

## SF<sub>6</sub> 가스중 V-t절연 파괴특성

서 길수, 김 익수

한국전기연구소 고전압연구팀

### Voltage Time characteristic of electrical breakdown in SF<sub>6</sub>

Kil-soo Seo, Ik-soo Kim

High voltage team, Korea Electrotechnology Research Institute

**(Abstract)**

In this paper, Voltage-time characteristics of lightning impulse and switching surge breakdown in SF<sub>6</sub> is studied on the gap and various pressure. The characteristics is categorized into three pattern depending on the configuration of the gap and gas pressure. The properties of the voltage-time characteristics in these patterns are generalized as semi-empirical formula which will be useful in the quantitation voltage evaluation of insulation coordination and the abnormal voltage protection of SF<sub>6</sub> insulated power equipment..

**1. 서 론**

고기압 SF<sub>6</sub>가스를 절연매체로 한 가스절연 방식은 이미 많은 변전소에 채용되어, 그 이용은 현재에도 점점 증가하고 있다. 특히 최근에는 고기압 SF<sub>6</sub>가스절연기기는 가스절연 변전소, 가스차단기 뿐만 아니라, 판로기중 송전에도 실용화되어, 가스절연 방식의 중요성은 이후에도 한층 높아질 것으로 추정된다. 이러한 경세로부터 SF<sub>6</sub>가스의 절연에 관하여 많은 연구가 진행되었으며, 그 중에서도 전압-시간 특성에 대해서는 공기절연 방식의 전압-시간 특성과는 다른 평할한 특징이 있는 것으로 보고되어 있다.

일반적으로 어떤 기체중의 전극에 전압을 인가하면 그 파괴시간에 시간특성이 발생한다는 사실은 이미 잘 알려져있다. 이 특성은 시간축에 따라서 방전현상에 지배되는 영역과 갭 조건의 변화에 지배되는 영역으로 나누어 진다. 즉 전자는 갭에 전압을 인가한 순간부터 절연파괴가 완료되기까지는 방전의 시간지연이 있으며, 이것은 전압-시간특성을 여러형태로 변화시키는 주된 요인이다. 후자는 기기의 운전중 갭조건의 어떤 변화에 의하여 전압-시간특성이 나타나는 영역이다. 갭 조건의 변화요인은 이물의 혼입, 전극표면상태의 변화등이 주된 요인이다[1-5].

압축 SF<sub>6</sub>가스의 전압-시간 특성은 가스절연 변전소나 다른 전력기들의 보호와 절연협조에 설계에 있어서 실질적으로 대단히 중요하다. 가스절연 전력기기는 접지된 금속용기 완전히 둘러싸여져 있으므로, 제방에 유기되는 이상전압은 통상적인 시스템에서의 이상전압과는 아주 다르다.

SF<sub>6</sub>가스의 전압-시간 특성은 인가전압의 극성, 전계분포, 가스압력등에 따라 현저한 영향을 받으며, 그 양상은 주로 3개의 형식으로 대별된다. 실제기기에 관해서는 부극성의 서어지에 대하여 극성효과 때문에 파괴전압이 상당히 저하하는 형식이 특히 중요하다. 따라서 절연협조면에서는 부극성 서어지가 지배적인 요인이 된다. 그러나 SF<sub>6</sub>가스의 절연파괴 기구에 대해서는 불확실한 점이 많이 남아 있다. 이와 같이 시험 조건에 따라 전압-시간 특성이 다르게 나타나므로, 본 고에서는 각종 갭조건과 가스압력하에서 파두장이 매우 짧은 서어지로 부터 개폐서어지까지 이르는 넓은 시간영역에서 SF<sub>6</sub>의 전압-시간 특성을 조사하여 전압-시간특성의 수식화를 검토하였다.

