 뇌임펄스전압과 진동성 임펄스전압을 각각 사용하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험계의 개략도를 그림 1에 나타내었으며, 뇌임펄스전압의 파형은 1.2/44μs, 진동성 임펄스전압의 파형은 상승시간, 50%감쇠시간 및 진동주파수가 각각 0.4μs, 44μs, 0.83MHz이었다. 모의 GIS 실험장치는 내경 396mm의 스테인리스강을 이용해서 원통형으로 설계·제작하였다. 전극계의 구성에서 상부전극은 반경 45mm인 스테인리스강을 사용하였고, 하부전극은 반경 35mm인 동으로 제작하였다. 하부전극의 중앙에 바늘모양의 돌기물(길이 10mm, 반경 0.5mm)을 설치하고, 인가전압의 변동에 따른 변위전류를 최소화시켜 전구방전전류를 정확하게 검출하기 위하여 하부전극과 돌기물을 전기적으로 절연시켰다.



C₁ = 31.25nF R₁ = 160Ω L₁ = 680μH
R₂ = 1600Ω C₂ = 25nF L₂ = 130μH

그림 1. 실험계의 개략도

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

2.2 실험 방법

시험 용기는 절연기체의 순도를 유지하기 위하여 진공펌프를 사용해서 용기 내부의 압력을 0.133Pa까지 배기시킨 후에 절대압력 0.1~0.5MPa의 범위에서 상용 등급의 SF₆(순도: 99.95%)가스에 고등급의 N₂(순도: 99.999%)가스를 압력 비율에 따라 0, 5, 10, 15, 20% 혼합시킨 SF₆ - N₂ 혼합기체의 임펄스전압에 대한 전구방전전류와 절연파괴특성을 측정·분석하였다. 전극에 인가되는 임펄스전압의 검출용 전계센서의 주파수대역은 40Hz~200MHz로 실험전압을 정확하게 측정할 수 있다[1].

절연파괴전압 및 전구방전전류의 측정은 정·부극성의 뇌임펄스전압 및 진동성 임펄스전압을 각각 30~50회씩 인가하여 이루어졌다. 전구방전전류를 측정하기 위해서 바늘모양의 돌기물에 접촉한 분류기 저항 R_S 는 50 Ω 이고, 분류기로 검출된 신호는 동축케이블에 접속된 10:1 감쇠기를 거쳐 인가전압과 동시에 오실로스코프(LeCoray 9304A)로 실시간 판독·저장되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 혼합비에 따른 절연파괴전압의 특성

기체압력 0.3MPa에서 N_2 가스의 혼합비에 따른 정·부극성의 임펄스전압에 대한 절연파괴전압 특성을 그림 2에 나타내었다. 전반적으로 절연파괴전압은 모든 인가전압의 파형과 극성에서 N_2 가스의 혼합비에 따라 점차 감소의 경향을 보였으며, 정극성의 임펄스전압을 인가했을 때 부극성의 경우보다 절연파괴전압이 매우 낮게 나타났다. 또한 절연파괴전압이 낮은 정극성의 임펄스전압에서는 그의 감소 변화가 거의 평탄한 감소특성을 보였지만, 부극성의 임펄스전압의 경우에는 N_2 가스의 혼합비율이 10%정도까지 매우 급격한 감소의 변화를 보이다가 그 이상의 혼합 비율에서는 점차 평탄한 감소의 경향을 나타내었다. 또한 진동성 임펄스전압에 대한 절연파괴전압은 정·부극성 모두에서 뇌임펄스전압보다 낮게 나타났다.

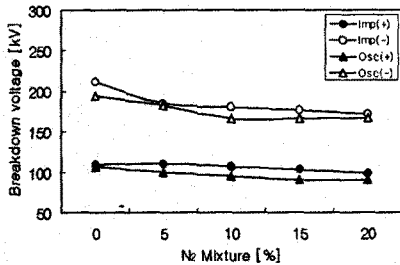


그림 2. N_2 가스의 혼합비에 따른 절연파괴전압의 특성

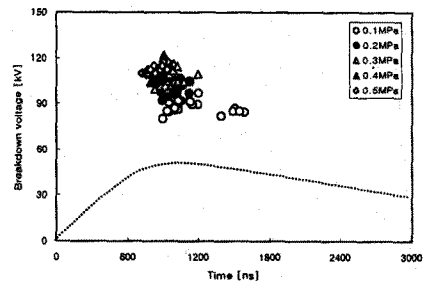
Fig. 2. Breakdown voltage characteristics on the portion of N_2 gas mixed in SF_6 .

