

## 36kV급 진공차단기에 적용 가능한 PMA(영구자석형 조작기) 연구 및 동작특성 해석

강중호, 신동규, 배채윤, 정현교  
 서울대학교 전기,컴퓨터공학부

### Research and Analysis of Dynamic Behavior Permanent Magnetic Actuator applicable to 38kV Vacuum Circuit Breaker

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

**Abstract** - This paper formulates the principle of the permanent magnetic actuator (PMA) and its dynamic characteristic calculation applicable to High Voltage Vacuum Interrupter (38kV/31.5kA). The new type of PMA is need to apply to High Voltage Vacuum Interrupter for large stroke length and contact force at interrupter. Consequently this paper describes the ideal matching of the new type of PMA mechanism with the characteristics required to operate successfully, reliably and efficiently a High Voltage Vacuum Interrupter.

#### 1. 서 론

보통 중저압용 차단기에는 주로 air, oil, SF<sub>6</sub> 그리고 진공을 이용해왔다. 요즘은 air, oil 차단기는 누설과 제조비용 부담, 그리고 많은 부품들로 인해 거의 사용되지 않고, 우수한 절연 특성을 지니는 SF<sub>6</sub> 절연가스와 진공을 이용한 차단기가 주로 사용되어진다. 최근에는 고압이나 초고압에서는 SF<sub>6</sub> 가스를 절연매체로 이용한 차단기가, 중저압에서는 진공을 이용한 차단기가 각광을 받으며 이용되고 있다. 특히 진공차단기는 상대적으로 짧은 접점간극과 큰 압점력을 가지는 특성을 지니고 있으므로, 영구자석과 코일에서 발생하는 자계의 힘으로 동작하는 PMA와의 이상적인 조화로 많은 곳에서 활발한 연구가 이루어지고 있다[1].

이미 PMA를 12kV/20kA급 진공차단기에 적용하여 우수한 동작특성, 안정성 그리고 효율성을 나타낸 바 있으며, 이를 보완 개발하여 보다 높은 고압진공 차단기에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 38kV/31.5kA급에서의 진공 차단기는 12kV/20kA급 진공 차단기에 비해 압점력과 접점간극이 2배 이상 커진다. PMA의 기본적인 특성은 상대적으로 짧은 공극거리에서 큰 힘과 빠른 속도를 가지는 것이므로, 큰 압점력과 큰 접점간극을 요구하는 고압에 적용하기 위해서는 새로운 형태(Basin Shape)의 PMA 설계가 필수적이다[2]. 본 논문에서는 38kV/31.5kA급 진공 차단기에 적용될 수 있는 PMA에 대한 새로운 형태의 PMA모형을 제시하고 그 동작특성을 통해 고압진공차단기에서의 적용가능성, 안정성 그리고 효율성을 나타낼 것이다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 구조 및 동작원리

###### 2.1.1 PMA 압점력과 조작길이에 따른 개선된 구조

차단기의 조작기로서 성공적인 역할을 하기 위해서는 아주 짧은 차단시간 이내에 접점의 압점력을 감당할 수 있는 충분한 힘과 빠른 속도로 동작을 마쳐야 한다. 38kV/31.5kA급 진공차단기에서는 압점력이 570kg(1EA)

