

난류변수에 따른 아크-후 전류의 계산

송기동, 이병윤, 박경엽, 박순규*

한국전기연구원 전력연구단 신전력기기연구그룹, #한국전력공사 중앙교육원

Calculation of Post-Arc Current According to Turbulence Parameter

Song KiDong, Lee ByeongYoon, Park KyongYop, Park SoonKyU*

Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), #KEPCO Central Eduation Institute.

Abstract - 차단기내에서 일어나는 아크현상을 모의하기 위해서는 수학적으로 표현할 수 있어야 한다. 하지만, 아크의 물리적 현상이 대단히 복잡하여 수식화 하기가 쉽지 않을 뿐만 아니라 논리적으로 이상이 없는 결과를 얻는 일도 쉽지 않다. 특히, 아크를 표현하는 수식에는 많은 경험적 변수 또는 실험결과를 고려하여 조정되어야 할 변수가 존재한다. 그 대표적인 것이 난류 변수(turbulence parameter)와 방사에너지 전달에서의 방사계수(emission coefficient)이다. 본 논문은 차단기가 전류 차단 후의 열적회복과정에서, 난류변수에 따른 아크-후 전류(post arc current)를 계산한 결과를 제시한 것이다. 난류변수에 따른 아크의 냉각효과를 검토하고 있으며, 실험결과 비교하여 가장 잘 맞는 난류변수의 값을 제시하고 있다.

제 요소인 난류 파라미터가 열적회복해석에 미치는 영향에 대해서 검토한 것이다. 난류 파라미터에 따른 아크-후 전류(post-arc current)의 크기변화를 계산하고, 열적회복특성의 변화를 검토하였다.

2. 본 론

2.1 지배방정식 및 아크-후 전류의 계산

차단부 노출 내의 가스 유동은 축대칭이고, 축방향 유동성분이 유동특성에 지배적이다. 실린더 형 좌표계에서, 아크해석을 위한 지배방정식은 다음과 같이 보존법칙의 형태로 나타낼 수 있다[4].

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v \phi - r \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}) = S_\phi \tag{1}$$

1. 서 론

차단과정에서 일어나는 아크현상을 해석하기 위해, 1943년 Mayer의 0차원 아크모델부터 1990년대 2차원 아크 모델까지 수많은 연구자들의 노력이 있었다[1,2,3]. 가스차단기의 차단 메카니즘이 전기적인 현상뿐만 아니라 유체역학, 기체동역학적인 문제를 포함하고 있다. 따라서 아크현상을 해석하는 엔지니어 입장에서는 전계, 자계, 전류크기, 과도회복전압과 같은 전기적인 파라미터뿐만 아니라, 에너지 전달과 유체역학에서 다루어지고 있는 전도, 확산, 방사, 난류 등에 관한 지식을 겸비해야 하며, 더군다나 차단기의 기계적인 동작을 고려하기 위해 동역학에 관한 지식과 모델링 기술을 갖추어야 한다.

1990년대까지는 전류 존재 시 즉, 전류영점 전에 아크와 주위가스 상호간의 관계를 수학적으로 규명하고 전산 해석을 통한 물리적 이해를 증진하는 것에 초점이 맞춰져 있었다. 이 과정에서 2차원 적분형, 미분형 아크모델들이 정립되었고, 난류모델이 고려되었으며 방사에 대한 에너지 전달 모델도 개발되었다. 1990년대 말부터는 차단성능 예측이 중요한 관점으로 대두되어, 전류영점에서의 과도적 현상과 전류영점 후의 절연회복 및 열적회복을 해석하는 데 주력하고 있다. 현재까지의 아크해석 기술에서 해석결과에 영향을 미치는 요소, 즉 수학적으로 정확하게 표현할 수 없는 또는 실험적 요소가 필요한 요소가 있다. 첫째는 난류 모델에서 실험 결과를 고려하여 조정하여야 할 난류 파라미터(turbulence parameter)이다. 이 파라미터는 유체역학에서 난류를 해석하는 데 있어서 계산속도 및 계산격자 수의 한계(난류 스케일의 모델링에서 비롯되는 문제) 때문에 생겨난다. 둘째는 방사 에너지 전달 모델에서 방사계수의 조정이다. 이것은 아크에서의 방사가 적외선에서 자외선까지 수많은 방사주파수에 따라 흡수 또는 재흡수(reabsorption) 및 방사(emission)율의 크기가 다르기 때문이다. 셋째는 이제까지 아크영역은 국부적 열평형(LTE; Local Thermal Equilibrium)이라고 가정하여 아크해석을 수행했지만, 전류영점 시점에서는 분명히 불-평형 상태(non thermal equilibrium)이다. 본 논문은 위 세 가지 요소 중, 첫 번

