

아크 발생에 의한 축자계형 진공인터럽터의 전자계 현상 시뮬레이션

서 상현, 하 성철
동국대학교

Simulation of electromagnetic Phenomena in Vacuum interrupter with axial magnetic field type by Arc

Sang Hyun Seo, Sung Chul Ha
Dongguk Univ.

Abstract

In this paper, we performed analysis of electric field, magnetic field, current density in AMF electrode using the Maxwell 3D simulation. The current distribution and magnetic field in simple models are analyzed to verify its efficiency and accuracy. In the vicinity of the slits of axial magnetic field type electrode a comparatively high axial magnetic flux density exists. In addition the validity of FEM is confirmed by performing the analyses of distribution in current density and magnetic flux density.

Key words : VI(진공인터럽터), VCB(진공차단기), RMF(횡자계 방식), AMF(축자계 방식), 유한요소법(FEM)

1. 서 론

진공차단기는 차단능력과 안전성 및 신뢰성이 우수하여 많은 산업기에 사용이 되고 있다. 진공차단기의 가장 핵심적인 부분은 바로 VI(진공인터럽터)로서 많은 연구가 국내 기업체에서도 이루어지고 있는 실정이다. 특히 VI의 핵심 기술인 전극절계기술과 접점분석에 대한 기술력의 확보는 필수적이라고 할 수 있다. VI는 아크를 소호하는 방식에 따라서 RMF(횡자계 방식)와 AMF(축자계 방식)으로 분류할 수 있는데, 축자계 방식은 전류차단시의 발생하는 아크에너지를 접점표면으로 넓고 균등하게 분포시켜 소호하여 전극의 용융을 방지하는 방식으로 횡자계 방식에 비해 차단능력이 우수하여 40kA 이상의 대전류 차단용으로 사용이 되고 있다. 하지만 축자계 방식은 전극구조가 복잡하여 열이 많이 발생한다는 단점이 있다. 그래서 열역학적인 분야의 연구 또한 상당히 필요한 실정이다. 따라서 외국 제품과 같은 성능의 VI를 개발하기 위해서는 더욱 더 많은 연구와 실험 및 지원이

필요하다. 본 연구에서는 이 축자계형 VI의 전자계해석을 맥스웰 3D시뮬레이션으로 분석하려고 한다.

2. 시뮬레이션 및 전자충돌단면적

1961년 GE사가 15kV, 차단전류 12kA 차단기를 제품화 하는 것에 성공하였다. 그 후 차단용량을 증대시키는 연구를 하여 20kA를 차단할 수 있게 되었지만 아무리 전극 지름을 크게 하여도 63~100kA를 차단하는 것은 어려운 점이 발생하여 새롭게 축자계형태의 방법이 고안되었다. 즉 접점과 같은 방향으로 자계를 가하면 아크 에너지가 외부 방향으로 확산됨을 방지하여 아크 에너지와 아크 전압이 낮아지게 하는 방식이 도입되었다. VI에서 핵심이 되는 전극부분의 구성은 접점, 주전극, 코일전극, 그리고 로드로 구성되었고 그림에서 전류가 코일전극을 따라 돌면서 축방향 자계가 생성되어 아크 에너지를 효과적으로 제어하는 것을 알 수 있다.

맥스웰 3D 전자계 해석의 기초가 되는 맥스웰 방정식의 기본 식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

또한 $\vec{D} = \epsilon_r \vec{E}$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$, $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ 은 맥스웰 방정식에 포함되어 있는 양들을 연관지어 주는 보조 식들이다.

맥스웰 방정식으로부터 전계해석은 식(2.3)을 이용하여 맥스웰 3D시뮬레이션에서 계산하였다. 여기서, D는 전속밀도이며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.5)$$

식(2.5)을 식 (2.3)에 대입하면 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}) = \rho \quad (2.6)$$

여기서 $\vec{E} = -\nabla \psi$ 를 식 (2.6)에 대입하면 식 (2.7)과 같이 된다.

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla \psi) = -\rho \quad (2.7)$$

여기서 ψ 는 전기스칼라포텐셜[V]이고 ϵ_r 은 비유전율, ϵ_0 은 진공중의 유전율[F/m], μ 는 투자율[H/m], σ 는 도전율[s/m]이다.

전자계해석에서는 자기벡터포텐셜 \vec{A} 를 도입한다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.8)$$

전자계문제에서는, 식(2.7)의 $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ 를 제외한 다음 식을 취한다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.9)$$

또한 $\vec{B} = \mu \vec{H}$ 이므로 이 식에다 식 (2.8)을 대입하면 $\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}$ 가 된다. 즉 전자계의 기초 방정식은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (2.10)$$

시간에 따른 변위전류를 계산하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) &= \vec{J}_0 + \vec{J}_e \\ &= \vec{J}_0 - \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \psi \right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\vec{J}_e = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \psi \right) \quad (2.12)$$

여기서 \vec{J}_0 는 강제전류밀도[A/m²], \vec{J}_e 는 와전류밀도[A/m²]이다.

