

진공인터럽터용 다극 종자계전극의 전자반발력 해석

김성일*, 박홍태, 안희일
LG산전 전력연구소

The Electromagnetic Repulsion Force Analysis of Multipolar Axial Magnetic Field type Electrodes for Vacuum Interrupter

SUNG-IL KIM*, HONG-TAE PARK, HEE-IL AHN
Electrotechnology R&D Center, LG Industrial Systems

Abstract - This paper describes electromagnetic repulsion force of multipolar axial magnetic field type electrodes for vacuum interrupter used in vacuum circuit breaker. It was distinguished that repulsion force of multipolar axial magnetic field type electrode in consideration of eddy current effect between upper electrode and lower electrode by finite element method. And it was found out that suitable contact weight of multipolar axial magnetic field type electrode for vacuum circuit breaker from repulsion force analysis results by finite element method.

발생하는 반발력의 발생기구에 대해 나타내었다. 전류 I에 의해 대향 전극에 만들어지는 자계 B에 의해 반대편 전극은 $J \times B$ 만큼의 힘을 받게 된다.

1. 서 론

진공차단기는 현재 대전류 차단용으로 폭넓게 사용되고 있는데, 진공차단기 내에서 전기적으로 전류를 차단하는 부분이 바로 진공인터럽터이다. 이 진공인터럽터가 대전류를 차단하는 원리는 크게 두가지로 나눌 수 있는데, 아크주에 수직으로 작용하는 자계에 의해 아크를 원주방향으로 빠르게 회전시키는 횡자계(Radial magnetic field) 방식과, 아크와 평행한 자계를 인가하여 아크를 점점 표면에 고르게 확산시켜 안정화시키는 종자계(Axial magnetic field) 방식이 바로 그것이다[1-7]. 특히 종자계 방식은 대전류의 차단에 용이하고, 접점의 소모율이 낮으며 수명이 긴 장점이 있기 때문에 최근에 대용량 전류차단용으로 많이 사용되고 있는 방식이다.

본 논문에서는 이러한 종자계방식의 진공인터럽터 접점에 있어서의 전자반발력에 관한 이론과 유한요소법에 의한 수치해석 결과를 비교 검토하였다. 진공인터럽터 전극의 대향된 두 접촉자의 모든 면이 서로 맞붙어 있다면 전자반발력은 큰 문제가 되지 않는다. 그러나, 실제 전극의 접촉은 거의 접촉자 면의 미세한 돌기에 의한 점접촉을 하게 된다. 따라서, 전류가 흐르는 진공차단기의 두 접점 사이에는 점접촉에 의한 반발력이 항상 존재한다. 특히 투입되는 순간에는 짧은 시간동안 스위치 임펄스 전류가 흘러서, 그 반발력은 매우 커지게 된다. 이 경우, 만약 차단기의 투입스프링 또는 와이퍼 스프링에 의한 접점의 투입력이 반발력보다 작게 되면 전극의 채터링 때문에 아크가 발생하여 전극에 손상을 줄 뿐만 아니라, 나아가 용착의 위험마저 갖게된다. 따라서, 미연에 투입전류 유입시의 전극의 전자반발력을 예측함으로써 이러한 위험을 방지할 수 있으며, 차단기의 기계적 구조 설계에도 이용이 가능하리라 생각된다.

2. 본 론

2.1 전자반발력

2.1.1 전자반발력 발생기구

차단기 접점의 접촉은 거의 접촉자 면의 미세한 돌기에 의한 점접촉을 하게 된다. 따라서, 상 하 접촉자 면을 흐르는 전류의 방향이 서로 반대가 되어 두 전극 사이에 척력이 작용하는데 이를 로렌츠힘(Lorentz Force)이라고 한다. 다음 그림 1은 접촉자 면에서 전류의 흐름에 의해

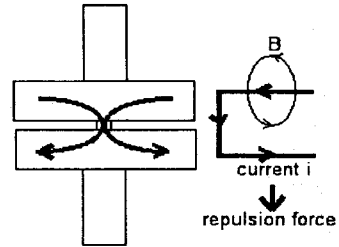


그림 1. 전자반발력 발생기구

2.1.2 전극 접촉면의 접촉점 반경

다음은 1점 접촉의 접촉점 반경 R을 계산하는 식이다

$$R = \sqrt{\frac{P}{\pi \zeta H}}$$

R : 돌기의 반경 (mm)

P : 접촉압력 (N)

