

설계변수에 따른 진공인터럽터용 종자계방식 전극의 아크특성에 관한 연구

김성일*, 박흥태, 안희일, 서정민
LG산전 전력연구소

A Study on the Arc Characteristics of Axial Magnetic Field Type Electrode for Vacuum interrupter by Design Parameters

S. I. Kim*, H. T. Park, H. I. Ahn, J. M. Seo
Electrotechnology R&D Center, LG Industrial Systems Co., Ltd.

Abstract - Axial magnetic field(AMF) type electrode can increase the interrupting capability of vacuum interrupters. But, this interrupting capability vary with design parameters such as shape of electrode, slits of contact, material of contact and so on. In this paper, shown arc characteristics of unipolar axial magnetic field type electrode for vacuum interrupter by design parameters such as shape of contact slits and diameter of contact. And, confirmed vacuum arc configuration by individual design parameter using high speed camera.

1. 서 론

진공인터럽터의 차단성능은 대전류 차단시의 아크모드에 의해 큰 영향을 받는다. 종자계(Axial magnetic field: AMF)는 상하 접점 사이의 공간으로 아크를 제한하고, 접점표면 전체에 고르게 아크를 확산시키며, 접점 표면의 에너지 밀도를 감소시킨다. 진공아크가 종자계에 의해 고르게 분포하므로 종자계 전극에서의 아크전압은 낮아지고, 대전류의 차단이 용이해진다.[1~2] 이러한 상황에서, 아크의 소모에너지는 접점 간 갭 내에서 최소가 되고, 따라서 접점의 소모 또한 최소화 된다. 그러므로, 대전류 아크의 반복 차단이 가능하다. 이러한 성능을 가지기 위하여 특별한 형상을 필요로 하며 이는 주된 연구 연구의 과제가 된다.[3~5] 전극 형상설계에 있어서 가장 중요한 것은 대전류 아크에 의한 열적인 스트레스를 접점의 전면에 균등하게 분포하도록 하는 것으로 가능한 높은 종자계를 인가하기 위한 구조의 설계가 요구된다.[6]

본 논문에서는 새로운 형상의 종자계방식 진공인터럽터의 설계에 있어서, 접점의 구조에 따른 종자계의 세기 및 분포를 연구함으로써 위에서 언급한 열적 스트레스가 접점의 전면에 균일하게 분포되도록 하기 위한 형상설계를 위한 최적인자를 찾으려 하였다. 이를 위하여 유한요소법을 이용하는 상용 전자계 해석프로그램을 이용하여 와전류를 고려한 자체해석을 통하여 접점사이에 발생하는 종자계의 세기 및 분포를 해석하고, 전극 샘플을 제작하여 탈부착이 용이한 진공챔버에 장착하여 아크 차단시의 전압과 전류를 측정하고, 고속카메라를 이용하여 아크 차단시의 아크모드의 변화를 관측하여 그 결과를 나타내었다.

2. 본 론

2.1 와전류를 고려한 자체해석

2.1.1 시간의존(와전류)장의 기초방정식

전자계를 지배하는 맥스웰의 기초방정식은 다음과 같다.

$$\text{rot}H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1.1)$$

$$\text{rot}E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\text{div}B = 0 \quad (1.3)$$

$$\text{div}D = \rho \quad (1.4)$$

정자계해석에서는 식(1.3)으로부터 얻어지는 다음 식으로 정의되는 자기벡터포텐셜 A를 도입한다.

$$B = \text{rot}A \quad (1.5)$$

정자계문제에서는, 식(1.1)의 시간미분항을 제외한 다음 식을 취한다.

$$\text{rot}H = J \quad (1.6)$$

식(1.6)에 식(1.5)를 대입하면, 정자계의 기초방정식은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu} \text{rot}A\right) = \text{rot}(J) = J \quad (1.7)$$

자속이 시간적으로 변화하는 경우에 해석영역 내에 있는 도체 또는 자성체에 와전류가 흐르고, 그에 따라 반작용자계가 문제가 되는 경우를 고찰한다. 이러한 형태의 장에 대한 방정식에는 시간미분항이 들어가기 때문에 일반적으로 시간의존장이라 불린다. 더욱이, 저주파를 취급하는 문제에서는 맥스웰의 기초방정식 중의 식(1.1)의 우변의 시간미분항의 변위전류를 무시할 수 있기 때문에 와전류문제의 자체의 기초방정식은 식(1.2), 식(1.5) 및 식(1.6)으로부터 다음과 같이 된다.

