

초고압 가스차단기의 소전류 차단성능 해석

김홍규, 박경엽, 송기동
한국전기연구원 신전력기기연구그룹

Analysis of Small Current Interruption Performance for EHV Gas Circuit Breaker

H.K. Kim, K.Y. Park, and K.D. Song
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper presents the prediction method of small current interruption performance for EHV gas circuit breakers. The FVFLIC method is used for the gas flow analysis and the FEM for the electric field analysis. Then, the dielectric withstanding voltage is evaluated by the empirical formulation or Streamer theory. By comparing the calculated dielectric strength with the test result, it is found that both methods show good prediction capability for the small current interruption performance. Especially, when both methods predict the same interrupting performance, the prediction is in accordance with the experimental result.

1. 서 론

본 논문에서는 초고압 가스차단기의 소전류 차단성능을 예측하기 위해서 FVFLIC법 (Finite volume fluid in cell) [1-3]에 의해서 유동해석을 수행하고, 유한요소법에 의해 전계 해석을 수행한 후, 경험식[4]과 스트리머 이론[5-6]에 의한 절연내력 계산식을 활용한다. 차단부 내의 유동해석 시에는 가동부 모의, 충격파 영향 등 전산유체역학 측면에서 상당히 어려운 문제들을 가지고 있으며, 본 연구에서 적용된 FVFLIC법을 실제 차단부 내의 냉가스 유동해석에 적용하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 계산된 절연내력을 소전류 차단시험 데이터와 비교하여, 경험식과 스트리머 이론식 모두 10% 오차 범위 내에서 소전류 차단성능을 예측할 수 있음을 확인하였다.

2. 냉가스 유동해석

2.1 FVFLIC법에 의한 유동해석

차단부 내의 유동 해석 시에는 가동부 이동에 따른 이동 경계 조건, 초음속 유동에 의한 충격파 발생, 노즐 등의 복잡한 형상 고려 등 CFD(computational fluid dynamics) 측면에서 상당히 어려운 점들이 많이 있다. 본 연구에서는 이러한 조건들을 비교적 정확히 고려할 수 있는 FVFLIC법[1-3]을 적용하여 차단부 내의 유동 해석을 수행한다. 이 방법은 임의의 형상의 격자를 사용할 수 있고, 계산량이 유한체적법, 유한차분법 등에 비해 적으며, 충격파에 의한 영향을 비교적 정확히 고려할 수 있는 것으로 알려져 있다. 차단부 유동 해석 시에는 축대칭을 가정하여도 큰 오차가 없으며, 해석을 위한 축대칭 오일러 방정식은 다음과 같이 표현된다.

질량 보존식 :

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

운동량 보존식 :

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

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

에너지 보존식 :

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

2.2 인공점성항

Navier-Stokes방정식을 해석하는 경우에는 그리드 간격과 시간 스텝을 적절히 선택하면 인공 점성항 (artificial viscosity)이 필요하지 않은 경우도 있지만, 오일러 방정식을 적용한 FVFLIC법의 경우에는 차분 방정식의 안정성을 위해서 속도가 낮은 영역에서 인공 점성항이 필요하다. 인공 점성은 주로 셀의 표면에서 계산되며, 인접한 두 셀 a와 b사이의 경계면 i에서의 인공 점성의 크기는 다음과 같이 정의된다[2].

$$q_i = A [\rho_i c_i (\vec{U}_a - \vec{U}_b) \cdot \vec{n}_i] \quad \text{if } K U_i^2 < c_i^2 \text{ and } (\vec{U}_a - \vec{U}_b) \cdot \vec{n}_i > 0$$

$$= 0, \quad \text{otherwise} \quad (5)$$

여기서 ρ_i : 셀 경계면에서의 밀도[kg/m³]
 c_i : 셀 경계면에서의 음속[m/s] = $\sqrt{\gamma R T}$
 γ : 비열비, R : 기체상수, T : 온도[K]
 \vec{U}_a, \vec{U}_b : 셀 a, b의 속도벡터
 \vec{n}_i : 셀 경계면에서의 외향 정규 법선 벡터

위의 식에서 계수 K는 인위적인 점성항이 적용될 하나의 셀 경계면에서의 마하수(Mach number)의 최대 값을 결정하며, A는 점성압력의 크기를 결정한다. 계산의 안정성을 높이기 위해서는 A는 큰 값일수록 좋지만, 해의 중요한 특징들을 정확히 표현하기 위해서는 작은 값이어야 한다. 따라서 실제 차단부 모델에 대한 시험 결과를 바탕으로 가장 적합한 K 및 A값을 구하여 사용하여야 한다. 본 연구에서는 K는 0.4를, A는 0.3을 사용하였다.

