

영구자석형 차단기 조작기의 동작 특성 해석

전희득, 우경일, 김병택, 권병일
한양대학교 대학원

The Operating Characteristic Analysis of PM-type Magnetic Circuit Breaker

Hee Deuk Jun, Kyung Il woo, Byung Taek Kim, Byung Il kwon
Graduate School of Hanyang Univ.

Abstract - This paper describes the operating characteristic analysis of PM-type magnetic circuit breaker for electromagnetic field, electric circuit and mechanical motion problems. Transient calculations based up 2D finite element magnetic field solution including non-linearity of materials. Change of dynamic characteristic from eddy current in mover is quantified from FEM analysis

1. 서 론

전력 계통에 있어서 단락, 지락 등 계통의 사고에 대응하여 신속히 고장전류를 차단하여 사고의 파급 방지 및 전력의 안정적 공급을 가능하게 하는 일차적인 기기로서 차단기가 있다. 2만[V]급의 차단기로서 종래에는 유입차단기(OCB: Oil Circuit Breaker)가 사용되었지만 80년대 이래로 진공 차단기(VCB: Vacuum circuit Breaker)로 대체되어 일반적으로 사용하고 있으며 이러한 차단기들은 통상 스프링을 압축하였다가 풀어줄 때 발생하는 에너지, 즉 스프링 축적에너지를 이용한 조작 기구를 구성하여 차단기를 동작시키지만, 수 천회(回) 이상의 동작이 필요한 계통에 있어서 조작기를 구성하는 부품 수가 많음에 따른 부품의 주기적 점검 및 교환 등 유지관리 문제점을 내포하고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 해결하고, 동작신뢰성을 향상하기 위하여 효율이 높은 영구자석을 이용한 차단기 조작기를 국내외적으로 활발히 연구중이다.

차단기 조작기의 소요부품을 최소화한 영구자석형 차단기 조작기는 코일의 에너지를 이용하지만 동작 상태 유지는 영구 자석의 보자력을 이용하여 스스로 유지하고, 필요 부품수를 극소화하여 수명을 극대화한 수 만회 이상의 동작에서도 원활하게 동작할 수 있도록 신뢰성을 크게 높인 조작기이다[1].

이와 같은 일반적인 영구 자석형 차단기 조작기는 자기회로, 전기회로 또한 기계적인 운동이 포함하고 있으므로, 이를 결합한 분석이 필요하다. 특히 차단기 조작기의 가동자는 기계적인 특징 때문에 적층형태가 아닌 단일 구조물로 만드는 것이 일반적이다. 따라서 사고시 전압이 인가되면 가동자 내부의 빠른 자속변화에 의해 와전류가 크게 발생하게 되며, 철심부의 포화 현상과 더불어 기기의 특성에 복잡한 영향을 주게 되므로 이를 고려한 해석과 설계가 필요하다[2]-[4].

따라서 본 논문에서는 유한요소법을 이용한 전자계해석을 통하여 기본 설계된 영구 자석형 차단기 조작기 가동자의 도전율의 변화에 따른 동적 상태와 힘의 분포를 고찰한다.

2. 특성해석

2.1 해석 모델 및 구조

리니어 액츄에이터는 가동부의 종류에 따라 가동 코일형(Moving Coil Type), 가동 자석형(Moving magnet Type) 및 가동 코어형(Moving Amature Type)등으로 분류 할 수 있다.

본 논문의 해석 모델은 그림 1과 같이 영구자석을 가진 가동코일형이다. 고정자는 적층되어 있으며 가동자는 적층되어 있지 않다. 코일A와 코일B에 인가되는 전압을 적절히 on, off하여 조절함으로써 가동자의 움직임을 제어한다. 가동자가 그림 1의 위치에 있는 경우 코일A에 전압을 인가하면 가동자가 위로 움직인다. 코일A에 인가된 전압이 off된 경우, 영구자석에 의하여 정지상태를 유지한다. 표 1은 기본 설계된 사양을 나타낸다.