**2. 단시간 영역의 V-t특성의 수식화**

단시간영역의 V-t특성의 수식화에는 다음과 같은 방법이 사용되고 있다. 그러나 수식화가 곤란한 것은 V-t특성은 갭, 극성, 전압파형등 여러인자에 좌우되기 때문이다. 따라서 시험 및 사용조건에 적합한 V-t특성이 수식화를 위해서는 이들 인자를 정확하게 파악해 두는 것이 좋다.[6-9]

**2.1 역승법칙.**

V-t특성을 시간의 역승으로 나타내는 것으로 고체절연 및 액체절연에서도 적용된다. 이경우의 실험식은 다음과 같이 역승법칙으로 주어진다.

$$V_{bd}(t) = V_{50} \left( \frac{t}{t_{50}} \right)^{-\frac{1}{n}} \quad (1)$$

여기서 V<sub>bd</sub>(t)는 시간 t에서의 절연파괴전압, V<sub>50</sub>은 시간 t<sub>50</sub>에서의 50%파괴전압, n은 정수이다. 정수 n은 갭의 형상, 가스압력, 전압파형 및 극성등에 의존한다. 이 실험식은 취급이 간단하므로 단시간 영역뿐만 아니라 장시간영역에서도 사용된다. 그러나 물리적 근거가 없으므로 V-t특성의 검토에는 부적합하다.

**2.2. 파두준도를 고려한 실험식**

이 경우의 V-t특성은 직선상승파의 파두준도를 매개변수로 결정된다.

$$V_{bd} = K_1 \cdot S \cdot t \quad (2)$$

여기서 K<sub>1</sub>는 시간계수, 파두준도 S[kV/μs]이고 t는

$$t = \frac{V_{min}}{S} \quad (3)$$

이고, V<sub>min</sub>는 최소파괴전압이다.

이방법은 전압-시간곡선의 계산이 용이한 반면에 적용데이가 적다는 단점이 있다..

**2.3 면적법칙**

V-t특성의 수식화를 위한 면적법칙은 최저절연파괴전압 V<sub>min</sub>을 초과한 파형의 면적이 인가전압의 파형에 따르지 않고 어느 일정값에 이르면 방전이 완료된다는 원리이다.

V-t(면적일정법칙(Equal Voltage-time area criterion))은 다음식으로 정의된다.

$$\int_{t_0}^{t_0+t_1} [V(t) - V_{min}] dt = A_f = 일정 \quad (4)$$

t<sub>0</sub>는 V<sub>0</sub>에 이르는 데 소요되는 시간이고, t<sub>1</sub>는 방전형성시간이다. 이기법은 V-t곡선의 계산이 복잡하지만 이론적 전제가 가능하고, 표준파 이외에도 적용할수 있다.

**2.4 V-t특성의 형식에 의한 실험식**

V-t특성의 경향을 조사할 경우 크게 3종류의 형식으로 즉 Pattern I, Pattern II, Pattern III으로 대별된다.

Pattern I은 S.Imp에 의한 절연파괴전압의 최저값이 장시간영역에서는 단일 전자사태이론에 의한 이론치에 거의 일치하고, V-t곡선의 상승이 완만하여 단시간영역에서는 절연파

과전압은 크게 상승하지 않는다. 준평동전계에서 대기압 정도의 압력이 낮고, 전극면적이 적은 정극성일 때 관측된다. 또한 이 영역의 V-t특성을 나타내는 실험식은

$$V_1(t) = V_{th}(1 + K_1 \cdot t^{-n_1}) \quad (5)$$

$V_{th}$ : 이론적 과과전압.

$K_1, n_1$ : 갭조건에 의해 결정되는 정수

Pattern II는 S.Imp과형에 의한 절연과과전압의 최저값이 부극성의 전극효과에 의해 이론치보다 낮게 되는 경우로서 수  $\mu$ s 정도의 단시간 영역에서는 절연과과전압은 급상승한다. 이 형식은 가스압력이 높은 실체의 전력기기에서 많이 나타난다. 이 형식의 수식은 다음과 같이 나타낸다.

$$V_2(t) = (1 + K_1 \cdot t^{-n_1}) \cdot [V_{min} + (V_{th} - V_{min}) \cdot \exp(-K_2 \cdot t^{n_2})] \quad (6)$$

