

## 배전급 차단기용 PMA의 특성 해석

박국남, 한성진  
동아대학교 전기공학과

### Characteristic Analysis of Permanent Magnetic Actuators for Distribution Circuit Breakers

Gook-Nam Park, Sung-Chin Hahn  
Department of Electrical Engineering, Dong-A University

**Abstract** - 차단기는 전력계통에서 고장이 발생한 경우, 고장전류가 퍼져나가는 것을 방지하고 고장전류에 의해 계통에 연결된 다른 기기들이 손상을 입는 것을 방지하는 전력기기이다. 그 중 진공 차단기는 친환경성과 우수한 절연특성으로 배전급 중·저압용 차단기로 널리 사용되고 있다.

차단기는 크게 조작부와 차단부로 구분되는데 진공 차단기의 조작부 메커니즘은 스프링 구동방식과 영구자석형 마그네틱 액츄에이터(PMA)를 사용하여 구동하는 방식으로 나뉜다. 본 논문에서는 진공차단기의 조작부인 영구자석형 마그네틱 액츄에이터(PMA)의 개방·투입 유지력과 동작특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 정밀한 해석을 위해 물질의 비선형성을 고려하였으며, 외부회로와 결합한 전자계 해석을 하였다.

#### 1. 서 론

차단기는 송·배전 계통에서 과전류, 단락 등에 의한 사고 발생시 그에 따른 과급효과를 최소화하기 위한 전력기기이다. 이러한 차단기 종류의 하나인 진공 차단기는 친환경적이며, 우수한 절연특성을 가지고 있다.[1] 차단기는 크게 차단 특성을 갖는 차단부와 동작 특성을 갖는 조작부로 나누는데, 진공 차단기의 차단부는 절연 성능이 우수하고 친환경적인 Vacuum Interrupter를 사용하며, 조작부는 스프링으로 구동되는 기계적 방식과 영구자석과 여자 코일을 이용하여 구동되는 영구자석형 자기 액츄에이터를 이용하는 방식이 있다.[2] 스프링으로 동작하는 방식은 많은 기계적 부품으로 인해 정교한 제작이 요구되며 정기적인 유지보수가 필요하다. 이에 반해 영구자석을 이용하는 PMA는 간단한 구조로 부품수가 감소하여 진공차단기의 축소를 가능하게 하였고, 고신뢰성과 반복성이 뛰어나 유지보수가 거의 필요없다.[3] 또한 개방, 단락상태를 유지할 때 영구자석을 사용함으로써 지속적으로 전류를 흘리지 않아도 된다는 큰 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 개방·투입 유지력, 변위에 따른 힘, 동작시간, 시간에 따른 이동부의 위치 등 PMA의 특성을 3D 유한요소 해석을 통해 나타내었다. 해석의 정확도를 높이기 위해 물질의 비선형 특성을 고려하였으며, 코일은 외부회로와 결합하여 해석을 실시하였다.

#### 2. 유한요소 정식화

##### 2.1 전기회로 방정식

Plunger의 이동은 여자전류에 의해 발생한 자계로 결정된다. 전원전압이 인가되었을 때, 회로에서 발생하는 전압과 전류를 나타내면

$$V = R \cdot I + \sum_{i=1}^N \frac{d\phi_i}{dt} \quad (1)$$

로 나타내어지며  $V$ 는 전원전압,  $R$ 은 코일의 저항,  $I$ 는 여자전류,  $\phi_i$ 는 쇄교자속,  $N$ 은 코일의 턴수를 나타낸다.

##### 2.2 자계 방정식

PMA는 영구자석과 여자코일에서 발생된 자계로 에너지를 공급받기 때문에 동특성을 유한요소법으로 계산하기 위해서는 앞서 언급한 두 가지 요소에 대한 수학적 정립이 필요하다.

먼저 자기벡터퍼텐셜을 정의하면

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

위 식으로 영구자석을 포함하는 지배 방정식을 구하면

$$\frac{1}{\mu_0} (\nabla^2 \times \vec{A}) = \vec{J} + \vec{B}_r \quad (3)$$

$\vec{J}$ 는 인가된 전압에 의한 전류밀도,  $\vec{B}_r$ 은 영구자석에 의한 잔류자속을 나타낸다. 위 식의 해가 유일성을 가지려면 다음의 정자계 구속조건(쿨롱 게이지)을 만족해야 한다.

