

고압 진공차단기에 적용 가능한 PMA의 제안 및 동작 특성 해석

신동규, 강중호, 배재운, 정현교
서울대학교

Proposal and Dynamic Analysis of Permanent Magnetic Actuator for High-Voltage Vacuum Breaker

Dong-Kyu Shin, Jong-Ho Kang, Chea-Yoon Bae, and Hyun-Kyo Jung
Seoul National University

Abstract - PMA(Permanent Magnetic Actuator)는 기존의 유압식, 공압식 또는 스프링 조작기에 비해 신뢰성과 내구성이 뛰어나며, 유지·보수의 비용이 적고, 전류의 ON/OFF로 조작기를 쉽게 제어 할 수 있다. 그래서 최근 중저압 진공 차단기에 많이 사용되고 있다. 그러나 상대적으로 점점 간극이 길고, 압점력이 큰 고압 진공 차단기에는 기존의 PMA(Permanent Magnetic Actuator)가 적합하지 않다. 고압 진공 차단기에 PMA를 적용시키기 위해서는 새로운 형상 설계가 불가피한데, 본 논문에서는 새로운 형태의 PMA(Permanent Magnetic Actuator)를 제안하고 그것의 동작 특성 해석을 통하여 사용 가능성을 검증하고자 한다.

1. 서 론

진공 차단기는 성능이 뛰어나고, 높은 신뢰성과 안전성을 가진다. 그래서 최근은 기존의 air나 oil 차단기를 대체하여 중저압 분야에서 많이 사용하고 있다. air나 oil을 절연매체로 사용하는 차단기는 많은 부품으로 이루어져 제작 및 유지·보수의 비용이 많이 들고, 절연매체의 누설 위험이 있으나, 진공을 이용한 차단기는 그 구조가 간단하여 제작 및 유지 보수 비용이 저렴하고, 위험성도 거의 없다.

진공 차단기는 짧은 점점 간극을 가지고, 투입 상태에서 큰 힘을 필요로 하는데, 이는 조작 거리가 짧고, 홀딩력이 큰 PMA와 이상적인 조화를 이룬다. 그래서 중저압 분야에서는 스프링이나 유압, 공압 조작기 대신 PMA를 적용한 진공차단기를 주로 사용하고 있다[1].

고압 진공 차단기는 중저압 진공 차단기에 비해 점점 간극이 길고, 압점력이 크다. 예를 들어 38kV/31.5kA급 진공차단기는 12kV/20kA급 보다 압점력과 점점 간극이 2배 이상이다. PMA가 고압 진공 차단기에 적용되기 위해서는 긴 조작거리와 압점력을 극복하는 큰 홀딩력을 낼 수 있어야 한다. PMA의 기본적인 특성은 짧은 조작 간극에 큰 힘과 빠른 속도를 가지는 것인데 긴 조작 간극과 큰 홀딩력을 요구하는 고압 진공 차단기에 적용하기 위해서는 새로운 형상 설계가 불가피 하다.

본 논문에서 새로운 형태의 PMA를 제안하고 그 동작 특성 해석을 통해 고압 진공 차단기에 적용 가능성, 안정성 그리고 효율성을 보일 것이며, 구체적으로 38kV/31.5kA급 진공 차단기에 적용될 수 있는 3상 일괄형 PMA를 제시 할 것이다.

