

불평등 전계중의 SF₆가스 절연파괴특성

서 길수[○], 문 인욱, 김 익수, 이 형호
한국전기연구소 고전압연구팀

Breakdown Characteristics of SF₆ Gas under Non-Uniform Field

Kil-Soo Seo, In-Wook Moon, Ik-Soo Kim and Hyeong-Ho Lee
High Voltage Research Team, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

An influences of gap clearance, pressure and applied voltage shape on breakdown characteristics are investigated by using a rod-to-plane electrode in SF₆ gas. In case of D.C and A.C, a corona stabilization effect increases the breakdown voltage remarkably for lower pressure than 0.2MPa, whereas in case of negative D.C this effect exists independently of gas pressure. This suggests that an insulation optimization in a practical apparatus is needed to prevent a corona appearance through the removal of local field enhancement.

1. 서론

實전력기기의 형상은 가능한 한 준평등 및 평등전계가 되도록 설계를 행하지만 長期사용 및 조립시의 불순물, 파티클 등의 원인에 의해 기기의 내부에 불평등전계가 형성되는 경우가 빈번하다. 이로 인하여 발생하는 코로나는 가스의 절연성능을 저하시킨다. 따라서 이러한 불평등전계는 實전력기기에 있어서 신뢰성 측면에서 보면 상당히 중요하다[1].

가스중의 불평등전계방전은 평등전계중의 그것에 비해, 공간전하의 영향을 강하게 받는 특성을 가지기 때문에 파괴전압보다도 상당히 낮은 전압에서 스트리머가 형성되고, 全路파괴가 발생되기 위해서는 스트리머에 의해 생성된 공간전하가 존재하는 전계중을 후속방전이 진행해야 한다. 이 방전은 공기중의 long gap의 경우 leader에 상당하고, short gap에서는 2차스트리머에 해당된다. 비교적 많은 data를 확보한 공기중조차도 불평등방전의 해석에 관해서는 정성적인 설명에 머물러 있는 실정이므로, 특수 가스인 SF₆의 경우 그 방전전압을 예측하는 것은 현재 상당히 어렵다.

본 연구에서는 이러한 문제점과 관련하여, 실전력기기의 불평등 전계계를 모의한 봉-평판 전계계를 이용하여 실증시험 및 전계해석을 행하고, 갭간격, 가스압 및 인가전압파형이 절연파괴전압에 미치는 영향을 분석하고, 또한 코로나발생에 의한 공간전하 전계를 중심으로 방전진전현상을 규명하였고 이와 관련하여 가스압력에 따른 방전경로를 관측하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 봉-평판 전극이 설치된 실험탱크는 그림 1에 나타낸 바와 같이 실효용적 부피: 1.458216m³인 362kV급으로써, 실험전극을 취부하기 위하여 실험탱크하부와 평판전극 사이에는 폴리에치렌봉을 사용하여 평판전극을 평행하게 설치하였다.

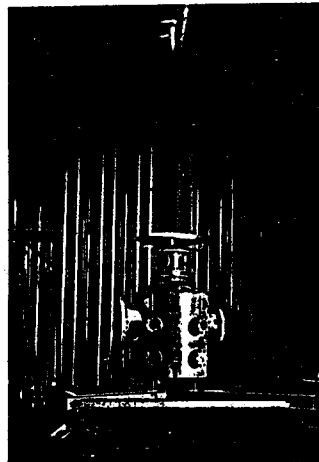


그림1 362kV급 실험용 챔버

Fig 1 Experimental chamber rated at 362kV

그림2는 실험용 전극의 탱크내의 취부 모양을 나타낸다. 상부전극인 봉전극은 길이가 10cm이고,

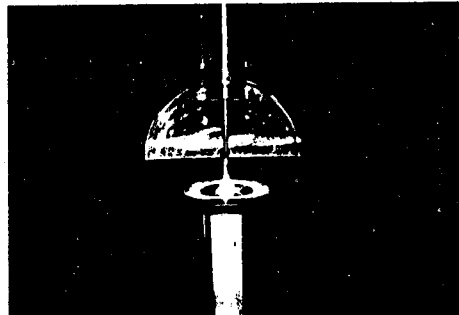


그림2 실험전극의 취부 모양

Fig 2 Electrode configuration in chamber

그 직경(φ)은 5mm로써, 재질은 Stainless를 사용하였고, 하부전극인 평판전극은 직경이 30cm로써 재질은 알루미늄을 사용하였고, 전극 단말부는 로고스키형으로 제작하였다.