3. 전자계해석 시뮬레이션 방법

진공인터럽터의 차단성능에 결정적인 영향을 미치는 대전류 아크모드를 효과적으로 제어할 수 있는 유일한 방법은 축자계를 이용하는 것이다. 진공아크에 평행한 자계를 인가하는 축자계 방식은 아크전압을 감소시켜 양극으로 입력되는 아크에너지를 최소화시킨 방법으로 보통 30V 전, 후의 적은 전압이다. 본 연구에서 시뮬레이션 한 모델은 정격전압 12kV이고 접점은 직경이 80mm, 전극은 100mm, 두께는 4mm이고 전극간 갭은 10mm로 설정하였다. 입력전류는 60Hz, 50kA로 하였다.

다음 표 1은 각 전극부의 재질과 도전율을 나타낸 것으로 전극부와 접점은 CuCr(Cr25%)로 구성되었고 아크는 도전율이 균일한 원통으로 가정하여 해석하였다. 아크주의 재질은 도전율이 상당히 적은 값인 2.8E3[s/m]로 설정하였는데 이는 일반적으로 진공아크를 구성하고 있는 플라즈마의 도전율이 전극봉 및 접점의 도전율에 비해 매우 낮기 때문에 실제 해석결과에 미치는 영향은 적다고 할 수 있다.

표 1. 전극 구성 성분

전극부	재질	도전율(s/m)	투자율
전극부, 접점	CuCr(Cr25%)	2.2E7	1
아크부	Arc Plasma	2.8E3	1

4. 시뮬레이션 결과

그림 1은 하부접점만을 평면도상으로 본 것으로 접점이 접촉하는 부분에 많은 전계가 집중되었고 그 값은 $1.3E6$ [v/m]이었다. 중앙의 홀 부분에는 이보다 적은 값인 $1E6$ [v/m]정도의 전계가 나타났다. 와전류 감소를 위해 생성한 슬릿부의 전계는 $6E5$ [v/m]으로 접점의 접촉면보다 전계가 적게 나타나는 현상이 있음을 확인 하였다.

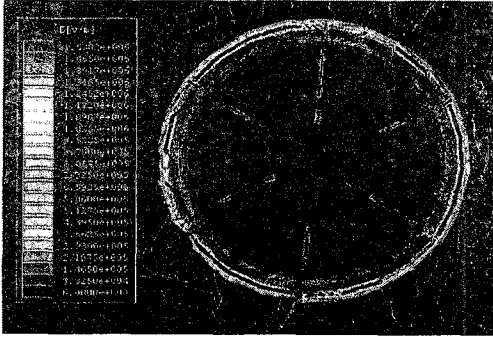


그림 1. 평면에서 본 공간부에서의 전계해석
Fig 1 Analysis of electric field at space in plane side

축자계형 전극에 대전류가 인가되면 접점 내에 와전류가 생긴다. 이는 축자계의 자속밀도를 감소시키고 잔류자계를 생성시킨다. 때문에 접점의 두께와 슬릿 설계가 상당히 중요하다.

접점의 두께를 크게 하면 보통은 차단능력이 커진다고 생각하겠지만 오히려 표피두께의 증가로 축자계를 약화시켜 아크 확산을 막지 못하여 접점의 용융으로 차단실패에 이른다.^[5,6]

그림 2는 자계의 세기를 벡터도를 이용해서 나타낸 것으로 로드부쪽은 횡자계가 나타났지만 코일 전극을 통해서 주전극, 그리고 접점 쪽으로 축자계가 나타났다. 특히 상부접점과 하부접점사이의 축자계가 생성이 됨을 확인함으로써 본 전극이 강한 축자계를 형성하여 아크 플라즈마를 전극 표면에 고르게 퍼지게 하여 소호 시킨다는 예상을 할 수 있다. 하지만 접점 중앙 쪽으로는 강한 축자계가 생성이 되었지만 접점의 외부로 가면 횡자계도 조금 나타났는데 이는 복잡한 전류경로에 의해 전류의 방향이 수직인 부분이 있기 때문이다. 즉 전류분포의 영향으로 횡자계도 조금은 생성이 된다.

아크가 발생하면 그 반경이 상당히 크게 발생되는데 축자계에 의해 더 이상 아크가 국부적인 집중이 되지 않고 아크 에너지가 소호 되는 형태이다. 횡자계는 아크가 옆쪽으로 힘을 받아 아크에너지의 집중화가 되어 전극이 쉽게 용융된다.

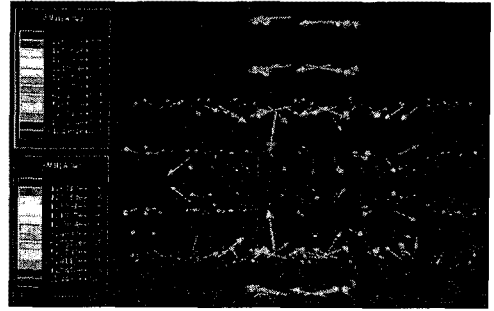


그림 2. 자계 벡터도
Fig. 2. Vector of magnetic field

그림 3은 접점의 하부 쪽에서 자속밀도 분포를 본 것으로 전류의 통과 경로인 접촉부 쪽으로 큰 자계가 생성이 되어 있다. 이 값은 접점의 표면 쪽으로 올라오면 감소한다. 축자계가 형성되는 코일 전극의 접촉부의 자속밀도는 0.6 [T]의 자계가 형성되지만 주전극과 접점으로 오면 그 값이 0.2 [T]로 떨어진다. 축자계는 접점의 중앙부와 전극의 바깥부분쪽에서는 적은 값을 나타내고 있는데 아크가 중앙부분과 접점의 바깥라인부분에서 발생하지 않도록 설계를 해야 할 것이다.