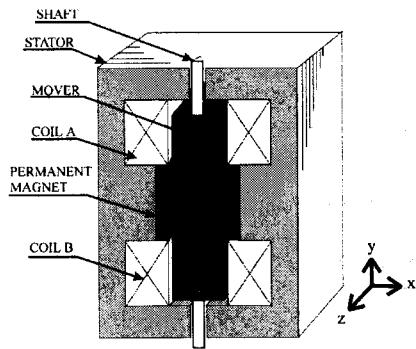


그림 1 영구자석형 차단기 조작기의 설계 모델

표 1 해석 모델의 기계적, 전기적 사양

코일 턴수	1500 [turn]
코일 직경	1 [mm]
입력 전압	200 [V]
철심 재질	s23
영구자석 잔류 자속 밀도	1.05 [T]
가동자 포화 자속 밀도	2.5 [T]
가동자 높이	232 [mm]
가동자 폭	77 [mm]
가동자 도전율	1e+007 [mho/m]
가동자의 이동 거리	20 [mm]
영구자석에 의한 힘	3000 [N]

2.2 유한 요소 해석

해석 영역에 대한 지배방정식을 도출하기 위한 맥스웰 및 보조 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times H = J_0 + J_e \tag{1}$$

$$B = \mu_0(H + M) \tag{2}$$

$$H = \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) - \frac{1}{\mu_r} M_r \quad (3)$$

여기서 J_0 는 권선 전류 밀도, J_e 는 와전류 밀도, M 은 자화량, A 는 자기 벡터 포텐셜, M_r 은 잔류 자화량이다.

식 (1), (2), (3)을 이용하여 해석영역의 지배 방정식은 식 (4)와 같이 구할 수 있다(5).

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_0 + J_e + \nabla \times \frac{1}{\mu_r} M_r \quad (4)$$

해석 영역의 전압 방정식은 Kirichhoff의 전압 법칙을 적용하면 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$V = R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt} + E_m \quad (5)$$

여기서 V 는 단자 전압, R_m 은 권선 저항, L_m 은 누설 인덕턴스, I_m 은 외부인가 여자전류, E_m 은 권선에 유겨된 역기전력이다.

식 (4)와 식 (5)를 결합하여 계산하면 기기의 전자장 특성을 해석할 수 있다. 가동자의 이동을 고려하기 위하여 식 (6)과 같은 운동방정식이 적용되었다.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{mag} - F_0 \quad (6)$$

여기서 m 은 가동자 질량, F_{mag} 는 발생추력, F_0 는 마찰력이다.

2.3 자계의 침투 깊이

시변 자계가 도전율을 가지는 도체를 투과할 때 주파수, 도전율, 비투자율에 관한 자계 침투 깊이 δ (Skin Depth)에 관한 식은 다음과 같다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0 \mu_r}} \quad (7)$$

여기서 ω 는 도체내의 자계의 주파수, σ 는 도체의 도전율, μ_r 는 비투자율을 의미한다. 따라서, 식 (7)로부터 시변 자계가 가동자를 투과할 때 자계의 침투 깊이가 줄게 됨을 알 수 있다.

3. 해석 결과 및 고찰

그림 2는 인가된 전압이 없는 경우의 자속 분포도이며, 영구자석에 의해 가동자의 정지상태를 유지한다.

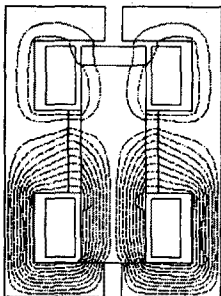


그림 2 인가된 전압이 없는 경우의 자속분포

그림 3은 코일A에 인가되는 200V의 DC전압이 인가되고 시간이 0.55(sec)일 때의 자속분포를 나타낸다. 이때 가동자가 받는 힘은 영구자석에 의한 힘의 반대 방향으로 작용하게 된다.

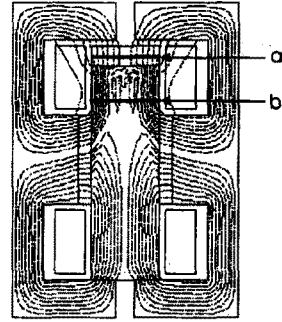


그림 3 코일A에 전압을 인가할 경우 자속분포

그림 4는 가동자의 도전율을 0, 1e5, 1e6, 1e7(mho/m)의 네 경우로 구분하여 해석하였으며, 시간이 0.55(sec)일 때 공극부분(그림 3의 a부분)에서 발생하는 자속 밀도를 나타내고 있다. 그림으로부터 도전율이 높아질수록, 와전류의 발생으로 공극 자속 밀도는 적은 것을 알 수 있다. 그리고, 그림 6은 시간이 0.55(sec)일 때 가동자 내부(그림 3의 b부분)에서의 자속 밀도를 나타낸다. 가동자의 도전율을 고려하지 않을 경우 가동자 전 영역에서 자속 밀도는 일정하게 나타나지만 도전율을 고려할 경우, 가동자에 투과되는 자속은 포피효과에 의해 가동자 표면에 집중됨을 알 수 있다.