이고 25mm의 접점 간극을 가진다. PMA를 이용하여 3상 일괄형으로 동작하려면 PMA의 동작이 3상 총 압점력이 16700N이상의 힘을 지녀야만 동작이 가능하다. 그리고 PMA는 압점력을 감당하여 접점상태를 유지하려는 홀딩력이 압점력의 20%가 큰 20000N 가까운 큰 힘이 필요하게 된다. PMA에서 가장 큰 장점 중 하나는 외부의 에너지(기계적인 장치)없이 영구자석의 힘으로 접점상태를 유지시킬 수 있는 것이므로, 이러한 장점을 유지하려면 순수 영구자석의 힘만으로 20000N에 가까운 힘을 가지도록 해야 한다. PMA가 접점간극과 같은 조작간극을 가질 경우, 20000N을 홀딩력으로 전적으로 감당해야 한다. 이 경우 조작기의 영구자석의 크기가 커지고 자속밀도에 의한 포화가 되지 않도록 철심이 비대해져야 하므로 PMA 자체가 아주 커지게 되어 제조비용이나 운송상에서 어려움이 발생하게 된다. 그러므로 여러개의 PMA를 병렬로 연결하거나 (12kV에서 적용되는 PMA 4개 이상) 레버(Lever)를 이용하여 홀딩력을 분산시켜 PMA가 감당해야 하는 압점력과 홀딩력을 줄일 수 있다. 전자는 제조비용과 각 PMA에 대한 독립적인 전압원과 거기에 따르는 부품들로 인해 조작부가 커지고 복잡해지게 되므로 가능한 PMA의 병렬연결 수를 줄일 필요가 있다. 레버를 이용할 경우 상대적으로 감당해야 할 힘이 작아지는 장점이 있지만, 상대적으로 PMA에서의 조작간극이 길어지게 된다. 자계의 힘으로 동작하는 PMA에서 자속밀도는 공극길이의 제곱에 반비례 하므로 조작간극이 길어지게 되면 그 힘은 현저히 줄어들게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 다단계 코일 또는 보조영구자석을 이용하거나 또는 간단하게 철심에 비자성체를 이용하여 철심에서의 자계가 가동자와 보다 가까이에서 작용하도록 하는 새로운 형태의 PMA가 요구된다. 본 논문에서는 웅덩이 모양(Basin Shape)의 코일 형태와 보조 영구자석을 이용한 새로운 형태의 PMA 구조와 동작특성을 나타낼 것이다.

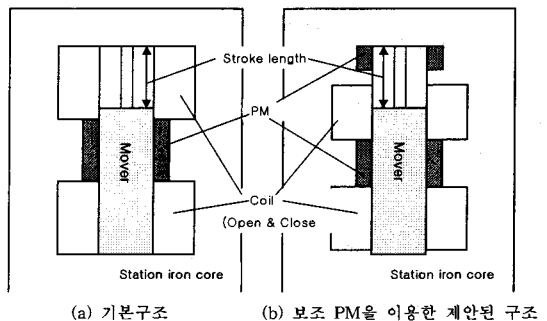
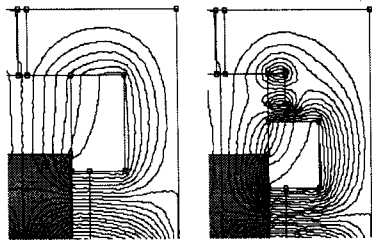


그림 1. PMA 기본 구조와 새로운 형태의 구조

### 2.1.1 동작원리

PMA는 영구자석(PM)에 의해 외부 에너지 유입없이 조작기의 상태를 유지할 수 있다. 이는 접점(VI)과 연결되어 개방(Opening)이나 투입(Closing) 상태를 유지할 수 있는 홀딩력으로 작용하게 된다. 특히 진공차단기에서는 아주 큰 압력으로 접점상태를 유지하게 되므로 조작기 홀딩력은 이 압력보다 20%정도 더 큰 힘으로 작용하게 된다. PMA를 동작시킬 때는 코일에 전류를 인가시켜 자계를 발생시키고 코일에서 발생한 자계의 힘이 영구자석이 홀딩력으로 작용하는 힘보다 크게 되면 가동자가 움직이게 된다. 가동자가 반대쪽에 가까워질수록 영구자석의 자계 또한 전류에 의한 자계와 같은 방향으로 작용하게 되어 더 큰 힘으로 동작하여 빠른 속도를 이끌어 낼 수 있게 된다. 가동자의 동작이 끝나게 되면 코일에 전류를 끊게 되고 이번에는 영구자석이 반대쪽으로 작용하여 그 상태를 유지하게 된다. 그림 2(a)를 보면, 38kV급 진공차단기에 적용되는 PMA는 상대적으로 동작거리(Stroke length)가 길어지므로 기본 모델의 경우 자계의 힘이 상대적으로 약해져서 빠른 동작을 기대하기가 힘들다.

그림 2(b)에서는 보조 PM과 코일부분 사이에 철심이 있어 발생한 자계가 그 철심으로 지나게 되어 가동자와 상대적으로 가깝게 되어 가동자가 받는 힘이 커지게 되어 같은 조건에서 빨리 동작하게 된다. 이는 기본구조를 가지는 PMA에서는 많은 전류를 흘려주어 더 큰 자계를 발생이 되어야 비로소 가동자가 움직이게 되므로, 전압원이 부득이 커지게 된다. 제안된 구조에서 보조 PM은 투입상태(Closing)에서 홀딩력을 키워주고 접점에서 압접력이 작용하는 구간에서 그 힘을 조작기에 보완해주는 역할을 하게 된다. 보조 PM이 한쪽에만 설치된 이유는 개방시(Opening)에서는 압접력이 해지되어 작용하지 않아 부하 홀딩력이 크게 작용하지 않게 되고 제작상 용이성으로 비대칭형으로 설계가 이루어지게 된다.