$V_{min}$ : 매우 긴 S.Imp전압에 대한 과과전압

$K_2, n_2$ : 정수

이방형은 식은 약간 복잡하지 않은 실용적인 갭조건에서 계산이 가능하고, 가스압력, 전극표면조건, 갭형상을 고려할 수 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 실험에서는 평동전극인 동축원통구조의 전극의 유효면적(effective area)이 같고, 전극에 뇌임펄스전압, 개폐임펄스전압을 인가하였을 때의 V-t를 파악하고, 전극의 표면 거칠기에 따른 절연과과전압의 특성을 실험을 통하여 분석하였다. 인가전압과형조정은 전극간 정전용량을 고려, 저항을 삽입하여 파두장(전압과형의 상승시간), 파미장을 조정하였다.

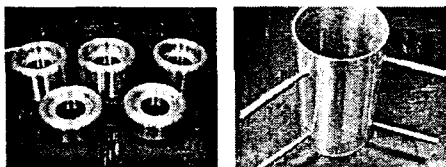
채임버의 내부는 절대가스압력이 0.006기압에서 8기압범위로서, 2[atm,abs], 4[atm,abs]으로 압력에 따라 전극간 이격거리는 5[mm]로 일정하게 두고 임펄스전압을 인가하였다.

실험에 사용된 가스는 순도 99.99%인 SF<sub>6</sub>가스로서 탱크내부의 공기를 진공펌프(Rotary Pump: 10~3torr까지 가능)를 이용하여 1Pa이하까지 배기시킨 후, 필요한 가스압력 P[atm,abs]까지 봉입하였다. 시험시 온도는 3.5°C~9°C이며, 실험에 사용된 전극은 다음과 같다.

표 1 실험에 사용된 시험전극

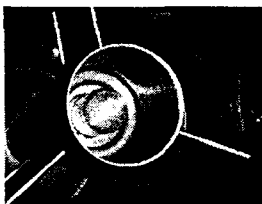
갭(표면거칠기)	크기(길이×직경) [cm×cm]	전극의 유효면적 [cm <sup>2</sup> ]
A(▽)	10×32	1003.30
0.8~1[mm]		
B(▽▽)	10×32	1003.30
0.02~0.1[mm]		
C(▽▽▽)	10×32	1003.30
0.001~0.007[mm]		

그림은 전극 (a), (b)를 시험용채임버에 설치한 모습이다.



(a) 내부전극

(b) 외부원통전극(접지)



(c) 설치된 전극모습

그림 1 실험에 사용된 전극 및 전극위부모습

#### 3.2 실험방법

본 실험에서 변수는 가스압 및 인가전압과형(개폐임펄스전압, 뇌임펄스전압)이며 가스압을 일정하게 유지한 채 전압을 인가하였다. 상승전압폭은 최소과과전압의 5%이고, 5회 과과전압을 평균한 값을 절연과과전압으로 하였다. 전압의 인가 빈도는 임펄스발생기(Impulse Generator)가 1분에서 충전이 완료되는 즉시 전압을 인가하였다.

#### 4. 실험결과 및 분석

그림 2는 Gap=5[mm], 압력 P=2[atm,abs], 표면거칠기가 ▽인 전극에, 정부의 뇌 및 개폐임펄스전압을 인가하여 V-t절연과과특성이다. V-t특성에서 최소과과전압은 정극성인 부극성보다 약 2[kV]정도 높게 나타난다.

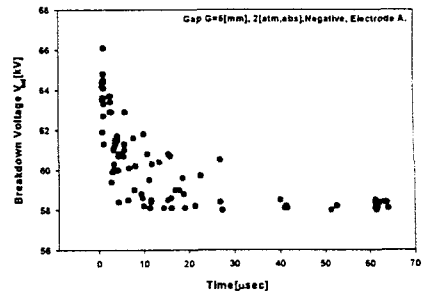
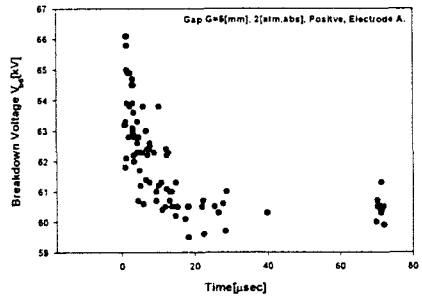


그림 2 Gap A에서의 V-t절연과과특성

그림 3은 Gap=5[mm], 압력 P=2[atm,abs], 표면거칠기가 ▽인 전극에 각각 정극성의 뇌 및 개폐임펄스전압을 인가하여 V-t절연과과특성이다.

