

진공차단부 자계해석 및 전자력 계산

김익모, 김진수, 최명준
현대중공업(주) 기전연구소

Magnetic Field Analysis and Magnetic Force Calculation of Vacuum Interrupter

I. M Kim, J. S Kim, and M. J Choi
Hyundai Electro-Mechanical Research Institute

Abstract - Recently, the vacuum interrupters have been most widely used in medium voltage level. In the vacuum circuit breaker, the most influential part is vacuum interrupter. By performing the precise electromagnetic analysis of the interrupter, we increase the capability of large current interruption. In this paper, diffuse arc and constricted arc are modeled to perform 3D electromagnetic analysis, and also flux distributions and electromagnetic force is calculated at the contacts' separation. It is expected these results will be used importantly in developing the new vacuum interrupters.

1. 서 론

진공을 이용한 차단기술이 1960년대에 소개되기 시작하였으며, 1970-80년대부터 대전류를 차단할 수 있는 진공차단기가 개발되기 시작하였다. 진공을 이용한 차단기는 소형화, 경량화와 유지보수가 없는 긴 전기적인 수명을 가졌기 때문에 중저압 배전시스템에서의 사용이 급속도로 증가하였다. 현재에는 중저압 분야에서 가장 많이 사용되는 차단기가 바로 진공차단기이다. 진공에서의 절연회복력과 성공적인 전류차단은 점점 갭사이의 플라즈마 파라미터들과 아크 전류영점근처에서의 전극 열적상태에 의해 결정된다. 전류차단이란 관점에서 불리한 아크모드는 대전류아크에서 발생한다. 활성화되고 고정된 양극점이 있는 응축아크가 발생한 경우가 특히 불리한 차단조건이 되는데, 이것은 양극점이 양극금속을 거대하고 깊게 녹이기 때문이다. 녹은 접점에 저장된 많은 양의 열에너지가 아크 전류영점후에도 많은 금속증기를 유지시킬 수 있다. 이로 인해 낮은 회복전압에서도 아크재점화가 일어날 수 있다. 이런 대전류 차단성능을 향상시키기 위해서는 진공차단부의 여러 가지 기술이 연구되어야 한다. 다음은 기술의 주요한 3가지 분야이다.

- 1) 진공아크의 제어
- 2) 고진공기술의 개발
- 3) 재료 개발

본 논문에서는 3가지 분야 중에서도 차단성능에 가장 영향을 미치는 진공아크의 제어에 대한 연구이다. 진공아크를 제어하는 방법에는 두 가지 방법이 사용된다. 아크가 발생했을 경우 전자력을 이용하여 접점 위를 움직이도록 하는 직교자계 방식과 발생한 아크가 응축아크가 되지 않고 확산아크 상태를 유지하게 하는 축자계 방식이 있다. 예전의 진공차단부는 직교자계 방식을 주로 사용하였지만, 이 방식은 대전류 아크를 제어하는데 한계점을 인식하여, 현재에는 대부분 축자계 방식을 채택하여 진공차단부를 개발하고 있는 상황이다. 축자계 방식은 아크의 움직임을 제어하기보다는 차단시 확산아크 상태를 지속적으로 유지함으로써, 접점이 개리되면 아크가

소멸되는 원리를 이용하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 차단부가 개리되었을 경우 전자계 해석을 할 수 있는 응축아크와 확산아크를 모델링 하였으며, 차단부 형상에 따른 차단부 사이의 직교자계와 축자계를 계산하였다. 또한 차단부 접촉시 구동부가 받는 전자력을 로렌츠의 힘을 이용하여 계산하였고, 확산아크가 받는 전자력도 계산하였다. 위와 같은 결과들은 진공차단부의 차단성능을 향상시키는데 커다란 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 유한요소 해석

진공차단부의 3차원 자계해석을 하기 위해서는 도체부분에서의 전류밀도분포를 구하는 것이 중요한 문제가 된다. 차단부의 형상이 단순하다면, 자계해석의 입력인 전류밀도분포를 쉽게 줄 수 있지만, 차단부의 형상이 복잡하다면 차단부 각 요소에서의 정확한 전류밀도분포를 계산한 후, 계산된 전류밀도분포를 이용하여 자계해석을 수행해야 한다. 진공차단부 각 부분에서의 전류밀도분포를 계산하기 위해서는 전류의 연속방정식을 이용하면 된다.