$$\text{rot}(\text{rot}A) = J_0 + J_e = J_0 - \sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad}\phi\right) \quad (1.8)$$

$$J_e = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad}\phi\right) \quad (1.9)$$

여기서 J_0 는 강제전류밀도[A/m²], J_e 는 와전류밀도, ϕ 는 전기 스칼라포텐셜[V]이다. 이 식은 식(1.7)에 나타낸 정자계의 기초방정식에 와전류를 표시하는 항이 추가되어 있을 뿐이다.

2.1.2 해석 모델

새로운 형상의 종자계 방식 전극은 크게 종자계를 발생시키는 3개의 슬릿을 가진 디스크 형상의 부분과 전류 차단시 아크가 발생하는 6개의 방사상 슬릿을 가진 접점부로 나눌 수 있다. 그림 1은 이러한 전극의 형상과 각 부분에서의 전류의 흐름을 나타낸다. 3슬릿의 디스크부분에서 전류는 전극의 중심에서 원주방향 또는 그 반대의 방향으로 흐르면서 전극의 축과 동일한 방향의 자계를 발생시키게 되며, 이로 인하여 접점에 발생하는 와전류는 접점의 슬릿이 감소시키는 역할을 한다. 이러한 와전류 감소의 기능을 하는 접점의 슬릿은 차단성능에 영향을 미치게 되는데, 슬릿의 길이가 접점 반경의 40%인 경우(전극b)와 70%와 교대로 배치되어 있는 경우(전극a)의 해석을 실시하고, 접점의 직경이 80mm인 경우와 70mm인 경우(전극c)의 종자계의 세기와 분포를 해석하였다. 차단전류는 50kArms 한 사이클로 하였으며, 물질의 재질에 따라서 Cu재질은 5.8×10^7 [S/m], CuCr25%는 2.204×10^7 [S/m], 그

리고, 아크플라즈마는 2800[S/m]의 도전율을 주었다. 아크는 접점표면 전체에 고르게 확산되어 있는 것으로 모의하였고, 전극 간 갭은 10mm를 유지하였다.

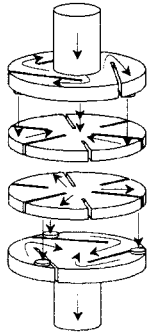
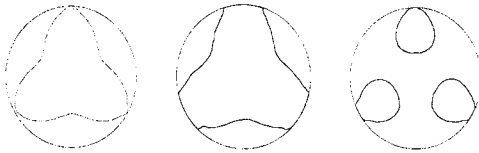


그림 1. 전형적인 모델 및 전류의 흐름

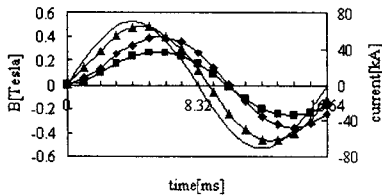
2.2.3 해석 결과

그림 2는 전류피크에서 상하 접점의 중심에서 발생하는 종방향 자속밀도의 분포에 있어서 아크를 안정화 시키는 데 필요한 자계값인 4mT/kA이상의 영역을 나타내었다.

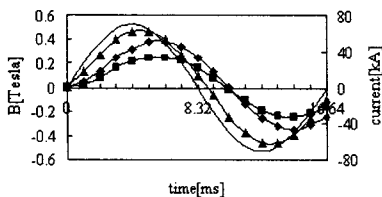


(a) 전극a (b) 전극b (c) 전극c
그림 2. 전류피크시 자속밀도 분포

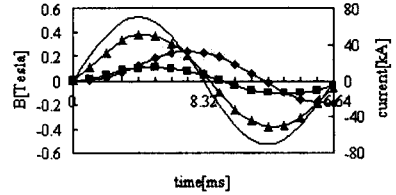
전극a와 전극b의 유효 종자계 분포는 전극c 보다 범위가 넓고 접점전면의 약 70~80%를 차지하는 것을 알 수 있었다. 그러나, 전극b의 분포는 접점의 외곽까지 분포되어 있으므로 아크가 접점의 직경을 벗어나 확산될 우려가 있는 것으로 판단된다. 그림 3은 아크의 중심에서 자속밀도가 가장 높은 부분과 약한 부분, 그리고 중앙의 시간의 변화에 따른 자속밀도의 변화를 나타내었다. 자속밀도가 높은 영역에서는 전류와의 위상차가 거의 나지 않았으나, 아크의 중심에서는 40도 이상 위상차가 발생하며 전류영점에서도 높은 자속밀도를 나타내었다.



