

15-5-14

3차원 유한요소해석을 이용한 종자계형 진공 인터럽터의 특성고찰

A Study of the Characteristic on the Vacuum Interrupter with Axial Magnetic Field Type using 3 Dimension Finite Element Analysis

하덕용*, 감형부**

(Duk-Yong Ha* and Hyung-Boo Kang**)

Abstract

This paper deals with the distribution characteristic of the current density and axial magnetic flux density on the vacuum interrupter with axial magnetic field type using 3 dimension finite element analysis. An axial magnetic field parallel to the current flow in the arc column can improve the current breaking capacity of vacuum interrupter by affecting the arc mode. The axial magnetic flux density on the contact electrode surface is analyzed by inputting external current as a function of the transient time for sine half wave. And it also is analyzed within the gap distance of the contact electrode. The calculated results show that the axial magnetic flux density is increased on the rising current by the peak value of current but is decreased with the descending current on the contact electrode surface and within the gap distance of the contact electrode. The residual magnetic field is generated on the contact electrode surface and within the gap distance in the instant of zero current, which is due to the influence of eddy currents. The phase shift due to eddy currents, defined as time difference between the maximum value of current and axial magnetic field, is about 1 ms in the center point of gap distance.

Key Words : Vacuum Interrupter, Axial Magnetic Field, Phase Shift, Gap Distance, Residual Magnetic Field

1. 서론

전력계통에 고장이 발생할 경우 신속하게 고장 전류를 자동으로 차단하여 계통 및 계통내의 각종 주요 기기들을 보호할 목적으로 차단기(circuit breaker)가 사용되어진다.

차단기에는 전류차단시 발생하는 아크(arc)의 소

호 매질 특성에 따라 유입차단기, 자기차단기, 가스차단기, 진공차단기 등으로 분류되어지는데, 진공차단기(vacuum circuit breaker)는 진공 중에서 발생하는 아크가 가스차단기처럼 아크를 유지할 수 있는 가스와 같은 매체가 없기 때문에 전극재료 용융에 의한 금속증기(metal vapor) 아크방전이 주체가 되며 이때 아크방전시 발생하는 금속증기를 진공 증으로 급속하게 확산(diffuse)시켜 아크를 소호 하는 특성을 가진 차단기로서 이것의 특징은 고신뢰성, 대전류 차단, 장수명, 소형화 및 경량성, 유지보수 용이함 등의 장점이 입증되어 현재 국내 배전 전압급의 개폐장치에 널리 적용되고 있다[1].

* : 한양대학교 공과대학 전기공학과
** : 한양대학교 공과대학 전기전자공학부
(서울시 성동구 행당동 17)
Fax : 02-2281-9912
E-mail : dyha63@hanmir.com

2002년 3월 4일 접수, 2002년 4월 26일 최종 심사 완료

이러한 진공차단기에 있어서 가장 핵심적인 부품은 전류차단시 발생하는 아크를 신속하게 소호하는 진공 인터럽터(vacuum interrupter)라는 전극구조체이다. 진공 차단기는 사고전류를 차단하는 책무를 가지고 있기 때문에 대전류 차단성능은 진공 인터럽터 설계에 있어 매우 중요한 요소이며, 대전류 차단 성능을 향상시킬 수 있는 방법으로는 진공 인터럽터의 접점전극 사이에 횡자계(radial magnetic field : RMF)를 발생시켜 접점전극에 집중되는 아크를 로렌즈력(Lorentz's force)에 의해 전극면상의 원주방향으로 구동시켜 아크를 접점전극 표면 위에 정체시키지 않으므로써 전극의 심한 용융을 방지하는 횡자계형과 진공 인터럽터의 접점전극 사이에 종자계(axial magnetic field : AMF)를 아크에 평행하게 형성시켜 접점전극 표면으로 입력되는 아크의 에너지를 균일하게 분포시켜 대전류에서 아크를 확산모드로 유지시키는 종자계형이 있다[2].