여기서 ϕ , Γ , S_ϕ 는 각각 독립변수, 확산계수(diffusion coefficient), 에너지원 항(source term)을 나타낸다. 식 (1)의 지배방정식에 대한 변수들의 의미와 상세한 설명은 참고문헌 [4]에 주어져 있으므로 여기서는 생략한다. 지배방정식을 푸는 데 필요한 온도에 대한 SF₆ 가스의 물리적 특성치는 Frost와 Liebermann의 연구결과[5]에서 취득했다. 방사(radiation)에 의한 에너지 전달을 계산하기 위해 반-실험적 방사모델[6]을 사용하였고 방사계수를 결정하기 위해 Libermann & Lowke의 연구결과[7]를 활용하였다.

전류 영점 후, 극간의 아크 영역에는 도전성의 전하들이 여전히 남아 있어 아크-후 전류가 흐른다. 그 전류에 의해 아크 영역에는 에너지가 공급되어 주열 열(Joule's heating)이 발생함과 동시에, 주위의 냉-가스에 의한 냉각이 동시에 이루어진다. 열적회복의 차단과 실패는 아크-후 전류의 크기에 따라 결정된다. 즉, 전류 영점 후 아크-후 전류의 크기가 몇 μs 이내에 영(zero)으로 감소하느냐에 따라 결정된다.

아크-후 전류를 계산하기 위해서는 전류 영점 전의 전계해석, 자계해석, 아크해석이 우선적으로 이루어져야 하고 뒤이어 전류영점에서 극간의 상태가 정확히 계산되어야 한다. 전류영점에서의 조건은 아크-후 전류 계산의 초기조건으로 사용된다. 극간의 저항 R은 전류영점 후 아크영역의 전도도를 계산하여 얻어질 수 있다. RRRV(즉 dV/dt)가 주어졌을 때, 시간 t에 따른 아크-후 전류의 변화는 다음 식 (2)로 계산된다[8].

$$I_{pa} = \frac{\left(\frac{dV}{dt}\right) t}{R} \tag{2}$$

식(1)과 (2)로 Laval 노즐(또는 Frind&Rich 노즐)에서, 압력과 전류 감소율에 따른 전류 영점 전·후의 전계, 자계, 온도분포, 압력분포와 아크-후 전류를 성공적으로 계산하여 이미 참고문헌[9]에 보고하였다. 그리고 계산된

결과로부터 그림 1과 같이 Frind&Rich nozzle에서의 열적회복특성을 얻었다[10].

그림 1에서, $di/dt=27.0A/\mu s$ 인 경우 실험결과에서 얻어진 특성곡선과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 하지만, $di/dt=13.5A/\mu s$ 인 경우는 실험결과와 매우 큰 차이를 보이고 있으며, 특히 압력이 낮아질수록 차이는 더욱 크다는 것을 알 수 있다. 여기서, 우리는 이러한 차이가 나는 요인에 대해, 식(1)이 성립되는 과정에서 가정했던 사실과 또는 인위적으로 조정되어야 할 상수 값들에서 우선적으로 생각해 볼 수 있다. 즉,

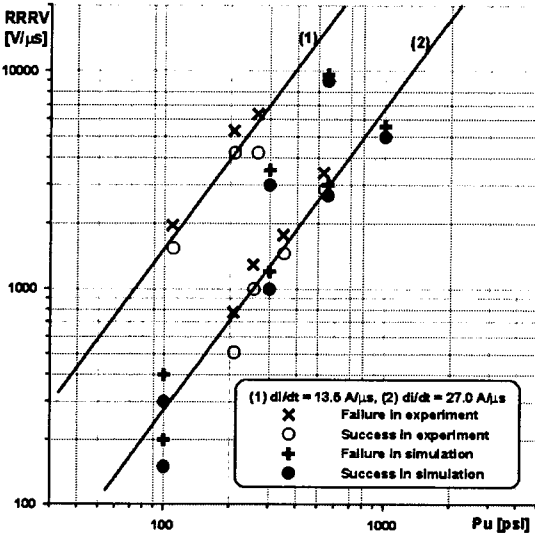


그림 1. Frind&Rich 노즐에서의 열적회복특성.

