

## 대전류 구간의 아크해석 결과를 이용한 SLF 차단성능 예측

이원호\*, 이종철\*, 서현석\*\*  
강릉원주대\*, 성균관대\*\*

### Prediction of SFL Interruption Performance from the Results of Arc Simulation during High-Current Phase

Won-Ho Lee\*, Jong-Chul Lee and Hyeon-Suk Seo\*\*  
Gangneung-Wonju National University\*, Sungkyunkwan University\*\*

**Abstract** - 본 연구에서는 대전류 구간에서의 아크해석 결과를 이용하여 SLF 차단성능을 예측하기 위하여 과도회복전압 상승률에 따라 전류영점 후 수~수백 마이크로초 동안 SF<sub>6</sub> 아크현상 이력과 영점후전류를 계산하여 대전류 구간 마지막 시점에서의 10,000K 이하의 가느다란 잔류아크가 완전히 소호될지 아니면 아크가 다시 재발호될지 판단하였다.

#### 1. 서 론

고전압 가스차단기는 단락 전류 조건 하에서도 작동이 가능하기 때문에 전력시스템에서 중요한 안전장치이다. 차단기가 작동할 때 차단기 접점 사이에 전기적 아크(electric arc)가 형성되는데, 대전류 구간(high-current phase)동안 커다란 아크현상은 전류영점(current-zero) 부근에서는 자연스럽게 작아지게 된다. 따라서 전류영점 직후 아크를 완전히 소호(quenching)하기 위해서 잔류아크(residual arc)를 붙여 없앨 수 있는 파퍼식(puffer-type), 자력팽창식(self-blast type), 복합소호식(puffer-assisted self blast) 등의 여러 가지 소호 메커니즘이 적용되고 있다[1].

본 논문에서는 자력팽창식(self-blast) 소호부의 SLF(short line fault) 차단성능을 예측하기 위하여 과도회복전압 상승률(rate of rise of recovery voltage, RRRV)에 따라 전류영점 후 수~수백 마이크로초 동안 SF<sub>6</sub> 아크현상 이력(history)과 영점후전류(post-arc current)를 계산하였다.

#### 2. 본 론

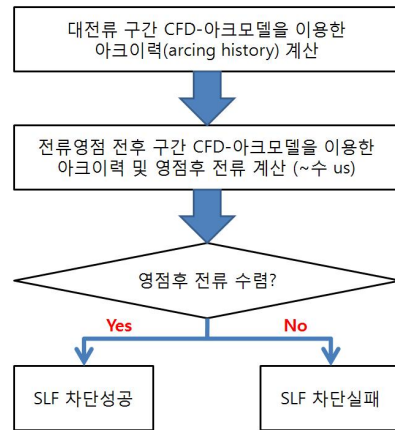
자력팽창식 소호부의 대전류 구간 및 전류영점 후 수~수백 마이크로초 동안의 아크해석을 위한 지배방정식 및 주요변수를 표 1에 나타내었다. 자세한 내용은 참고문헌[2]을 참고하기 바란다. 아크해석을 위한 복사열전달은 Liebermann and Lowke[3]에 의해 정의된 순방출계수(net emission coefficient)를 이용한 간이방사모델(approximate radiation model)을 사용하였고, 난류모델은 Zhang[4]에 의해 수정된 프란틀 혼합거리 모델을 사용하였다.

대전류 구간동안 계산된 해석결과를 SLF 차단성능 평가에 적용하기 위해서 전류영점을 기준으로 대전류 구간과 전류영점 전후 구간으로 영역을 나누어 해석을 수행하였다. 전류영점 후 수~수백 마이크로초 동안 계산된 온도분포와 식(1)을 이용하여 과도회복전압(dV/dt)에 따른 영점후전류를 계산하였다. SLF 차단성능 평가를 위한 해석 순서도를 그림 1에 나타내었다.