최근 산업의 발달에 따른 전력수요증대 및 전력계통 부하의 급증으로 인한 차단용량 증가의 필요성이 대두되어 대전류 차단 능력이 우수하고 소형경량인 종자계형 진공 인터럽터가 주로 채택되어 사용되어지고 있으며 이의 대전류 차단용량을 증대시키기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다.

종자계형 진공 인터럽터 설계시 대전류 차단성능 향상을 만족시키기 위해서는 무엇보다도 먼저 인터럽터 전극들의 형상에 의해 결정되는 전류밀도 분포와 접점전극 사이의 종자계 자속밀도 크기와 분포가 가장 큰 영향을 미치는 주요 인자가 되나 과거에는 접점전극 사이의 아크에서 종자계의 효과에 대한 수치적인 해석이 어려워 실험적 방법으로 결과를 도출하였으나[2-4] 비약적인 기술의 발달로 이의 수치 해석이 가능해졌으므로 수치 해석적인 방법으로 인터럽터의 특성을 고찰하는 것이 매우 중요하다[5-8].

본 연구에서는 3차원 유한 요소 해석 상용 프로그램인 Ansys 6.0을 이용하여 복잡한 전극 형상을 가진 종자계형 진공 인터럽터에 교류의 고장전류를 인가시켜 각각의 전극에 흐르는 전류밀도 해석 및 접점전극에 흐르는 와전류를 고려한 수치 해석 방법으로 과도전류 인가 시간별 및 접점전극의 위치별로 접점전극의 표면에서와 접점전극 간극(gap distance)의 아크에서 종자계 크기와 분포를 해석하였다. 또한, 접점전극 간극의 중심에서 전류와 종자계 사이의 위상차를 구하여 종자계형 진공 인터럽터의 전류와 자속 밀도 분포에 대한 특성을

검토하였다.

2. 진공 인터럽터의 구조 및 해석이론

2.1 진공 인터럽터의 구조

그림 1은 종자계형 진공차단기의 내부에 있는 진공 인터럽터의 구조를 나타내고 있다. 여기서 전류는 위쪽 전류전도부(rod), 코일전극(coil electrode), 접점전극(contact electrode)과 아크(arc)를 거쳐 아래쪽에 있는 전류전도부를 통해 흐르게 된다. 위쪽의 전류전도부와 접점전극 사이에 존재하고 있는 코일전극에 전류가 흐를 경우 자계가 형성되며, 아래쪽 전극에서도 동일한 현상이 발생하게 된다. 결과적으로 상하의 코일전극에 의해 발생된 자계는 접점전극에 수직으로 되어져서 접점전극 사이의 아크에 평행하게 인가되는데 이를 종자계라고 하며, 종자계가 집중화된 대전류 진공 아크에 평행하게 형성되면 그 아크는 접점전극 사이에서 급격하게 바깥쪽으로 확산되어져 전극표면의 손상을 최소화 할 수 있게 되어지므로 횡자계형 진공 인터럽터에 비해 대전류 차단 성능 및 차단 신뢰성이 크게 향상되어진다[6].

