

파퍼식 가스 차단기의 열적 파괴 영역에서의 차단성능 해석

김홍규*, 이병운*, 박경엽*, 박순규**, 이봉희**
 한국전기연구원*, 한국전력공사 중앙교육원**

Analysis of Interrupting Performance for Puffer GCB during the Thermal Failure Period

H.K. Kim*, B.Y. Lee* , K.Y. Park*, S.K. Park**, B.H. Lee**
 KERI*, KEPCO Central Education Institute**

Abstract - 본 연구에서는 전류 영점 직전까지의 대전류 구간에서의 열가스 해석을 수행하여, 그 결과와 과도 회복 전압에 따른 아크 후 전류를 계산하여, 아크 후 전류의 0으로의 수렴 여부를 이용하여 열적 파괴 영역에서의 차단성능을 평가한다. 아크 후 전류는 유동해석을 통해 구하여진 극간의 온도분포로부터 계산된 아크 저항과 과도인가회복 전압을 이용하여 계산된다.

1. 서 론

전력 계통에서 가장 빈번히 일어나는 고장 중의 하나는 차단기로부터 가까운 거리의 가공선에서 고장이 발생하는 경우이며, 특히 차단기로부터 수 km 떨어진 곳에서 고장이 발생하면 가장 가혹한 고장 조건이 발생하게 되며, 이러한 고장을 SLF(short line fault)라고 한다. SLF 고장 시 고장 전류를 차단한 직후 나타나는 과도 회복 전압의 피크치는 단자단락사고(BTF)시의 고장 전류를 차단한 직후에 나타나는 과도 회복 전압의 피크치보다는 상대적으로 작지만 초기 상승률은 훨씬 더 크다. 따라서 차단기가 SLF 전류를 차단한 후 이러한 가혹한 초기 과도회복 전압 상승률에 견디기 위해서는 차단 직후 극간에 남아 있는 열가스를 신속히 배출시킴으로써 열적 파괴가 일어나지 않도록 하여야 한다. 열적 파괴는 전류 영점 후 수~수 십(μs) 이내에 발생하기 때문에 이 영역에서의 아크 후 전류 계산을 통해 전류가 0으로 수렴하면 열적 파괴를 극복하며, 반대로 전류가 계속 흐르게 되면 열적 파괴가 발생하게 된다[1].

따라서 가스 차단기의 열적 파괴 영역에서의 차단성능을 파악하기 위해서는 유동해석으로부터 구하여진 온도분포로부터 극간의 전기 전도도를 계산하여 아크 저항을 계산하고, 아크 저항과 과도회복전압을 이용하여 아크 후 전류(post-arc current)를 계산하는 것이 중요하다. 전류 영점구간에서의 특성은 대전류 구간에서의 유동 특성에 의해 좌우되기 때문에 대전류 구간에서의 열가스 유동 해석 수행이 필요하다. 본 연구에서는 대전류 구간에서는 오일러 방정식을 기본 지배방정식으로 하여 전류 영점 전까지의 유동 특성을 구하고, 아크 후 전류 계산을 위한 전류 영점 부근에서의 계산은 Navier-Stokes 방정식을 기본 지배방정식으로 한다. 유동 해석을 위한 수치해석 기법은 FVFLIC(Finite Volume Fluid in Cell)법[2]을 적용하며, dv/dt에 따른 아크 후 전류 계산 결과로부터 임계과도회복전압 상승률(Critical Rate of Rise of Recovery Voltage, RRRVc)을 구하는 과정을 보인다.

2. 열가스 유동 해석

2.1 지배 방정식

차단부 내의 유동해석 시에는 축 대칭을 가정할 수 있기 때문에, 차단부 내의 열가스 유동해석을 위한 기본 방정식으로서 다음과 같은 축 대칭 방정식을 이용한다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot F = S + \frac{\partial E_v}{\partial z} + \frac{\partial F_v}{\partial r} + H_v \quad (1)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho E \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$F = \begin{bmatrix} \rho \vec{U} \\ \rho u \vec{U} \\ \rho v \vec{U} \\ \rho E \vec{U} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\partial P}{\partial z} + F_z \\ -\frac{\partial P}{\partial r} + F_r \\ -\nabla \cdot (P\vec{U}) + S_e + x[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \frac{\partial T}{\partial r})] \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$E_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{zz} \\ \tau_{zr} \\ u\tau_{zz} + v\tau_{zr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$F_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{zr} \\ \tau_{rr} \\ u\tau_{zr} + v\tau_{rr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$H_v = \begin{bmatrix} \tau_{zr} - \frac{2}{3} r \frac{\partial}{\partial r}(\mu \frac{v}{r}) \\ \tau_{rr} - \tau_{\theta\theta} - \frac{2}{3} \mu (\frac{v}{r}) - r \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r}(\mu \frac{v}{r}) \\ u\tau_{zr} + v\tau_{rr} - \frac{2}{3} \mu \frac{v^2}{r} - r \frac{\partial}{\partial r}(\frac{2}{3} \mu \frac{v^2}{r}) - r \frac{\partial}{\partial z}(\frac{2}{3} \mu \frac{uv}{r}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\tau_{zz} = \mu(\frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial r}) \quad (8)$$

