

소전류 차단성능 개선을 위한 가스 차단기의 형상 최적화

김홍규*, 박경엽*, 임창환**, 정현교**, 박순규***, 이봉희***
 한국전기연구원*, 서울대학교**, 한국전력공사 중앙교육원***

Shape Optimization of GCB for Increasing Small Current Interruption Capacity

H.K. Kim*, K.Y. Park*, C.H. Im**, H.K. Jung**, S.K. Park***, B.H. Lee***
 KERI*, Seoul National University**, KEPCO Central Education Institute***

Abstract - 본 연구에서는 가스 차단기의 소전류 차단 성능을 개선하기 위한 최적화 과정에 대해서 나타낸다. 목적함수는 절연내력과 극간 인가전압의 차이의 최소값으로 선정하였으며, 목적함수가 최대가 되도록 최적화를 수행한다. 설계 변수로는 개극 전의 전극 이동길이, 노즐목 길이 및 노즐목 발산각과 노즐 하류장 형상을 채택하였다. 최적화 알고리즘으로는 (1+1) 진화알고리즘을, 유동해석을 위해서는 FVFLIC법을 사용하였다. 최적화 결과로 얻어진 모델은 초기 모델에 비해 소전류 차단성능이 상당히 개선되었음을 확인할 수 있었다.

가스 차단기의 원리이다. 차단기 내의 유동 해석 시에는 차단부 형상으로 인해 축대칭을 가정한 유동 해석을 하여도 큰 오차가 없으며, 이 경우의 유동 해석 지배 방정식은 다음의 보존식으로 표현이 된다[2].

질량 보존 법칙 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

운동량 보존 :

$$z\text{방향 } \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{U}) = -(\nabla P)_z \quad (2)$$

$$r\text{방향 } \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{U}) = -(\nabla P)_r \quad (3)$$

에너지 보존 :

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \vec{U}) = -\nabla \cdot (P \vec{U}) \quad (4)$$

여기서 u, v 는 z 와 r 방향의 속도 성분, ρ 는 밀도, P 는 압력, E 는 비총에너지(specific total energy)를 나타낸다.

차단부 내의 유동 해석을 위해서는 FVM, FDM, FEM, FVFLIC법 등의 여러 가지 수치해석 기법이 사용되고 있지만, 본 연구에서는 계산량이 적고 해석 시간이 상대적으로 짧은 FVFLIC법을 사용한다.

1. 서 론

차단기는 BTF(Bus terminal fault) 및 SLF(Short line fault)와 같은 대전류 차단 성능과, 장거리 송전선로, 케이블, 콘덴서 뱅크 등을 개로할 때 일어날 수 있는 진상소전류 차단과 같은 소전류 차단 성능을 동시에 가져야 한다. 대부분의 차단기는 큰 고장 전류를 차단할 때, 첫 전류 영점에서 차단 성공에 이르지 못하고 접점이 충분히 떨어진 후에야 아크를 소호하여 차단에 성공하지만, 진상 소전류와 같이 차단 전류 크기가 작은 경우에는 접점이 분리된 후 곧 차단을 할 수 있다. 이 경우에는 극간의 거리가 가까우면서 계통 전압 최대치의 약 2배에 가까운 전압이 극간에 인가되어 재점화가 일어날 가능성이 높으며, 재점화가 일어난 후에는 극간의 절연파괴가 발생한다. 따라서 소전류 차단 성능은 극간의 절연 회복 능력과 밀접한 관계가 있으며, 극간의 절연회복 능력은 극간의 가스 밀도와 전장의 세기에 의해 결정된다. 따라서 소전류 차단 시의 차단 성능 해석은 아크가 없는 경우의 냉가스 유동 해석에 의해 공간 상의 가스 밀도 분포를 계산하고, 스트로크에 따른 전장 해석에 의해 극간의 전장 세기를 구하여, 계산지점에서의 밀도와 전장세기로부터 절연내력이 계산되진다[1].

본 연구에서는 가스 차단기의 소전류 차단성능 개선을 위한 차단부 형상 최적화를 수행한다. 최적화 알고리즘으로는 (1+1) 진화 알고리즘을 채택하며, 절연내력을 구하기 위해 필요한 극간의 밀도분포는 FVFLIC(Finite Volume Fluid in Cell)법[2,3]에 의해서, 전장의 세기는 유한요소법에 의해 구한다. 또한 극간의 내전압은 실험으로부터 구하여진 상수를 이용한 경험식을 적용한다. 시뮬레이션 결과로부터 최적화된 형상은 초기 형상에 비해 소전류 차단 성능이 상당히 개선되었음을 확인하였다.