그림 2는 종자계를 발생시키는 코일전극의 전류 흐름 경로를 나타낸 것이다. 전류전도부와 접촉하는

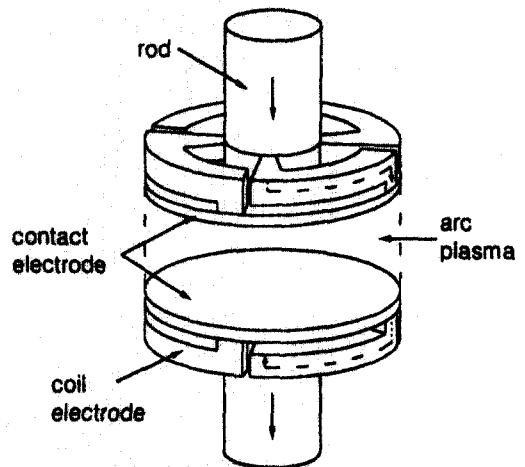
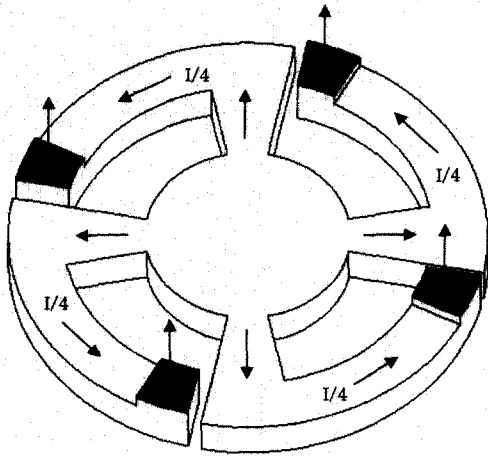


그림 1. 종자계형 진공 인터럽터의 구조.

Fig. 1. Structure of the axial magnetic field type vacuum interrupter.



■ 접점 전극 접촉면

그림 2. 코일 전극의 구조.

Fig. 2. Structure of the coil electrode.

코일전극으로부터 전류는 4개의 원호(segment)로 균일하게 분배되어 원주방향 전류 I/4가 각각의 코일에 흐르고 이 원주방향 전류에 의해 중자계가 발생하게 되어진다.

2.2 해석이론

진공 인터럽터에서 외부로부터의 입력 전류밀도 J_o 와 자속밀도 B 의 분포를 얻기 위해서는 전류 벡터 포텐셜법과 자기 벡터 포텐셜법이 이용되며 자속밀도 B 의 분포 해석 시에는 반드시 와전류를 포함하는 식이 고려되어야 한다[9]. 도체와 아크를 포함하는 전류전도 영역에서 전류밀도 분포 J_o 는 다음 식 (1)을 풀어 얻을 수 있다.

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\sigma} \text{rot } T\right) = 0 \quad J_o = \text{rot } T \quad (1)$$

여기서 T 는 전류 벡터 포텐셜이고 σ 는 전기 전도도 이다.

전류 분포의 연속성은 식 (2)을 만족시켜야 한다.

$$\text{div } J_o = \text{div}(\text{rot } T) = 0 \quad (2)$$

전류 벡터 포텐셜 T 의 경계 조건은 식 (3)을 만족시켜야 한다.

$$\oint T ds = I \quad (3)$$

여기서 I 는 도체를 통해 인가되는 전전류(total current)이다.

자속밀도 B 의 분포는 와전류를 고려하여 다음 식들로부터 구하여진다.

$$\text{rot}(\nu \text{rot } A) = J_o + J_e \quad (4)$$

$$B = \text{rot } A \quad (5)$$

$$J_e = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (6)$$

여기서 ν 는 자기저항률 ($= \frac{1}{\mu}$), A 는 자기 벡터 포텐셜, J_o 는 외부입력 전류밀도이고, J_e 는 와전류 밀도이다.

3. 해석 및 결과고찰

3.1 3차원 유한요소 해석 모델

본 해석에서는 중자계형 진공 인터럽터를 3차원으로 모델링하여 접점전극의 간극(gap distance)을 10 mm 로 일정하게 고정시킨 후 30 KA RMS 50 Hz의 사인 반파 전류를 인가한 과도 해석을 실시하였다. 해석에 이용된 중자계형 진공 인터럽터를 구성하는 전극 모델의 각 부분별 물질 특성을 표 1에 나타내었다.

외부전류 인가시 접점전극의 간극에서 발생하는 아크는 접점전극과 동일한 직경을 가지고 일정한 도전율을 가진 동질의 실린더 도체로 가정하여 각 부분별 전류밀도 및 자속밀도 크기와 분포를 해석하였다.

표 1. 물질특성.

Table 1. Material properties.

