

베어링 타입 부싱을 적용한 영구 자석형 조작기의 동작 특성 해석

김태용, 강종호, 최상민, 정현교
서울대학교 전기컴퓨터공학부

Dynamic Characteristic Analysis of Permanent Magnetic Actuator Applying Bearing Type Bushing

Tae-yong Kim, Jong-Ho Kang, Sang-min Choi, Hyun-Kyo Jung
Seoul National University

Abstract - 최근 중·저압용 진공 차단기의 구동 메커니즘으로 영구자석형 조작기(PMA)가 널리 사용되고 있다. 이는 모터 스프링이나 유압 및 공압식 등과 같은 기계식 메커니즘에 비해 성능과 신뢰성에서 우수함을 인정받고 있다. 그러나 기존 영구자석형 조작기에서는 가동자와 영구 자석 사이의 큰 마찰력으로 인한 에너지 손실과 차단부와 연결 로드에서의 기계적 고장 및 파손이 유발될 수 있다. 본 논문에서는 가동자의 로드에 베어링 타입의 부싱을 장착한 모델을 제안함으로써 이 문제를 해결하고자 한다. 부싱을 이용하여 영구 자석과 가동자 사이의 공극을 확보함으로써 마찰을 감소시키고 기계적 안정성 및 동작 특성 향상을 기대할 수 있다. 유한요소법(FEM)과 시간차분법(TDM)을 이용하여 제안된 모델의 동작 특성을 해석하였고, 이를 기존 모델의 특성과 비교하여 그 우수성을 검증한다.

1. 서 론

일반적으로 중저압용 차단기에는 주로 air, oil, SF₆ 그리고 진공 매질을 이용하였다. 요즘은 air, oil 차단기는 누설과 제조비용 부담, 그리고 많은 부품들로 인해 거의 사용되지 않고, 우수한 절연 특성을 지니는 SF₆ 절연가스와 진공을 이용한 차단기가 주로 사용된다. 최근에는 고압이나 초고압에서는 SF₆ 가스를 절연매체로 이용한 차단기가, 중저압에서는 진공을 이용한 차단기가 각광을 받으며 이용되고 있다. 특히 진공차단기는 상대적으로 짧은 점접근구과 큰 압접력을 가지는 특성을 지니고 있으므로, 영구자석과 코일에서 발생하는 자계의 힘으로 동작하는 PMA와의 이상적인 조화로 많은 곳에서 활발한 연구가 이루어지고 있다.

이미 PMA를 12kV/20kA급 진공차단기에 적용하여 우수한 동작특성, 안정성 그리고 효율성을 나타낼 바 있으며, 이를 보완 및 개발하여 보다 높은 고압진공차단기에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 한편 기존 PMA의 가동자와 영구 자석 사이의 접촉으로 인한 큰 마찰력은 PMA의 가동부와 차단부를 연결하는 로드에 기계적 충격을 주게 된다. 이는 조작기 자체의 고장 및 파손과 에너지 손실 등을 유발시켜, 요구되는 차단특성을 만족하지 못하는 장애의 요인으로 존재한다. 이에 대한 기본 PMA 특성에 대한 보완 및 개발을 위해서는 마찰력을 감소시킬 수 있고 차단부와 연결 로드에서의 기계적 강도를 높일 수 있는 PMA의 설계가 필수적이다. 본 논문에서는 가동자의 로드에 베어링 타입의 부싱을 장착함으로써 언급된 마찰 관련 문제를 극복한 새로운 PMA 모델을 제시하고, 그 동작특성을 통해 기계적 안정성 및 효율성을 나타낼 것이다.