$$I_{post-arc} = \frac{dV}{dt} \frac{t}{R_{arc}} \quad (1)$$

**<표 1> 지배방정식 및 주요 변수**

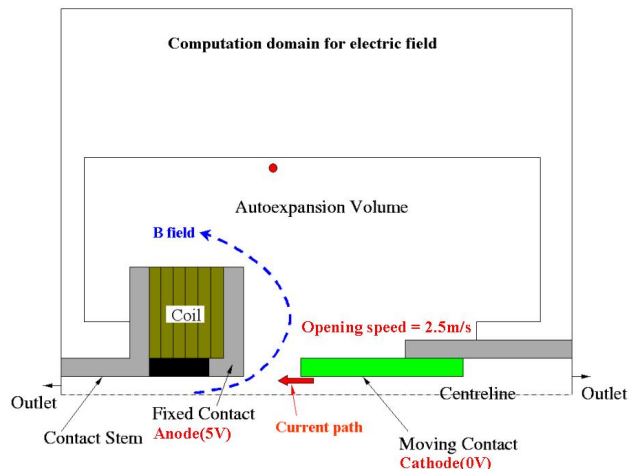
Navier-Stokes Eq.		Electrostatic potential & Electric field		Magnetic field
$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\phi) - \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) = S_\phi$		$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0$ $E = -\nabla \varphi$		$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rB_\theta) = \mu_0 j_z$
Equation	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$	
Mass	1	0	0	
z-momentum	w	$\mu_t + \mu_r$	$-\partial p / \partial z + (J \times B)_z + \text{viscous terms}$	
r-momentum	v	$\mu_t + \mu_r$	$-\partial p / \partial r + (J \times B)_r + \text{viscous terms}$	
Enthalpy	h	$(k_t + k_r) / c_p$	$dp / dt + \sigma E^2 - q + \text{viscous dissipation}$	



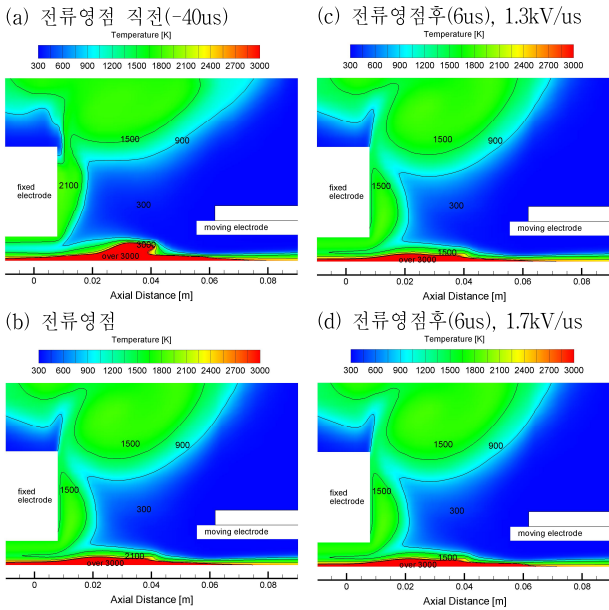
**<그림 1> SLF 차단성능 평가를 위한 해석 순서도**

본 논문의 해석 대상으로 선정된 차단부는 24kV/10kA 자력팽창 소호부이며, 그림 2에 개략도를 나타내었다. 대전류 구간에서의 아크해석 결과 검증을 위하여 고속카메라로 촬영된 차단과정의 아크현상 사진과 분압기(voltage divider)로 측정된 아크전압[5]과 비교한 결과 좋은 일치를 나타내었다.

대전류 구간에서의 아크해석 결과를 이용하여 과도회복전압 상승률에 따라 전류영점 후 수~수백 마이크로초 동안 SF<sub>6</sub> 아크현상 이력과 영점후 전류를 계산하면 대전류 구간 마지막 시점에서의 10,000K 이하의 가느다란 아크가 완전히 소호될지 아니면 아크가 다시 재발호(reignition)될지 판단할 수 있다. 첫 번째로 그림 3과 같이 전류영점 부근(-40us), 전류영점(0us), SLF 차단구간(6us)에서의 온도이력이 대전류 구간동안 형성된 압력에너지에 의한 냉각작용으로 순차적으로 감소되는지 확인해야 하며, 반대로 전류영점 후 다시 온도이력이 상승하게 되면 SLF 차단실패로 연결될 확률이 높은 것을 의미한다. 과도회복전압 상승률이 1.3kV/us일 때 순차적으로 온도가 감소되는 것을 확인할 수 있으며, 1.7kV/us인 경우에는 온도가 다시 상승하는 것을 볼 수 있다.



