

3차원 유한요소법에 의한 진공 인터럽터의 전기해석

최승길*, 심재학, 강형부
한양대학교 전기공학과

An Electric Field analysis of a Vacuum Interrupter by 3 Dimensional Finite Element Method

Seung-Kil Choi, Jae-Hak Shim, Hyung-Boo Kang
Dept. Electrical Eng., Hanyang Univ.

Abstract - This paper describes the application of two and three dimensional electric field analysis for vacuum interrupter with spiral contacts. The electric potentials of floating arc shield and electric fields in a vacuum interrupter are analysed at various gap distances from 1mm to 12mm. The electric potentials of floating shield is increased with the gap distance, which is because the relative position of shield is closer to the fixed contact so that the capacitance distribution inside interrupter is varied. The calculated results show that the maximum value of electric field in a vacuum interrupter with floating shield is nearly same to that without shield at short gap distance below 5mm, however at longer gaps more intensive electric field is achieved in interrupter with shield comparing with the model without shield, which is due to the influence of charged floating shield.

1. 서 론

진공차단기는 우수한 절연 및 소호 특성을 갖는 진공을 매질로 사용한 대전력용 보호기기로서 1980년대 국내 교류계통에 적용되기 시작하여 약 20년동안 고신뢰성, 보수점검의 용이, 소형 및 경량등 많은 이점이 입증되어 현재 국내 배전전압급의 개폐장치에 대부분 적용되고 있다. 최근에는 전력계통 부하의 급증으로 인한 차단용량 증가 및 핵융합로의 전원설비에의 적용등의 필요성이 대두되어 소형, 고전압화를 위한 진공 절연의 연구, 차단전류의 증대를 위한 아크 차단현상의 연구[1,2], 대전류 차단 방식 및 병렬차단방식에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 자체의 특이한 전극 형상으로 전류 경로를 변화시킴으로써 발생시킨 아크 구동력에 의해 사고 전류 차단시에 발생하는 열적 아크 에너지를 분산 및 억제함으로써 차단용량을 증대시키기 위해 축 또는 반경방향 자계(axial or radial magnetic field)를 발생시키기 위한 특이 전극 구조 및 형상에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[3,4]

일반적으로 진공 인터럽터의 내부에는 전류차단시 발생하는 금속 증기 증착에 의한 절연용기 내벽 연면의 절연 성능 저하를 방지하기 위해 금속 재질의 부유 차폐판(floating shield)이 설치되어 있으며[5], 이 차폐판은 전원 전압이 인가되면 등전위면을 형성하여 진공 인터럽터의 전계를 집중, 왜곡시킨다. 이와 같은 복잡한 전극 구조와 부유 도체의 영향 때문에 진공 인터럽터의 절연 성능을 검토하기 위해 해석적인 방법으로 전위 분포 및 전계를 해석하는 것은 용이하지 않다.

이에 본 연구에서는 우선 2차원 유한요소법(finite

element method)에 의한 해석을 기초로 하여 외부 전위가 인가 되지 않는 제 3의 전극, 즉 부유 차폐판이 인터럽터의 절연 성능에 미치는 영향을 규명하고, 3차원 해석을 도입하여 스파이럴(spiral) 형상의 집접 구조를 구현하여 전위 및 전계를 해석함으로써 진공 인터럽터의 절연에 대한 기본적인 해석 방법을 제시, 검토하였다.

2. 유한요소해석을 위한 정식화

3.1 지배방정식 유도 및 정식화

진공 인터럽터의 전위 분포 및 전계를 해석하기 위한 지배 방정식은 식(1)~식(3)의 Maxwell 방정식 및 보조 방정식으로부터 유도된다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (2)$$

$$D = \epsilon E \quad (3)$$

여기서, E 는 전기장의 세기, B 는 자속밀도, D 는 전속밀도, ρ 는 전하밀도이며 ϵ 은 유전율이다.

정전계의 경우는 자체가 시간에 따라 변화하지 않으므로 식(1)은

$$\nabla \times E = 0 \quad (4)$$

이 되어 전계는 보존장이 됨을 알 수 있다.

위 식(4)에 전계와 스칼라 포텐셜(scalar potential)과의 관계식 $E = -\nabla\phi$ 및 식(3)을 도입하면, Poisson 방정식의 형태인 식(5)와 같은 정전계 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla \phi = -\rho \quad (5)$$

1차 시험함수를 사용하여 Galerkin법으로 식(6)과 같은 계 방정식을 구성할 수 있다.

$$[K]\{\phi\} + \{F\} = \{0\} \quad (6)$$

여기서 $[K]$ 는 계수행렬이며, $\{F\}$ 는 구동행렬이다. 식(6)에 대해 주어진 경계조건에서 해를 구하면 전위 ϕ 가 얻어지며, 전기장의 세기는 아래의 식(7)과 식(8)에 의해서 구할 수 있다.