인가전압 중 정극성의 뇌임펄스전압 및 진동성 임펄스전압에서 절연파괴전압이 가장 낮게 나타났으므로 실용적 측면을 고려하면 이에 대한 혼합비에 따른 절연파괴전압의 특성을 집중적으로 분석하는 것은 중요한 의미를 갖는다고 사료된다. N_2 가스의 혼합비에 따른 $SF_6 - N_2$ 혼합기체에 대한 절연파괴전압의 특성을 동일 압력에서 정극성의 임펄스전압으로 비교 분석한 결과, 뇌임펄스전압의 경우에는 5, 10, 15, 20% N_2 가스의 혼합비율에서 각각 SF_6 가스 절연내력의 약 100%, 98%, 95%, 90% 정도를 나타내었고, 진동성 임펄스전압의 경우에는 94%, 90%, 84%, 84% 정도의 절연내력을 나타내었다. 따라서 뇌임펄스전압 및 진동성 임펄스전압의 인가전압에 대하여 절연파괴전압이 특히 낮은 정극성의 경우 순

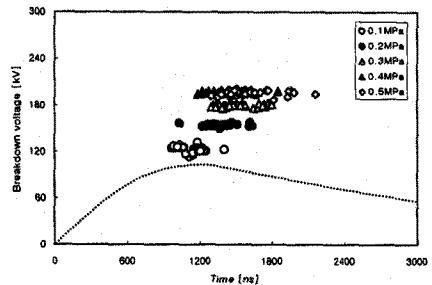
수 SF_6 가스의 90% 이상이 되는 절연내력의 특성과 경제성 등을 고려해 보았을 때 10% $N_2 - SF_6$ 혼합기체를 적용하는 것이 순수 SF_6 가스를 대체할 절연기체로서 타당하다고 사료된다. 그러므로 본 연구에서는 실제 기체절연시스템에서 절연기체로서의 적용 가능성이 높을 것으로 판단되는 10% $N_2 - SF_6$ 혼합기체에 대한 절연파괴특성을 중점적으로 측정 및 분석하였다.

3.2 V-t 특성

$SF_6 - N_2$ 혼합기체에 대한 최대 절연파괴강도는 전극의 형상이 평등전계를 형성할 때 얻어진다. 그러나 실제 현장에서의 적용은 불평등전계 갭들을 피할 수 없다. 이러한 전극의 갭 중에서 절연파괴전압은 인가전압의 파형 및 극성에 강하게 의존한다. 그림 3은 기체압력을 파라미터로 하여 뇌임펄스전압에 대한 10% $N_2 - SF_6$ 혼합기체의 V-t 특성을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 $SF_6 - N_2$ 혼합기체의 V-t 특성을 평가하기 위한 기준으로써 한국공업규격 및 국제전기위원회(IEC 60-2)규정에 의거하여 설정하였다. 즉, 절연파괴전압은 절연파괴 이전에 시험 갭에 인가된 최대 전압을, 절연파괴시간은 전압이 인가되어 절연파괴가 일어나기까지의 시간을 적용하는 방법으로 하였다.



(a) 정극성



(b) 부극성

그림 3. 뇌임펄스전압에 대한 V-t 특성의 기체압력의 의존성

Fig. 3 Dependence of the V-t characteristics under the lightning impulse voltage on the gas pressure.

동일한 전극계에 정극성의 뇌임펄스전압을 인가시킨 경우 10% $N_2 - SF_6$ 혼합기체의 절연파괴특성은 최근에 발표되었던 순수 SF_6 가스의 절연파괴특성과 비교해 보면[1], 절연파괴까지의 지연시간이 짧으며, 절연파괴전압이 피크값 부근에서 거의 집중된 경향을 보였다. 10% $N_2 - SF_6$ 혼합기체는 순수 SF_6 가스의 특성과 같이 부극성인 경우가 정극성일 때보다 압력 의존성이 현저하고, 동일한 조건에서의 절연파괴전압도 높게 나타났으며, 절연파괴전압의 편차도 크게 나타났다. 결국, 이와 같은 특성은 전압의 인가시간이 길어져도 약점이 증가할 확률이나 전극계에서의 더 이상의 열화는 없으며, 단지 전극계 자체의 특성이 두드러지기 때문에 나타난 현상이라고 볼 수 있다. 그러나, 진동성 임펄스전압에 대한 $V-t$ 특성에서 부극성의 경우는 기체압력의 의존성이 크게 나타났지만, 정극성의 경우에는 거의 기체압력에 의존하지 않았으며, 거의 평탄한 특성을 보이고 있다. 기체압력을 높게 하여 절연내력의 향상을 도모하는 경우가 있으나 정극성의 진동성 임펄스전압에 대한 10% $N_2 - SF_6$ 혼합기체의 절연파괴전압은 상기와 같이 기체압력에 따라 거의 변화가 없으므로 가스절연시스템의 절연설계에 있어서 특별히 주의하여야 할 사항이라고 생각된다.