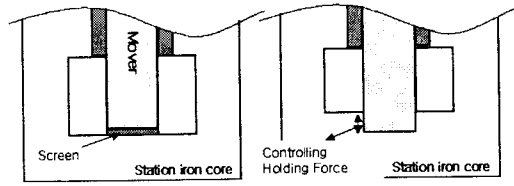


(a) 기본구조에서의 자계분포 (a) 제안된 구조에서의 자계분포

그림 2. 자계분포

개방상태에서의 홀딩력은 가동자의 빠른 동작을 이끌어 내기 위해 외부의 변화(진동이나 충격)에 의해 조작기 상태가 영향을 받지 않을 정도의 최소한의 홀딩력을 가지도록 하여 투입으로의 동작을 빠르게 해주어야 한다. 보통은 차폐판(비자성체)을 개방상태를 유지하는 가동자의 끝에 삽입하여 임의로 공극을 크게 해주어 홀딩력을 조절하도록 한다. 하지만 이 차폐판은 조작기의 동작이 이루어지게 되면 그 충격으로 변형을 일으켜 수천 번 동작하게 되는 조작기의 성능을 저하시킬 수 있다. 본 제안된 모델에서는 이러한 차폐판을 사용하지 않고 코일 부분이 철심쪽으로 들어가는 형태를 지니도록 하여 홀딩력을 조절할 수 있도록 하고 마찬가지로 동작시에도 상대적인 공극을 줄이는 역할을 하도록 하였다.

그림 3에서 차폐판과 제안된 모델을 이용하여 홀딩력을 조절하는 구조를 나타내었다. 그림 3(a)에서는 영구자석에서 발생한 자계는 가동자와 철심에서 수직으로만 발생하게 되어 자계 전체가 아래쪽으로 힘을 미치게 되므로



(a) 차폐판 이용 (b) 제안된 형상

그림 3. 홀딩력 조절

차폐판(Screen)을 이용하여 홀딩력을 조절하게 되고, 그림 3(b)에서는 코일을 철심 안쪽으로 들어가게 하여 영구자석에서 발생하는 자계가 가동자와 철심의 수직 방향 뿐만 아니라 양쪽으로 분산되도록 하여 홀딩력을 조절하도록 설계한 것이다. 코일이 철심 안쪽으로 들어갈수록 홀딩력은 감소하게 되므로 적절한 홀딩력에 대한 설계를 할 수 있다.

### 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 역기전압이 크게 발생하고, 전압원에 의한 전류가 정상상태 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 여자인 자계의 힘과 가속도에 의해 가동자의 위치, 속도 등을 구할 수 있다.

#### 2.2.1 지배방정식

맥스웰 방정식으로부터 자기 벡터퍼텐셜을 이용하여 FEM을 통한 자계해석을 수행한다.

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

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

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

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

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 + \vec{J}_e + \nabla \times \frac{1}{\mu_r} M_r \quad (4)$$

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 자속변화를 고려해 주어야 한다. 이 식으로 인해 자속변화에 따른 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.

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

기계적인 운동방정식 또한 접점간극 구간에서 압접력이 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 압축력이 스프링의 변위에 관계없이 일정한 특성을 지니므로, 스프링 상수  $K$ 와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

### 2.2.2 동작특성 분석 및 시뮬레이션 결과

중저압 진공 차단기에서 각 전압/전류에 따른 기본적인 진공차단기의 접점부의 접점간극 및 압접력 그리고 접점에서의 접점간극 및 투입속도 등을 표 1에 나타내었다.