ζ : 접촉면의 상태에 따라 결정되는 계수(통상 0.5 ~ 0.7)

H : 접촉자 재료의 브리넬 경도 (N/mm²)

2.1.3 전자반발력과 차단전류

전류 Ia에 의해 발생하는 반발력을 Fa라 하고, 전류 Ib에 의해 발생하는 반발력을 Fb라 하면 둘 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$F_a \times \left(\frac{I_b}{I_a}\right)^2 = F_b$$

Ia : 차단전류 a

Ib : 차단전류 b

Fa : 전류 Ia에 의한 전자반발력

Fb : 전류 Ib에 의한 전자반발력

위와 같이, 두 반발력 사이에는 전류비의 제곱에 비례하는 관계가 있다.

2.1.4 로렌츠의 힘

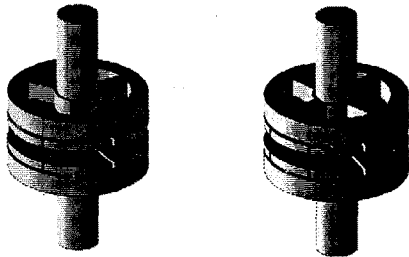
어떤 도체의 전자반발력은 아래 수식과 같이 도체에 흐르는 전류와 그 도체에 가해지는 자속의 벡터적 외적분으로 나타낼 수 있다.

$$F = \int_V [(J_0 + J_e) \times B] dv = \int_V (J \times B) dv = \int_V f dv$$

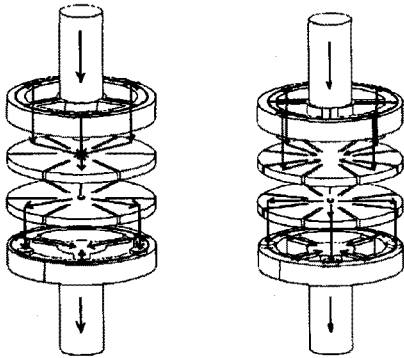
F : 전자반발력
 J_0 : 주전류밀도
 J_e : 와전류밀도
 J : $J_0 + J_e$
 v : 전자력이 미치는 공간

2.2 다극 종자계전극 해석모델

종자계방식 전극은 전극이 만드는 자계의 방향성에 따라서 분류할 수 있는데, 한 방향으로 작용하는 자계를 가지는 것을 단극방식, 전극 중심축을 중심으로 서로 교번되는 방향으로 작용하는 자계를 가지는 것을 다극방식이라 한다. 본 논문에서는 후자인 다극방식 종자계전극 중 6극과 8극을 모델링하여, 그 전자반발력을 계산하였다. 그림 2에는 본 연구에 사용된 6극과 8극 종자계 전극의 형상을 나타내었으며, 그림 3에는 점접촉 시의 전류의 흐름을 나타내었다.



(a) 6극 종자계전극 모델 (b) 8극 종자계전극 모델
 그림 2. 다극 종자계 전극 모델



(a) 6극 종자계전극 모델 (b) 8극 종자계전극 모델
 그림 3. 점접촉 시의 전류의 흐름

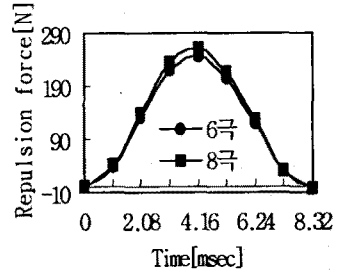
그림 1의 각 다극 종자계전극 모델은 전류의 입출을 위한 전극봉과 종자계를 만들기 위한 코일전극, 코일전극과 접촉자 사이의 기계적 강도 보강을 위한 지지판, 그리고 전류차단시 아크가 직접적으로 닿는 부분인 접촉자로 구성되어 있다. 그리고, 접촉자에는 주전류가 만드는 자계에 의해 발생하는 와전류를 감소시키기 위하여 슬릿을 각각 극수와 동일하게 주었다. 표 1에 각부의 치수와 물질특성을 나타내었다.

