

월드 유무에 따른 245kV GCB의 소전류차단성능 평가

송태헌, 이형구, 김연풍, 윤자홍
(주)현대중공업

Evaluation of Small Current Breaking Performance
for 245kV GCB with or without Shield

T. H. Song, H. G. Lee, Y. P. Kim, J. H. Yoon
Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

Abstract - 상용 CFD(Computational Fluid Dynamics) 프로그램인 PHOENICS를 이용하여 245kV SF₆ 가스 차단기의 진상소전류 차단성능을 평가하였다. 소전류 차단시에는 아크가 발생 즉시 소호되므로 SF₆ 가스를 전리가 일어나지 않은 냉가스로 취급할 수 있다. 그러므로 PHOENICS를 이용하여 극간의 SF₆ 가스밀도 및 전계의 변화를 계산하였으며 이것으로부터 극간 SF₆ 가스의 절연내력(Dielectric Strength)을 계산하였다. 계산된 SF₆ 가스의 절연내력과 아크 소호 후 극간에 인가되는 회복전압(Recovery Voltage)을 비교하여 차단기의 진상소전류 차단성능을 평가하였다. 245kV 차단기에는 전계를 완화하기 위한 목적으로 차단부에 월드가 설치되어 있으며 이 월드에 의한 소전류차단성능의 변화를 해석하였다.

1. 서 론

전력계통에 지락 등의 사고발생시 발생하는 크기가 매우 큰 단락사고전류를 차단하여 전력기기를 보호하고 전력계통의 건전성을 유지하는 역할을 하는 차단기는 유입 차단기(Oil Circuit Breaker), 기중차단기(Air-blast Circuit Breaker), 진공차단기(Vacuum Circuit Breaker)등을 거쳐 현재 초고압 송전선에서는 대부분 SF₆가스 퍼퍼형차단기(SF₆ Gas Puffer Type Circuit Breaker)가 사용되고 있다.

퍼퍼형 차단기는 퍼퍼실린더와 피스톤의 상대운동에 의해 고압으로 압축된 SF₆ 가스를 고속으로 분사하여 아크를 소호하고 SF₆ 가스의 냉각에 따른 절연력 회복을 통해 아크 소호 후에 극간에 인가되는 높은 과전압을 견디는 방식이므로 차단기의 차단 성능을 평가하기 위해서는 아크와 SF₆ 가스 유동에 대한 정확한 이해가 필요하다. 그러나 차단시에 발생하는 물리현상은 아크라는 방전현상과 초음속유동현상 등의 여러 가지 물리현상이 서로 밀접하게 상호작용을 하고 있어서 수많은 복잡한 물리적 현상을 이해하고 이것을 설계요소와 서로 연관짓기는 매우 힘들다. 이와 같은 이유로 현재까지 차단기 개발에는 경험과 시험을 통한 시행착오적인 방법으로 이루어져왔으며 이로 인해 막대한 개발비용 및 시간이 소요되었다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 선진업체에서는 차단시 발생하는 물리현상에 대한 이해를 높이고 설계요소가 바뀌었을 때 차단기의 성능이 어떻게 변화하는지를 예측/분석하여 설계에 도움을 주는 컴퓨터 시뮬레이션 개발의 필요성을 인식하여 80년대 이후로 이 분야에 집중적인 연구를 수행하여 현재는 상당한 수준에 도달한 것으로 파악되고 있다.

당사에서도 차단성능을 해석할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 기술 개발의 필요성을 인식하여 2001년부터 상용 CFD(Computational Fluid Dynamics) 프로그램인 PHOENICS를 적용하여 차단부에서 발생하는 아크를 해석하여 차단성능을 평가하는 컴퓨터 시뮬레이션을 개발하고 있다. 1차 연구 성과로써 소전류 차단성능 평가

기술을 개발하였으며 계속적인 연구를 통해 대전류 차단성능 평가 기술도 개발할 예정이다.

본 연구에서는 개발된 소전류 차단성능 평가기술을 245kV 차단기에 적용하여 소전류 차단성능을 평가하였으며, 특히 전계완화를 목적으로 설치되어 있는 월드가 소전류 차단성능에 미치는 영향에 대해서 알아보았다.