2. 소전류 차단성능 해석

2.1 냉가스 유동 해석

그림1은 본 연구에서의 대상 모델인 파퍼식 가스 차단기의 일반적 형상을 보여준다. 가동부의 이동에 의해 파퍼실이 압축되며, 압축된 가스(SF₆)가 극간에 존재하는 아크로 강하게 불어서 아크를 소호하는 것이 파퍼식

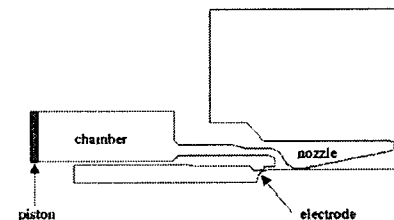


그림 1. 파퍼식 가스차단기 모델

2.3 절연내력 계산

차단기의 소전류 차단 성능 해석 기법에는 크게 실험적 방법과 스트리머 이론(Streamer theory)을 이용한 이론적 방법이 있다. 본 연구에서는 실험적 방법에 의해 내전압을 계산한다. 실험적 방법에 의한 절연 파괴전압은 다음식으로 표현된다[1].

$$V_d = a \frac{\rho^b}{E_0} \quad (6)$$

여기서 a , b 는 실험에 의해 결정하여야 할 상수이다.

3. (1+1) 진화 알고리즘을 이용한 최적화 과정

접점 분리 후에는 극간에 과도회복 전압이 인가되며, 절연내력이 인가전압보다 크게 되면 차단기는 절연회복을 달성하여 차단에 성공하게 되고, 반대의 경우는 절연 파괴가 일어나 차단에 실패하게 된다. 따라서 차단기가 차단에 성공할 충분한 차단 능력을 가지기 위해서는 절연내력이 인가전압보다 충분히 커야 한다. 본 연구에서의 목적함수는 극간의 여러 지점에서의 절연내력과 인가전압의 차의 최소값으로 정의하며, 이 값이 클수록 차단기의 차단 성능이 커지기 때문에 최적화 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Maximize Obj_func} = \text{Min.} \{V_d(r,z) - V_a\}, (r,z) \in \Omega \quad (7)$$

여기서 $V_d(r,z)$ 는 (r,z) 점에서의 절연내력, V_a 는 극간 인가 전압, Ω 는 해석 영역을 나타낸다.

설계변수로는 그림2에 표시한 4개를 선정하였으며, 각각의 의미와 변수 범위는 다음과 같다.

- x1 : 개극 전 전극 이동 길이
 - x2 : 노즐 목 길이
 - x3, x4 : 노즐 발산각 및 하류장 형상
- $x1 = [0.02, 0.04] [m]$
 $x2 = [0.009, 0.011] [m]$
 $x3 = [0.01, 0.03] [m]$
 $x4 = [20.0, 40.0] [deg]$

최적화 알고리즘으로는 전역 최적화 탐색이 가능하여 널리 이용되고 있는 (1+1) 진화 알고리즘을 사용하였다[4]. 이 방법은 알고리즘이 간단하면서도 수렴속도가 빠르다는 장점이 있다. 그림 3은 최적화 과정에 대한 순서도를 나타낸다. 형상이 주어지면 냉가스 유동해석과 전장해석을 수행하여 극간의 밀도분포와 전장세기를 스트로크에 따라서 계산하여 절연내력 V_d 를 계산하고, 스트로크 및 극간 위치에 따른 절연내력과 인가전압의 차가 최소인 값을 구한다. 이 최소값이 주어진 값(여기서는 200kV) 이상이 되거나, 목적함수의 값이 이전 스텝의 값과 비교하여 0.01% 내에서 변화하면 최적화 과정은 종료한다.



그림 2. 설계 변수 정의

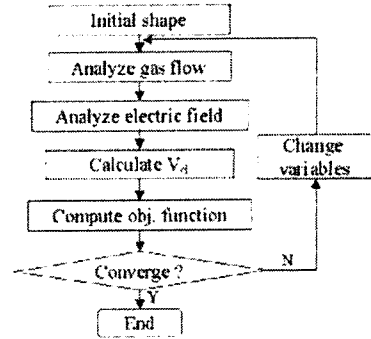


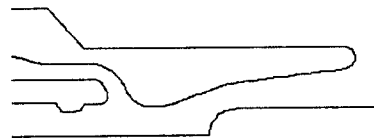
그림 3. 최적화 과정에 대한 순서도

4. 사례 연구

본 연구에서의 최적화 과정을 소전류 차단성능 개선을 위한 170kV급 차단부 형상 최적화에 적용하였다. 한번의 목적함수 값을 계산하는 데 소요되는 시간은 약 30분(펜티엄4, 1.4GHz)이며, 약 200번의 반복 계산 후에 최적화 값이 구하여졌다. 표1은 최적화 결과 얻어진 설계 변수를 나타내며, 그림 4에 형상을 나타내었다. 두 모델 간의 가장 큰 차이는 노즐 발산각으로, 노즐 발산각에 따라서 유동의 속도가 크게 바뀌어 극간의 밀도 분포에 큰 영향을 주기 때문이다. 초기 형상은 설계 변수 범위 내에서 임의의 값을 선택하였으며, 초기 형상에 대한 목적 함수값은 -17(kV)이다. 이는 절연 내력이 인가전압보다 낮은 지점이 있음을 의미하며, 이 경우 차단기는 이 지점에서 절연파괴가 발생하여 소전류 차단에 실패하게 된다. 최적화 결과 얻어진 목적함수 값은 211.9[kV]로서 이 경우 차단기는 소전류 차단 성능이 충분히 확보되었음을 알 수 있다.