3. 소전류 차단성능예측

3.1 경험식에 의한 소전류 차단성능예측

일반적으로 기체의 절연파괴 전압은 가스의 밀도와 전계 세기와 밀접한 관계가 있다. 즉, 전계세기가 낮을수록, 그리고 가스 밀도가 높을수록 절연내력이 높아져 소

전류 차단에 성공할 가능성이 높아진다. 이러한 조건으로부터 절연내력을 계산하기 위한 경험식은 다음과 같이 표현될 수 있다[4].

$$V_{bd} = a \frac{\rho^b}{E} \quad (6)$$

여기서 ρ 는 가스밀도, E 는 전계세기를 나타내며, a 와 b 는 시험으로부터 구하여야 하는 상수들이다.

3.2 스트리머 이론에 의한 절연내력 계산

스트리머 이론에 의한 임계 절연과피 전압은 다음과 같이 표현된다[5].

$$V_{bd} = \frac{(E/N)^*}{E/N} \times V_{ap} \quad (7)$$

여기서 $(E/N)^*$ 은 임계 E/N 이라고 하며, E 는 전계의 세기, N 은 단위체적당의 입자의 수, V_{ap} 는 인가전압을 나타낸다. SF₆ 가스의 경우 $(E/N)^*$ 은 약 $3.56 \times 10^{-15} V/cm^2$ 의 값을 가지는 것으로 알려져 있다[6].

위의 식에 의해 임계 절연과피전압을 구하기 위해서는 전계해석으로부터 E 를 구하고, 유동해석으로부터 밀도를 계산하여 N 을 계산하면 된다. 즉 스트리머 이론에 의한 절연내력 계산식에 경험식에 의한 계산식과 유사하게 전계의 세기와 밀도의 함수로 표현됨을 알 수 있다.

4. 사례 연구

본 연구에 의한 소전류 차단성능 예측 방법을 145kV 급 가스 차단기에 적용하여 그 결과를 검토한다. 소전류 차단 시에도 실제로는 차단 전류가 흐르며, 따라서 극간에 인가되는 전압은 다음 식으로 표현된다.

$$V_{ap}(t) = V_m (1 - \cos w(t - t_0)) \quad (8)$$

여기서 t_0 는 아크 시간을 나타내며, 전압은 점점이 분리된 후, $t=t_0$ 시점부터 인가된다.

극간에 절연과피가 발생할 확률이 가장 높은 곳은 고정 아크 접점 표면으로, 이 지점은 노즐목을 지나는 시점에서 빠른 유동에 의해 밀도가 다른 곳보다 현저히 낮아지고, 또한 접점이 노즐 부근을 지나는 시점에 유전체 인 노즐의 영향으로 전계가 집중되기 때문이다. 본 연구에서는 그림 1에서와 같이 고정아크 접점 표면에 위치한 점들의 절연내력을 계산 한 후, 가장 절연내력이 취약한 점에서의 값과 인가전압을 비교하여 절연회복 특성을 평가한다.

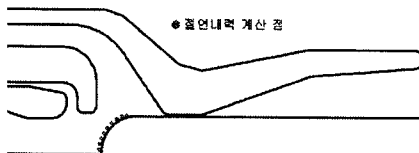


그림 1 절연내력 계산점

그림 2은 해석에 적용된 차단부 모델을 보여주며, (a)는 파퍼식 차단기, (b)는 병렬복합소호 방식의 차단기[7]이다.