10% $N_2 - SF_6$ 혼합기체의 $V-t$ 특성은 인가전압의 파형 및 극성과 기체압력에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 정극성의 뇌임펄스전압의 경우 절연파괴전압은 기체압력에 따라 다소 다르지만 부극성보다 약 50~90%정도, 진동성 임펄스전압의 경우에는 약 30~100%정도로 낮았다. 최소절연파괴전압이 나타나는 시간영역은 부극성의 뇌임펄스전압의 경우 0.1μs의 기체압력을 제외하고 정극성보다 대략 0.5~1μs정도, 진동성 임펄스전압의 경우에는 모든 기체압력의 조건에서 대략 2~4μs정도 긴 시간영역이었으며, 기체압력이 증가할수록 그 차이는 크게 나타났다. 특히 부극성의 진동성 임펄스전압을 인가한 경우에 시간지연은 가장 길게 나타났다.

3.3 $V-p$ 특성

기체압력은 방전공간 안에서의 전자나 이온의 거동특성에 지배적인 영향을 미치므로 $V-p$ 특성은 절연파괴기구의 해석에서 중요한 요소이다. $V-t$ 곡선의 절연파괴전압 중에서 최소절연파괴전압을 취하여 기체압력의 변화에 따른 $V-p$ 특성을 그림 4에 나타내었다. $SF_6 - N_2$ 혼합기체의 $V-p$ 특성은 순수 SF_6 가스에 비하여 기체압력의 의존성이 적게 나타났다. 이러한 현상은 $SF_6 - N_2$ 혼합기체 내에는 SF_6 가스에 비해서 스트리머 코로나 기간동안 보다 많은 양의 전자가 주입됨으로서 코로나안정화작용이 SF_6 가스보다 넓은 압력의 범위에서 지속되는 것으로 보고되어 있다[3]. 뇌임펄스전압의 경우를 보면 인가전압의 극성에 관계없이 0.4MPa 부근의 기체압력에서 최소절연파괴전압은 최대값을 가지며, 순수 SF_6 가스와 유사하게 기체압력과 더불어 약간 증가하는 특성을 나타내었다. 그러나 부극성의 진동성 임펄스전압의 경우 최소절연파괴전압은 기체압력에 따라 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 정극성의 최소절연파괴전

압은 기체압력에 관계없이 거의 일정한 것으로 나타난 것으로 보아서 뇌임펄스전압에 비해 코로나안정화작용이 보다 견실하게 나타남을 알 수 있다. GIS의 성능평가에서 뇌임펄스전압 시험 이외에 운전 중에 발생하는 과도과전압에 대한 절연특성의 평가와 시험을 병행하는 것이 보다 합리적이고 효과적인 것으로 판단된다.

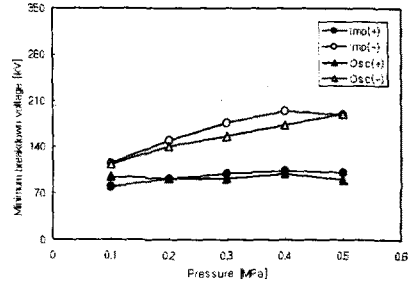


그림 4. 절연파괴전압-기체압력의 특성
Fig. 4 Characteristics of the breakdown voltages with respect to gas pressure.

4. 결 론

불평등전계 중에서 $SF_6 - N_2$ 혼합기체의 절연특성에 대하여 분석 및 검토한 결과를 요약해 보면, $SF_6 - N_2$ 혼합기체 중에 놓인 불평등 전극계의 최저절연파괴전압은 N_2 가스의 혼합비에 따라 큰 변동을 나타내지 않았다. 불평등전계가 형성된 10% $N_2 - SF_6$ 혼합기체의 절연특성은 전반적으로 순수 SF_6 가스와 유사한 특성을 나타내었고, 뇌임펄스전압의 부극성인 경우 정극성보다 절연파괴전압에 대한 압력의존성이 현저하며, 정극성의 진동성 임펄스전압에서는 기체압력의 변화에 거의 의존하지 않았다. 불평등 전극계에 인가된 뇌임펄스전압 및 진동성 임펄스전압 모두에서 정극성의 경우가 부극성일 때보다 최소절연파괴전압이 현저하게 낮았고, 기체압력의 변화에 거의 영향을 받지 않았다. 절연파괴까지의 지연시간은 부극성의 진동성 임펄스전압을 인가한 경우 가장 길게 나타났으며, 순수 SF_6 가스와 동일한 경향을 나타내었다.

(참 고 문 헌)

- [1] B.H. Lee and K.O. Lee, "Breakdown Characteristics of SF_6 Gas under VFOTs in Non-uniform Field", Proc. of the Korea-Japan Joint Workshop on Plasma Technologies and Applications, pp. 81~88, 1998.
- [2] N. H. Malik and A. H. Qureshi, "A review of electrical breakdown in mixture of SF_6 and other gases", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-14, No 1, pp. 1~11, 1979.
- [3] T. Watanabe and T. Takuma, "The breakdown voltage and discharge extension of long gaps in Nitrogen- SF_6 and Air- SF_6 gas mixtures", J. Appl. Phys., Vol. 48, No. 8, pp. 3281~3287, 1977.