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \tag{1}$$

위 (1)식에서 \vec{J} 는 전류밀도이다.

식(1)에 전류의 오옴법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad \nabla \cdot (\sigma \vec{E}) = 0 \tag{2}$$

위 식(2)에서 \vec{E} 는 전계이고, σ 는 도전율이다.

식(2)을 전위를 미지수로 하는 방정식으로 바꾸면 다음과 같다.

$$\vec{E} = -\nabla V, \quad \nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0 \tag{3}$$

위 식(3)에서 V 는 전위이다.

식(3)은 복잡한 형상을 가진 도체부분에서 전계해석과 유사한 방법으로 각 도체부분에서 흐르는 전류밀도를 구하는 식이다. 식(3)도 전계해석과 똑같이 경계부분에 전위를 인가하고 풀면, 도체부분에서의 전류밀도를 계산할 수 있다.

식(3)을 이용하여 구한 도체부분에서의 전류밀도값을 구동항으로 하면, 진공차단부 각 부분에서의 자계해석을 수행할 수 있다. 자계해석은 다음과 같은 맥스웰 방정식을 풀면 된다.

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B}, \quad \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{B} \right) = \vec{J} \tag{4}$$

위 식(4)에서 \vec{A} 는 자기벡터 포텐셜이고, \vec{B} 는 자속 밀도이며, μ 는 투자율이다.

위 식(4)을 풀게 되면 진공차단부의 전류밀도에 의한 공극 및 각 부분에서의 자계분포를 해석할 수 있다. 3차원 해석에 있어서는 위와 같은 두 가지 해석방법을 사용하는 이유는 2차원 경우처럼 전류밀도의 방향이 단지 z 축성분만 존재하는 것이 아니라, x,y,z성분이 모두 존재하기 때문이다.

3. 전자력 계산

진공차단부 대부분이 금속도체로 구성되어 있으며, 대전류에서의 진공아크 또한 금속중기 아크이다. 전류가 흐르는 도체가 받는 힘을 계산하기에 가장 적용이 쉽고, 정확한 값을 얻을 수 있는 방법이 로렌쯔법을 이용하는 것이다. 로렌쯔의 전자기력 공식은 다음과 같다.

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (5)$$

위 식(5)에서 \vec{f} 는 전자기력 밀도이다.

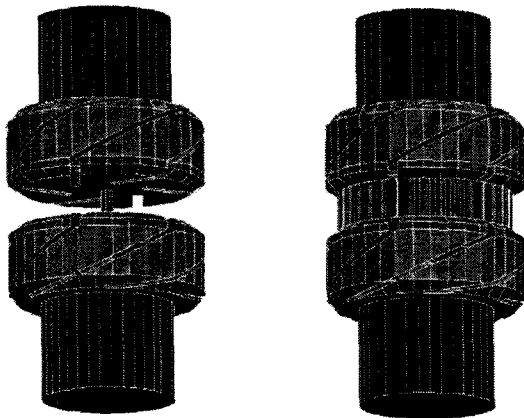
식(5)을 이용하여 도체부분 전체에 가해지는 힘 \vec{F} 는 다음과 같다.

$$\vec{F} = \int_v f dv = \int_v [\vec{j} \times \vec{B}] dv \quad (6)$$

위 식(6)에서 v 는 도체부분의 체적이다.

4. 진공아크 수치해석 모델링

진공아크는 대전류에서 발생하는 응축아크와 보통 수천암페어 이하의 저전류에서 발생하는 확산아크의 두 가지로 분류된다. 진공차단부는 겹겹 개리시 겹겹사이에 위와 같은 진공아크가 발생한다. 진공차단부의 정확한 전자계해석을 하기 위해서는 겹겹사이에 발생하는 아크를 수치해석을 할 수 있도록 모델링을 해야한다. 진공아크를 정확히 모델링하기는 불가능하지만, 해석에 커다란 영향을 미치지 않도록 아래의 그림과 같이 수치해석 모델링하였다.



(a) 응축아크 (b) 확산아크

그림 1. 진공아크 수치해석 모델링

위 그림1처럼, 해석을 할 경우 진공아크는 원기둥아크로 취급될 수 있다. 응축아크나 확산아크는 각기 다른 지름과 다른 도전율을 가진 동질성의 원통형으로 취급될 수 있다. 응축아크와 확산아크의 도전율은 각기 $1 \times 10^4 S/m$ 와 $2 \times 10^3 S/m$ 이다.