2. 본 론

2.1 소전류 차단성능 평가 기법

차단기의 소전류 차단책무는 부하에 따라 진상 소전류 차단(Capacitive Current Breaking)과 지상 소전류 차단(Inductive Current Breaking)으로 분류할 수 있다. 이중에서 퍼퍼형 차단기에서 문제가 되는 것은 진상 소전류 차단이다

퍼퍼형 차단기에서 진상 소전류 차단이 문제가 되는 이유는 대부분의 차단기는 대전류 차단에 초점을 맞추어서 설계가 되므로 진상 소전류와 같이 크기가 작은 소전류는 점점이 개리된 뒤 곧바로 차단할 수 있다. 이처럼 점점간에 충분한 거리를 확보하지 못한 상태에서 전원전압 최대치로 충전되어 있는 컨덴서의 충전전압과, 상용 주파수 전압파형으로 진행되는 전원측 전압이 중첩되어 반사이클 후에는 식 (1)로 표현되는 계통전압 최대치의 거의 2배에 해당하는 매우 높은 전압이 극간에 걸리게 된다.[1]

$$V_c(t) = V_m(1 - \cos\omega t) \quad (1)$$

여기서 V_m은 계통전압최고치[V]이며, ω는 각주파수로 ω = 2πf 이다.

이와 같이 점점간의 거리가 적을 때 전원전압의 2배에 상응하는 높은 전압이 극간에 인가되므로 재점화가 일어날 가능성이 매우 높게 된다. 따라서 차단기의 진상 소전류 차단성능은 극간의 절연회복 능력과 밀접한 관계가 있고 이로써 소전류 차단성능을 절연이라는 관점에서 다를 수 있다.

진상 소전류는 전류가 작기 때문에 점점이 떨어진 직후에 아크가 소호되므로 SF₆ 가스는 아크에 의해 열적으로 분해되지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 SF₆ 가스는 상온 상태라고 할 수 있다. 그와 같은 경우에, 절연 파괴전압은 국부적인 가스 압력 P, 전계 E₀ 그리고 절연파괴강도 E_d에 의해 계산되어 질 수 있다.[2] 이와 같은 개념을 적용하기 위해서는 국부적인 가스 압력을 알아야 하나 유동이 있을 때의 차단기 내의 압력은 유동의 속도 때문에 위치에 따라 크게 변한다. 따라서 점점의 모든 부분에서의 가스 압력의 변화를 실험적으로 측정하는 것은 불가능하므로 유동 현상은 컴퓨터로 해석을 하여야 한다.

차단부내의 냉가스 유동해석은 상용 CFD(Computational Fluid Dynamics) 프로그램인 PHOENICS를 이용하였다. PHOENICS는 해석하고자 하

는 문제에 따라서 사용자가 지배 방정식에 직접 접근하여 필요한 항을 첨가 또는 삭제할 수 있으며, 점점의 이동을 모의할 수 있는 등의 특징으로 차단부 아크해석에는 가장 적절한 상용 프로그램으로 판단되어 적용하게 되었다.[3]

냉가스 유동해석에 적용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\cdot \text{연속방정식} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\cdot \text{운동량보존방정식} \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u} - \mu \nabla \vec{u}) = -\nabla P \quad (3)$$

$$\cdot \text{상태방정식} \quad P = \rho RT \quad (4)$$

여기서 ρ 는 밀도, P 는 압력, t 는 시간, \vec{u} 는 속도벡터, R 은 기체상수, T 는 온도이다.

절연 파괴 강도 E_f 는 기체 압력 P 의 함수로써 다음과 같이 주어진다.

$$E_f = AP^n \quad (5)$$

여기서 A 는 상수이고, n 은 전계 불평등에 따라 정해지는 상수이다. 점점사이의 절연파괴전압 V_{BD} 는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$V_{BD} = 100 E_f / E_0 = 100 AP^n / E_0 \quad (6)$$

여기서 E_0 는 점점간의 전압차가 100[V] 일 때의 전계값이다. 식 (6)에서 SF_6 가스에 대한 압력과 밀도의 관계식으로부터 압력 P 대신에 밀도 ρ 를 사용하여 최종적으로 다음과 같은 절연파괴전압식을 얻게 된다.

$$V_{BD} = a \rho^b / E_0 \quad (7)$$

여기서 a, b 는 실험상수이다.

전계계산은 고정아킹점점과 가동아킹점점에 경제조건으로 전압을 인가하고 다음의 식을 풀어서 구하였다.

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = 0 \quad (8)$$

$$E = -\nabla \phi \quad (9)$$

전계 계산시에 사용된 경제조건은 다음과 같다.