전원장치로는 400kV급-DC내압기 및 1100kV급-상용주파내전압시험설비를 이용하였다.

실험용 챔버의 내부는 절대가스압력이 0.66기압에서 6기압까지의 범위로서, 전극간 이격거리는 1, 3, 5cm이다. 시험가스는 순도 99.99%인 SF₆가스를 사용하였다.

또한 방전경로를 관측하기 위하여 챔버의 관측창에 카메라를 설치하여 벌브노출(Bulb)-shut로 촬영하였다.

2.2 실험방법

실험에서의 실험조건 변수는 가스압 및 갭간격이다. 갭간격을 일정하게 유지한 채로 가스압력을 변화시키면서 절연파괴시의 전압을 측정하였다. 50%절연파괴전압은 수차례에 걸친 예비방전을 실시한 후, 10회의 측정을 행하고, 그중 최대치와 최소치를 제외한 나머지 결과치를 평균하여 결정했다.

3. 실험결과 및 분석

SF₆가스에 대해서는 전자의 부착계수를 고려한 스트리머 이론에 의해서 파괴전압을 이론적으로 계산하는 식이 다음과 같이 제안되어 있다[2,3].

$$V_{th} = 89 \cdot P \cdot u \cdot d \cdot \left(1 + \frac{0.175}{\sqrt{P \cdot R}}\right) \quad (1)$$

여기에서,

- V_{th} : SF₆가스의 절연파괴전압의 이론치 [kV]
- P : 절대가스압력 [atm]
- d : 전극간 이격거리 [cm]
- R : 전극의 선단 곡률반경 조화 평균 [cm]
- u : 전계이용율(=평균전계/최대전계)을 나타낸다.

그림3은 봉-평판 전극계에 있어서 유효요소법을 이용한 전계분석 결과를 평균전계(V/d, V:인가전압, d:전극간거리)로 규격화한 전계집중계수(f=E/(V/d))로써 나타내고 있다.

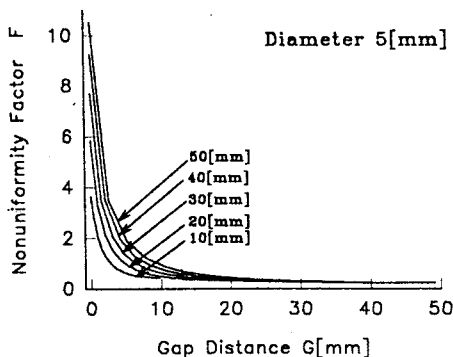


그림3 봉-평판전극계의 전계분포 특성

Fig 3 Field distribution for rod-plane electrode

그림4는 전극계의 절연파괴전압에 미치는 전계집중계수와 압력변화에 따른 코로나 안정화 영역을 나타낸 것이다.

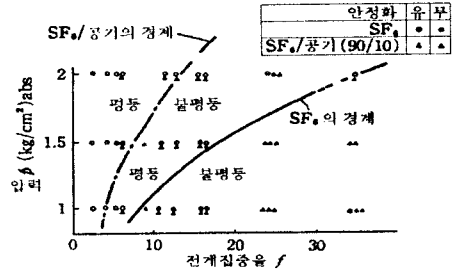


그림4 코로나 안정화의 경계[4]

Fig4 Range of Corona Stabilization

3.1 정·부극성 직류파괴특성

그림5는 봉전극 선단반경 2.5mm인 봉-평판 전극에 전극간 이격거리 및 압력을 변화시켰을 경우의 50%절연파괴전압을 측정하는 것이다.

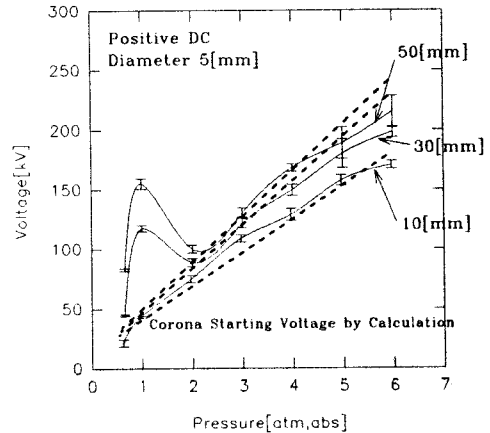


그림5 50%정극성 직류파괴전압 특성

Fig 5 50% breakdown voltage for positive D.C

갭거리가 1cm일 때의 정극성 직류파괴전압-가스압 특성은 f=4.2로써 그림4에서 보는 바와 같이 전극계는 평평동계의 영역에 포함되어 코로나방전을 경유하지 않고 곧바로 절연파괴에 이른다. 실험치는 이론치와 거의 일치하고 있다.