5. 수치해석 사례

본 논문에서는 진공차단부 3차원 전자계해석을 수행하였다. 해석모델은 리드부, 베이스부, 팁부, 외함으로 구성된 차단전류 50kA인 진공차단부이다. 실제 모델에서는 아크월드 부분이 존재하지만, 본 해석모델에서는 제외하였다. 진공차단부의 전자계해석을 하기 위해서는 각 부분에서의 전류밀도분포를 우선 알아야 한다. 각 부분에서의 전류밀도분포를 알기 위해서는 앞에서 언급했던 것처럼 경계조건을 이용하면 된다. 전자계해석이 선형이므로, 단위 전압을 인가하였다. 구동부에는 1[V]를 인가하고, 고정부에는 0[V]를 인가하였다. 그림2는 갭사이에 확산아크가 발생하였을 경우, 차단부와 아크부분에서의 전류밀도분포를 나타낸 그림이다.

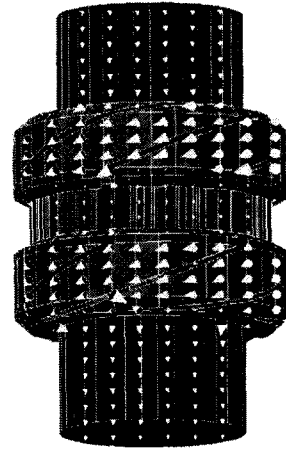
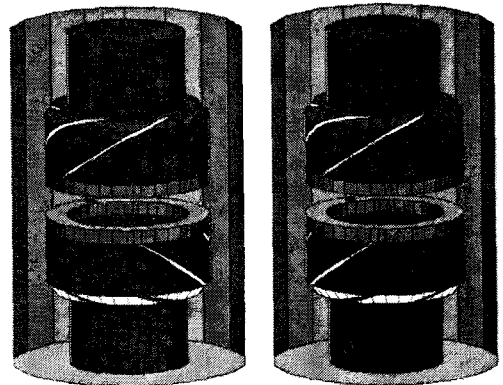


그림 2. 확산아크 발생시 전류밀도 분포

그림2처럼, 확산아크가 발생하였을 경우에는 베이스부의 전류밀도분포가 균일하게 분포한다는 것을 알 수 있다. 또한 응축아크가 팁부의 가장자리에 발생하였을 경우, 전류밀도분포를 해석해본 결과 응축아크 근처 베이스부분을 따라 전류가 흐른다는 것을 알 수 있었다.

또한 베이스부분의 slits 모양의 변화에 따라 갭사이에 발생하는 자속밀도값을 해석하였다. 수치해석 모델은 아래의 그림과 같다.

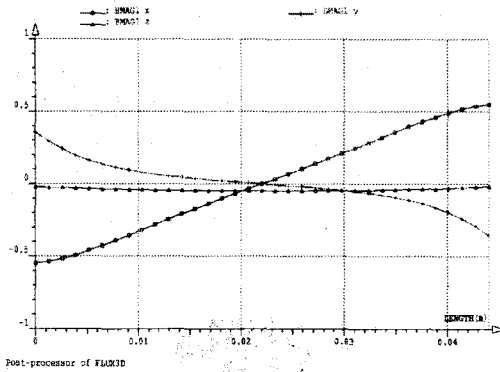


(a) 직교자계 해석모델 (b) 축자계 해석모델

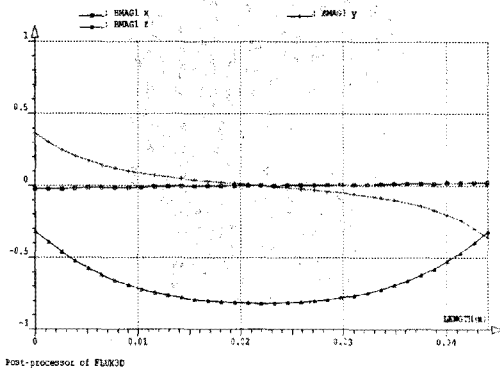
그림 3. 자계해석 모델 (2 types)

그림3의 해석모델들은 단지 베이스 고정부의 slits 방향만 다르다. 그러나 이 slits의 영향에 의해 갭사이에 나

타나는 자속밀도값에는 커다란 변화를 일으킨다. 갭사이 에 나타나는 자속밀도값은 아래의 그림과 같다.



