

자계가 인가된 아크의 공간적, 시간적 거동

최원준, 강진, 최승길, 고광철*
 한양대학교 전기공학과, *한양대 전자전기공학부

Spatial and Temporal Behavior of Arc with Magnetic Field

Won-joon Choe, Jin Kang, Seung-kil Choi, Kwang-cheol Ko
 Hanyang University

Abstract - Axial magnetic field restrains arc diffusion that appear at cutting off fault current in vacuum interrupter(VI). In this study, spatial and temporal behavior simulation of arc is carried out for various axial magnetic field. Also the results of this simulation show that axial magnetic field controls and helps to extinguish arcs. This study can be applied to design and analysis of VI. Dymo theory that is not considered in this study will be considered latter.

1. 서 론

전력계통의 부하가 증가하면서 차단용량의 대형화가 요구되고 있다. 따라서 차단기의 재료, 가스 등을 비롯 해 다양한 분야에서 연구가 이루어지고 있다.

중간 전압의 스위치기어로서 많이 사용되고 있는 진공 차단기에는 축자계(Axial magnetic field)를 이용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 차단기에서 축자계는 고장 전류 차단시 발생하는 아크의 확산을 억제하기. 때문에 아크전압이 낮고 양극강하 전압이 생기지 않게 된다[1]. 이러한 이유로 같은 크기의 일반 차단기와 비교 해서 높은 차단용량과 긴 수명을 나타낸다. 그리고 차단 용량은 전극의 지름과 비례하기 때문에 이론적으로는 차단전류 용량에는 한계가 없다[2]. 본 연구에서는 축자계를 인가한 진공아크를 모의하여 축자계 진공 차단기(Axial magnetic field vacuum interrupter)에서의 아크를 해석하고자 하였다.

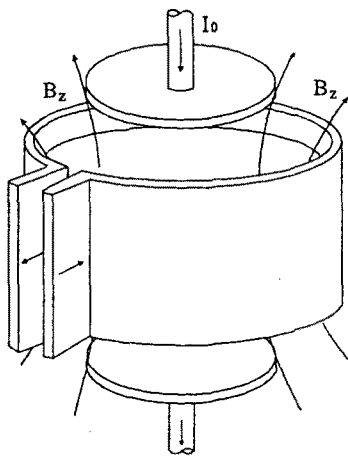


그림1. 축자계 진공차단기

2. 본 론

2.1 모델링

그림1은 진공차단기에서 축자계를 인가하는 모양을 나타낸 그림이다. 전극 주위의 솔레노이드로 전극사이에 축방향으로 자계를 발생시킨다. 실제로 전극으로 입력되는 전류를 솔레노이드로 통과시켜 별도의 전원 없이도 축자계를 발생시킬 수 있다.

시뮬레이션에서는 그림1에서의 차단기를 간략화하여 그림2와 같이 모델링 하였다. 전극의 재료는 구리(Cu)이고 지름이 10cm이다. 두 전극은 처음에 붙어 있다. 고장전류 발생 시 아래쪽 전극이 1m/s의 속도로 떨어진다. 이 차단기에 10kA의 전류를 인가했고 축방향으로 다양한 자계를 발생시켰다. 대전류에서 다수의 음극점이 생기면서 개개의 음극점으로 부터 생기는 각각의 양광주는 서로 간섭에 의해 하나의 양광주로 간단하게 해석할 수 있을 것이다[1].

그리고 간단한 해석을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 두 전극사이에 발생하는 아크궤선은 축대칭이다.
2. 아크는 국부적 열평형 상태에 있다.