표 1. 부품별 물질특성

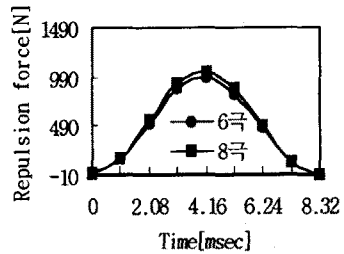
	재료명	도전율	비투자율	치수
전극봉	Cu	5.8E7	1	R13× 50.0
코일전극	Cu	5.8E7	1	R45× 12.0
지지판	SUS	1.1E6	1	R32× 3.65
접촉자	CuCr2	2.2E7	1	R45× 5.00

2.3 결과

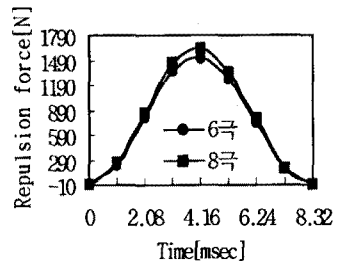
반발력 해석은 슬릿을 가진 6극과 8극 그리고, 슬릿이 없는 8극 전극모델로 실시하였다. 그림 4에는 입력전류의 변화에 따른 슬릿이 있는 모델의 전자반발력의 변화를 나타내었다. 각각의 입력전류에서 6극과 8극 모델의 전자반발력은 큰 차이를 나타내지 않으며, 입력전류 변화의 제곱에 비례하여 반발력이 증감함을 확인 할 수 있었다.



(a) 입력전류 50kA



(b) 입력전류 100kA



(c) 입력전류 125kA

그림 4. 입력전류 및 극수에 따른 전자반발력 변화

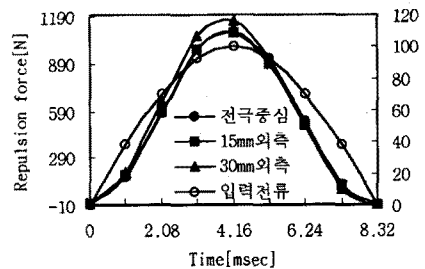
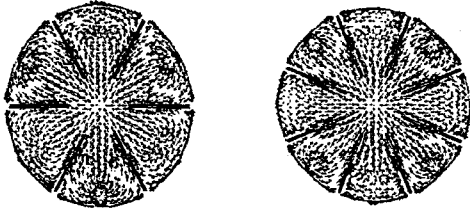


그림 5. 접촉돌기의 위치에 따른 반발력 변화

그림 5는 슬릿이 없는 8극 전극의 전자반발력 변화를 나타내고 있다. 여기서 전극중심에 접촉점이 형성되는 경우나 중심에서 외경쪽으로 15mm 이동한 경우의 반발

력은 거의 일치한다는 것을 확인하였고, 30mm 이동한 경우에는 반발력이 소폭 상승함을 알 수 있었다. 그리고, 그림 6에는 전류피크시 접촉자에서의 전류밀도 분포를 나타내었다. 코일전극과 맞닿는 부분의 전류밀도가 크고, 그렇지 않은 부분의 전류밀도는 매우 낮다.



(a) 6극 전극의 전류밀도 (b) 8극 전극의 전류밀도
그림 6. 전류피크시 접촉자에서의 전류밀도 분포

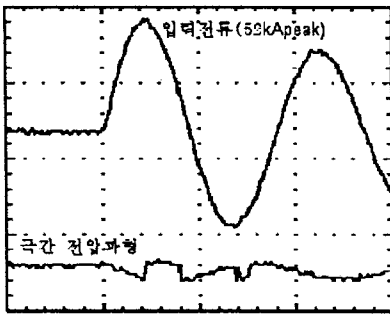


그림 7. 전자반발력 파형

그림 7은 8극 전극의 전자반발력 실험 결과 그래프이다. 이때의 접촉하중은 약 500N인데, 이는 해석치 약 300N보다 큰 값으로, 실험시 전극면의 특성이나, 해석시 변수 지정의 오차 등에 의한 것으로 생각된다.

3. 결 론

다극 종자계형 전극모델의 전자반발력 해석 및 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 1) 다극 전극의 경우에는 극수의 변화는 전자반발력에 큰 영향을 미치지 않는다.
 - 2) 다극 전극의 전자반발력 해석에 있어서 와전류의 영향은 크지 않다. 그러므로, 와전류를 고려한 해석을 하지 않아도 되므로, 해석시간의 단축이 가능하다.
- 수치해석치 신뢰성의 확보를 위해서는 개발모델에 적용 가능한 해석모델 및 방법을 정량화 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

[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. Unger-Weber, Wiederverfestigung des Hochstrom Vakuumbogens bei hohem 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

[7] Y. Sunada, N. Itoh, S. Yanabu, H. Awaji, H. Okumura and Y. Kanai, Research and Development on 13.8kV 100kA Vacuum Circuit Breaker with Huge Capacity and Frequent Operation, CIGRE, 1986