**<그림 2> 24kV/10kA 자력팽창 소호부의 개략도**



〈그림 3〉 전류영점 전후의 아크온도 분포

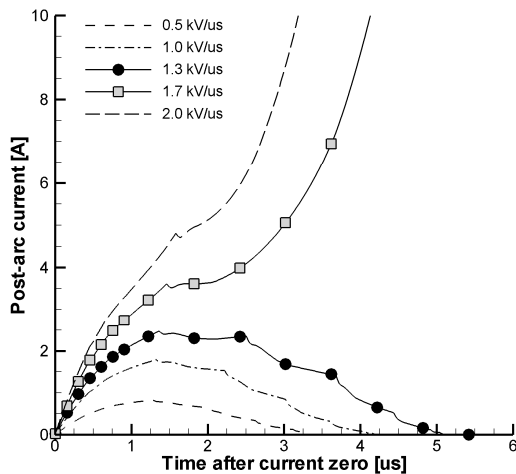
두 번째로 그림 1과 같이 영점후전류를 이용하면 보다 이해하기 쉽게 SLF 차단성능을 평가할 수 있는데, 영점후전류 계산을 통해 전류가 0으로 수렴되면 열적 파괴를 극복하여 SLF 차단이 성공한 것이며, 반대로 영점후 전류가 계속 흐르게 되면 SLF 차단이 실패한 것으로 판단하면 된다. 그림 4와 같이 본 논문의 해석대상인 자력팽창 소호부의 한계 과도회복전압 상승률 (critical RRRV)은 약 1.5kV/us 임을 알 수 있으며, 이는 그림 3에서 검토한 온도분포의 결과와 동일한 패턴을 나타냄을 확인할 수 있었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 대전류 구간에서의 아크해석 결과를 이용하여 SLF 차단성능을 예측하기 위하여 과도회복전압 상승률에 따라 전류영점 후 수~수백 마이크로초 동안 SF<sub>6</sub> 아크현상 이력과 영점후전류를 계산하여 대전류 구간 마지막 시점에서의 10,000K 이하의 가스다란 잔류아크가 완전히 소호되지 아니면 아크가 다시 재발호될지 판단하였다. 24kV/10kA 자력팽창 소호부에 적용한 결과, 온도분포 및 영점후전류 계산에서 모두 동일하게 한계 과도회복전압 상승률 (critical RRRV)은 약 1.5kV/us 임을 알 수 있었다.

### 후 기

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2014년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호: R14XA02-30)



〈그림 4〉 과도회복전압상승률에 따라 계산된 영점후전류

### [참 고 문 헌]

- [1] R. D. Garzon, "High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications 2nd", Marcel Dekker, New York, pp. 18-25, 2002
- [2] Y. J. Kim and J. C. Lee, "SF<sub>6</sub> Arc Plasma Simulation and Breakdown Performance Prediction Using Computational Fluid Dynamics and Arc Modeling", Thin Solid Films, Vol.521, pp.206-211, 2012
- [3] R. W. Liebermann and J. J. Lowke, "Radiation Emission Coefficients for Sulfur Hexafluoride Arc Plasmas", JQSRT, 16, pp. 253-264, 1976
- [4] J. L. Zhang, J. D. Yan, A. B. Murphy, W. Hall and M. T. C. Fang, "Computational Investigation of Arc Behavior in an Auto-expansion Circuit Breaker Contaminated by Ablated Nozzle Vapor", IEEE Trans. on Plasma Sci., Vol.30, No.2, pp.706-719, 2002
- [5] J. C. Lee and Y. J. Kim, "Numerical Modeling of SF<sub>6</sub> Thermal Plasma Generated during the Switching Process", Thin Solid Films, Vol. 475, pp. 72-80, 2005