표 1. 전압/전류 용량에 따른 진공차단기 사양

제품	전압 (kV)	전류 (kA)	압접력 (Kgf)	접점간극 (mm)	접점투입 속도 (m/s)	접점개방 속도 (m/s)
A	12	12.5	150	6.5~7.5	0.9~1.1	1.1~1.3
B	12	20	200	6	0.8	1
C	12	25	250	11	0.6~0.9	1.2~1.5
D	12	31.5	315	11	0.6~0.9	1.2~1.5
E	36	16	120	15	1.5~1.7	1.5~1.7
F	36	25	227	17	1	1.2~1.6
G	36	31.5	315	14	0.8~1.2	1.7~2.0
H	38	31.5	570	25	0.9~1.0	1.5~1.7

본 논문에서는 진공차단기에 H제품을 사용했을 경우, PMA가 나타내는 전류, 가동자의 변위, 속도 및 힘의 변화를 그림 4, 5, 6, 7에 나타냈다. 접점간극이 25mm이고 총 압접력이 16758N이고, 조작기가 감당해야 할 홀딩력은 총 압접력의 20%보다 큰 20110N을 지니도록 설계해야 한다. 여기서는 1:1.5~1.6의 비율로 레버를 이용하여 조작기의 변위길이를 40mm로 설계하고 2개의 PMA 병렬로 연결하여 3상 일괄동작을 일으키도록 하였다.

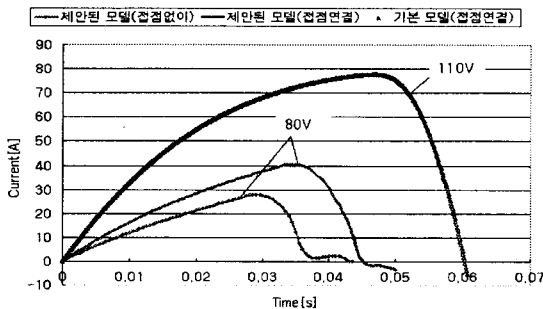


그림 4. 시간에 따른 전류 변화

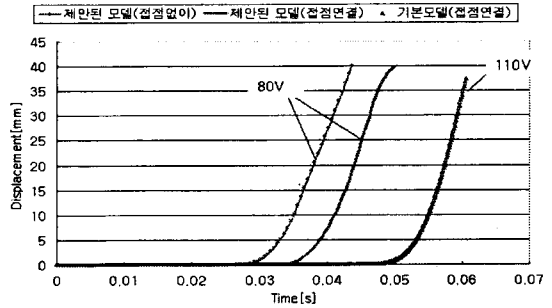


그림 5. 시간에 따른 가동자 변위

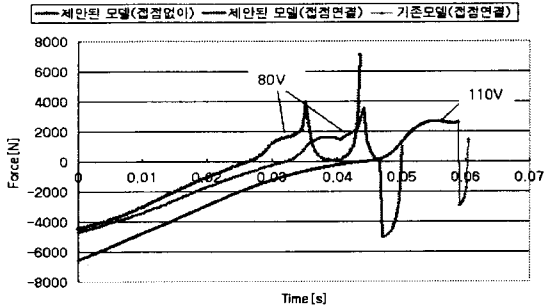


그림 6. 시간에 따른 가동자 속도

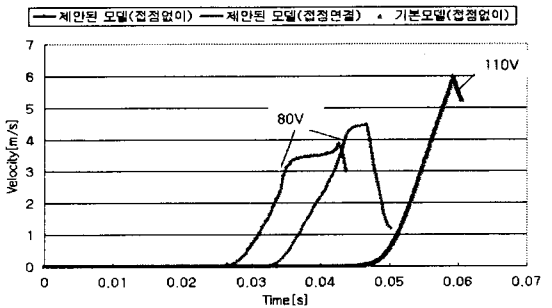


그림 7. 시간에 따른 가동자가 받는 힘

## 3. 결 론

본 논문에서는 38kV/31.5kA에서 적용가능한 PMA 모델에 대해 기존모델과 제안된 모델에 대한 동작특성해석을 통해서 진공차단기에서의 적용가능성에 대해 나타내었다. 제안된 모델에서의 PMA는 전압원 80V에서 진공차단기의 적용에 대한 성공적인 성능을 나타내었다. 진공차단기의 우수한 성능으로 보다 높은 등급의 차단용량에 적용하려는 연구가 활발해지고 있으므로, 그 조건에 만족하는 PMA에 대한 적용가능성에 대한 연구 또한 활발해질 것이다. 이 논문이 보다 차단 성능이 우수하고, 유지보수 비용 절감 및 차단기 수명을 연장시키는 연구에 도움이 될 수 있기를 바란다.

### [참 고 문 헌]

- [1] B A R Mckean, Dr C Reuber, "MAGNETS & VACUUM-TH E PERFECT MATCH", *IEE Trans in Distribution Switch gear*, 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