첫째, 식(1)은 차단기에서 발생하는 아크 플라즈마를 해석하기 위해 전제조건으로 아크는 국부적 열평형(LTE)상태에 있다고 가정한다. 하지만, 전류영점에서 아크 플라즈마 내부는 순간적으로 ($50\mu s$ 이하) 열적 불-평형(NLTE; non-LTE) 상태이다. 그런데 이 전류영점 주위상태를 국부적 열평형(LTE)으로 가정하여 계산했고, 계산된 결과는 전류영점 이후의 아크-후 전류 계산에 영향을 미쳤다는 것이다.

둘째, 아크로부터 외부로의 방사에너지 전달과정에서 방사계수(radiation emission coefficient) 값의 설정에서의 오류를 생각할 수 있다.

셋째, 난류모델의 적용에 있어서 실험결과에 따라 조정되어야 할 난류변수(turbulence parameter)의 값 설정이 다소 정확하지 않았다는 것이다.

위의 세 가지 요소 중에서, 첫 번째 요소인 아크가 전류영점 부근에서 LTE상태에 있다고 가정하는 것은 분명히 오차를 유발할 수 있다. 그러나 전류영점 부근 수십 μs 동안의 NLTE를 고려하기 위해서는 별도의 해석기법 즉, 가스입자 또는 전자 하나 하나의 특성 및 거동을 추적하는 Monte Carlo simulation과 같은 해석기법이 도입되어야 하며, 현재까지 전류영점 부근의 NLTE를 고려하는 뚜렷한 해석기법이 아직까지 제시되지 않은 채 활발히 연구되고 있다. 또한 전류영점 부근에서의 NLTE를 LTE로 계산한 결과가 전류영점 후의 아크상태에 얼마만한 영향을 미치는 지 정량적으로 분석된 결과는 전무한 상태이며, 본 연구의 범위를 벗어나는 사항이므로 오차발생 요소의 고려대상에서 일단은 배제한다. 두 번째 요소인 방사계수의 결정에서, 방사에너지 전달은 전류영점 부근과 전류영점 후에는 무시될 수 있을 정도로 극히 미미하므로 오차발생 요인의 고려대상에서 역

시 제외된다. 마지막으로 세 번째 요소인 난류변수이다.

2.2 난류 변수

난류를 계산하려고 하는 노력은 19세기의 Boussinesq나 Reynolds로부터 비롯하여 이미 100년 이상 계속되고 있다. 공학적인 난류를 정면으로 해석하기 위한 시도는 컴퓨터의 출현으로 시작되었다. 하지만, 현재 가장 빠르고, 가장 용량이 큰 컴퓨터라도 난류의 속도크기, 특성길이를 완전히 해석하는 것은 불가능한 실정이다. 이러한 부족한 부분을 보충하기 위해 난류 모델(turbulence model)이 도입되었다. 본 연구에서는 난류 모델로 Prandtl 혼합거리 모델을 사용하였다.

식(1)의 운동량 보존방정식에서 $\Gamma = \mu + \mu_t$ 는 점성 항(viscous term)을 나타내는 것으로, μ 와 μ_t 는 각각 층류(laminar)와 난류의 점성도(turbulent viscosity)를 나타낸다. 난류점성도 μ_t 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_t = \rho \ell_m^2 \left| \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right| \quad (3)$$

여기서 ℓ_m 은 운동량 전달에 있어서의 혼합 길이(mixing length)를 나타낸다. 가스 분사 노즐 아크에 대해 ℓ_m 은 다음과 같이 주어진다[].

$$\ell_m = c\delta \quad (4)$$

여기서 δ 는 다음과 같이 표현되는 아크의 열-반경(thermal radius)을 나타낸다.