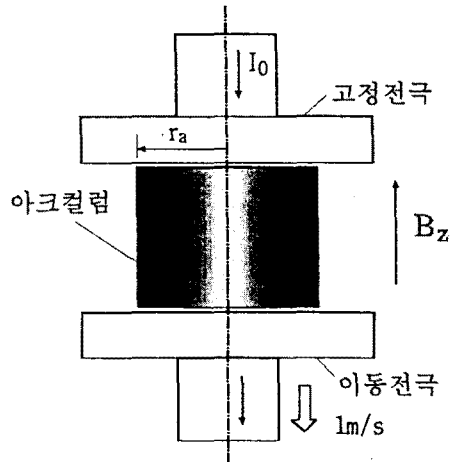


그림2. 아크 모델링 영역

2.2 수치해석

양광주의 거동에는 몇 가지 비선형 보존식이 결합되어 있다. 그리고 이러한 비선형 보존식의 몇몇 파라미터 값을 알기 위해서는 진공아크의 발생부터 살펴 볼 필요가 있다. 그러나 두 전극사이에서 일어나는 절연파괴는 전

극의 연마도와 밀접하게 관계있기 때문에 해석하기가 까다롭다. 그래서 본 시뮬레이션에서는 처음 두전극 접점이 떨어지면서 발생하는 아크를 간격 1mm의 두 전극 사이에서 구리 전극이 가열되면서 절연파괴가 일어나 아크가 발생하는 것으로 했다(3). 이때의 파라미터(온도, 방출속도 등)를 초기조건으로 했다(4). 그리고 모든 계산은 1ms단위로 이산적으로 행해진다.

아크가 발생하면 음극 전극에서 음극점이 발생하고 금속증기가 방출된다. 금속증기의 전리도는 사하 방정식에 의해 결정된다.

$$\frac{n_e^2 p}{n^2 - n_e^2} = 3.16 \times 10^{-6} T^{2.5} \exp\left(\frac{-eV_i}{kT}\right) \quad (1)$$

여기에서 n_e 는 전자밀도, n 은 이온과 중성입자의 밀도, p 는 기체 압력이고 T 는 기체 온도, V_i 는 이온화 퍼텐셜이다. 금속증기의 전리도가 결정되면 질량밀도, 전류밀도가 구해진다.

그리고 광손실을 무시하면 온도 분포는 Elenbass - Heller 방정식에 의해 지배된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{j_z^2}{\sigma} = 0 \quad (2)$$

양광주에서 반경방향 전류밀도가 없고 축방향 전류 밀도는 옴의 법칙에 의해 주어지고 전계는 일정하므로 아크컬럼내의 아크전류는 아래와 같이 주어진다.

$$I = 2\pi E \int_0^{r_0} r \sigma dr \quad (3)$$

r_0 는 아크컬럼 반경이며 (2)식과 (3)식의 반복계산을 통해 아크컬럼의 반경방향 온도분포를 알 수 있다.

온도에 의해 금속증기의 파라미터 값이 결정되고 편치 효과에 의한 압력분포를 구한다. 아크의 수축 영역과 비수축 영역간의 전류밀도의 변화는 컬럼 축상에 압력차를 유발한다.

$$p(z) = \int_0^{r_0} j(r, z) B_\theta(r) dr \quad (4)$$

아크단면적에 대해 전류밀도가 균일하다고 가정하고 운동량 보존식

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho(v \cdot \nabla)v = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + j \times B + \rho \cdot g \quad (5)$$

에서 점성효과를 무시하고 반경방향 속도와 반경방향 전류밀도를 0이라 한다면

$$\rho v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} \quad (6)$$

가 얻어진다. 압력 P 의 분포를 알 때 아크플라즈마의 축방향 속도를 구할 수 있다.

양광주 반경은 확산길이에 관계된다. 이온의 확산계수 D_{iL} 은 다음과 같다.

$$D_{iL} = \frac{\lambda \langle v \rangle}{3} \cdot \frac{1}{1 + (\lambda/r_0)} \approx \frac{\langle v \rangle}{3\lambda} r_0^2 \quad (7)$$

여기에서 λ 는 평균 자유행정, r_0 는 라모반경이다. 따라서 아크컬럼 반경 r_a 는

$$r_a = \frac{1}{3\lambda} r_0^2 \quad (8)$$

가 된다. 따라서 축자계와 아크컬럼 반경과의 관계는

$$r_a = \frac{n \sigma_{ei}}{3} \left(\frac{Mv}{qB} \right)^2 \quad (9)$$

여기에서 n 은 입자밀도이고 σ_{ei} 은 이온·이온간의 쿨롱 충돌 단면적으로

$$\sigma_{ei} = 4\pi \left(\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 \mu g^2} \right)^2 \ln \Lambda \quad (10)$$

로 나타내진다.