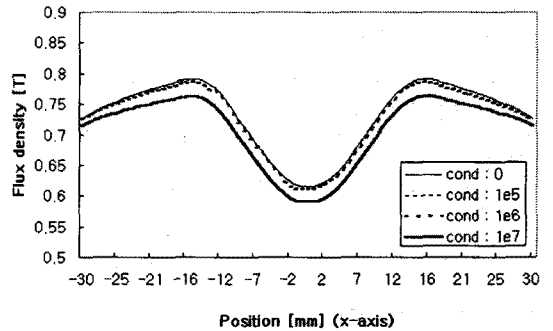


그림 4 공극에서 자속 밀도 분포

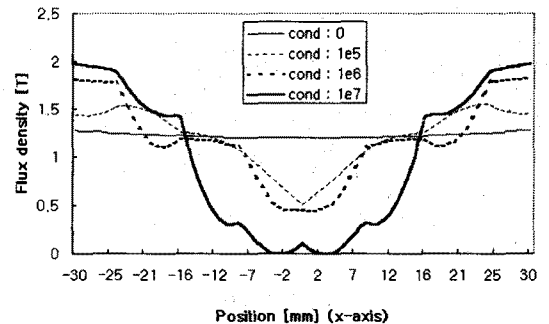


그림 5 가동자 부분에서 자속 밀도분포

그림 6은 코일A의 시간에 따른 여자전류를 나타내고 있다. 가동자의 빠른 이동으로 인해 역기전력이 증가하

여 전류가 다소 감소하다가 가동자가 요크에 도달한 후 전류는 다시 증가하는 경향을 나타낸다. 이 때 가동자의 도전율이 있는 경우에는 와전류가 발생하며, 따라서 전기·기계적 시정수가 달라지므로 가동자의 도전율이 클수록 전류가 크게 흐르고 전류의 수렴속도도 늦어진다.

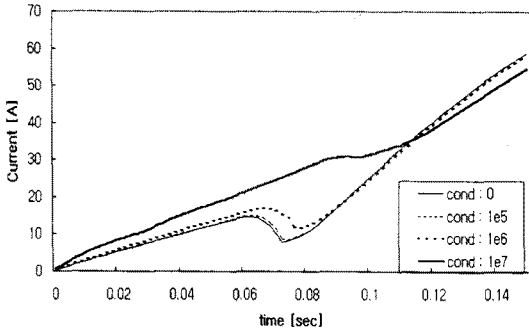
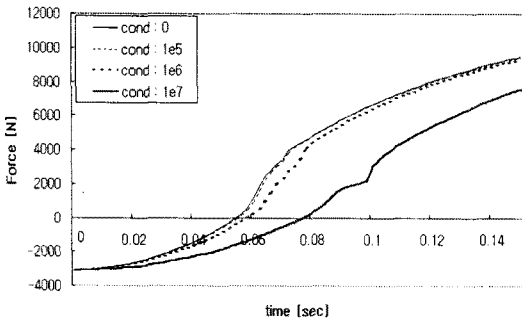
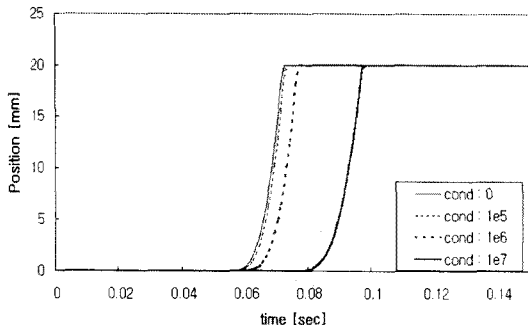