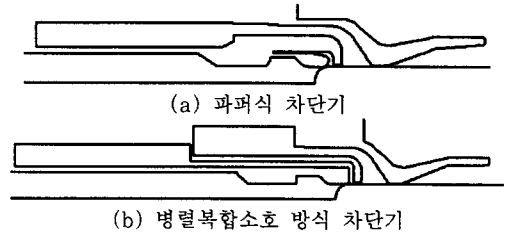


그림 2 해석용 차단부 모델 형상

각 차단기에 대해서 다음의 전압

$$V_{ap} = \frac{145kV}{\sqrt{3}} \times f \quad (9)$$

을 인가하여 상수 f 를 0.7에서 재발호(restrike)가 일어날 때까지 증가시킨다. 즉 시험에서 아크시간 T_{arc} 와 절연과피가 발생하는 전압을 구하고, 이 결과를 해석 결과와 비교한다. 그림 2는 해석에 사용된 삼각형 격자를 보여주며, 해석 초기에는 약 13,000개, 그리고 전극이 노즐목을 지나는 시점에는 약 15,000개의 요소가 사용되었으며, 고정아크 접점 선단의 유동특성이 중요하기 때문에 이 부근에는 조밀한 요소를 사용하였다.

그림 3은 파퍼식 차단기에 대해서 계산된 절연내력과 인가전압을 비교한 것이다. 그림 (a)는 인가전압 퍼크치 $V_c = 327$ kV, 아크시간 $T_{arc} = 3.4$ ms인 경우이며, 경험식과 스트리머 이론에 의한 식 모두 절연내력값이 인가전압보다 높게 나타나 소전류 차단에 성공할 것으로 예상되었으며, 시험에 의해서도 절연과피가 발생하지 않았다.

그림 (b)는 인가전압 퍼크치 $V_c = 371$ kV, 아크시간 $T_{arc} = 3.14$ ms인 경우이며, 두 가지 절연내력 계산식에 의해 모두 절연내력이 인가전압보다 낮은 시점이 있어 소전류 차단에 실패할 것으로 예상되며, 실제 차단 시험에서도 약 20ms 부근에서 재점화가 발생하였다. 이 시점은 그림에서 보듯이 절연내력이 인가전압보다 낮아지기 시작하는 시점에 해당한다.

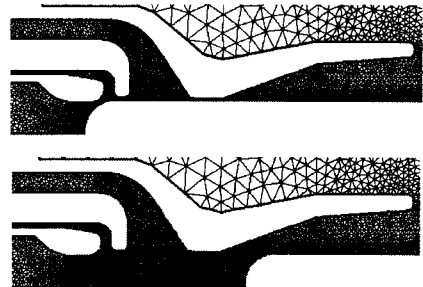
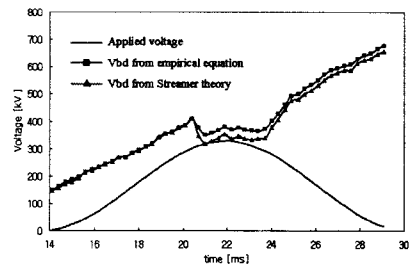
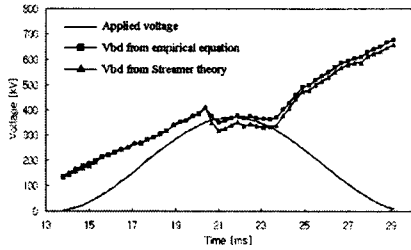


그림 3 요소분할도



(a) $V_c = 327$ kV, $T_{arc} = 3.4$ ms



(b) $V_c = 371$ kV, $T_{arc} = 3.14$ ms
그림 4 절연내력과 인가전압 비교

표1은 시험 및 해석에 의한 소전류 차단성능 결과를 비교한 것이다. 여기서 시험결과가 ○이면 재점화가 일어나지 않은 경우이며, ×이면 재점화가 일어난 경우이다. 그리고 F_{db} 는 다음 식으로 계산되는 절연내력과 인가전압의 상대적 차이의 최소값을 나타낸다.

$$F_{db} = \min \left\{ \frac{V_{db} - V_{ap}}{V_{ap}} \times 100 \right\} \quad (\%) \quad (10)$$

따라서 F_{db} 값이 양의 값이 되면 절연내력이 항상 인가전압보다 높게 되어 소전류 차단에 성공하는 경우이며, 음의 값이 되면 재점화가 일어나는 것으로 예측하게 된다.

표1에서 보듯이 경험식과 스트리머 이론식 모두 소전류 차단성능을 잘 예측하고 있으며, 경험식의 경우 V_c 가 345kV인 경우에 차단 성공으로 예측되었지만 시험에서는 재점화가 발생하였으며, 스트리머 이론식의 경우 V_c 가 347kV인 경우 차단실패로 예측이 되었지만 시험에서는 차단성공의 결과가 나왔다. 하지만 두 방법 모두 오차 범위 10% 내에서 소전류 차단 성능을 예측할 수 있음을 알 수 있다.