구분	물질명	도전율[S/m]	비투자율
접점전극	CuCr(75/25)	5.5 E6	1
코일전극	Cu	5.5 E7	1
아크	Arc	2.0 E3	1
진공	Vacuum	1.0 E-9	1

그림 3은 아크를 포함한 3차원 종자계형 진공 인터럽터의 유한요소 해석 모델을 나타낸다.

3.2 코일전극의 전류밀도에 대한 해석

코일전극은 종자계형 진공 인터럽터에서 종자계(AMF)를 발생시키는데 있어 가장 중요한 역할을 하는 전극으로써 그림 2에서 보듯이 코일전극의 원호(segment)에 전류가 흘러 들어가게 되면, 암페어 법칙에 의해 코일전극 주위에 자속이 발생하게 된다. 그림 4는 외부입력 전류가 피크치값($t=5$ ms)일 때 코일전극에 흐르는 전류밀도를 나타낸 것으로써 단위는 A/m^2 이며, 코일전극이 전류전도부(rod)와 접촉하는 면에서는 최소의 값을 가지나 코일의 원호 쪽으로 갈수록 증가하는 모습을 볼 수 있으며, 또한 입력 전류는 4개의 코일 원호에서

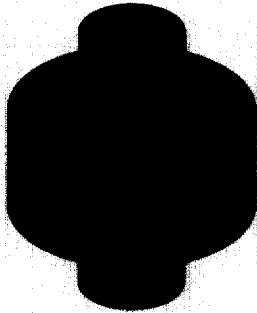


그림 3. 종자계형 진공 인터럽터의 3차원 유한요소 모델.

Fig. 3. 3-D FEM model of vacuum interrupter with axial magnetic field type.

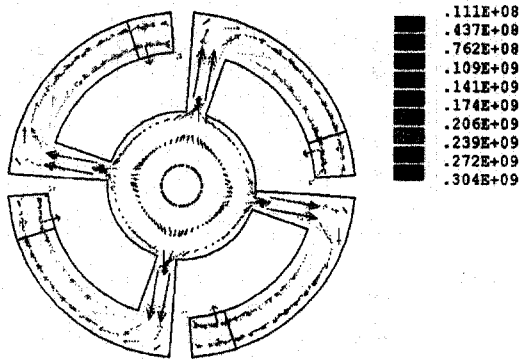


그림 4. 코일전극의 전류밀도.

Fig. 4. Current density in the coil electrode.

각각 1/4씩 균일하게 분배되어져 접점전극의 접촉면 쪽으로 흐르고 있음을 알 수 있었다.

3.3 접점전극에서의 전류밀도와 종자계 자속 밀도 해석

그림 1과 2에서 보듯이 접점전극 접촉면을 통해 접점전극 쪽으로 흘러 들어오는 전류는 접점전극의 모든 방향으로 분할(split up)되어지고 그리고 나서 다시 아크 쪽으로 균일하게 흘러나가게 된다. 이때 위쪽의 접점전극 표면에서 외부입력전류의 시간대별 전류밀도와 종자계 자속밀도 분포를 그림 5~7에서 보여주고 있다.

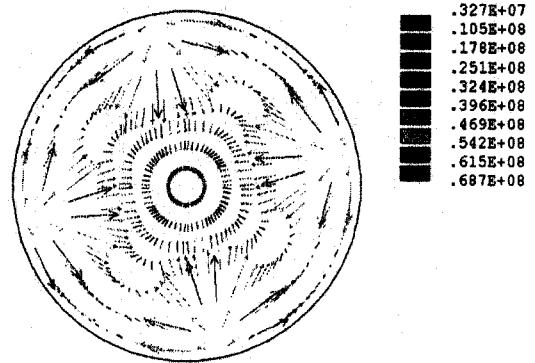


그림 5(a). 접점전극 표면에서 전류밀도($t=2$ ms).

Fig. 5(a). Current density on the contact electrode surface ($t=2$ ms).