$$\tau_{rr} = \mu(\frac{4}{3} \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (9)$$

$$\tau_{zr} = \mu(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (10)$$

$$\tau_{\theta\theta} = \mu[-\frac{2}{3}(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{4}{3} \frac{v}{r}] \quad (11)$$

여기서 ρ [kg/m³]은 밀도, P[N/m²]는 압력, T[K]는 온도, $\vec{U} = (u, v)$ 는 축방향 및 반경 방향 속도 성분을, E[J/kg]는 비총에너지(specific total energy)를 나타내며, S_e [J/kg·sec]는 에너지 소스 항을 나타내고, F_z, F_r [N]은 각각 로렌츠 힘(Lorentz's force)의 축방향 및 반경방향 성분을 나타낸다. 또한 τ는 viscous shear stress항, μ [kg/m·s]는 점성계수, x [W/m·°K]는 열전도 계수를 나타낸다.

위의 식에서 μ = x = 0 으로 두면 오일러(Euler) 방정식이 되며, F_z = F_r = S_e = 0 으로 두면 아크가 없는 경우의 냉가스 유동 해석 방정식이 된다. 식(1)을

해석하기 위해서 오일러 방정식 부분은 FVFLIC법에 의한 이산화 과정을 적용하며, 열전도항 및 점성항은 FVM의 이산화 과정을 적용하여 계산한 후, FVFLIC법의 중도값을 계산하는 과정에 대입한다.

2.2 아크 모델링

대전류 차단 시에 전극이 분리되면 극간에는 고온의 아크 플라즈마가 생성되며, 유동 해석 시 이러한 아크의 영향은 에너지 소스항인 S_e 로 표현이 된다. 대전류 차단시의 아크는 주로 Ohmic heating과 복사 에너지에 의해 에너지 평형을 이루게 된다. 따라서 아크에 의한 에너지 소스 항 S_e 를 다음과 같이 ohmic heating 항과 복사전달 항으로 표현한다.

$$S_e = S_{ohm} - U_{rad} \quad (12)$$

여기서 $S_{ohm} = \sigma E^2$ [J/kg·sec]이며, 전기전도도는 $\sigma = \sigma(P, T)$ [mho/m]의 압력과 온도의 함수이며, 전장의 세기 E [V/m]는 전장 해석을 통해 구하여진다.

U_{rad} 은 아크 중심부에서 방출되는 복사 에너지와 아크 주변부에서 재흡수되는 복사 에너지를 고려한 다음의 식으로 표현된다.

$$U_{rad} = U_e - U_a \quad (13)$$

여기서 U_e [J/kg·sec]는 방출되는 복사량, U_a [J/kg·sec]는 재흡수되는 복사량을 나타낸다.

방출되는 복사에너지 U_e 는 온도, 압력 및 아크 반경의 함수로 주어지지만, 재흡수되는 복사 에너지 U_a 는 아크 중심부에서 방출되는 복사량에 따라서 달라지며 평가하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 이러한 방출 및 재흡수되는 복사량을 고려한 간이복사전달 모델(3)을 이용하여 복사에너지를 계산한다. 이 모델은 그림1과 같이 온도분포에 따라서 방출 및 재흡수되는 구간을 설정하여 복사량을 계산한다.

(i) 아크 중심부 : $\alpha T_0 \leq T \leq T_0$

$$(0 \leq r \leq R_1, \alpha \approx 0.83)$$

이 구간에서 단위 체적당 단위 시간당의 순 방출되는 복사에너지는 다음과 같다.

$$U_{rad} = \varepsilon_N(T, P, R_{arc}) \quad (14)$$

여기서 R_{arc} 은 아크 반경을 나타내며, ε_N [Watt/m³]은 순방출계수를 나타내며, 아크 온도, 압력 및 반경의 함수로 구성되어 있다. 아크 반경 R_{arc} 는 온도가 4000(K)인 지점의 반경으로 설정하였다.