2. 본 론

2.1 PMA의 구조 및 동작 원리

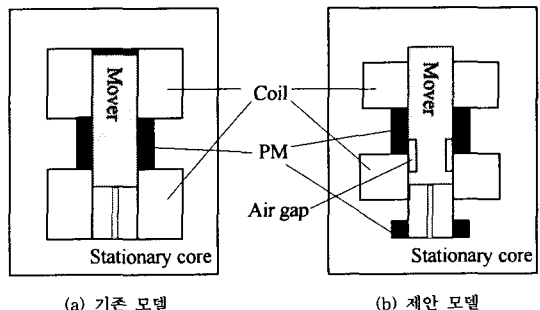
38kV/31.5kA급 진공 차단기는 25mm의 점점 간극과 한 상당 5700N의 압점력을 가진다. 이것을 PMA를 이용하여 3상 일괄형으로 동작시키기 위해서는 3상의 총 압점력이 17100N이므로 PMA는 이 이상의 홀딩력을 가져야 한다. 뿐만 아니라 보통 PMA는 총 압점력의 20%의 여유분을 가지고 홀딩력을 계산하기 때문에

38kV/31.5kA급 진공 차단기에 적용 가능한 PMA는 20520N 이상의 홀딩력을 가져야 한다. 이상은 레버 (lever) 비를 1:1로 고려한 것이고 이 비를 1:2로 한다면 PMA의 조작간극은 50mm이고, 홀딩력은 10260N 이상을 가져면 된다.

레버 비를 1:2로 하는 PMA를 38kV/31.5kA에 적용시키기 위해서는 10260N 이상의 홀딩력과 50mm의 조작간극을 가져야하는데, 기존의 PMA 구조를 사용한다면 10260N 이상의 홀딩력을 내기 위해 여러 개의 PMA를 병렬로 연결하거나, PMA의 영구자석과 철심 및 가동자가 극히 커져야 한다. 그리고 조작간극이 길기 때문에 코일에 투입되는 전류에 의한 자계 경로가 길다. 자속 밀도는 공극길이의 제공에 반비례하기 때문에 가동자가 움직일 만큼의 힘을 얻기 위해서는 전류 여자 시간이 길어지게 된다. 홀딩력과 조작간극, 그리고 전류 여자 시간을 고려하면, 기존의 PMA를 38kV/31.5kA급에 진공 차단기에 3상 일괄형으로 사용하기에는 무리가 있다. 그래서 본 논문에서는 웅덩이 모양(basin shape)의 코일 영역과 보조 영구자석, 그리고 가동자의 형태 변화를 통하여 38kV/31.5kA급 진공 차단기에 적용될 수 있는 PMA를 제안하고 있다.

2.1.1 PMA의 구조

PMA는 크게 가동자와 철심, 개방 및 투입 코일 그리고 영구자석으로 이루어져 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 기존의 PMA는 한 쌍의 영구자석과 넓은 코일 영역으로 이루어져 있으나, 새로운 형태의 PMA는 두 쌍의 영구자석과 웅덩이 모양(basin shape)의 코일 영역, 그리고 가동자에 공극이 추가되었다. 투입측 철심 끝부분에 보조 영구자석을 추가함으로써, 투입 상태에서 홀딩력을 증가시킨다. 코일 영역을 웅덩이 모양으로 만듦으로써 투입시 코일 전류에 의한 자계 경로를 짧게하여 전류 여자 시간을 단축시킨다. 가동자에 공극을 추가한 것은 투입 상태에서 주 영구자석의 자속이 웅덩이 모양의 코일 영역으로 인해 누설되는 것을 막아 홀딩력을 증가시키기 위한 것이다. 개방측 코일 영역을 웅덩이 모양으로 함으로써 차폐판을 달지 않고 개방 상태에서의 홀딩력을 적절한 크기로 조절할 수 있다.



