전극 형상에 따른 C4F7N 가스의 DC 중첩 절연파괴 특성 분석

고건*, 권일*, 허창근**, 황휘동**, 정동훈**, 이방욱*
HVDC 전력연구실, 한양대학교 ERICA*, ㈜효성 중공업연구소**

Analysis of DC-Superimposed Breakdown Characteristics of C4F7N Gas under Different Electrode Geometries

Geon Go*, Il Kwon*, Chang-Geun Heo**, Hui-Dong Hwang**, Dong-Hoon Jeong** Bang-Wook Lee*
HVDC EPL, Hanyang University ERICA*, Hyosung Corporation**

Abstract - SF6 사용 저감을 위한 대체 절연가스 연구가 확대됨에 따라, C4F7N 가스의 절연파괴 특성에 대한 기초 데이터 확보가 요구되고 있다. 특히 HVDC GIS/GIL과 같은 DC 가스절연 시스템에서는 DC pre-stress 상태에서 뇌임펄스가 중첩될 수 있으므로, 복합전압 조건에서의 절연파괴 특성 분석이 필요하다. 또한 가스 절연파괴 특성은 전극 형상에 따른 전계 분포의 영향을 받기 때문에, DC 중첩 조건에서도 전극 형상에 따른 차이를 검토할 필요가 있다. 본 논문에서는 C4F7N 가스를 대상으로 봉-평판 및 실린더 전극 조건에서 LI(-) 단독 및 DC(-)+LI(-) 중첩 절연파괴 시험을 수행하고, COMSOL Multiphysics 기반 정전계 해석을 통해 전극 형상별 전계 분포를 비교하였다. 시험 결과, 봉-평판 전극에서는 DC 중첩 조건에서 평균값과 분포 폭의 변화가 나타난 반면, 실린더 전극에서는 평균 절연파괴전압 저하가 뚜렷하지 않아 전극 형상에 따른 DC 중첩 영향 차이를 확인하였다.

1. 서 론

SF6는 우수한 절연성능과 소호성능으로 가스절연 전력기기에 널리 사용되어 왔으나, 높은 지구온난화지수로 인해 사용 저감 및 대체 절연가스 적용에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. C4F7N 가스는 높은 절연성능을 갖는 fluoronitrile 계열 가스로, SF6 대체 절연매질 후보 중 하나로 검토되고 있다[1].

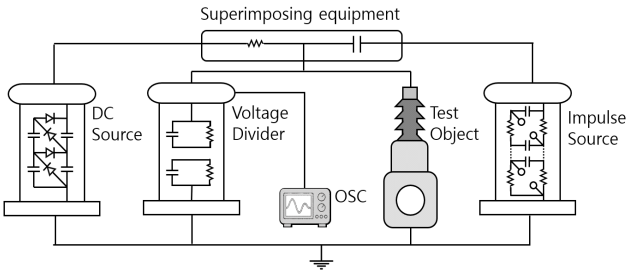
HVDC GIS/GIL과 같은 DC 가스절연 시스템에서는 정상 운전 중 DC pre-stress가 지속적으로 인가되며, 운전 중 뇌임펄스와 같은 과도전압이 중첩될 수 있다. 따라서 DC 절연설계를 위해서는 단일 임펄스 조건뿐만 아니라 DC pre-stress가 인가된 상태에서 임펄스 전압이 중첩되는 복합전압 조건에서의 절연파괴 특성을 검토할 필요가 있다[2]. 또한 가스 절연파괴 특성은 가스 종류와 압력뿐만 아니라 전극 형상에 따른 전계 분포의 영향을 받는다[3]. 따라서 DC 중첩 조건의 절연파괴 특성은 전극 형상에 따른 전계 집중 위치와 공간적 분포 형태를 함께 고려하여 해석할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 C4F7N 가스의 DC 중첩 절연파괴 특성에 대한 전극 형상의 영향을 분석하기 위해, 봉-평판 전극과 실린더 전극 조건에서 LI(-) 단독 및 DC(-)+LI(-) 중첩 절연파괴 시험을 수행하였다. 또한 각 조건의 평균 절연파괴전압과 절연파괴전압 분포 특성을 비교하여, 전극 형상에 따른 DC 중첩 영향의 차이를 분석하였다.

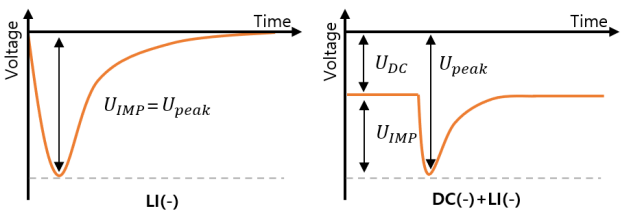
2. 본 론

2.1 실험 구성

그림 1은 C4F7N 가스의 DC 중첩 절연파괴 특성을 분석하기 위해 구성한 회로도를 나타내고 있다. 회로는 DC 전압원, 임펄스 전압 발생부, 보호 저항 및 커플링 커패시터로 구성되며, DC 중첩 조건에서는 시험 전극에 DC(-) 전압을 사전에 인가한 상태에서 동일 극성의 LI(-) 전압을 중첩하였다. 보호 저항과 커플링 커패시터를 통해 임펄스 전압의 DC 전압원 측 유입을 억제하고, 중첩 과정에서 발생할 수 있는 서지성 전류를 제한하였다.