(ii) 재흡수층 : $T_s \leq T \leq \alpha T_0$ ($R_1 \leq r \leq R_3$)

이 구간에서는 이온과 원자간의 빠른 재결합에 의해 아크 중심부에서 방출되는 복사 에너지를 흡수하게 되며, 따라서 흡수되는 양이 방출되는 양보다 많기 때문에 음의 복사 에너지 평형을 이루게 된다. 재흡수가 시작되는 온도는 중심축 상의 온도에 따라 달라지며, 아크 반경에 해당하는 온도 T_s 는 4000(K)로 설정한다.

구간 $R_1 \leq r \leq R_0$ 및 $R_2 \leq r \leq R_3$ 에서는 재흡수되는 양이 선형적으로 변하고, $R_0 \leq r \leq R_2$ 에서는 일정한 값

U_b 를 가진다고 가정한다. 여기서 $R_0 = (R_1 + R_2)/2$ 이다.

참고문헌(3)에 의하면 방출되는 양의 약 80(%)가 재흡수되며, 이 조건으로부터 U_b 를 다음식에 의해 계산할 수 있다.

$$\int_{R_1}^{R_3} U_{rad} dV = 0.8 \int_0^{R_1} U_{rad} dV \quad (15)$$

(iii) thermal layer : $T_\infty \leq T \leq T_s$

여기서 T_∞ [K]는 주변의 가스의 온도를 나타내며, 이 영역에서 가스는 방출 및 흡수하는 복사 에너지가 0이다.

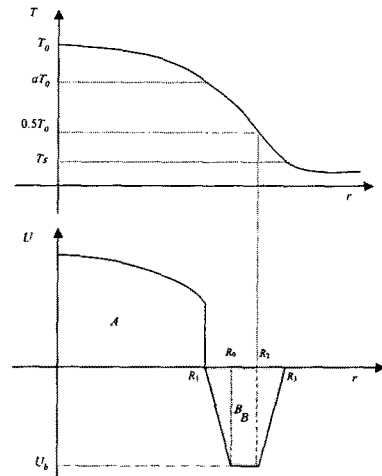


그림1. 간이복사전달 모델

3. Post-Arc 전류 계산

전류 영점 부근에서는 아크 전류 값이 매우 낮기 때문에 아크에 의한 전기적 입력 에너지가 낮아지고, 이로 인해 아크 반경이 매우 작아지고, 반경 방향으로의 온도 경사가 심하기 때문에 이 영역에서의 유동 해석 시에는 난류, 열전도 등을 고려한 정밀 해석이 필요하다. 또한 전류 영점 직전의 유동 해석 결과는 대전류 차단 성능 평가를 위한 post-arc 전류 계산의 초기 조건으로 이용되므로 정확한 해석이 필요하다.

전류 영점 직후에 극간에 잔재하는 고온의 열가스에 의해 재점화의 가능성이 있으므로, 열가스를 효과적으로 냉각시켜 전기전도도를 낮게 함으로써 과도회복 전압에 의해 절연 파괴가 발생하지 않도록 해야 한다. 과도 회복 전압에 의한 열적 파괴 여부를 파악하기 위해서는 차단 직후에 극간에 걸리는 과도회복 전압에 따른 post-arc 전류를 계산하여 임계 과도회복전압 상승률(critical RRRV)을 구하여야 한다. critical RRRV를 구하기 위한 post-arc 전류 계산은 다음식을 이용한다.

$$I_{post-arc} = \frac{dV/dt \times t}{R_{arc}} \quad (16)$$

여기서 R_{arc} 는 아크 저항, dV/dt 는 과도전압 상승률, t 는 전류 영점을 기준으로 한 시간을 나타낸다.

아크 저항을 계산하기 위해서 총 파워를 이용한다. 총 파워는

$$P_t = V_t \times I_{arc} = \int_{V(\phi,0)} \sigma E^2 dv \quad (17)$$

로 표현된다.

전계 해석 시에 극간의 전위차를 1[V]로 설정하면 실제 전계의 세기는 다음과 같다.

$$\vec{E} = V_t \vec{e} \quad (18)$$

여기서 \vec{e} 는 전위차가 1[V]인 경우의 전계의 세기이다.

식(18)을 (17)에 대입하면 다음의 식이 된다.

$$P_t = V_t \times I_{arc} = \int_{V(\phi,0)} \sigma E^2 dv = \int_{V(\phi,0)} \sigma V_t^2 e^2 dv \quad (19)$$

위 식을 정리하면 아크 후 전류는 다음 식으로 계산된다.

$$I_{arc} = V_t \times \int_{V(\phi,0)} \sigma e^2 dv \quad (20)$$

위의 적분식은 전기전도도가 0보다 큰 고온 가스 영역에 대해서 적용한다.