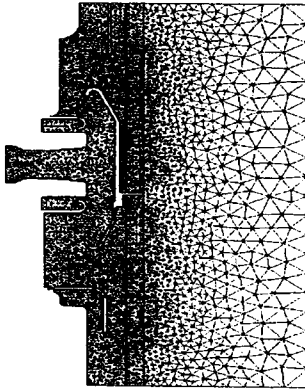


그림 1. 유한요소분할도(요소수: 9697 개)
Fig. 1. Finite elements discretization

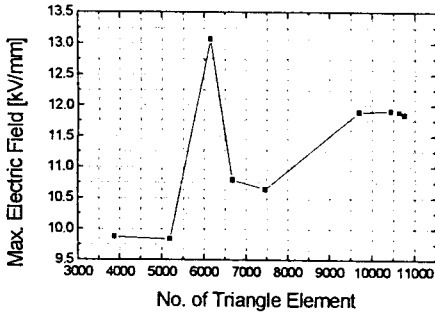


그림 2. 요소수에 대한 최대 전계
Fig. 2. Max. electric field versus No. of finite elements

$$E_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (7)$$

$$E_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (8)$$

3.2 경계조건

전계의 지배방정식의 해를 구하기 위한 해석 영역의 경계조건은 일반적으로 식(9) 및 식(10)과 같이 주어진다.

$$\phi = \phi_i \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

여기서 ϕ_i 는 전원 또는 접지 전위를 갖는 기지의 값이며, 식 (10)은 자연 경계 조건을 나타낸다.

도체계가 형성되어 있을 때 접지되어 있지 않거나 전원과 연결되어 있지 않은 도체는 등전위(equipotential)이

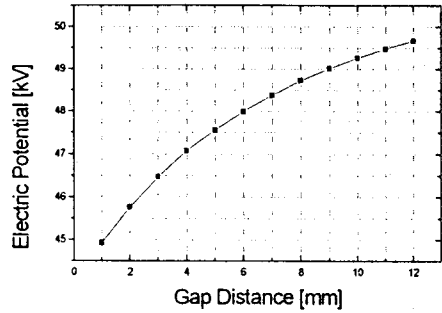


그림 3. 점점 간극에 대한 부유차폐판의 전위
Fig. 3. Electric potential of floating arc shield versus Gap distance

기는 하지만 그 값이 주어지지 않는다. 즉 진공 인터럽터의 부유 차폐판과 같이 동일한 전위값을 갖지만 어떤 값인지를 알 수 없는 경우에는 아래와 같은 등전위 경계 조건을 적용하여 계 방정식의 해를 구하여야 한다.[6]

$$\phi_f = \phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \dots = \phi_k \quad (11)$$

여기서 ϕ_f 는 부유 차폐판의 전위로 미지값이며, $\phi_1 \sim \phi_k$ 는 부유차폐판에 위치한 유한요소 절점의 전위값이다. 부유 도체에 위치한 미지 절점은 k 개 존재하지만 동일한 전위값을 가지므로 미지의 값은 하나만 존재하게 된다. 따라서 계 방정식의 해를 구할 때 부유 도체에 대해서는 k 개의 방정식을 유도하는 대신 한 개의 식만을 적용시켜 주면 된다.

3. 시뮬레이션 및 고찰

3.1 유한요소 분할

본 인터럽터 해석에 대한 적정 요소수를 추정하기 위해 부유 차폐판 구조를 가진 진공 인터럽터의 점점 간극이 12mm이고, 고정측 도체에 정격 뇌충격 전압(rated lightning impulse voltage)의 파고치 95kV, 가동측 도체에 접지 전위를 인가하여 절연 성능을 결정짓는 최대 전계값의 변화추이를 검토하였다.

그림에서 보듯이 본 해석 모델의 2차원 해석의 경우 요소수가 9000 여개 이하일 경우 진공 인터럽터 내부의 최대 전계값은 상당히 큰 차이가 나타나는 양상을 보이는데 반해, 그 이상의 요소수에 대해서는 최대 전계값이 포화되어 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 유한 요소 해석 기법 자체가 가지는 원리 특성상 해의 정밀도가 요소의 크기에 의존하기 때문이다.

따라서 본 해석에서는 이와 같은 분석 결과를 토대로 진공 인터럽터의 전위 및 전계에 대한 모든 해석에 대해 요소수 11,000개 이상으로 요소분할하여 해석함으로써 해석 오차를 줄이고자 하였다.

3.2 부유차폐판의 전위에 대한 시뮬레이션

그림 3에 진공인터럽터의 고정접점에 95kV를 인가하고 가동접점을 접지전위로 하여, 점점 간극을 1mm에서

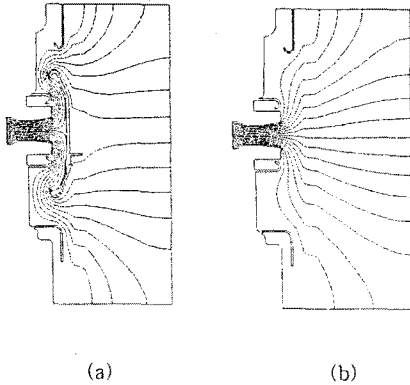


그림 4. 접점 간극이 11mm일 때의 전위분포
Fig. 4 Potential distribution at 11mm gap

12mm까지 변화시켰을 때 부유 차폐판에 유기되는 전위를 나타내었다.