- 인가전압: 고정아킹점점 - 100[V]
가동아킹점점 - 0[V]
- 비유전율: 노즐 - 2.1
SF₆ - 1.0

2.2 쉴드가 없는 245kV GCB 해석결과

2.2.1 해석모델

그림 1은 245kV GCB 해석모델이다. 실제 차단기에서는 그림 1의 붉은 부분은 고정되어 있고 나머지 부분이 움직이지만, 본 해석에서는 이동 모의의 편의를 위해 붉은 부분이 움직이는 것으로 모의하였다. 또한 연두색 부분은 노즐 부위로서 전계 해석 시 비유전율(ϵ_r) 2.1이 입력되고, 도체 부분의 도전율은 무한대를 모의하기 위해서 10⁹을 입력하였다. 나머지 부분은 SF₆ 가스로서 비유전율 1을 입력하였다.

또한 본 해석에서 사각격자계(Structured Grid)를 적용하였다.



그림 1. 해석모델

2.2.2 차단성능해석결과

고정아킹점점 선단부는 전계강도가 가장 크며, 또한 이 부위에서 충격파가 발생하여 SF₆ 가스의 밀도가 급격하게 저하되기 때문에 소전류 차단시 재점화가 발생될 가능성이 가장 높은 부위이다. 따라서 그림 2에 나와 있는 것처럼 고정아킹점점 선단부 9곳에서 밀도와 전계를 계산하여 소전류 차단성능을 평가하였다.

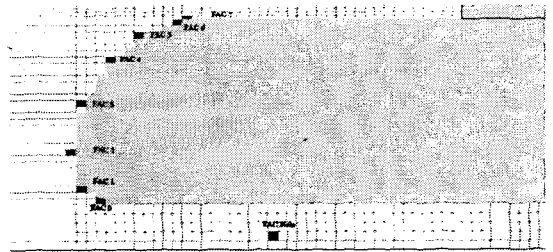


그림 2. 고정아킹점점 선단부 측정 위치

그림 3에는 차단성능을 평가한 그래프가 나와 있다. 차단후 극간에 인가되는 회복전압(TRV)보다 SF₆가스의 절연회복이 더 높은 것으로 나와 있다. 이것으로부터 이 모델은 소전류 차단에 성공하는 것으로 판단할 수 있다. 그림 내부에서 두 개의 수직선은 소전류 차단성능 평가 시 차단 성공의 확률이 낮아지는 부분을 표시한 것이다. 이 모델에서는 약 15.7 [ms] ~ 17.4 [ms] 사이에서 FAC7 부분의 절연 내력이 가장 약한 것으로 나타났다. 그 원인은 그림 4에서도 알 수 있듯이 이 시기에 FAC7의 압력(밀도)이 급격히 떨어지기 때문이라고 생각된다.

가장 위험한 시기는 약 17.2 [ms]로서, TRV는 약 519.1 [V/m]이고 FAC7 부분의 절연내력은 약 545.16 [V/m]로 약 5%의 여유율을 가지고 있다.

