

아크시간이 초고압 가스차단기의 차단성능에 미치는 영향

박경엽, 신영준, 송기동, 정진교, 송원표\*, 권기영\*  
 한국전기연구소, \* 효성중공업(주) 기술연구소

Effect of arcing time on the interruption performance  
 of EHV class GCB

K.Y.Park, Y.J.Shin, K.D.Song, J.K.Chong, W.P.Song\*, K.Y.Kwon\*  
 Korea Electrotechnology Research Institute, \* HYOSUNG Industries Co.

**Abstract** - The interruption performance of EHV class gas circuit breakers critically depends on the flow conditions inside interrupter and the external circuit conditions. In case of puffer type gas circuit breakers the flow conditions are significantly influenced by arcing time. In this paper the calculated results of RRRV and pressure rise at current zero with varying arcing time are presented and the effect of arcing time on the thermal interruption performance of EHV class gas circuit breakers is analyzed.

1. 서 론

초고압 SF<sub>6</sub> 가스차단기의 차단성능 여부는 전류0점 부근에서의 차단부 내부의 유동조건과 외부회로 조건에 의해 결정된다. 즉 이 기간 동안의 차단부 극간의 열적 유전적 절연회복속도가 충분히 빨라서 외부회로 조건에 의해 인가되는 전류0점 직전의 di/dt, 전류0점 직후의 dv/dt 및 과도회복전압에 의한 스트레스를 견딜 수 있으면 차단에 성공하게 된다. 한편 현재 채용되고 있는 대부분의 초고압 SF<sub>6</sub> 가스차단기는 파피식 가스차단기이다. 파피식 가스차단기는 고장전류 차단시 차단신호에 의해 가동부가 이동하며 이 때에 파피실린더에 채워진 SF<sub>6</sub> 가스도 압축이 된다. 이런 종류의 차단기의 차단성능은 전류0점에서의 파피실의 상승압력에 지수함수적으로 비례한다. 그리고 전류0점에서의 파피실의 상승압력은 스트로크 곡선의 특성, 파피실 및 차단부의 형상 등에 크게 영향을 받지만 아크시간도 매우 중요한 변수가 된다. 현재까지 초고압 SF<sub>6</sub> 가스차단기의 차단성능을 해석하기 위한 다양한 방법들이 제시되었지만[1-4] 아직까지 아크시간이 차단성능에 미치는 영향을 깊이 있게 분석한 경우는 없는 실정이다.

본 논문에서는 아크시간의 변화가 초고압 가스차단기의 차단성능에 미치는 영향을 적분법을 이용하여 해석하고 분석한 결과를 제시한다. 이 결과는 초고압 가스차단기의 개발시 설계단계에서 유용하게 이용될 수 있을 것이며 아울러 단락책무 5와 같이 DC분이 많이 함유된 고장전류를 차단해야 하는 경우의 사전 성능평가 수단으로서도 각광을 받을 것으로 전망된다.

2. 본 론

2.1 모델 파피차단기

본 연구에 사용된 모델 파피차단기는 Noeske 등[5]이 사용한 G.E. 모델이며 노즐은 G-005노즐이다(그림 1 참조). 이 모델차단기를 사용한 이유는 차단부의 형상 및 치수가 명확하게 제시되고 있으며 무부하시는 물론 유부하시의 차단부 내부의 상승압력, 아크전압, 스트로

크, 차단성능(RRRV) 등의 측정결과가 매우 잘 정리되어 있기 때문이다. 그리고 아크시간의 변경은 60Hz 반파에다가 1500Hz의 고주파 주입전류를 합성한 파형을 기본으로 하여 개극시간을 조정하여 이루어진다. 그림 2에 아크시간이 10.7ms인 경우의 전류파형을 나타낸다.

2.2 아크모델

본 논문에서는 아크시간의 변화가 초고압 가스차단기의 차단성능에 미치는 영향을 적분법을 이용하여 해석하였다. 파피차단기의 아크해석을 위해서는 파피실 내부의 상승압력, 밀도 등을 먼저 계산하여야 한다. 본 논문에서는 편의상 아크 및 외부유동에 대한 지배방정식만 제시하고 이 지배방정식들에 대한 수치해석 방법, 초기조건 및 경계조건, 그리고 위에서 언급한 파피실린더에 대한 모델링 등에 대한 사항은 참고문헌 [6]에 잘 기술되어 있으므로 생략한다.