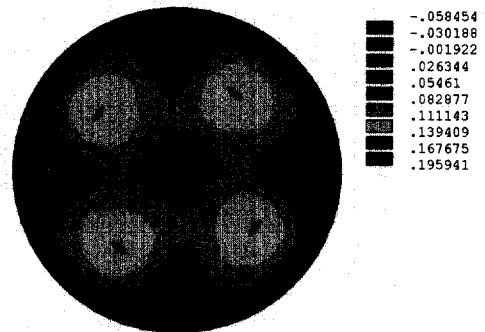


그림 5(b). 접점전극 표면에서 종자계 자속밀도($t=2$ ms).

Fig. 5(b). AMF flux density on the contact electrode surface ($t=2$ ms).

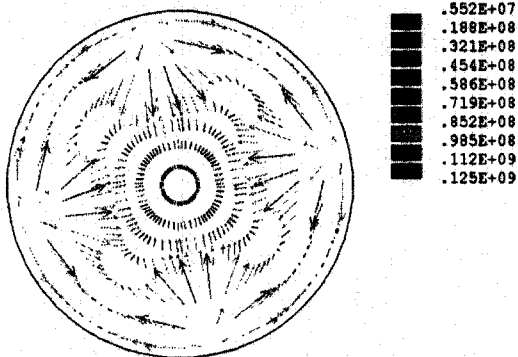


그림 6(a). 접점전극 표면에서 전류밀도($t=5$ ms).
 Fig. 6(a). Current density on the contact electrode surface ($t=5$ ms).

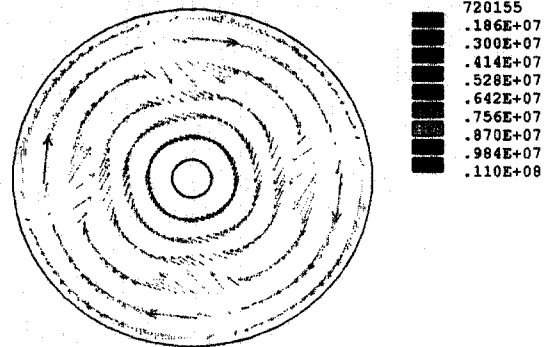


그림 7(a). 접점전극 표면에서 전류밀도($t=10$ ms).
 Fig. 7(a). Current density on the contact electrode surface ($t=10$ ms).

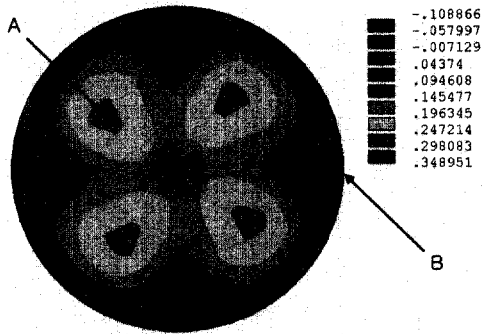


그림 6(b). 접점전극 표면에서 종자계 자속밀도 ($t=5$ ms).
 Fig. 6(b). AMF flux density on the contact electrode surface ($t=5$ ms).

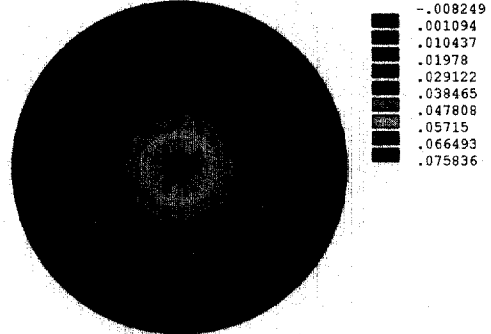


그림 7(b). 접점전극표면에서 종자계 자속밀도($t=10$ ms).
 Fig. 7(b). AMF flux density on the contact electrode surface ($t=10$ ms).