표1. 최적화 결과

	$X_1[m]$	$X_2[m]$	$X_3[m]$	$X_4[m]$	Obj.func[kV]
Initial	0.03	0.01	0.02	35.5	-17
Optimized	0.033	0.0093	0.024	27.9	211



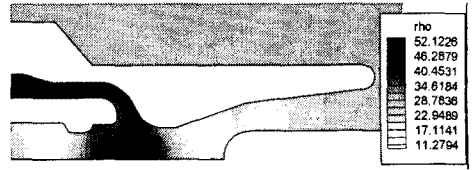
(a) 초기 형상



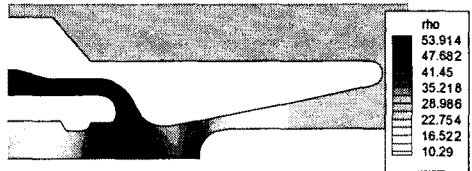
그림 4. 초기 형상 및 최적화 된 차단부 형상

그림5는 극간의 인가전압과 절연내력을 비교한 것이다. 초기형상에 대한 그림(a)에서 시간 17(ms)부근에서는 절연내력(V_d)의 최소값이 인가전압(V_{app})보다 낮아서 소전류 차단에 실패하게 된다. 하지만 최적화된 형상에 대한 그림 (b)의 경우는 모든 영역에서 절연 내력이 인가전압보다 크며, 또한 절연내력과 인가전압과의 차이가 충분히 커서, 이 형상의 차단기는 소전류 차단 성능에 충분한 여유가 있음을 알 수 있다.

그림6은 시간 17(ms)인 시점에서 극간의 밀도 분포를 보여준다. 차단기의 소전류 차단 성능에 가장 큰 영향을 미치는 부분은 고정아크 접점 선단부분이며, 이 부분에서는 전장 세기가 높고, 또한 전극이 노출 목을 지나가는 시점부터 빠른 유동이 형성되어 밀도가 현저히 낮아져서 절연내력이 나빠진다. 그림6의 (a)의 경우, 고정아크 접점 앞 부분에서의 밀도값이 그림(b)의 최적화된 형상보다 매우 낮아져서, 결과적으로 절연내력이 매우 낮음을 확인할 수 있다.

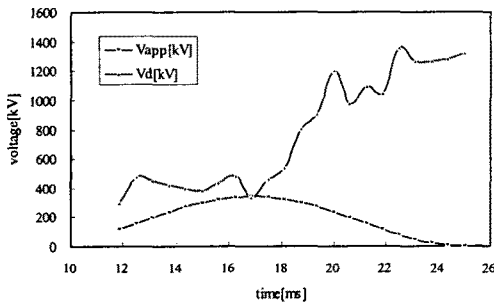


(a) 초기형상

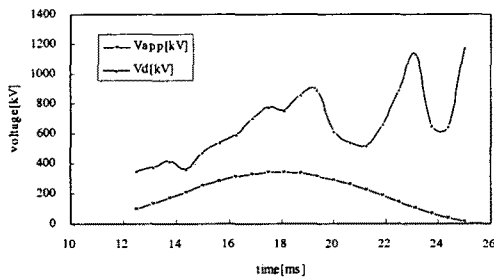


(b) 최적화 된 형상

그림 6. time=17.5(ms) 시점에서의 극간 밀도 분포



(a) 초기형상



(b) 최적화된 형상

그림 5. 절연내력과 인가전압 비교

5. 결론

본 연구에서는 가스차단기의 소전류 차단성능 개선을 위한 최적화 결과를 나타내었다. 수치유동해석 방법으로는 계산량이 적고 계산시간이 빠른 FVFLIC법을 사용하였으며, 최적화 알고리즘으로는 (1+1) 진화 알고리즘을 사용하였다. 최적화 결과 얻어진 형상은 초기 형상에 비해서 소전류 차단성능에 충분한 여유가 있음을 확인하였으며, 본 연구에 의한 방법은 가스 차단기의 차단부 설계 시 기본 형상 설계에 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

6. 참고 문헌

- [1]송기동 외 3인, "초고압 SF₆ 가스차단기의 소전류 차단성능 해석기술 I", 대한전기학회 논문지 Vol. 50B, No. 7, pp.331-337, 2001년 7월.
- [2]김홍규, 신승록, 정현교, 김두성, 권기영, "Puffer식 차단기 내의 냉가스 유동 해석", 대한전기학회 논문지 Vol. 48B, No. 7, pp. 233-239, 2000년 4월.
- [3]Y. Zhao and D.E. Winterbone, "The Finite Volume FLIC Method and its Stability Analysis", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 37, No. 11, pp 1147 - 1160, 1995.
- [4]K.Press, et al., FEM & Evolution Strategies in the Optimal Design of Electromagnetic Devices, *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 26, no.5, pp.2181-2183, September 2000.