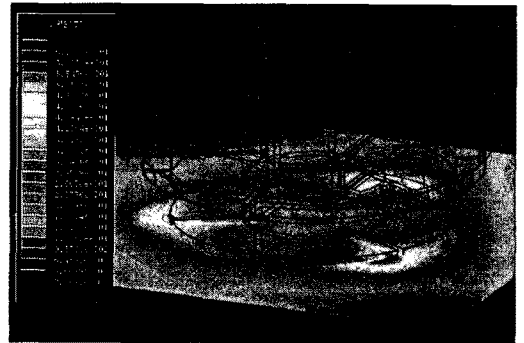


그림 3. 수평면으로 자른 자속밀도
Fig. 3. Magnetic flux density in cut of horizontal plane

그림 4는 상부전극부분을 평면으로 자른 다음 전극과 접점 연결부를 시작으로 전극 끝까지의 자속밀도를 2차원으로 나타낸 그래프이다. 전극연결부분의 자속밀도값은 약 0.55[T]정도이고 전극 중심부분의 자속밀도값은 0.18[T]로 나타났다. 접점의 크기는 80mm이므로 접점의 접촉면 부근은 대체로 강한 축자계가 형성되고 전극의 중심과 전극의 바깥부분쪽은 자속밀도가 낮다. 주전극부분에서 나타난 축자계의 값은 0.1[T]에서부터 0.55[T]의 값으로 나타났다.

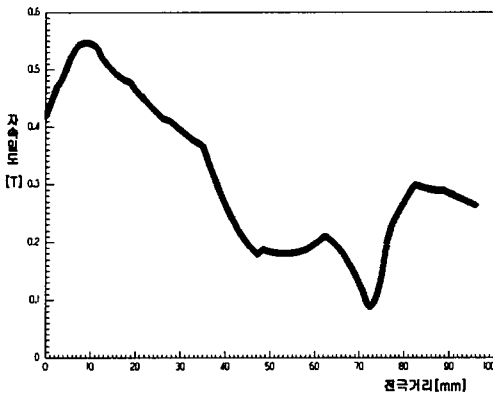


그림 4. 전극에서의 자속밀도
Fig 4. Magnetic density of electrode

5. 결 론

정격전압 12kV, 입력전류는 50kA이며 접점의 지름이 80mm, 전극 100mm, 두께는 4mm, 접점간 갭은 10mm인 축자계형 접점을 맥스웰 3D 전자계 시뮬레이션을 통해서 전계, 자계, 전류밀도를 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전계분포는 접점 접촉부에서는 균등하게 나타났지만 와전류 감소를 위해 생성한 슬릿 주위의 전계는 6E5[v/m]로 접점의 접촉면보다 적게 나타났다.
2. 상부접점과 하부접점사이의 축자계가 생성이 됨을 확인함으로써 본 전극이 강한 축자계를 형성하여 아크 플라즈마를 전극 표면에 고르게 퍼지게 하여 소호시킨다고 예상된다.

3. 전극의 연결부분과 접점의 접촉면 부근은 대체로 강한 축자계가 형성되었지만 전극의 중심부분쪽은 자속밀도가 낮으므로 전극설계시 전극중심에서 아크가 발생하지 않게 하여야 한다.

참고문헌

- [1] Kenji Watanabe, Eiji Kaneko, and Satoru Yanabu, Fellow, IEEE, "Technological Progress of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters", IEEE Trans. on Plasma Science, vol.25 No.4, pp609~616, August 1997.
- [2] S. Yanabu, E. Kaneko, H. Koike, T. Tsutsumi, T. Tamagawa, "The Application of Axial Magnetic Field Electrodes to Vacuum Circuit Breakers", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 5, May 1983.
- [3] S. Ito, Y. Takato, Y. Kawase and T. Ota, "Numerical Analysis of Electromagnetic Forces in Low Voltage AC Circuit Breakers using 3-D Finite Element Method Taking into Account Eddy Currents," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 5, 2597~2600, 1998.
- [4] 임달호, "電氣系의 有限要素法", 東明社.
- [5] E. Dullni, B. Gellert and E. Schade, "Measurement of Particle and Vapor Density after High-current Vacuum Arcs by Laser Techniques," IEEE Trans. Plasma Science, Vol. PS-15, 545, 1987.
- [6] 하덕용, 강형부, "3 차원 유한요소해석을 이용한 종자계형 진공 인터럽터의 특성고찰" 전기전자재료학회논문지, 15권, 5호, 460~452, 2002.