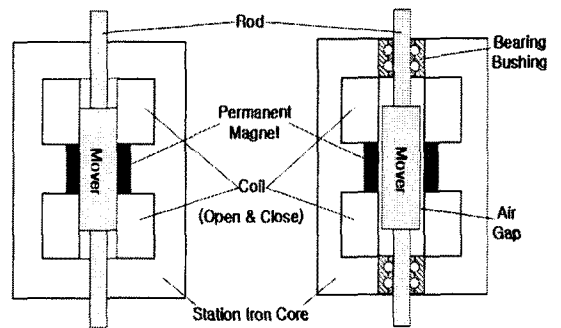
2. 본 론

2.1 구조 및 동작원리

2.1.1 베어링 부싱을 적용한 개선된 구조

차단기의 조작기로서 성공적인 역할을 하기 위해서는 아주 짧은 차단시간 이내에 접점에서의 큰 압접력을 감당할 수 있는 충분한 힘과 빠른 속도를 동시에 지녀야 한다. 진공차단기에 적용된 기본 PMA에서는 영구자석을 가동부의 자성체 양 측에 바로 부착하게 된다. 이 때 영구자석의 자기력으로 인한 인력이 가동자에 바로 작용함으로써 가동자와 영구자석 사이의 접촉면에는 큰 마찰력이 발생한다. 코일전류에 의해 여자된 기자력이 영구자석의 반대하는 자력을 상회할 때 PMA의 가동자가 움직이게 되는데, 가동자와 영구자석 사이의 마찰력은 가동자의 움직임을 방해하므로 코일 전류의 기자력에 대한 부담을 가중시키게 된다. 이 경우 마찰력이 없을 때와 비교해 본다면, 가중된 기자력을 **충당하기** 위해서는 코일의 턴 수 또는 전류 크기를 증가시켜야 할 뿐 아니라 가동부에서의 자계포화가 발생하지 않도록 사이즈를 키워야하므로 결국 PMA 자체의 크기가 증가된다. 이는 제조비용의 증가와 스위칭 소자에서의 전류제한 및 운용상의 어려움을 유발한다. 뿐만 아니라 이러한 마찰로 야기되는 부품에서의 마모 및 손상으로 인한 PMA의 비정상적 작동과 같은 치명적인 문제를 유발시킬 수 있다. 그러므로 마찰력을 근본적으로 줄일 수 있는 새로운 형태의 PMA 개발이 요구된다.

그림 1(b)는 가동자의 로드에 베어링 부싱을 적용한 새로운 PMA 모델의 구조 단면을 보여준다. 로드 측의 볼(ball) 타입 베어링 부싱을 이용하여 가동자와 영구자석 사이에 공극(Air Gap)을 확보함으로써 가동부의 자성체와 영구자석 간의 마찰 요인을 근본적으로 제거할 수 있고, 가동부의 동작을 원활하게 할 수 있다. 가동자에 작용하는 마찰력은 베어링과의 접촉 부분에서 상대적으로 매우 작게 발생하므로 코일 측 권선과 전류의 부담을 줄여줄 수 있다.



(a) 기본 구조

(b) 부싱을 이용한 제안된 구조

그림 1. PMA 기본 구조와 새로운 형태의 구조

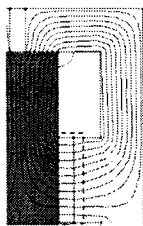
2.1.2 동작원리

PMA는 영구자석(PM)에 의해 외부 에너지의 유입 없이 조작기의 상태를 유지할 수 있다. 이는 접점(Vacuum Interrupter)과 연결되어 개방(Opening)이나 투입(Closing) 상태를 유지할 수 있는 홀딩력으로 작용하게 된다. 특히, 진공차단기에서는 아주 큰 압력으로 접점 상태를 유지해야 하므로 조작기의 홀딩력은 이 압력보다 20%정도 더 큰 힘으로 작용하게 된다. PMA를 동작시킬 때는 먼저 코일에 전류를 인가하여 자계를 발생시키는데, 코일에서 발생한 자계의 힘이 홀딩력으로 작용하는 영구자석의 자력보다 크게 되면 가동자가 움직이게 된다. 가동자가 진행하여 반대쪽에 가까워질수록 영구자석의 자계 또한 전류에 의한 자계와 같은 방향으로 작용하게 되고, 그에 따라 가동부는 점차 더 큰 힘으로 동작하여 빠른 속도를 이끌어 낼 수 있게 된다. 가동자의 동작이 끝나면 코일에 전류를 끊게 되고, 초기 위치의 반대쪽에서 역시 영구자석의 홀딩력으로 그 상태를 유지한다.

그림 2에서는 새롭게 제안된 PMA 모델의 자계 분포를 기존 모델과 비교하여 나타내었다. 자계 분포 상 큰 차이점은 없으나, 주목해야 할 것은 가동자와 영구자석 사이의 자속 밀도이다. 새롭게 제안된 모델에서는 가동자와 영구자석 사이에 1.5[mm] 크기의 공극을 부여하였는데, 여기서 증가된 자기 저항(Reluctance)이 자속의 흐름에 관여하여 영구자석과 코일 전류가 생성하는 기자력과 감소시킨다. 그림 3에서 가동자와 영구자석 사이의 평균적인 자속 밀도가 대략 0.05[T] 정도의 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 에너지 밀도의 감소로 동작특성을 저해하는 요인으로 작용한다. 그러나 가동부의 자성체와 영구자석 간의 공극을 부여함으로써 얻어지는 마찰력의 감소는 공극에서의 자기저항 증가로 인한 자기 손실을 충분히 보상하여, 동일한 값의 인가전류에서도 기존 모델을 능가하는 성능을 얻을 수 있다. 뿐만 아니라 가동자와 영구자석의 기계적 마모 및 손상을 방지할 수 있다는 이점은 새로운 모델의 가장 큰 장점이라 하겠다. 가동부의 자성체와 영구자석 간의 1.5[mm]의 공극 크기는 영구자석의 인력에 대한 안정성과 현실적 제작 기술을 고려한 최소 규격이다.