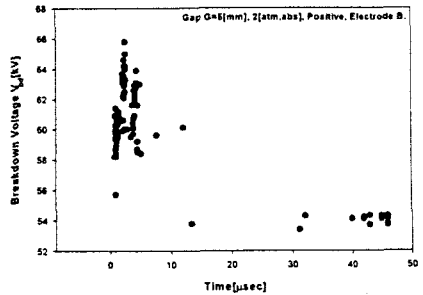


그림 3 Gap B에서의 V-t절연과과특성

그림 4은 Gap=5[mm], 압력 P=2[atm,abs], 표면거칠기가 ▽인 전극에 각각 정극성의 뇌 및 개폐임펄스전압을 인가했을 때의 V-t절연과과특성이다.

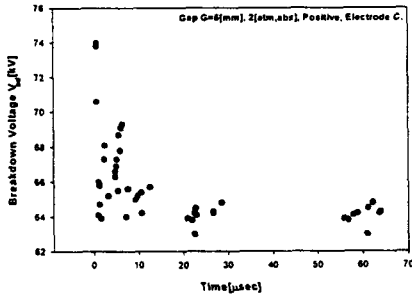


그림 4 Gap C에서의 V-t절연파괴특성

실험의 결과로부터 V-t절연파괴특성곡선의 패턴은 그림 5에서 나타낸 것처럼 패턴 I, II에 속한다.

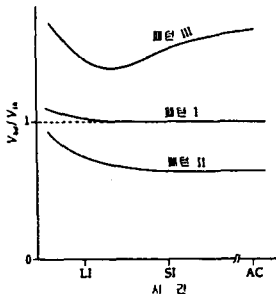


그림 5 V-t특성의 3가지 패턴

패턴 I, II의 영역에서 GIS의 절연협조를 위한 정량적인 실험식을 결정하기 위하여 2.4절에서 식 (5)의 계수  $\kappa_1$ ,  $n_1$ 을 실험결과로부터 계산하여, 평등전계중 SF<sub>6</sub>가스 V-t절연파괴특성식을 구할수 있다. 표 1은 전극 A,B,C의  $\kappa_1$ ,  $n_1$ 을 나타낸 것이다.

표 1 전극 A,B,C의  $\kappa_1$ ,  $n_1$ 계수

극성	계수	압력	전극 A	전극 B	전극 C
정극성	$\kappa_1$	2	4.815E-2	1.035E-1	2.451E-2
		4	8.24E-2	1.475E-1	8.206E-2
	$n_1$	2	3.579E-9	3.374E-9	7.577E-9
		4	1.77E-9	6.307E-9	6.622E-9
부극성	$\kappa_1$	2	3.759E-2	6.793E-2	3.775E-2
		4	1.084E-1	8.662E-2	7.391E-2
	$n_1$	2	6.23E-9	4.006E-9	4.638E-9
		4	3.55E-9	1.059E-8	5.092E-9

실험결과에서  $\kappa_1$ 은 임펄스파괴전압의 절대값을 결정하는 반면에,  $n_1$ 은 V-t곡선에서 기울기를 결정하는 요소이다.  $\kappa_1$ ,  $n_1$ 의 값으로부터 패턴 I형으로 주어지는 전극형에서 V-t특성을 결정할수 있다.