(a) 전극a



(b) 전극b



(c) 전극c

○ 전류, ▲ 자속밀도가 높은 영역, ◆ 아크의 중심, ■ 자속밀도가 낮은 영역
그림 3. 시간에 따른 자계의 변화

이러한 전류와 자계의 위상차는 전류영점에서 아크가 차단되는 진공인터럽터의 성능에 악영향을 주므로 작을수록 우수한 성능을 나타낸다.

2.2 진공챔버 내에서의 전류차단 실험

2.2.1 실험 방법

진공중의 전류차단 실험을 위하여 자체해석에 사용한 모델의 3가지 시료(접점의 슬릿을 장단으로 한 시료, 접점의 직경을 작게 한 시료, 접점의 슬릿이 짧은 시료)를 제작하였다.

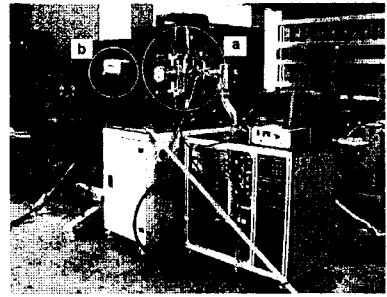
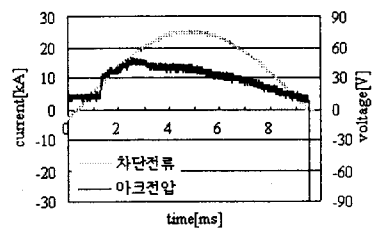


그림 4. 실험장비 배치

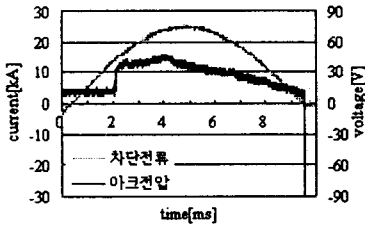
이러한 접점 시료를 그림 4의 (a)의 탈부착이 용이한 진공챔버에 장착하고, 5×10^{-5} Torr 이하의 진공을 유지하며, 간이 시험설비를 이용하여 전류를 인가하여 차단실험을 실시하였다. 그림 4의 (b)는 전류차단시 발생하는 아크의 시간에 따른 모드의 변화를 확인하기 위한 고속 카메라로, 초당 4500프레임으로 촬영을 실시하였다. 각각의 시료를 아크챔버에 장착 후 낮은 전류에서 수회 차단하여 전류컨디셔닝을 실시하고, 전류를 5kA씩 증가시키며 차단실패에 도달할 때 까지 실험을 진행하였다.

2.2.2 실험 결과

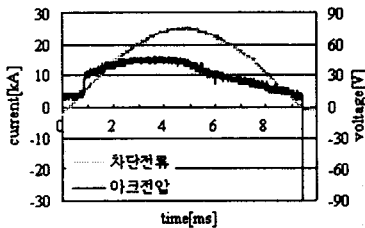
그림 5는 25kApeak 전류차단시의 아크전압파형을 나타낸다. 3개의 시료 모두 아크전압이 45[V]이하로 나타났으며 반 사이클 동안의 변화도 그리 크게 나타나지 않았다. 이는 아크가 접점의 표면에 고르게 확산이 되어 안정화 되므로써 나타나는 현상으로 생각된다.