2.2 동작 특성 해석

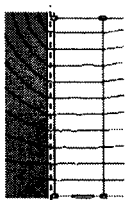
본 논문에서는 유한요소법(FEM)을 이용하여 자계회로 방정식과 기계적인 운동 방정식을 이용하여 프로그램을 직접 구현하였다. 본 실험은 DC 전압원으로 이루어졌으나 영구자석과 코일에서 발생하는 자계의 변화에 의한



(a) 자계 분포

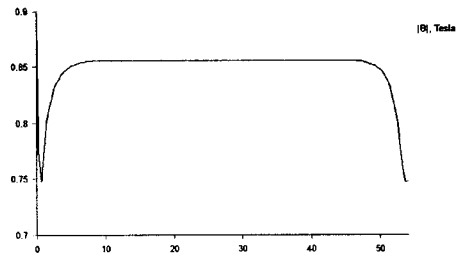


(b) 기본 구조(표시부분 확대)

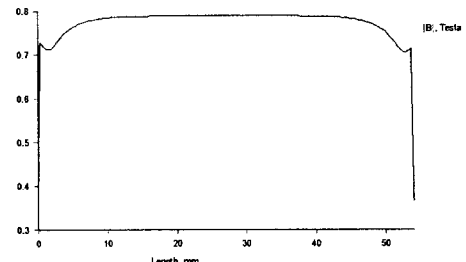


(c) 제안된 구조(표시부분 확대)

그림 2. 자계 분포



(a) 기본 구조



(b) 제안된 구조

그림 3. 가동자와 영구자석 사이의 자속 밀도

역기전압이 크게 발생하고, 전압원에 의한 전류가 정상 상태 도달 전에 동작이 끝나게 되므로 하므로 정상상태가 아닌 과도상태 해석을 해야 하고 자계 특성 또한 선형이 아닌 비선형 해석을 해야 한다. 일정한 시간 간격에 대한 자계와 인덕턴스변화로 인해 전류가 변화하게 되고, 그 전류에 여자된 자계의 힘과 가속도에 의해 가동자의 위치, 속도 등을 구할 수 있다.

2.2.1 지배방정식

맥스웰 방정식으로로부터 자기 벡터퍼텐셜을 이용하여 FEM을 통한 자계해석을 수행한다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 + \vec{J}_e, \quad \vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (1)$$

$$\vec{B} = \nabla \times A \quad (2)$$

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

식 (1),(2),(3)을 이용하여 벡터퍼텐셜을 이용하여 나타내면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

자계회로 방정식은 가동자가 움직이기 전과 가동자가 움직이는 동안에 다르게 표현된다. 전류인가 후 전류에 의해 발생하는 자계의 힘이 영구자석이 반대로 작용하는 힘과 평형을 이루기 전에는 가동자가 움직이지 않으므로 전류에 의한 자계변화만이 발생하게 된다.

$$V = (I_0 + di) + N \left(\frac{\partial \Phi}{\partial i} \right) \left(\frac{di}{dt} \right) \quad (5)$$

가동자가 동작하게 되면, 가동자의 위치에 따른 자속 변화를 고려해 주어야 한다. 이 식으로 인해 자속변화에

다른 전류 변화를 구할 수 있다.

$$V = (I_0 + di) + N \left(\frac{\partial \phi}{\partial i} \right) \left(\frac{di}{dt} \right) + N \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (6)$$

자계에서 발생하는 힘은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{mag} = - \frac{\phi^2}{2\mu_0 A_g} \quad (7)$$

기계적인 운동방정식 또한 접점간극 구간에서 압점력이 발생하는 구간에서는 압축력을 일으키는 기계적 장치 부분(보통 스프링을 이용)을 감안해 주어야 한다. 이는 일반적인 코일스프링으로 이루어져 있을 경우, 스프링 상수를 이용하여 kx 와 같이 표현할 수 있고, 접시 스프링과 같은 경우 압축력이 스프링의 변위에 관계없이 일정한 특성을 지니므로, 스프링 상수 K 와 같이 나타낼 수 있다.

$$M \left(\frac{d^2 z}{dt^2} + g \right) = F^{magnetic} + F^{coil} + K \quad (8)$$

운동 방정식으로부터 가동자의 위치, 속도 그리고 변위를 구할 수 있다.