외부에서 인가되는 입력전류가 2 ms 와 5 ms 경과하였을 때 아크와 접촉하는 접점전극 표면에서 전류밀도 벡터도와 종자계 자속밀도 분포도의 값의 크기는 다르나 비슷한 형태의 분포양상을 보이고 있다. 그림 6(b)의 자속밀도 분포도에서 접점전극 4분면 중심에 위치한 A점의 자속밀도는 약 298 mT 정도이며 이런 부분이 극부적으로 4군데 존재하고 있는데 이는 코일전극의 원호(segment)가 4개임으로써 나타나는 현상이며 상대적으로 가장자리에 위치한 B점은 최소의 자속밀도를 가지는 위치이다. 그리고 오른쪽 분포도에서 약 349 mT의 자속값은 A점에 대응하는 접점전극 뒷면에서의 자속밀도값 분포를 나타낸 것이다.

접점전극 표면에서 최대 자속밀도 값을 가지는 A점은 코일전극의 전류흐름에 의해 발생한 자속과 접점전극의 전류흐름에 의해 발생한 자속이 이 부분에서 서로 중첩되어 강화되어졌음을 알 수 있고 이와 반대로 B점은 이들의 자속이 서로 상쇄되어 약해지는 것을 볼 수 있었으며 이 부분은 그림 2에서 보듯이 코일전극과 접점전극이 서로 접촉하는 면이다.

외부입력 전류가 0 이 되는 시점인 10 ms 에서 그림 7(a)의 전류밀도 벡터도 에서는 와전류 현상이 심하게 나타나며 그림 7(b)의 자속밀도 분포는 접점전극의 중심에서 최대 자속밀도를 가지며 가장자리로 갈수록 자속이 감소하는 등고선 형태의

자속밀도 분포를 가지므로써 그림 5(b)와 그림 6(b)와는 전혀 다른 형태의 분포 모습을 보여주고 있다. 이를 외부 입력 전류가 0 인 상태에서 나타나는 잔류자계라 하며 접점전극에 존재하고 있는 와전류에 의해 전적으로 영향을 받는다.

잔류자계는 전류차단기 간극사이에서 발생하는 아크를 간극 바깥쪽으로 급격하게 확산되는 것을 방해함으로써 진공차단기 소호 순간에 재점호를 발생시켜 고장전류의 차단실패를 야기하는 주원인이 되므로 이를 최소화시켜야 한다.

그리고 잔류자계를 최소화하기 위해서는 우선 진공 인터럽터의 접점전극에서 와전류 발생을 억제하여야 하는데, 이때 와전류는 접점전극의 구조에 의해서 많은 영향을 받기 때문에 접점전극에서 슬릿(slit)삽입, 직경변화 및 두께변화 등 여러 인자들을 고려한 해석을 실시하여 와전류 발생을 최소화시킬 수 있는 최적 조건을 도출하여 종자계형 진공 인터럽터를 설계하는 것이 타당하다.

3.4 접점전극 간극의 자속밀도 해석

그림 8에 삽입된 그림에서 보듯이 일점쇄선을 따라 접점전극 간극(gap distance)의 중앙면(아크 영역)에서 전극 반경에 따른 종자계 자속밀도 B_z ,

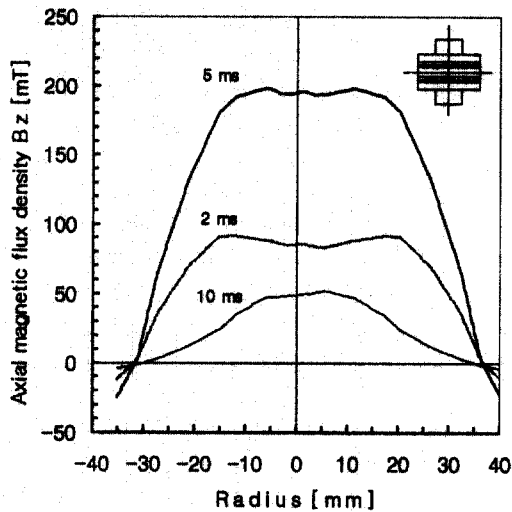


그림 8. 간극에서 접점전극 반경에 대한 종자계 자속밀도 분포.