표2는 복합소호 방식 차단기에 대해서 시험 및 해석에 의한 소전류 차단성능을 비교한 것이며, 파퍼식 차단기의 경우와 마찬가지로 10% 이내의 오차범위에서 차단성능을 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다.

표 1 시험 및 해석에 의한 소전류 차단성능 비교 (파퍼식 차단기)

V_c [kV]	T_{arc} [ms]	시험 결과	F_{db} [%] (경험식)	F_{db} [%] (스트리머)
327	3.40	○	10.2	0.1
345	2.70	×	1.4	-7.7
371	3.14	×	-4.3	-11.6
347	3.29	○	3.1	-6.3
374	3.25	×	-4.4	-13.1

표 2 시험 및 해석에 의한 소전류 차단성능 비교 (복합소호 방식 차단기)

V_c [kV]	T_{arc} [ms]	시험 결과	F_{db} [%] (경험식)	F_{db} [%] (스트리머)
326	1.79	○	11.9	1.7
351	1.94	×	3.5	-5.1
334	1.92	○	8.5	-1.2

표 1과 2에서 보듯이 경험식과 스트리머 이론식의 결과가 모두 차단성공으로 예측되면 실제 시험에서도 차단에 성공하며, 두 방법 모두 차단 실패로 예측되면 차단 시험에서 실패하는 것을 알 수 있다. 따라서 차단기 설계 시에 두 방법을 모두 적용하여 차단성공으로 예측되는 차단부를 설계한다면 시험으로 차단성능을 확인하지 않고서도 적절한 소전류 차단성능을 가지는 차단부 설계가 가능하리라고 예상된다. 또한 스트리머 이론식에 의한 F_{db} 값이 경험식에 의한 값보다 작으므로 스트리머 이론식을 적용하여 차단부를 설계한다면 소전류 차단에 더 여유가 있게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 SF₆ 가스 차단기의 소전류 차단성능 예측을 위해서 FVFLIC법에 의해 냉가스 유동해석을 수행하고, 유한요소법에 의해 전계 세기를 구한 후, 경험식과 스트리머 이론식에 의한 절연내력 계산식을 적용하였으며, 파퍼식 및 복합소호 방식 차단기에 적용하여 소전류 차단성능 예측의 정확도를 검토하였다. 절연내력을 계산하는 두 방법 모두 10% 오차범위 내에서 소전류 차단성능을 예측할 수 있었으며, 두 방법 모두 차단 실패로 예측되면 실제 시험에서도 재점화가 발생한다는 점을 확인하였다. FVFLIC법은 상용 CFD 툴에 비해서 해석 시간이 매우 짧기 때문에 향후에 본 연구에 의한 절연내력 해석방법과 최적화 루틴을 결합한다면, 소전류 차단성능이 향상된 차단부 형상 설계가 가능하며, 또한 차단기 개발 시에 소요되는 개발 기간을 단축하고 시험 비용을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.A. Gentry, R.E. Martin and B. Daly, "An Eulerian differencing method for unsteady compressible flow problems", J. Computl. Phys., Vol. 1, pp. 87-118, 1966.
- [2] 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.
- [3] 김홍규, 신승록, 정현교, 김두성, 권기영, "Puffer식 차단기 내의 냉가스 유동 해석", 대한전기학회 논문지 Vol. 48B, No. 7, pp. 233-239, 2000년 4월.
- [4] 송기동, 이병윤, 박경엽, 박정후, "초고압 SF₆ 가스차단기의 소전류 차단성능 해석 기술 I", 대한전기학회 논문지 Vol. 50B, No. 7, pp. 331-337, 2001년 7월.
- [5] 송기동, 이병윤, 박경엽, 박정후, "초고압 SF₆ 가스차단기의 소전류 차단성능 해석 기술 II", 대한전기학회 논문지 Vol. 50B, No. 8, pp. 384-391, 2001년 8월.
- [6] J.Y. Trépanier, M. Reggio, and Y. Lauzé, "Analysis of the dielectric strength of an SF₆ circuit breaker", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, pp. 809-815, April, 1991.
- [7] 송기동, 정진교, 김홍규, "차단부 형태에 따른 소전류 차단성능 비교", 대한전기학회 논문지 Vol. 55B, No. 7, pp. 362-368, 2006년 7월.