갭거리가 3cm인 경우는 f=10.1이고, 가스압의 변화에 따라 코로나 안정화 영역이 존재하며, N형특성이 뚜렷하게 나타난다. 파괴전압은 p_m≒1기압에서 극대값 V_m이 나타나고, p_c≒2기압에서 극소값 V_c를 가진다.

갭간격이 5cm인 경우는 f=15.6으로서 코로나영역이 갭간격 3cm인 경우보다 넓어지는 것을 알 수 있다. 이는 그림3의 전계집중계수치에서 알 수 있듯이, 갭간격이 크질수록 전계집중계수의 증가, 즉 불평평동의 증가에 의하여 코로나 안정화 현상에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

갭간격이 각각 1cm, 3cm, 5cm인 경우의 가스압력 변화에 따른 절연파괴전압 특성은 파괴전압의 극대값 V_m을 발생시키는 가스압(p_m)은 큰 차이가 보이지 않지만 갭간격이 크짐에 따라 극소값 V_c는 증가하였다.

그림6은 전향에서 사용한 전극계에 부극성 직류전압을 인가한 경우의 파괴전압-가스압력의 특성을 나타낸다. 본 실험

의 가스압력 범위에서는 정극성 경우처럼 극대, 극소값이 존재하는 N형 특성이 나타나지 않았다. 코로나안정화 작용이 전 가스압에 걸쳐 광범하게 발생하고, 그 효과는 정극성보다 상당히 안정하고 크다는 것을 알 수 있다. 기기의 실사용 상태에서도 부극성의 절연파괴전압에 비해 정극성의 그것이 훨씬 낮기 때문에 부극성의 방전전압은 크게 문제가 되지 않는다.

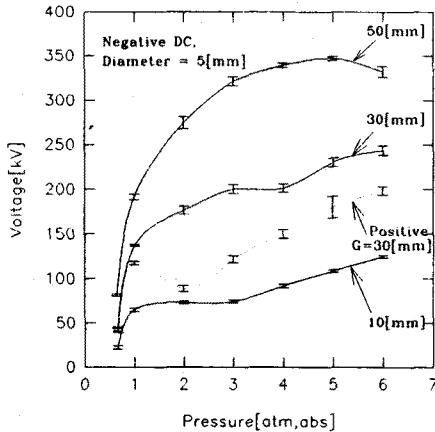


그림6 부극성 직류 50%파괴전압 특성
Fig 6 50% breakdown voltage for negative D.C

그림 7은 전극간 간격이 3cm이고 부극성직류전압 인가시의 압력에 따른 방전경로에 대해서 관측한 것이다. 그림과 같이 방전경로는 압력이 증가함에 따라 휘어진다. 이와 같이 압력에 따라 영향을 받는 것은 압력이 높아질수록 공전하밀도의 증가와 확산계수가 감소하기 때문이다. 결과적으로 고기압에서는 파괴스트리머는 더욱 휘어진다. 이러한 현상은 스트리머의 성장이나 방전전전을 방해하는 부이온의 공간전하가 없으면 직선으로 진행되는 것으로 알려져 있다[7].

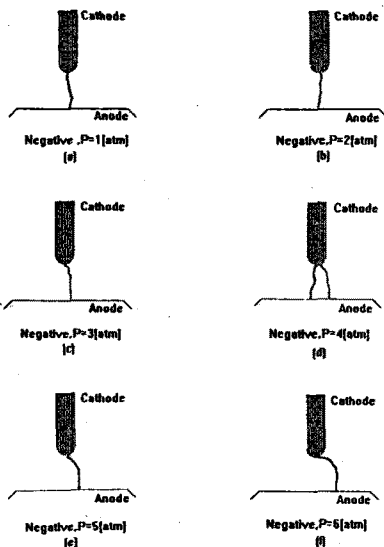


그림 7 갭간격 3cm 봉-평판 전극에서의 방전경로
Fig 7 Spark trajectories in a 3cm negative rod-plane gap

3.2 교류전압파괴특성

그림8은 갭간격이 1, 3, 5cm인 봉-평판전극계를 이용하여 교류상용주파전압을 인가하였을 때의 파괴전압-가스압력 특성이며, 그림중의 점선은 방전개시전압의 계산치를 나타낸다.