아크가 존재하는 경우, 노즐내부는 편의상 2개의 영역으로 나눌 수 있다. 하나는 아크의 중심으로부터  $r_0 = \sqrt{\theta_0}$ 로 정의되는 아크열 반경까지의 영역이고(이하 아크열 영역이라고 부름), 나머지 하나는 그 이외의 영역을 뜻하는 외부유동 영역이다. 외부유동 영역에서는 물리량들의 반경방향의 경사는 무시할 수 있을 정도로 작다. 이들 2개의 영역에 대한 지배방정식들은 다음과 같이 유도될 수 있다.

연속방정식 (아크열 영역 및 외부유동 영역을 함께 고려함)

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_\infty(A - \theta_0)] + \frac{\partial}{\partial z}[\rho_\infty W_\infty(A - \theta_0)] = m_w \quad (1)$$

여기서  $m_w$ 는 단위길이당의 노즐벽의 용삭량이다.

외부유동에 대한 모멘트 방정식

$$\rho_\infty \left( \frac{\partial W_\infty}{\partial t} \right) + \rho_\infty W_\infty \left( \frac{\partial W_\infty}{\partial z} \right) + \frac{m_w W_\infty}{A - \theta_0} = - \frac{\partial P_\infty}{\partial z} \quad (2)$$

외부유동에 대한 에너지 방정식

$$\rho_\infty \left( \frac{\partial h_0}{\partial t} \right) + \rho_\infty W_\infty \left( \frac{\partial h_0}{\partial z} \right) - \frac{\partial P_\infty}{\partial t} = \frac{m_w (h_v - h_0)}{A - \theta_0} \quad (3)$$

여기서  $h_0 = h_\infty + 0.5 W_\infty^2$  그리고  $h_v$ 는 노즐내벽으로부터 용삭된 단위질량의 증기를 노즐내벽의 온도까지 올리는 데 소요되는 엔탈피를 나타내며 참고문헌 [7]에 의하면 노즐내벽의 온도를 1000K로 가정할 때 PTFE 노즐에 대한  $h_v$ 의 값은 1.05 MJ/kg 정도이다.

$$RRRV_c = K \left( \frac{di}{dt} \right)^{-\alpha} P^\beta \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_\infty h_0 \theta_\delta] + \frac{\partial}{\partial z} [\rho_\infty W_\infty h_0 \Lambda_c \theta_\delta] - \rho_\infty \theta_\delta \frac{\partial h_0}{\partial t} - \rho_\infty W_\infty \theta_\delta \frac{\partial h_0}{\partial z} = EI - Q - \frac{m_w (h_v - h_0) \theta_\delta}{A - \theta_\delta} \quad (4)$$

여기서 Q는 단위길이당의 방사손실이며 국부에너지입력(local power input) EI에 대해 다음과 같은 관계를 가진다.

$$Q = \alpha EI \quad (5)$$

여기서  $\alpha$ 는 상수이며 상류장 접점의 재질과 아크주위의 환경에 의해 정해진다 [8].

오음의 범칙

$$I = \sigma^* \Lambda_c \theta_\delta E \quad (6)$$

여기서  $\sigma^*$ 는 전기전도도이며  $\Lambda$ 는 콘덕턴스 형상계수 [9]이다.

용삭률  $m_w$ 는  $m_w = Q/h_a$ 에 의해 결정되며  $h_a$ 는 상태변환을 위해 소요되는 엔탈피와  $h_v$ 의 합이다. 마지막으 로 상태방정식은

$$P_\infty = \rho_\infty R_\infty T_\infty \quad (7)$$

로 주어진다.

만약  $\Lambda$ 와  $\Lambda$ 의 값들이 주어지면, 식 (1) - (4)는 식 (5) - (7)의 관계식들을 대입하면 풀려지게 된다.  $\Lambda$ 와  $\Lambda$ 의 값들은 아크의 단위길이당의 동적 에너지손실(dynamic power loss)의 함수라고 가정되고 미분형의 아크 보존방정식(arc conservation equation in differential form)을 풀어서 구할 수 있다.