Fig. 8. Distribution of AMF flux density vs. contact electrode radius, at the gap distance.

의 분포를 시간대별로 그림 8에 나타내었다. 접점전극 간극의 가장자리 부분에서는 외부입력 전류의 인가 시간과 무관하게 종자계 자속밀도 B_z 는 거의 0 에 가까운 값이 된다. 그리고 간극의 중심으로 갈수록 종자계 자속밀도 B_z 는 증가하는 경향을 보이고 있다. 간극의 중심에서 B_z 는 외부입력 전류가 상승하는 2 ms 일때에는 약 85 mT, 전류가 피크치 값일 때인 5 ms 에서 약 195 mT 그리고 전류값이 0 인 10 ms에서는 약 49 mT의 값을 가진다.

외부입력 전류가 상승하는 2 ms와 5 ms 에서 B_z 의 분포를 보면 간극의 중심부분에서 종자계 자속밀도 B_z 가 약간 감소하는 모습을 보이는데 이는 전류전도부(rod)에서 발생하는 와전류의 영향을 받았기 때문이다. 그러나 전류치가 0 인 10 ms에서는 간극의 중심부분의 B_z 가 최대값을 가짐을 보이는데 이는 외부입력 전류가 0 인 상태에서 접점전극에 나타나는 와전류에 의해 주로 영향을 받으므로써 나타나는 현상이다.

그림 9는 30 KA RMS 50 Hz의 사인 반파 전류를 인가하였을 때 접점간극의 중심점에서 시간의 함수로써 종자계 자속밀도 B_z 분포를 보여주고

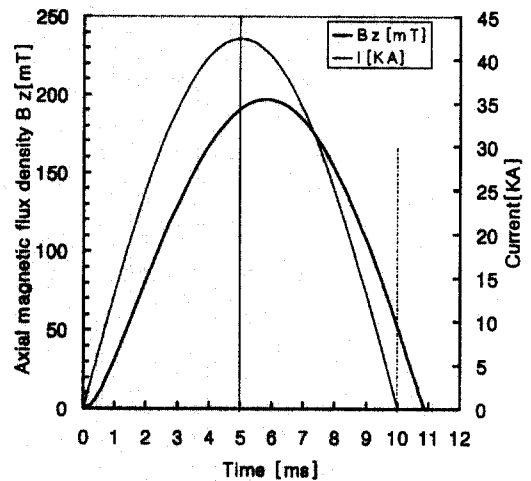


그림 9. 간극의 중심에서 시간에 대한 종자계 자속밀도.

Fig. 9. AMF flux density vs. time, in the center point of gap distance.

있다. 인가 전류 최대치와 종자계 자속밀도 최대치 사이의 시간차로써 정의되는 위상차는 본 해석에서는 약 1 ms 정도였으며 전류가 0 이 되는 순간에 잔류자계는 약 49 mT 잔존하고 있음을 알 수 있었다. 그림 9에서와 같이 전류와 종자계 자속밀도 B_z 사이에서 위상차가 발생하는 이유는 와전류로 인해 기인된 것이며 와전류의 발생을 억제시키면 위상차를 더욱 감소시키게 되므로 아크 소호시 간극에는 잔류자계가 거의 존재하지 않게 되어 전류 차단 신뢰성을 향상시킬 뿐 아니라 전류차단 용량도 증가시킬 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 배전 전압급의 차단기로써 많이 사용되는 종자계형 진공 인터럽터를 3차원으로 모델링하여 과도 전류를 인가시킨후 3차원 유한요소 해석을 실시한 결과를 다음과 같이 얻었다.