그림 6 코일A의 여자 전류

그림 7은 도전율에 따른 가동자의 시간에 대한 추력과 변위를 나타내고 있다. 그림으로부터 코일A가 여자된 이후 가동자 추력은 계속 증가하게 되며 영구자석에 의한 힘 3000[N]이상이 될 때 가동자가 이동하기 시작하는 것을 알 수 있다. 이 때 가동자에 도전율이 존재하는 경우, 도전율이 높을수록 추력과 변위특성이 늦어지게 되는데, 이는 그림 6의 전류특성과는 반대이다. 특히 가동자의 도전율이 1e5[mho/m]인 경우는 도전율이 없는 경우와 특성이 거의 비슷하나, 1e6[mho/m]이상인 경우는 가동자의 도달시간 지연은 물론 도달시 가동자의 속도도 상당히 늦어지게 되므로 차단기 특성에 심각하게 영향을 미칠 수 있다.



(a) 가동자의 추력



(b) 가동자의 변위

그림 7 가동자의 추력과 변위

그림 8은 도전율의 변화에 따른 가동자의 도달시간과 가동자의 도달시 추력 및 속도 특성을 나타낸다. 그림으로부터 도전율이 1e5(mho/m)인 경우는 도전율이 없는 경우에 비해 도달시간의 지연이 1.4[%], 도달시 추력 감소가 0.35[%]로 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나, 도전율이 1e6부터 크게 증가하여, 1e7(mho/m)인 경우는 도달시간은 36[%]가 지연되었으며, 이와 같은 도달시간지연은 사고시 적절한 시간내에 동작을 완료해야 하는 차단기의 성능을 악화시키게 된다. 또한 추력은 약 45[%] 감소하였으며, 따라서 도달시 가동자의 속도는 3.11[m/sec]에서 2.59[m/sec]로 16.9[%] 감소하였다. 이 결과는 차단을 하기 위하여 일정한 가동자의 운동량이 요구되므로 중요한 설계 고려사항이 되며, 심한 경우 추력의 감소에 따라 차단이 실패할 수도 있다.

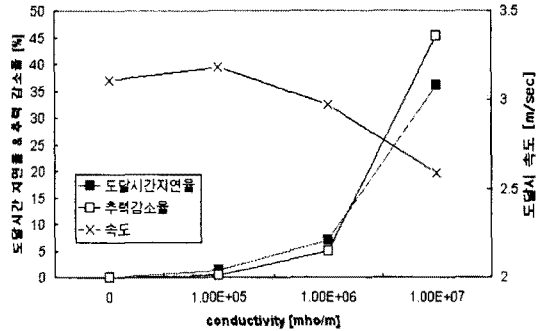


그림 8 도전율에 따른 가동자의 도달시간, 추력 및 속도특성

4. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 영구자석형 차단기 조작기의 전자계해석을 통하여 가동자의 도전율에 따른 추력, 반응속도 및 코일에 흐르는 전류 등을 정량적으로 제시하였다.

해석결과로부터 가동자의 도전율이 1e6(mho/m)이상일 때 와전류에 의한 영향이 가시적으로 발생하며, 특히 1e7(mho/m)인 경우는 가동자의 도달시간의 지연 및 도달시 추력의 감소특성이 각각 36[%]와 45[%]에 달하므로 특성에 매우 큰 차이가 발생함을 알 수 있었다. 따라서 차단기 조작기의 설계시 가동자의 와전류에 의한 영향을 충분히 고려하여야 할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Lin Xin, Gao Huijun, "The Calculation and Anal the Coupled Problem in the Permanent Magnet Actuator Vacuum circuit Breaker".
- [2] Boldea, S.A.Nasar, "Linear electric actuator generator" IEEE Transaction on Energy Convers Vol.14, No. 3, pp. 712-717, 1999.
- [3] Joachim Fetzer, Stefan Kurz, "Analysis of an actuator eddy current and iron saturation between a FEM and BEM-FEM coupling approach", IEEE Transaction on Magnetics, pp. 270-273, 1999.
- [4] Xiong, Guangyu, Yamada, "Dynamic Analysis of Cylindrical Moving-core Linear Oscillator Act" LDIA'95 Nagasaki, JAPAN, pp. 405-408, 1999.
- [5] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992