(a) 전극a (arcing time : 8.2ms)



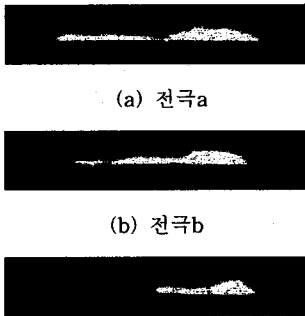
(b) 전극b (arcing time : 7.4ms)



(c) 전극c (arcing time : 8.6ms)

그림 5. 전류 25kA 차단시의 아크전압파형

그림 6은 25kApeak 전류 차단시에 고속카메라로 촬영한 전류피크시의 접점 사이에 발생한 아크의 형상을 나타낸다. 길고 짧은 슬릿이 함께 있는 전극a의 아크분포가 가장 균일한 것을 알 수 있었다. 3개의 시료 모두 25kApeak를 차단하였으나, 전극a를 제외한 나머지 둘은 32kApeak전류의 차단에 실패했다.



(c) 전극c

그림 6. 25kApeak 전류차단시 아크형상

그림 7은 전류차단 실험후의 접점의 표면을 촬영한 것이다. 전극a의 표면은 접점 전면이 고르게 아크흔이 분포함을 확인하였으나, 다른 두 전극의 표면에는 양극 전압강하에 의한 것으로 판단되는 용융의 흔적이 있음을 확인할 수 있었다.

특히 직경이 작은 전극b의 경우에는 전극을 벗어나서까지 아크에 의한 용융흔이 많이 남아 있는 것이 확인되었으며, 짧은 슬릿 만을 가지고 있는 전극c는 접점 전 표면에서 아크에 의한 용융흔이 나타났다.



(a) 전극a



(b) 전극b



(c) 전극c

그림 7. 전류차단 실험후의 접점표면

3. 결 론

이상의 진공인터럽터용 종자계방식 전극의 접점 설계 변수인 슬릿의 형상과 접점의 사이즈에 따른 와전류를 고려한 자계의 해석과 진공챔버를 이용한 전류차단 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1) 전극에서 종자계를 발생시키는 3슬릿의 디스크부의 형상이 동일하면 접점의 직경에 상관없이 4mT/kA이상의 유효면적은 거의 동일하다. 그러나, 접점의 직경이 작아지면 유효면적이 접점의 외부에 까지 분포하게 되므로 아크는 접점의 외부에 까지 확산이 되어 아크 안정화에 불리한 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 접점의 슬릿이 모두 어느 범위 이상으로 작은 경우에는 아크 확산을 위한 유효면적이 현저히 작아짐을 확인하였다.

3) 고속카메라로 촬영한 아크의 확산 상태와 실험종료 후 촬영한 접점표면의 아크흔과 용융흔은 깊은 관계가 있는 것으로 판단이 된다. 아크의 확산이 균일한 경우 아크흔은 접점표면에서 균일하게 나타나고, 아크의 휘점이 한쪽으로 집중되어 있는 경우에는 그부분에서 용융흔을 확인 할 수 있었다. 이는 장단슬릿을 가진 접점이 우수한 아크 확산성을 가지고 있음을 나타낸다.

최적의 성능을 나타내는 종자계방식 전극의 설계를 위해서는 많은 변수의 검증이 따라야 한다. 따라서, 더 많은 변수에 관한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Yanabu, E. Kaneko, E. Okumura, T. Aiyoshi, "Novel electrode structure of vacuum interrupter and its practical application", IEEE Power Engineering society Meeting, Minneapolis, 1980
- [2] M. B. Schulman, P. G. Slade, J. V. R. Herberlein, "Effect of an axial magnetic field upon the development of the vacuum arc between opening electric contacts", IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 16, No. 2, p. 180, 1993
- [3] F. U-Weber, "Wiederverfestigung des Hochstrom Vakuumbogens bei hohen Spannungen. Thesis", Techn. Univ. Braunschweig, Germany, 1988
- [4] B. Fenski, M. Lindmayer, "Vacuum Interrupters with Axial Field Contacts 3D Finite Element Simulations and Switching Experiments", XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Berkeley, California, USA, July 21-26, 1996
- [5] S. Yanabu, T. Tsutsumi, K. Yokokura, E. Kaneko, "Recent technical developments in high-voltage and high-power vacuum circuit breakers", IEEE Trans. on Plasma Sci., Vol. 17, No. 5, p. 717, 1989
- [6] W. G. J. Rondeel, "The vacuum arc in an axial magnetic field" J. Phys. D., Appl. Phys., Vol. 8, 1975