진공인터럽터의 차폐판의 전위는 접점간극이 길어질수록 증가하는 양상을 보인다. 이는 진공 인터럽터의 구조상 차폐판이 절연용기에 고정되어 있어 접점 간극이 증가하게 되면 차폐판의 위치가 고전압측인 고정접점에 상대적으로 가까워지게 되어 정전용량 변화에 따른 분압 특성이 변화하기 때문으로 생각되며, 부유차폐판이 진공 인터럽터의 전계에 큰 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다.

3.3 차폐판이 전계에 미치는 영향에 대한 시뮬레이션

그림 4는 진공 인터럽터의 접점 간극이 11mm인 경우에 있어서 부유 차폐판이 있을 경우 (a)와 없을 경우 (b)의 전위 분포를 나타낸 것으로, 부유 차폐판이 없을 경우에는 주접점 간극 사이의 등전위 분포(equipotential distribution)가 밀하게 되어 이 영역에서 전계 집중(electric field concentration)이 이루어지는데 반해, 부유 차폐판이 있을 경우에는 주접점 간극의에도 부유 차폐판과 전원 인가측 및 부유 차폐판과 접지 전극측에도 상당히 조밀한 전위분포가 형성되어 상당한 전계집중이 형성됨을 알 수 있다.

그림 5는 접점 간극 변화에 대한 차폐판이 있는 경우와 없는 경우 진공 인터럽터 내부의 최대 전계값을 비교한 것이다.

그림에서 보듯이 진공 인터럽터의 접점 간극이 5mm 이하로 짧을 경우 최대 전계는 차폐판의 유무에 무관하게 거의 동일한 값을 보이는 반면, 그 이상의 간극에서는 차폐판이 있을 경우의 최대전계값이 없을 경우에 비해 최대 20[%] 이상의 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이와 같은 양상을 보이는 이유는 접점 간극이 짧을 경우에는 최대전계는 인터럽터의 주접점 사이에 분포하기 때문에 차폐판에 의한 전계 왜곡의 영향이 미미하기 때문이며, 접점 간극이 클 경우에는 차폐판의 전위 상승에 의한 전계 왜곡의 정도가 심화되기 때문인 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 도입하여 부유 전극(floating electrode)이 포함된 계에서의 전위 분포 및 전

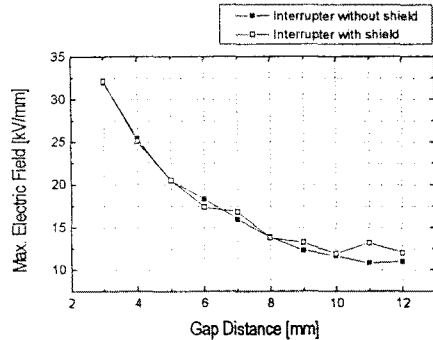


그림 5. 접점 간극에 대한 최대 전계
Fig. 5 Max. electric field versus Gap distance

계를 해석하기 위한 기본 방법의 검토 및 적용을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 진공 인터럽터가 개극상태일 때 부유 상태에 있는 아크 차폐판에는 인가 전압의 약 50[%] 정도의 높은 전위가 유기된다.
- (2) 접점 간극을 변화시키면서 최대 전계를 해석하였을 때 부유 차폐판이 있는 경우가 없는 경우보다 최대 20%이상의 큰 최대 전계값을 가져 부유 차폐판이 인터럽터의 절연 성능을 저하시키는 요인으로 작용함을 알 수 있다.

본 연구는 한국전력공사의 연구비 지원에 의해 기초전력공동연구소 주관으로 수행된 과제결과의 일부임.(관리번호 : 98-075)

참 고 문 헌

- [1] M. Binnendijk, et al, "High-current interruption in vacuum circuit breakers" *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 4, pp. 836-840, 1997
- [2] K. Yokokura, et al, "Capacitor switching capability of vacuum interrupter with CuW contact material," *IEEE Trans. Power Deverly*, vol. 10, pp. 804-810, 1995
- [3] Kenji Watanabe, et al, "Technical progress of axial magnetic field vacuum interrupters", *IEEE Trans. Plasma Science*, vol. 25, pp. 609-616, 1997
- [4] K. Nitta, et al, "Three-dimensional magnetic field analysis of electrodes for VCBs" *IEEE Trans. Power Deverly*, vol. 12, pp. 1520-1525, 1997
- [5] H. Okumura, E. Kaneko, "Recently developed vacuum interrupter construction and performance improvement" *Toshiba Review*, no. 141, pp. 5-10, 1982
- [6] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1986