〈그림 1〉 DC 중첩 임펄스 절연파괴 시험 회로도



〈그림 2〉 인가 전압 파형

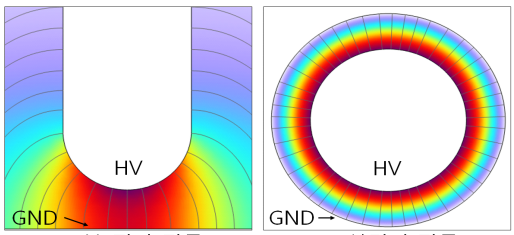
〈표 1〉 실험 조건

항목	조건
절연가스	C4F7N
전극 형상	봉-평판, 실린더
압력	3, 3.5 bar
인가 전압 종류	LI(-), DC(-)+LI(-)

시험 전극은 봉-평판 전극과 실린더 전극으로 구성하였다. 봉-평판 전극은 반경 15 mm의 봉 전극과 평판 전극 사이에 10 mm 간격을 두어 구성하였고, 실린더 전극은 내경 60 mm, 외경 90 mm의 동축 구조로 구성하였다. 시험 압력은 3 bar 및 3.5 bar로 설정하였으며, 인가 전압은 그림 2와 같이 IEC 60060-1에 따른 표준 뇌임펄스 파형을 기준으로 인가하였다[4]. 각 조건에서 LI(-) 단독 및 DC(-)+LI(-) 중첩 시험을 up-and-down method로 30회 수행하였으며, 측정된 절연파괴전압의 평균값 및 분포 특성을 비교하였다. DC 중첩 조건에서 인가한 DC(-) 전압은 봉-평판 전극 3 bar 조건의 LI(-) 단독 평균 절연파괴전압을 기준으로 약 0.5 p.u.로 설정하였다.

2.2 전극 형상에 따른 정전계 분포 비교

전극 형상에 따른 전계 분포 차이를 비교하기 위해 COMSOL Multiphysics를 이용하여 정전계 해석을 수행하였다. 해석은 동일한 전압 조건에서 수행하였으며, 전극 형상에 따른 전계 집중 위치와 공간적 분포 형태를 비교하였다. 그림 3은 봉-평판 전극과 실린더 전극의 정전계 해석 결과를 나타낸 것이다. 봉-평판 전극에서는 봉 전극 끝단부에 전계가 집중되었으며, 실린더 전극에서는 내측 전극 주변을 따라 비교적 대칭적인 전계 분포가 형성되었다. 따라서 이후 절연파괴전압 결과는 전극 형상별 전계 분포 차이를 고려하여 분석하였다.



(a) 봉-평판 전극 (b) 실린더 전극

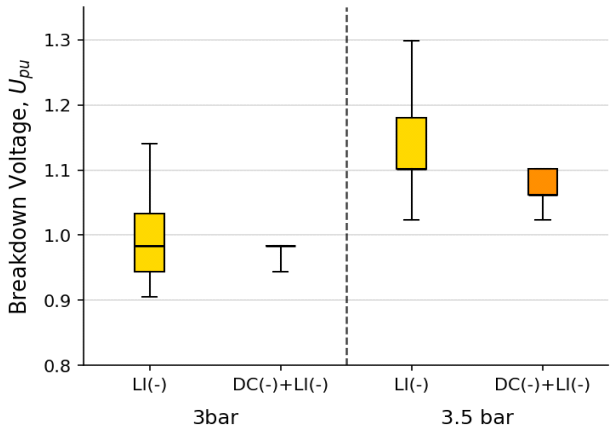
〈그림 3〉 전극 형상 및 정전계 해석 결과

2.3 전극 형상별 DC 중첩 절연파괴 특성

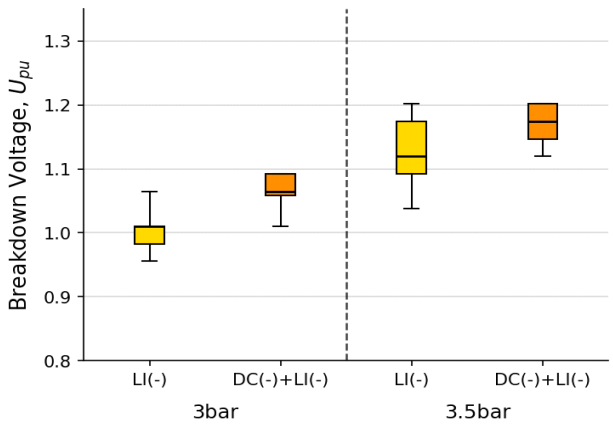
절연파괴전압은 전극 형상별 변화 경향을 비교하기 위해 식 (1)과 같이 p.u.로 정규화하였다. 기준값은 각 전극 형상에서 3 bar LI(-) 단독 조건의 평균 절연파괴전압으로 설정하였다.

$$U_{PU} = \frac{U_{BD}}{\overline{U}_{BD,LI(-),3bar}} \quad (1)$$

여기서 U_{BD}는 각 조건에서 측정된 절연파괴전압이며, $\overline{U}_{BD,LI(-),3bar}$는 해당 전극 형상에서 3 bar LI(-) 단독 조건의 평균 절연파괴전압이다. 본 연구에서는 모든 전극 형상 및 압력 조건에 동일한 DC(-) 전압을 인가하였다. 따라서 정규화된 절연파괴전압을 이용하여 동일한 DC pre-stress 조건에서 전극 형상별 DC 중첩 영향의 차이를 비교하였다.