$\kappa_1$ 은 전극구조 및 가스압력으로 결정되는 것이므로,  $d/p\mu$ 의 함수로 식(7)과 같이 다시 나타낼수 있다.

$$\kappa_1 = a(d/p\mu)^b \quad (7)$$

여기서 p는 압력,  $\mu$ 는 전계이용율로서 최대전계와 평등전계의 비이다.  $a=0.06$ ,  $b=0.66$ 으로 나타난다.  $\kappa_1$ 의 값이 전극의 면적이 커지면 약간 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이 미소한 편차는 전극의 면적이 작은 전극에서 초기전자의 부족으로 인한 임펄스파괴전압의 확률의 통계적인 편차에 기인하는 것이다. 이러한 것은 전극의 면적이 넓은 전극에서는 무시할수 있다. 또한  $n_1$ 의 값도 식 (8)과 같이 전극간거리와 전계이용율로 나타낼수 있다.

$$n_1 = 0.24 \ln(d/\mu) + 0.77 \quad (8)$$

그림 6은 전극의 표면거칠기 A( $\nabla$ ), B( $\nabla\nabla$ ), C( $\nabla\nabla\nabla$ )가 최소파괴전압에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

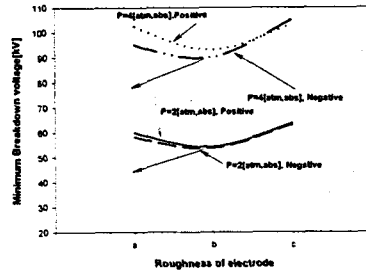


그림6 절연파괴전압의 표면거칠기의 효과

전극의 표면 거칠기가 거칠어 질수록 파괴전압은 감소한다. 그러나 전극 B에서 A로 갈수록 절연파괴전압이 증가하는 것은 절연파괴에 의한 conditioning effect의 한 것으로 추정된다.

### 5 결론

낙뢰나 개폐기의 동작시 발생하는 뇌, 개폐서지에 대한 절연파괴특성을 실전력기기를 모의한 동축원통의 평등전계중 실시험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

V-t절연파괴특성의 3가지 패턴중에서 A,B,C전극은 정,부극성에서 패턴 I에 해당하는 특성을 나타낸다.

실험결과와 통계적인 처리를 통하여 GIS절연협조를 위한 SF<sub>6</sub>가스절연파괴특성인 V-t실험식을 도출하였다.

전극 A,B,C의 절연파괴특성은 전극의 표면거칠기가 증가함에 따라 절연파괴전압은 감소한다.

본 논문은 한국전기연구소 기관고유사업에 의한 연구결과와 일부입니다.

### [참고 문헌]

- [1] 서길수, 문인옥, 김익수, 이형호 "SF<sub>6</sub>가스중의 코로나 안정화작용이 절연파괴특성에 미치는 영향" 1995년, 전기재료연구회
- [2] 서길수, 문인옥, 김익수, 이형호 " 불평등전계중의 SF<sub>6</sub>가스절연파괴특성" 1995년 하계학술대회
- [3] 서길수, 문인옥, 최재구 "SF<sub>6</sub>가스중 절연파괴전압에 미치는 전극의 면적효과" 1995년 하계학술대회
- [4] 이형호, 서길수 "초고압불평등전계중 SF<sub>6</sub>가스절연파괴전압에측" 1996년 대한전기학회 제 45권 3호
- [5] 서길수 "SF<sub>6</sub>가스의 절연특성에 있어서 전극면적의 영향연구" 한국전력공사 기술개발지 '96 겨울호(제29집), Page 9 1~101
- [6] H.W.Anderl, C.L.Wagner, T.H.Dodds, "Insulation coordination for Gas Insulated Substations", IEEE Trans, Vol. PAS-92, No5, pp1622-1630, 1973
- [7] T.Nitta, Y.Shibuya, "Electrical breakdown of long gaps in SF<sub>6</sub>", IEEE Trans., vol. PAS-90, No.3, pp1065-1071
- [8] W.Knorr et al., "Voltage-time Characteristics of slightly nonuniform arrangements in SF<sub>6</sub> using linearly rising and oscillating lightning impulse voltages", CIGRE Paper 15-05 1980
- [9] T.Yamagiwa, J.Ozawa, "Generalization of equal voltage-time area criterion for estimating voltage-time characteristics of various arrangements in SF<sub>6</sub> gas", 1985 Int. Conf. On properties and Application of Dielectric Material, Xian Vol. 2, pp764-767, 1985