4. 사례 연구

본 연구에 의한 아크 후 전류 계산 방법을 실제 차단부 모델에 적용하여 해석 결과를 나타낸다. 적용 모델은 72.5kV 25kA GCB이며, 해석 시의 전류 파형은 피크치 21.5kA, 주파수 55[Hz]의 정현파 교류이며, 아킹 시간은 8.5[ms]이다. 그림2는 아킹 시간에 따른 아크 전압을 비교한 것이며, 그림3은 파파실의 압력상승치를 비교한 것이다.

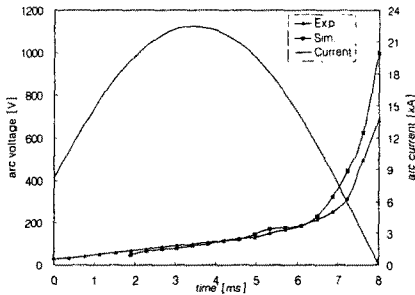


그림 2. 아크 전압 비교

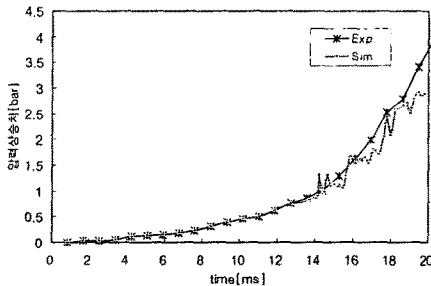


그림 3. 파파실 압력 상승 비교(피스톤 전면)

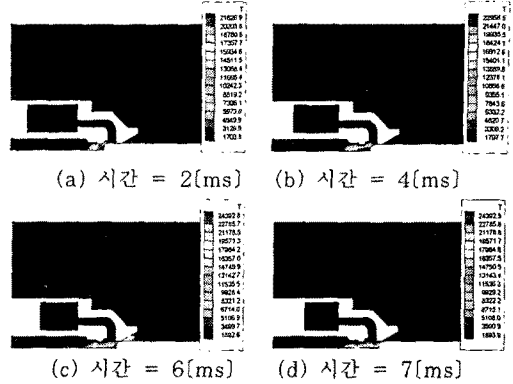


그림 4. 아킹 시간에 따른 극간 온도분포

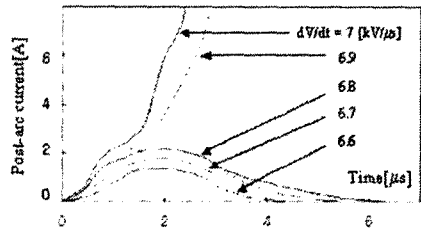


그림 5. dV/dt에 따른 아크 후 전류

그림4는 시간에 따른 극간의 온도분포를 보여주며, 그림5는 dV/dt에 따른 아크 후 전류를 보여준다. 그림에서 보듯이 dV/dt가 6.8[kV/μs]이하이면 아크 후 전류는 0으로 수렴하지만, 6.9[kV/μs]이상이면 전류가 발산하여 열적 파괴에 이르며, 이 차단기의 critical RRRV는 이 사이의 값이 된다.

5. 결론

본 연구에서는 대전류 구간에서의 열가스 해석 결과를 이용하여, 전류 영점 이후의 극간에 인가되는 과도회복 전압에 따른 아크 후 전류 계산 방법 및 결과를 나타냈다. 유동 해석은 FVFLIC법을 적용하였으며, 아크 후 전류 계산은 유한요소법에 의해 구하여진 전장세기와 전기전도도를 이용한 각 셀의 Ohmic heating 계산에 의해 구하였다.

6. 참고 문헌

- [1] A. Gleizes, M. Mitiche, P.V. Doan, "Study of a Circuit-Breaker Arc with Self-Generated Flow: The Post-ARc Phase", *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, Vol.19, No.1, pp12-19, 1991.
- [2] H.K. Kim *et al.*, "Numerical Analysis of High Current Arcs in a Gas Circuit Breaker", *Proceedings of the XIII International Conference on Gas Discharges and Their Applications*, Vol. 1, paper No. A-2, 2000.
- [3] J. F. Zhang, M. T. C. Fang, D. B. Newland, "Theoretical investigation of a 2kA DC nitrogen arc in a supersonic nozzle", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 20, pp. 368-379, 1987.