위의 과정으로 구해진 새로운 아크반경과 전극간격을 기초로 하여 다른 조건에서의 수치해석 과정을 반복하게 된다.

3. 결과 및 고찰

그림3은 아크컬럼 반경에 따른 온도를 나타내었다. 반경 끝부분에서 온도가 급속히 떨어지는 것을 제외하고는 반경에 큰 관계없이 대체적으로 일정하다는 것을 알 수 있다.

그림4는 시간4ms일 때 축상의 아크 플라즈마 속도를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보듯이 대체로 속도가 증가한 것은 전계나 압력차에 의한 가속이 이온 충돌에 의한 감속보다 컸음을 알 수 있다.

그림5는 시간에 따라 서로 다른 축자계 하에서 아크 반경이 어떻게 달라지는지를 나타낸 그림이다. 그림을 보면 축자계가 강해질수록 아크반경이 현저하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 축자계가 아크확산을 효과적으로 억제한다는 것을 나타낸다.

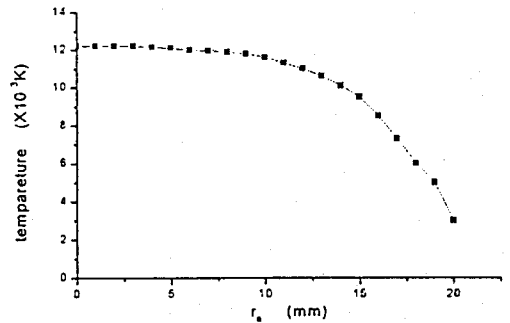


그림3. 아크컬럼의 반경에 따른 온도분포 (3ms 일 때)

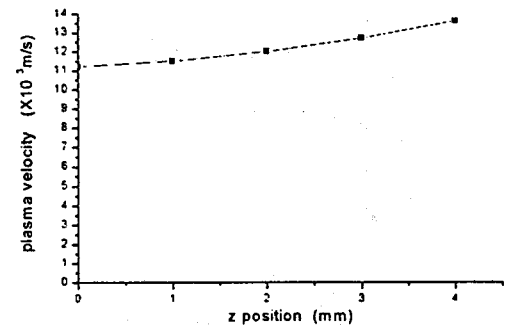


그림4. 축상의 플라즈마 속도 (3ms 일 때)

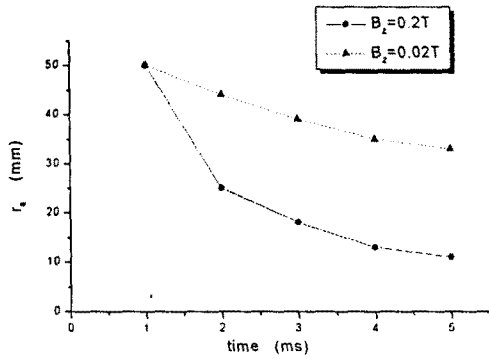


그림5. 시간에 따른 아크반경 변화
(0.2T와 0.02T의 자계를 인가했을 때 비교)

이 시뮬레이션에서는 아크의 발생을 간략화 시키는 과정에서 실험치[1][2]와 약간의 차이를 보이게 되었다. 그리고 아크전류에 의해 생기는 원주방향자계 (B_θ)와 축자계 (B_z)와의 상관관계는 고려하지 않았다. 추후에 아크발생 모의과정을 보다 세밀하게 하고 dymo이론도 고려할 필요가 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Osami Morimiya, "Theoretical and Experimental Study of a High-current Vacuum Arc in a Uniform Axial Magnetic Field", *Journal of Applied Physics*, Vol.71, No.1, pp101-107, January 1992
- [2] Kenji Watanabe, Eiji Kaneko, and Satoru Yanabu, Fellow, IEEE "Technological Process of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters", *IEEE Trans. on Plasma Science*, vol.25 No.4, pp609-616, August 1997
- [3] J.M.Lafferty, "Vacuum Arcs - Theory and Application", John Willy & Sons, INC, 1980
- [4] 電気学会放電ハンドブック出版委員会編 "放電ハンドブック", 電気学会, 1975