2.2.2 동작특성 분석 및 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 12kV/20kA급 진공차단기에 제안된 PMA를 사용했을 경우 나타나는 투입 동작 시뮬레이션 결과를 기존 모델에 대한 데이터와 비교하였다. 먼저 기존 모델의 시뮬레이션이 실제 실험 데이터와 유사함을 그림 4에서 검증할 수 있다. 그림 5, 6, 7은 각각 전류, 가동자의 변위, 힘의 변화에 대한 그래프이다. 접점간극은 12[mm]이고 총 압점력은 3상 일괄동작에서 6762[N]이며, 조작기가 감당해야 할 홀딩력은 총 압점력의 20%보다 큰 8115[N]을 지나도록 설계해야 한다. 여기서는 1.67의 비율로 레버를 이용하여 조작기의 변위길이를 20[mm]로 설계하였다. 기존 모델에서 가동자와 영구자석 사이의 마찰력은 600[N]이며, 제안된 모델의 부상 측 마찰력은 50[N]으로 설정하였다.

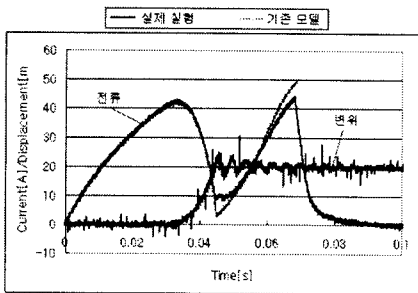


그림 4. 기존 모델 시뮬레이션과 실험 데이터 비교

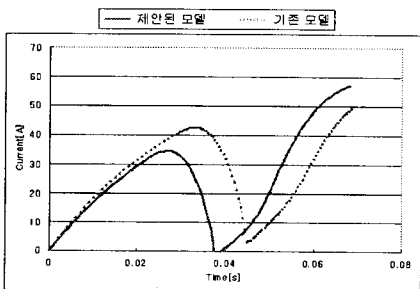


그림 5. 시간에 따른 전류 변화

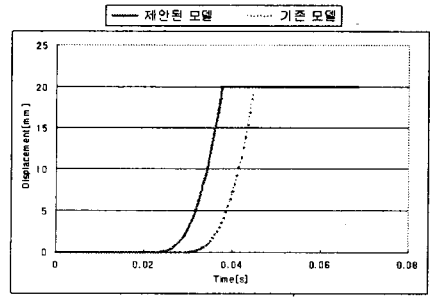


그림 6. 시간에 따른 가동자 변위

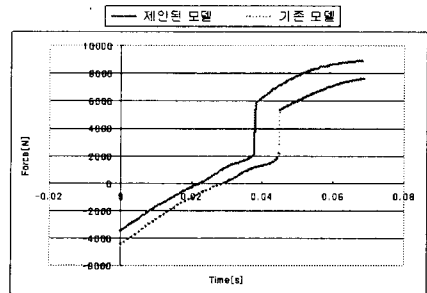


그림 7. 시간에 따른 가동자가 받는 힘

제안된 PMA 모델의 속도 특성은, 동작 변위에서 처음과 끝의 각각 2[mm]를 제외한 16[mm](전체 변위의 80%) 구간의 평균 속도가 1.78[m/s]를 보여 기존 모델의 2[m/s]를 능가함을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 베어링 부상을 적용한 PMA 모델을 제안하고, 그 동작 특성을 해석하여 기존 모델과 비교함으로써 진공차단기에 대한 진보적 구동 메커니즘으로의 적용가능성에 대해 나타내었다. 제안된 PMA는 가동자와 영구자석 사이의 마찰을 제거하여 진공차단기의 적용에 대한 향상된 성능을 나타냄과 동시에 기계적 손상 요인을 줄여 견고성과 안정성을 높였다. 진공차단기의 우수한 성능을 보다 높은 등급의 차단용량에 적용하려는 연구가 활발해지고 있으므로, 그 조건을 만족하는 PMA의 적용가능성에 대한 연구 또한 활발해질 것이다. 이 논문이 보다 우수한 차단 성능의 개발과, 유지보수 비용 절감 및 차단기 수명을 연장시키는 연구에 도움이 될 수 있기를 바란다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jong-Ho, Kang and Hyun-Kyo, Jung, "Development and Characteristic Analysis of New type Actuator, Electro Magnetic driven Force Actuator applicable to High Voltage Circuit Breaker" The Fifth International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, 25-28 September 2005, pp. 383~386.
- [2] Jong-Ho, Kang and Hyun-Kyo, Jung, "Dynamic Behavior Analysis of Permanent Magnetic Actuator in Vacuum Circuit Breaker" The Seventh International Conference on Electrical Machines and Systems, 2004, pp.256~259.
- [3] B.A.R. Mckean and Dr. Reuber, "MAGNETS & VACUUM-THE PERFECT MATCH," Trends in Distribution Switchgear, 10-12 November 1998, Conference Publication No.459.