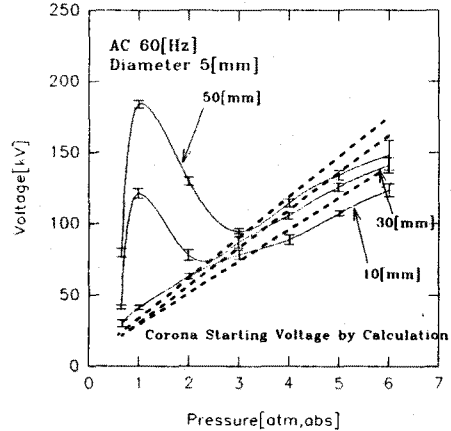


그림8 갭간격 변화에 대한 AC파괴전압-가스압력 특성
Fig 8 A.C breakdown voltage-gas pressure according to gap distance

갭간격이 1cm일 때는 직류와 마찬가지로 방전개시전압=파괴전압의 관계가 성립하여 코로나를 경유하지 않고 파괴되었다. 본 연구의 경우, 파괴전압실험치는 절대가스압력이 3기압 이상에서 계산치보다 약간 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 압력이 증가하면 파괴실험의 반복에 의해서, 평판전극의 표면에 roughness가 존재하여 전극면적효과를 나타내기 때문이다.

갭간격이 3cm일 때 실험치는 절대가스압력 1기압에서 최대치를 나타내고 약 2기압에서 계산치와 거의 일치하면서 선형적으로 증가한다. P_m 이상의 가스압에서 방전전압이 저하하는 원인에 대해서는 (1) 정이온의 확산이 감소하고, (2) 광전리가 활발하게 되어 streamer가 확산하기 쉬워지며, (3) 광전자의 도달거리가 작아 이온의 확산이 충분하지 않게 되기 때문이다.

본 실험의 경우 갭간격이 비교적 큰 5cm의 경우도 절연파괴특성은 전반적으로 갭간격 3cm의 경우와 유사한 특성을 나타내었다.

갭간격 변화에 따른 파괴전압-가스압력의 특성은 $P < 0.8$ 기압에서는 갭간격의 값에 상관없이 방전전압이 급격하게 상승한다. V_m 및 P_m 의 값은 갭간격이 크짐에 따라서 증가하는 경향을 나타내며, 전반적인 특성은 정극성 직류파괴특성과 같다.

4. 결론

실전력기기의 불평등전계를 모의한 봉-평판 전극을 이용하여, SF₆가스중에 있어서 갭간격, 가스압 및 인가전압파형이 절연파괴특성에 미치는 영향을 분석하였다.

정극성 직류 및 교류의 경우, 코로나 안정화작용에 의한 절연파괴전압의 상승은 SF₆가스압이 약 2기압보다 낮을시크게

나타났으나, 이에 반하여 부극성 직류는 가스압에 관계없이 코로나 안정화작용이 전반적으로 존재하여 절연과괴전압이 높았다. 따라서, 고기압 SF₆가스를 사용하는 실전력기기에 있어서는 정극성직류 및 교류를 중심으로 기기의 최적절연설계에 의한 국소 고전계의 제거를 통하여 코로나의 발생을 방지할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] R.J. Van Brunt and M. Misakian "Mechanisms for Inception of DC and 60-Hz Corona in SF₆
- [2] T. Nitta, Y. Shibuya, "Electrical Breakdown of Long Gaps in Sulfur Hexafluoride", IEEE Trans., Vol. PAS-90, No.3 PP1065-1071.
- [3] 新田, 山田 "SF₆Gas의 絶縁特性" 三凌電氣技報, Vol.44 No.9, PP 1133-1142, 1970
- [4] 高野哲美·宮本昌廣·松浦清: 沼58電學大會 113
- [5] M. Zwicky, IEEE Trans. EI, Vol. 22 pp. 317-324, 1987
- [6] R.E. Wootton, S. J. Dale & N.J. Zimmerman: "Electric Strength of Some Gases and Gas Mixtures", Gaseous Dielectrics II, Pergamon Press, 137(1980-3)
- [7] N. H. Malik, A. H. Qureshi and G. D. Theophilus "Static field breakdown of SF₆-N₂ mixtures in rod-plane gaps" IEEE Trans. Insul, Vol EI-14 NO 2 April 1979