(a) 기존 모델

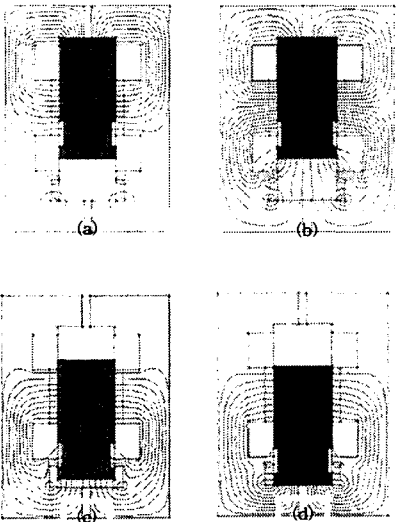
(b) 제안 모델

그림 1. PMA 기존 모델과 새로운 형태의 모델

기존의 PMA를 38kV/31.5kA급 진공 차단기에 적용하기 위해서는 그 체적이 극히 크거나, 여러 개의 PMA를 병렬로 연결해서 사용해야 하지만, 새로운 형태의 PMA는 12kV/20kA급 진공 차단기에 사용되는 PMA에 비해 약 40% 정도 체적을 늘임으로서 38kV/31.5kA급 진공 차단기에 삼상 일괄의 조작 성능을 낼 수 있다.

2.1.2 동작원리

그림 2는 새로운 PMA의 동작에 따른 자기력선 분포를 나타낸 것이다. PMA는 외부 에너지의 유입 없이 영구자석(PM)에 의해서 개방 또는 투입 상태를 유지할 수 있는데, 그림 2(a)는 개방 상태에서 자기력선을 나타낸다. 그림 2(a)에서 개방 코일 영역이 웅덩이 모양(basin shape)으로 되어 있어서 철심의 좌우 끝부분에서 자기 누설이 일어남을 볼 수 있는데, 이는 차폐판을 이용하지 않고 개방 상태에서 홀딩력을 적절히 조절할 수 있음을 보여준다. 개방 상태에서는 압전력이 작용하지 않기 때문에 큰 홀딩력을 가질 필요가 없다. 오히려 홀딩력이 크면 투입 코일의 전류 여자 시간이 길어 지기 때문에 동작 특성이 나빠질 수 있다. 그림 2(b)는 투입 코일에 전류가 인가 된 후 가동자가 움직이기 직전의 모습을 나타낸 것이다. 전류에 의한 자계가 보조 영구자석과 투입 코일 영역 사이의 철심으로 흐름을 볼 수 있다. 자계 경로가 짧아짐으로 인해 가동자가 움직일 수 있는 힘을 내기까지 전류 여자 시간이 단축된다. 그림 2(c)는 가동자가 40mm 움직이고 압전력이 작용하기 시작하는 상태의 그림이다. 가동자 좌우에 공극이 있어서 자계가 보조 영구자석과 투입 코일 영역 사이로 많이 흐르지 않음을 볼 수 있다. 자계가 투입측 끝부분으로 많이 흐름으로 인해서 투입 방향으로 큰 힘을 낼 수 있다. 그림 2(d)는 투입 상태에서의 자기력선 분포를 나타낸 것인데, 주 영구자석의 의한 자계와 보조 영구자석에 의한 자계가 합해짐을 볼 수 있다. 이는 투입 상태에서 주 영구자석에 의한 힘에 보조 영구자석에 의한 힘이 합해져서 큰 홀딩력을 낼 수 있음을 보여준다.



(a) 개방 상태에서의 자기력선 분포
(b) 투입 코일에 전류 인가 후 가동자가 움직이기 직전의 자기력선 분포
(c) 압전력이 작용하기 시작하는 순간의 자기력선 분포
(d) 투입 상태에서의 자기력선 분포

그림 2. PMA 동작에 따른 자기력선 분포

2.2 동작 특성 해석

본 논문에서는 유한요소법에 의한 결과를 전기 및 자기 회로 방정식과 기계적인 운동 방정식에 적용하여 PMA의 동작 특성을 보이고 있다. 전기 및 자기 회로 방정식은 PMA의 전원이 커패시터로 이루어져 있기 때문에 커패시터에서의 전압 강하와 개방 및 투입 코일에서의 코일저항에 의한 전압강하 그리고 코일에 유기되는 역기전력을 고려하고 있다. 기계적인 운동 방정식은 영구자석과 개방 및 투입 코일에 인가되는 전류에 의해 가동자가 받는 힘, 가동자의 질량 그리고 가속도를 고려하고 있다. 특히 압전력이 작용하는 구간에서는 가동자가 받는 힘은 영구자석과 전류에 의한 자계로부터의 힘 그리고 압전력으로 구성된다.