### 2.3 결과 및 분석

그림 3에 아크시간이 4.3ms, 6.4ms, 8.5ms, 10.7ms일 때의 노즐내부의 축방향 압력분포를 나타낸다. 아크시간이 길어짐에 따라 고정 및 가동아크접점 사이의 거리가 증가하며 아울러 노즐단면적도 증가한다. 노즐출구쪽 아크접점 선단의 압력은 그 점에서의 노즐단면적과 충전압력에 대한 파퍼실의 상승압력비의 관계식에 의해 결정되며 그림에서 아크시간이 4.3ms인 경우에는 저음속, 6.4ms 및 8.5ms인 경우에는 초음속, 그리고 10.7ms인 경우에는 다시 저음속으로 된다. 그림 3에서 아크시간이 4.3ms인 경우에 노즐출구쪽 아크접점 선단의 압력파형을 보면 충격파가 발생하였음을 알 수 있다. 이 충격파는 아크시간이 길어짐에 따라 아크접점 선단보다도 더 후단에 위치하다가 노즐단면적이 커지고 충전압력에 대한 파퍼실의 상승압력비의 증가가 둔화되면 다시 아크접점 선단부분에 위치하게 된다.

그림 4는 아크시간의 변화(4.3ms-10.7ms)에 따른 전류0점에서의 파퍼실의 상승압력의 크기를 나타낸다. 상승압력은 아크시간이 길어짐에 따라 초기에는 선형적으로 증가하다가 아크시간이 10ms를 초과하게 되면 증가폭이 둔화된다. 이 전류0점에서의 파퍼실의 상승압력은 아래 식 8에서 알 수 있는 바와 같이 주어진 차단전류( $di/dt = \text{일정}$ )에서는 파퍼식 가스차단기의 열적 차단 성능을 결정하는 유일한 변수이다.

여기서 RRRVc는 한계 열적 차단성능, K,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 차단방식 및 차단부 형상에 관계되는 상수이며 P는 전류0점에서의 파퍼실의 압력이다. 그림 5에 차단전류가 20.2kArms일 경우( $di/dt = 20A/\mu s$ ) 아크시간의 변화에 따른 열적 차단성능을 나타내고 있다. 열적 차단성능은 아크시간이 길어질수록 증가하고 있다. 이 현상은 실제의 차단시험에서도 관찰되는 바이며 식 8에서도 예측이 가능하다. 즉  $di/dt = 20A/\mu s$ 로 일정한 경우에 아크시간이 증가할수록 전류0점에서의 파퍼실 압력도 증가하므로 열적 차단성능도 증가한다. 아크시간이 0.5싸이클(=8.33ms) 이상이 되어 파퍼실의 압력상승은 크게 둔화되어도 (그림 4 참조) 그림 5의 열적 차단성능은 계속 증가하고 있는데 이것은 극간거리가 계속 증가하기 때문으로 판단된다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 아크시간의 변화가 초고압 파퍼식 가스 차단기의 열적 차단성능에 미치는 영향을 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 파퍼식 가스차단기의 경우 복압식 가스차단기와는 달리 아크시간이 차단성능에 크게 영향을 미친다.
- 2) 아크시간이 증가할수록 전류0점에서의 파퍼실 압력이 증가하여 열적차단성능을 향상시키나 아크시간이 0.5싸이클보다 길어지면 압력상승은 둔화된다.
- 3) 노즐출구쪽 아크접점 선단부분에 충격파가 발생하며 이 충격파는 아크시간이 길어짐에 따라 노즐출구쪽으로 이동한다. 이 충격파의 위치는 노즐단면적과 충전압력에 대한 파퍼실의 상승압력비의 관계식에 의해 결정된다.
- 4) 추후 아크시간을 더욱 증가시키고 DC분까지 고려한 아크시간의 영향을 분석할 필요가 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] K.Y.Park et al., "Mathematical Modelling of SF6 Puffer Circuit Breakers I: High Current Region", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 24, No. 2, April 1996, pp. 490-502
- [2] K.Y.Park et al., "Mathematical Modelling of SF6 Puffer Circuit Breakers II: Current Zero Region", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol.25, No.5, Oct. 1997, pp. 967-973
- [3] W.Hermann and K.Ragaller, "Theoretical description of the current interruption in HV gas blast breakers", IEEE Trans., Vol. PAS-96, No.5, 1977, pp.1546
- [4] M.T.C.Fang and J.F.Zhang, "The dynamic behaviour of nozzle arcs", IEEE Trans., Vol. PS-14, No.4, Aug.1986, pp.350-356
- [5] H. O. Noeske, et al., "Application of arc-interruption fundamentals to nozzles for puffer interrupters," Report EL-3293, Electric Power Research Institute, California, USA, 1983
- [6] 박경엽 외 "SF6 파퍼차단기의 수학적 모델링 I: 대전류영역", 대한전기학회 하계학술대회, 논문집 B, 640-644, '93
- [7] M.T.C.Fang and D.B.Newland, "DC nozzle arcs with mild wall ablation", J. Phys. D: Appl. Phys., 1983, pp. 793-810
- [8] C.Strachan, D.Lidgate and G.R.Jones, "Radiative energy losses from a high current air-blast arc", J. Appl. Phys., Vol. 48, No. 6, June 1977, pp. 2324-2330
- [9] M.D.Cowley, "Integral method of arc analysis:

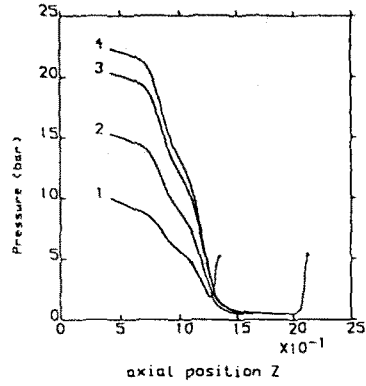
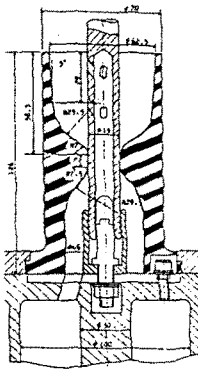
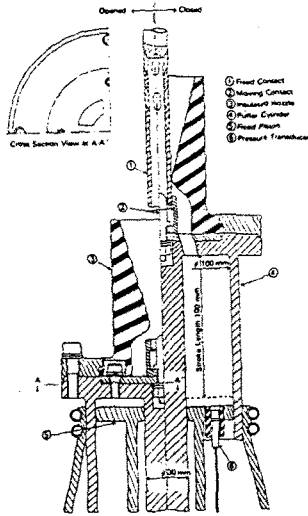


그림 3 아크시간이 4.3ms, 6.4ms, 8.5ms, 10.7ms 일 때의 노즐내부의 축방향 압력분포

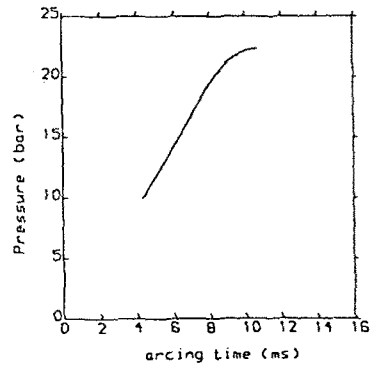


그림 4 아크시간의 변화(4.3ms-10.7ms)에 따른 전류0점에서의 파퍼실의 상승압력의 크기

그림 1 모델 파퍼차단기 및 노즐

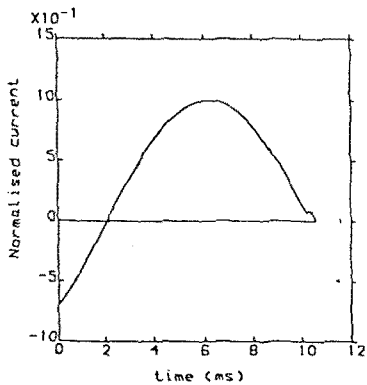


그림 2 아크시간이 10.7ms인 경우의 전류파형

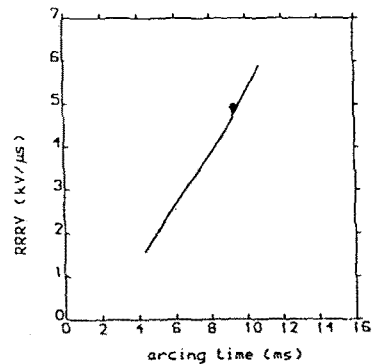


그림 5 차단전류가 20.2kArms일 경우( $di/dt=20A/\mu s$ ) 아크시간의 변화에 따른 열적 차단성능