a) 직교자계 성분별 자속밀도값



b) 축자계 성분별 자속밀도값

그림 4. Slits 방향변화에 따른 자속밀도값

그림4의 경우에는 갭사이에 아크가 발생하지 않고, 차단 부에 전류에 흐른다는 가정하에 자체해석을 한 경우이다. 실제로는 이와 같은 현상은 발생하지 않는다. 그러나 slits의 변화에 따른 갭사이의 자속밀도값의 변화를 알아보기 위해 해석해본 결과이다. 그래서 실제 현상에 가깝게 갭사이에 확산아크 모델링을 하였다. 이때 차단전류는 410(A)이다. 확산아크부분에서의 자속밀도값은 아래의 그림과 같다.

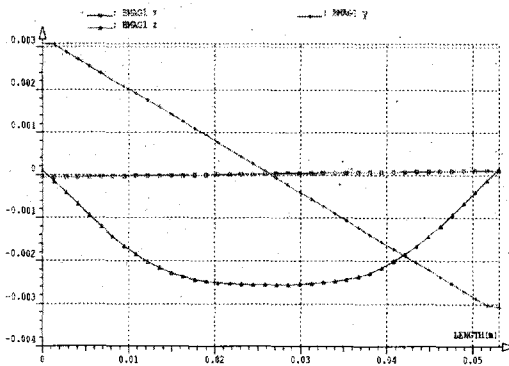


그림 5. 확산아크 발생시 자속밀도값

다음으로는 진공차단부 구동부가 받는 힘을 계산하였다. 구동부가 받는 힘은 해석모델 두 가지 타입이 접촉

하였을 경우와 갭사이에 확산아크가 발생하였을 경우에 대하여 계산하였다. 구동부가 받는 힘을 로렌츠의 전자기력 공식을 이용하였다. 해석결과값들은 차단전류가 1(A)일 때 구한 값들이며, 힘의 z축 성분만을 표1에 나타냈다. 구동부 힘의 z축 성분만을 나타낸 이유는 크기가 가장 세며, 차단부가 z축으로 움직이므로 가장 많은 영향을 미칠 것으로 판단되기 때문이다.

표 1. 구동부가 받는 힘 (z축 성분값)

구동부 접촉시	
Type	힘 [N]
직교자계 타입 구동부	-2.86×10^{-5}
축자계 타입 구동부	4.70×10^{-5}
갭사이에 확산아크 발생시	
축자계 타입 구동부	8.51×10^{-9}

6. 결 론

본 논문에서는 진공차단부의 베이스부 slits의 변화에 따른 차단부 갭사이의 자속밀도값의 변화를 해석하였으며, 갭사이에 확산아크가 발생하였을 경우를 가정하여 3차원 자체해석을 수행하였다. 위와 같은 해석결과들은 차단부 형상설계에 중요한 자료로 사용될 것이다. 또한 차단부 구동부가 받는 전자기력을 로렌츠 방법을 이용하여 계산하였다. 위와 같은 전자기력은 차단부의 조작부 설계시 기초적인 자료로 사용될 것으로 판단된다. 향후 과제로는 진공아크 발생현상 및 진공아크 거동에 대한 연구가 수행되어야 한다고 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] K. Nitta, K. Watanabe, et al, "Three-Dime Magnetic Field Analysis of Electrodes for VCBs", *I Transactions on Power Delivery*, Vol.12, No.4, pp1520-1525, 1997
- [2] Yoshihiro Kawase, Hiroyuki Mori and Hiroaki "3-D Finite Element Analysis of Magnetic Blowout F Acting on the arc in Vacuum Circuit Breakers", *Transactions on Magnetics*, Vol.32, No.3, pp1681-168
- [3] Zdzislaw Zalucki and Jerzy Janiszewski, "Transitio Constricted to Diffuse Vacuum Arc Modes During Hig Current Interruption", *IEEE Transactions on P Science*, Vol.27, No.4, pp991-1000, 1999
- [4] M. Bruce Schulman, "Separation of Spiral Conta the Motion of Vacuum Arcs at High AC Currents", *Transactions on Plasma Science*, Vol.21, No.5, pp4 1993
- [5] C.H. Flurscheim, et al, Power circuit breaker the design, *IEE Power Engineering Series 1*, 1982