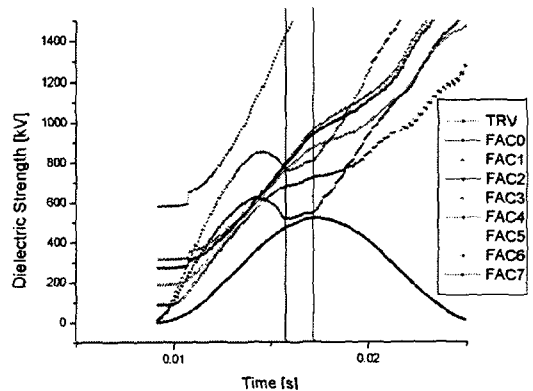


그림 3. 차단 성능 평가

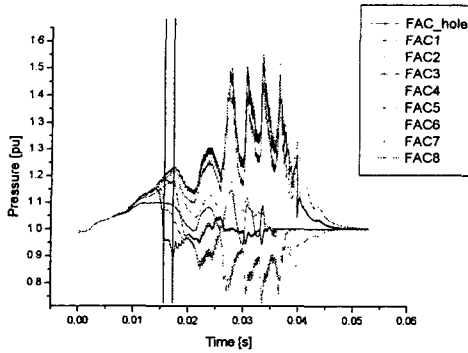


그림 4. 고정아킹접점 선단부에서의 압력 변화

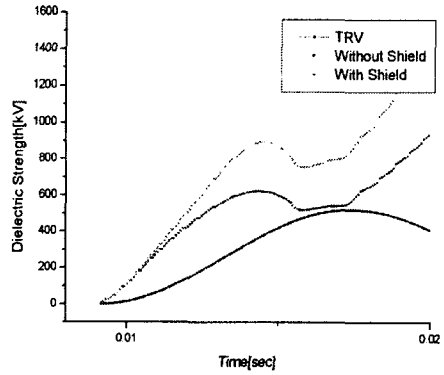


그림 7. FAC7에서의 절연회복력 비교

2.3 쉴드를 설치한 245kV GCB 해석결과모델

2.3.1 해석모델

앞의 모델이 설계여유가 매우 작으므로 소전류 차단성능을 개선할 필요성이 있다. 소전류 차단성능을 개선하는 방법으로 첫 번째로는 노즐 및 접점형상의 변경을 통해 밀도를 증가시키는 방법과 두 번째로는 전계를 저감시키는 방법이 있다. 접점 및 노즐의 형상 변경없이 소전류 차단성능을 개선시키기 위해서 차단부에 쉴드를 설치하여 전계를 저감시키기로 하였다. 쉴드의 설치 위치는 그림 5에 나와 있다.

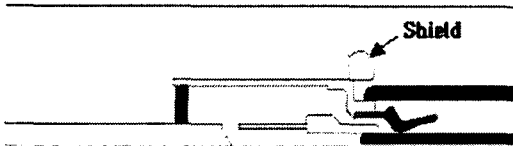


그림 5. 쉴드가 있는 차단부 해석 모델

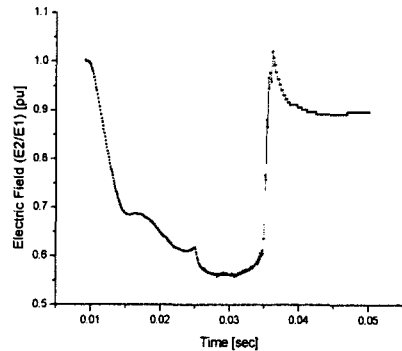


그림 8. 전계 비교

2.2.2 차단성능해석결과

그림 6에는 쉴드를 설치한 모델의 소전류 차단성능이 나와 있다. 그림 3과 비교해 보면 차단성능이 향상된 것을 알 수 있다. 그림 7은 절연내력이 가장 약한 FAC7에서의 절연회복력을 비교한 것으로써 이전 모델에 비해 절연회복력이 약 58% 향상되었다. 이와 같이 절연회복력이 향상된 이유는 접점과 노즐의 형상 변경이 없으므로 밀도는 이전 모델과 같으나 쉴드 설치에 의해 접점부위에서의 전계가 저감되었기 때문이다. 그림 8은 쉴드가 있는 모델 전계(E2)와 이전 모델 전계(E1)를 비교한 것이다. 절연회복력이 약한 약 15.7 [ms] ~ 17.4 [ms] 사이에 전계가 크게 저감된 것을 알 수 있다.

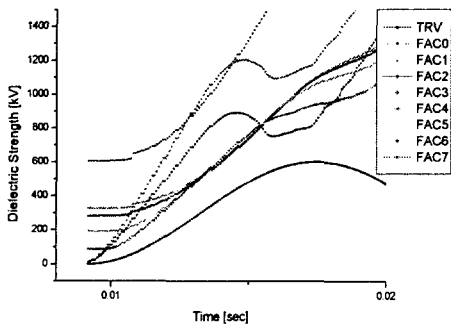


그림 6. 쉴드를 설치한 모델의 소전류 차단성능

3. 결 론

- (1) 상용 CFD 프로그램인 PHOENICS를 이용하여 소전류 차단성능 평가기술을 개발하였다. 이것은 유동해석과 전계해석을 통해 SF₆ 가스의 절연파괴전압을 구하고 극간에 인가되는 회복전압과의 비교를 통해서 차단성능을 평가한다.
- (2) 개발된 기술을 245kV 차단부에 적용하여 소전류 차단성능을 평가하였으며, 쉴드 설치를 통해 전계를 저감시켜 소전류 차단성능을 향상시켰다.
- (3) 본 기술의 계속적인 연구개발을 통해 향후 대전류 차단성능 평가 기술도 개발할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] "Power Circuit Breaker Theory and Design", Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1975.
 [2] F.Endo, M.Sato, M.Tsukushi, Y.Toshioka, K.Saito, K.Hirasawa, "Analytic Prediction of Transient Breakdown Characteristics of SF₆ Gas Circuit Breakers", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, p.1731-1737, 1989.
 [3] J.D.Yan, M.T.C.Fang, W.Hall, "The Development of PC Based CAD Tools for Auto-Expansion Circuit Breakers Design", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 1, January, 1999