$$\delta = \sqrt{\int_0^{R_\infty} \left(1 - \frac{\rho}{\rho_\infty}\right) 2\pi r dr} \quad (5)$$

여기서 R_∞ 는 외부 냉-가스와의 경계(온도 약 2000K되는 지점)까지의 반경방향 거리, ρ_∞ 는 경계지점에서의 가스 밀도를 나타낸다. 식(4)에서 c 가 실험결과에 따라 조정되어야 할 난류 변수이다. 그림 1에서 실험결과와 계산결과사이에 차이가 나는 이유를 이 난류변수 값의 설정에서 찾고자 했고, 에너지 보존방정식에서 난류에 의한 에너지 소산(energy dissipation) 량

$$\Phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r(\mu + \mu_t) w \frac{\partial w}{\partial r} \right] \quad (6)$$

을 정량적으로 검토하고자 하였다.

2.3 해석결과 및 검토

그림 2는 실험에서 사용한 노즐 형상과 계산을 위한 경계조건 및 계산격자 수를 나타낸 것이다. 그림 3은 전류기울기 $di/dt=27.0A/\mu s$, 상류장(inlet)의 압력 3.75MPa인 경우 전류영점에서의 온도분포를 나타낸 것이다.

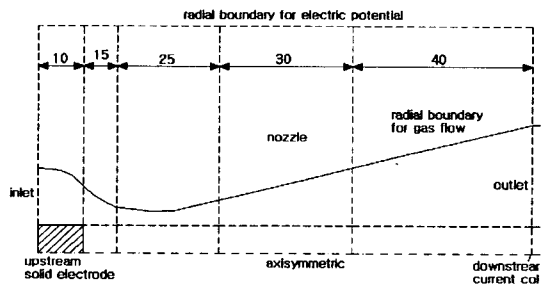


그림 2. Frind&Rich 노즐과 계산영역.

그림 3의 결과는 난류변수 $c=0.10$ 을 사용하여 얻어진 결과이다.

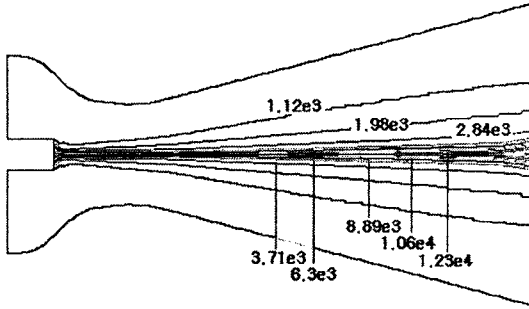


그림 3. $di/dt=27.0A/\mu s$, $P_u=3.75MPa$ 일 때, 전류영점에서 온도분포도($c=0.10$).

그림 4는 전류 감소율 $di/dt=27.0A/\mu s$, 상류장 압력 $3.75MPa$ 에서 난류변수에 따른 아크-후 전류를 계산한 결과이다. 난류변수의 변화에 따라 열적회복 능력이 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다. 즉, 열적회복 능력이 $2.7kV/\mu s$ 에서 $4.4kV/\mu s$ 로 약 2배정도 상승하여, 난류변수 값의 설정이 대단히 중요하다는 것을 나타내고 있다.

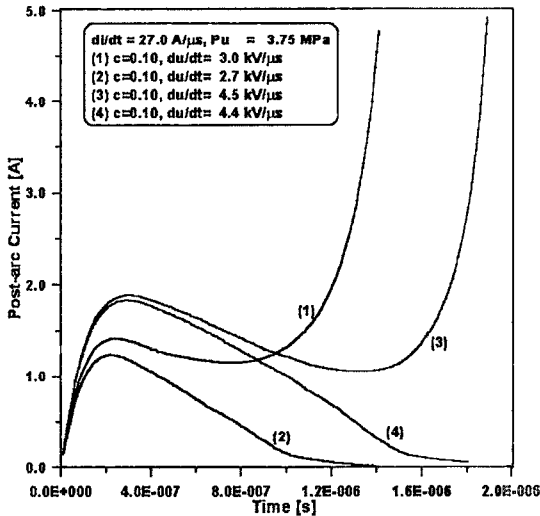


그림 4. 전류감소율 $27.0A/\mu s$, 상류장 압력 $3.75MPa$ 에서 난류변수에 따른 아크-후 전류의 변화.