2.2.1 지배 방정식

해석 영역에 대한 지배 방정식을 도출하기 위한 맥스웰 방정식 및 보조 방정식은 다음과 같다.

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

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

$$\vec{B} = \nabla \times A \quad (3)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) - \frac{1}{\mu_r} M_r \quad (4)$$

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.

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

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_0 + J_e + \nabla \times \frac{1}{\mu_r} M_r \quad (5)$$

전기 및 자기 회로 방정식은 가동자가 움직이기 전과 움직이는 동안에 다르게 표현된다. 전류에 의한 자계가 발생하는 힘이 영구 자석에 의한 힘보다 작은 경우 가동자가 움직이지 않으므로, 이 때에는 전류에 의한 자속 변화만을 고려하여 다음과 같은 방정식을 만들 수 있다.

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

코일에 전류를 인가하고 난 후부터 시간이 지나면서 전류가 증가하는데, 특정 전류 이상이 되면 전류에 의한 자계가 발생하는 힘이 영구 자석의 의한 힘보다 커지게 되어 가동자가 움직이기 시작한다. 가동자가 움직이는 동안에 전기 및 자기 회로 방정식은 전류에 의한 자속 변화 뿐 아니라, 가동자의 위치에 따른 자속 변화를 함께 고려해 주어야 한다.

$$V = (I_0 + di) + N \left(\frac{\partial \phi}{\partial i} \right) \left(\frac{di}{dt} \right) + N \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (7)$$

운동 방정식은 가동자가 움직이는 동안의 가동자에 미치는 힘과 질량 그리고 가속도로 표현되는데, 이는 압전력이 작용하지 않는 구간과 작용하는 구간으로 구분지어 나타내어야 한다.

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

$$M \left(\frac{d^2 z}{dt^2} + g \right) = F^{magnetic} + F^{coil} + K \quad (9)$$

식 (8)은 압점력이 작용하지 않는 구간에서의 운동 방정식이고, 식 (9)는 압점력이 작용하는 구간에서의 운동 방정식이다. 여기서 K 는 압점력을 나타내는데, 압점력을 일으키는 기계적 장치가 코일 스프링인 경우에는 Kx 로 표현할 수 있고, 접시 스프링의 경우에는 상수 K 로 나타낼 수 있다.

전기 및 자기 회로 방정식을 통해서 코일에 인가되는 전류, 전압 값을 얻을 수 있고 기계적인 운동 방정식을 통해서 가동자의 변위, 속도 값을 구할 수 있다.

2.2.2 해석 결과

본 논문에서는 38kV/31.5kA급 진공 차단기에 삼상 일팔의 조작 성능을 낼 수 있는 PMA를 적용시켜 접점을 닫고 동작 특성 해석을 수행하였다.

다음 그림들은 120V 전원 전압으로 투입시 기존 모델과 제안 모델의 동작 특성 해석 결과를 비교한 것인데, 기존 모델은 약 80ms 동안 동작을 하고, 제안 모델은 그 1/2인 약 40ms 동안 모든 동작을 마침을 볼 수 있다. 단 기존 모델은 제안 모델과 같은 홀딩력을 내기 위해 체적이 제안 모델에 비해 20%정도 더 크다.

그림 3은 시간에 따른 가동자의 변위를 나타낸 것으로서, 기존 모델은 전류를 인가한지 약 50ms를 지나서 가동자가 움직이기 시작하고, 약 80ms에 동작이 완료됨을 볼 수 있지만, 제안 모델은 약 25ms부터 가동자가 움직여서 약 40ms에 동작이 끝남을 볼 수 있다.