1. 접점전극 표면에서 종자계 자속밀도 B_z 는 외부입력 전류가 상승할 때인 $t=2$ ms 에서 168 mT, 전류 피크치값인 $t=5$ ms 에서 298 mT 정도로 전류증가와 비례하는 경향을 보였고, 입력 전류가 0 인 $t=10$ ms 에서는 65 mT 정도로 급격히 감소하면서 B_z 가 전극의 중심부에서 최대값을 가지는 등고선 형태로 분포하는 모습을 보였다. 이는 접점전극에 잔존하고 있는 와전류에 의한 영향임을 알 수 있었다.
2. 접점전극 간극(gap distance)에서 종자계 자속밀도 B_z 는 전류인가 시간과 무관하게 전극의 가장자리에서 최소값을 가지고 중심부로 갈수록 증가함을 볼 수 있었고 시간에 따른 B_z 의 분포는 접점전극 표면의 B_z 분포와 매우 유사한 특성을 가짐을 알 수 있었다. 외부입력 전류가 상승하는 2 ms와 5 ms 에서 B_z 의 분포를 보면 간극의 중심부분에서 종자계 자속밀도 B_z 가 약간 감소하는 모습을 보이는데 이는 전류전도부(rod)에서 발생하는 와전류의 영향을 받았기 때문이다.
3. 접점전극 간극의 중심점에서 외부입력 전류와 종자계 자속밀도 B_z 사이의 위상차는 1 ms 정

도였으며 전류가 0 이되는 순간에 잔류자계는 약 49 mT 잔존하고 있음을 알 수 있었다.

이상의 종자계형 진공 인터럽터의 전류밀도와 자속밀도 분포에 대하여 유한 요소 해석을 실시하여 얻은 기초적인 특성결과를 진공 인터럽터의 설계에 적용하면 기본적인 전극형상 설계가 가능하며, 종자계형 인터럽터의 신뢰성 향상 및 차단용량을 증가시키기 위해서는 종자계 자속밀도 B_z 의 증가 및 잔류자계 최소화에 대한 연구가 더 필요하다고 생각된다.

참고 문헌

- [1] S. Yanabu and E. Kaneko, "Research and development of axial magnetic field electrode and its application", ISDEIV, 18th, p. 1, 1998.
- [2] S. Yanabu, S. Souma, T. Tamagawa, S. Yamashita, and T. Tsutsumi, "Vacuum arc under an axial magnetic field and its interrupting ability", PROC. IEE, Vol. 126, No. 4, p. 313, 1979.
- [3] Y. Kurosawa, H. Sugawara, Y. Kawakubo, N. Abe, and H. Tsuda, "Vacuum circuit breaker electrode generating multi-pole axial magnetic field and its interruption ability", IEEE trans. on PAS, Vol. PAS-99, No. 6, p. 2079, 1980.
- [4] K. Watanabe, E. Kaneko, and S. Yanabu, "Technological progress of axial magnetic field vacuum interrupters", ISDEIV, 17th, p. 231, 1996.
- [5] B. -J. Paul, "Calculation of eddy-current-induced magnetic fields in vacuum interrupters with axial magnetic field contacts", IEEE trans. on Magnetics, Vol. 24, No. 5, p. 2204, 1988.
- [6] B. Fenski and M. Lindmayer, "Vacuum interrupters with axial field contacts 3-d finite element simulation and switching experiments" ISDEIV, 17th, p. 337, 1996.
- [7] K. Nitta, K. Watanabe, K. Kagenaga, T. Mori, E. Kaneko, H. Somei, and H. Takahashi, "Three-dimensional magnetic

- field analysis of electrodes for VCBs", IEEE trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, p. 1520, 1997.
- [8] P. N. Stoving and E. F. Bestel, "Finite element analysis of AMF vacuum contacts", ISDEIV, 18th, p. 522, 1998.
- [9] Y. Kawase, H. Inoue, and T. Ota, "Numerical analysis of axial magnetic field acting on the arc in vacuum circuit breakers by 3-D finite element method taking into account eddy currents", IEEE trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 5, p. 2668, 1998.