그림 5는 난류변수에 따른 열적회복특성을 실험결과와 비교한 것이다. 전류감소율 $13.5A/\mu s$ 인 경우, 난류변수 c 가 0.10 에서 0.11 로 조정됨에 따라 열적회복 능력이 상승하여 실험결과에 가깝게 접근하는 반면, 전류감소율이 큰 $27.0A/\mu s$ 에서는 실험과는 오히려 벗어나는 결과를 나타내고 있다. 또한, 난류 값의 조정은 상류장의 가스압력에 따라 비선형적으로 조정되어야 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 난류변수의 조정은 전류의 기술기, 압력이 고려되어 신중히 선택되어야 하고, 이에 관한 지속적인 연구가 요구되고 있다.

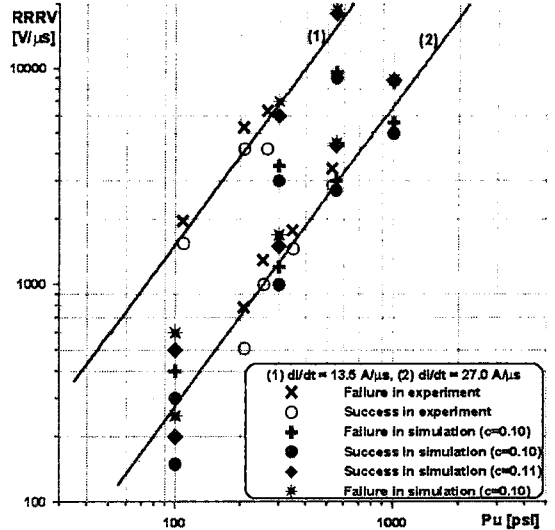


그림 5. 난류변수에 따른 열적회복특성 비교.

3. 결론

이상과 같이 난류변수에 따른 아크-후 전류를 계산하고 열적회복특성의 변화를 검토하였다. 그 결과 난류변수는 가스압력에 비선형적으로 변하며, 열적회복특성에 대단히 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 본 연구에서 적용된 Frandtl mixing length 모델의 예도 $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하는 등 보다 정밀한 지속적인 연구가 요구되고 있다.

[참고 문헌]

- [1] O. Mayr, "Contributions to the theory of the static and the Dynamic Arc", Archive Fur Electrotechnik, Vol. 37, No. 1, pp.588, 1943.
- [2] J.J. Lowke and H.C. Ludwig, "A Simple Model for High current Arcs Stabilized by forced convection", J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 8, pp3352-3356, 1975.
- [3] J.F. Zhang and M.T.C. Fang, "The dynamic behaviour of nozzle arcs", IEEE Trans., Vol. PS-14, No. 4, pp.350-356, 1986.
- [4] Ki Dong Song, Byeong Yoon Lee, Kyeong Yop Park and Jung Hoo Park, "Analysis of Dielectric Recovery for SF6 Gas-Blast Arc", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 41, pp6541-6549, 2002.
- [5] L.S. Frost and R.W. Liebermann, "Comparison and Transport Properties of SF6 and Their Use in a Simplified Enthalpy Flow Arc Model", Proc. of IEEE, Vol. 59, No. 4, pp474-485, 1971.
- [6] J.F. Zhang, M.T.C. Fang, "Theoretical investigation of a 2kA arc in a supersonic nozzle", J. Phys. D, Appl. Phys., Vol. 20, pp368-379, 1987.
- [7] R.W. Liebermann and J.J. Lowke, "Radiation Emission Coefficients for Sulfur Hexafluoride Arc Plasmas", JQSRT Vol. 16, pp253-264, 1976.
- [8] Kunio Nakanish, Switching Phenomena in High-Voltage Circuit Breakers, Marcel Dekker, Inc., 1991.
- [9] 송기동, 이병윤, "전류 감소율에 따른 전류영점 전·후의 아크특성 해석" 대한전기학회 고전압/방전 국제대회는문집, pp. 145-149, 2003.
- [10] Frind G. and Rich J., "Recovery speed of axial flow gas blast interrupter: dependence on pressure and di/dt for air and SF6", IEEE Trans. Power Appar. Syst. 93, pp1675-1682, 1974.