그림 4는 시간에 따른 전류의 변화를 나타낸 것인데, 제안 모델은 웅덩이 모양의 코일 영역이 짧은 자계 경로로 만들기 때문에 기존 모델과 비교하여 짧은 전류 여자 시간과 낮은 전류 값에서 가동자가 움직이는 것을 볼 수 있다.

그림 5와 6은 시간에 따른 가동자의 속도와 가동자가 받는 힘을 보여주고 있는데, 가동자가 처음 40mm를 움직이고 나서 압점력이 작용하는데, 그 때문에 속도와 힘이 작아짐을 볼 수 있다.

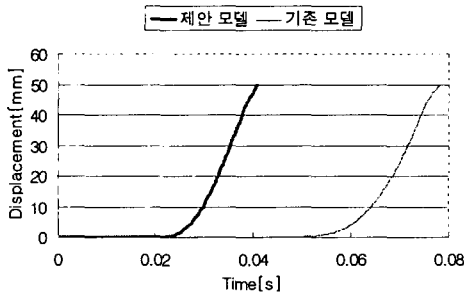


그림 3. 시간에 따른 가동자의 변위

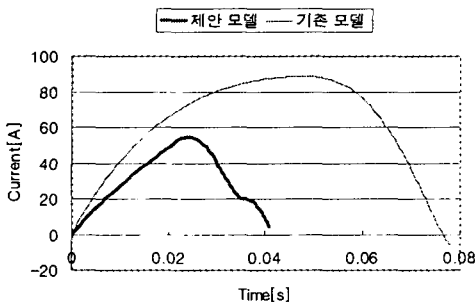


그림 4. 시간에 따른 전류의 변화

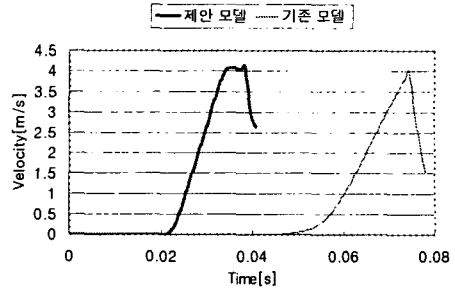


그림 5. 시간에 따른 가동자의 속도 변화

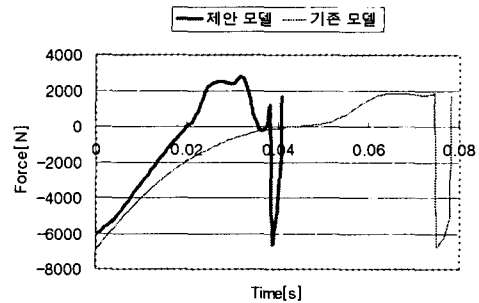


그림 6. 시간에 따라 가동자가 받는 힘

3. 결 론

본 논문에서는 38kV/31.5kA급 진공 차단기에 적용 가능한 새로운 형태의 PMA를 제안하고 그것의 동작 특성 해석을 통해 적용 가능성을 검증해 보았다. 새로운 형태의 PMA는 웅덩이 모양의 코일 영역과 보조 영구자석, 그리고 가동자에 공극을 가지는데, 이렇게 함으로써 같은 체적의 PMA에 비해 약 20% 더 큰 홀딩력을 가지고 동작 특성에서도 좋은 결과를 보여 주었다. 본 논문에서 제안한 새로운 형태의 PMA는 38kV/31.5kA급 뿐 아니라 보다 더 큰 용량의 진공 차단기에 조작기로서 좋은 성능을 낼 수 있는 가능성을 제시하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] B A R Mckean, Dr C Reuber, "MAGNETS & VACUUM-THE PERFECT MATCH", *IEE Trans in Distribution Switchgear*, No.459, pp.73-78, November, 1998.
- [2] Ma Shaohua, Wang Jimei, "Research and Design of Permanent Magnetic Actuator for High Voltage Vacuum Circuit Breaker", *International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, pp.487-490, 2002