〈그림 4〉 DC 중첩 조건에 따른 절연파괴전압 분포(봉-평판)



〈그림 5〉 DC 중첩 조건에 따른 절연파괴전압 분포(실린더)

그림 4와 그림 5는 각각 봉-평판 전극과 실린더 전극 조건에서 측정한 LI(-) 단독 및 DC(-)+LI(-) 중첩 절연파괴전압 분포를 나타낸 것이다. 본 절에서는 각 전극 형상에서 DC 중첩에 따른 절연파괴전압의 평균값 및 분포 특성 변화를 비교하였다.

봉-평판 전극의 경우, 3 bar 및 3.5 bar 조건 모두에서 LI(-) 단독 조건과 DC(-)+LI(-) 중첩 조건의 최저 절연파괴전압은 유사하였다. 반면, 평균값과 분산 정도는 중첩 여부에 따라 차이를 보였으며, DC 중첩 조건에서는 LI(-) 단독 조건에 비해 표준편차가 감소하는 경향을 보였다. 이는 국부 고전계가 형성되는 봉-평판 전극에서 DC pre-stress가 절연파괴전압 평균값 및 분포 특성에도 영향을 줄 수 있음을 의미한다.

실린더 전극의 경우, 3 bar 및 3.5 bar 조건 모두에서 DC(-)+LI(-) 중첩에 따른 평균 절연파괴전압 저하는 확인되지 않았다. 또한 분포 변화는 봉-평판 전극에 비해 상대적으로 제한적으로 나타났으며, 특히 3 bar 조건에서는 LI(-) 단독 조건과 DC(-)+LI(-) 중첩 조건이 유사한 산포를 보였다. 따라서 C4F7N 가스의 DC 중첩 절연파괴 특성은 전극 형상에 따른 전계 집중 위치와 공간적 분포 형태에 따라 평균 절연파괴전압과 분포 특성이 서로 다르게 나타나는 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구에서는 C4F7N 가스를 대상으로 봉-평판 및 실린더 전극 조건에서 LI(-) 단독 및 DC(-)+LI(-) 중첩 절연파괴 시험을 수행하였다. 시험 압력은 3 bar 및 3.5 bar로 설정하였으며, DC 중첩 조건에서는 봉-평판 전극 3 bar LI(-) 단독 평균 절연파괴전압의 약 0.5 p.u.에 해당하는 동일한 DC(-) 전압을 모든 조건에 인가하였다.

전계해석 결과, 봉-평판 전극에서는 봉 전극 끝단부에 전계가 집중되었으며, 실린더 전극에서는 내측 전극 주변을 따라 비교적 대칭적인 전계 분포가 형성되었다. 절연파괴 시험 결과, 봉-평판 전극에서는 DC 중첩 조건에서 최저 절연파괴전압이 LI(-) 단독 조건과 유사하였으나, 평균값과 분포 폭은 감소하는 경향을 보였다. 반면, 실린더 전극에서는 DC 중첩에 따른 평균 절연파괴전압 저하가 확인되지 않았으며, 분포 변화도 봉-평판 전극에 비해 제한적으로 나타났다.

이러한 결과는 C4F7N 가스의 DC 중첩 절연파괴 특성이 전극 형상에 따른 전계 집중 위치와 공간적 분포 형태에 따라 달라질 수 있음을 보여준다. 이는 DC 중첩 절연특성 평가 시 단순히 동일한 전압 조건에서의 절연파괴전압 크기만을 비교하기보다, 전극 형상에 따른 전계 분포와 측정값의 분포 변화를 함께 해석할 필요가 있음을 시사한다. 본 연구 결과는 C4F7N 가스를 적용한 DC 가스절연 기기에서 전극 형상에 따른 복합전압 절연특성을 해석하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

[1] L. Silvestre, T. N. Tran, A. Kumada, and K. Hidaka, “Nanosecond Breakdown Characteristics of C4F7N and Various Mixtures at Pressures Above 1 Atmosphere in Comparison with SF6,” Applied Sciences, vol. 14, no. 23, 11268, 2024.

[2] CIGRE Working Group D1.51, Dielectric Testing of Gas-Insulated HVDC Systems, CIGRE Technical Brochure 842, 2021.

[3] M. M. Ispirli et al., “The effect of DC voltage pre-stress on the breakdown voltage of air under composite DC and LI voltage,” Energies, vol. 15, no. 4, Art. no. 1353, 2022.

[4] IEC 60060-1, High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements, International Electrotechnical Commission.