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (4)$$

#### 2.3 운동 방정식

PMA의 동작특성은 Plunger의 운동방정식을 계산함으로써 구할 수 있다.  $z$  축으로 상·하 운동을 할 경우의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M \frac{d^2 z}{dt^2} = F_{mag} - F_f \quad (5)$$

$M$ 은 Plunger의 질량,  $z$ 는 변위,  $F_{mag}$ 는 Plunger에 작용하는 전자기력,  $F_f$ 는 중력을 포함하는 전체 반발력을 나타낸다.

#### 2.4 전자력 계산

전자력 계산 방법은 크게 맥스웰 스트레스 텐서법과 가상변위법 2가지로 나뉜다. 맥스웰 스트레스 텐서법은 표면 전자력 밀도를 적분하여 전자력을 구하고, 가상변위법은 이동부의 변위에 따른 자계에너지의 미분으로 전자력을 구하는 방법이다. 본 논문에서는 가상변위법을 이용한 3차원 유한요소법으로 전자력을 계산한다.

가상변위법은 에너지를 기본으로 전자력을 계산하는 방법이다. 가상 변위  $z$ 를 고려하였을 때  $z$  방향으로의 전자력  $F$ 는 자계에너지  $W$ 를 미분하는 방법으로 구할 수 있다.

$$F = - \frac{\partial W}{\partial z} \quad (6)$$

선형적인 영역에서의 자계에너지  $W$ 는 다음 식과 같다.

$$W_{mag} = \iiint \frac{1}{2} B \cdot H \, dv \quad (7)$$

Plunger에 작용하는 전자력  $F_{mag}$ 를 구하면,

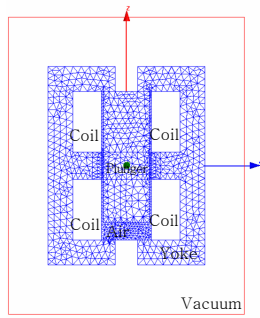
$$F_{mag} = - \frac{\partial}{\partial z} \frac{B^2}{2\mu_0} v \quad (8)$$

$F$ 는 Plunger에 작용하는 힘,  $B$ 는 공극에서의 자속밀도,  $\mu_0$ 는 공기의 투자율,  $v$ 는 Plunger의 체적을 나타낸다.

#### 3. 유한요소 해석

주어진 PMA 모델은 NdFeB계열 영구자석을 사용하였으며, Plunger와 Yoke부분의 재질은 Iron을 사용하였다. 정밀한 해석을 위해 물질의 비선형 특성을 고려하였으며, 외부회로와 결합하여 전자계 해석을 하였다.

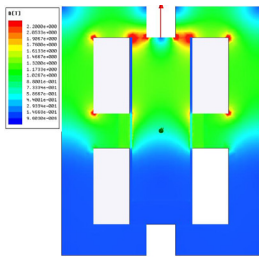
### 3.1 요소분할도



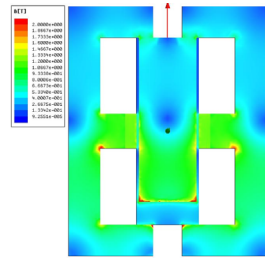
<그림 1> 요소분할도

<그림 1>는 해석대상의 요소분할도를 나타낸다. 해석대상은 진공으로 둘러싸여 있으며 해석대상은 공극과 전압이 인가되는 코일, 그리고 영구 자석, Plunger와 Yoke부분으로 나누어진다. 해석대상은  $x$  축으로 대칭인 모델이므로 자기벡터퍼텐셜은  $A$  는  $x$  성분만을 가진다.

### 3.2 자속밀도분포



<그림 2.1> 영구자석

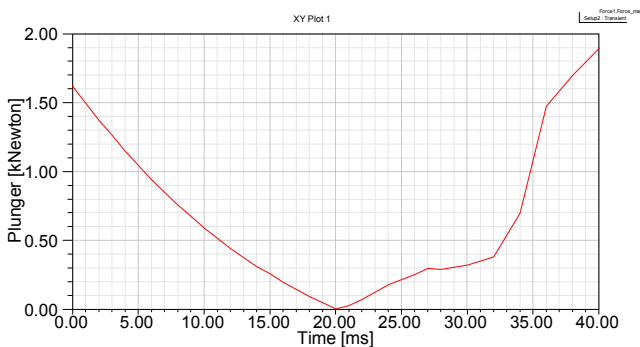


<그림 2.2> 여자전류인가

<그림 2.1>은 영구자석에 의한 자속밀도분포를 나타낸다. 코일에 전류는 인가되지 않았으며, 영구자석에 의해 발생한 자속은 자기저항이 큰 하부보다 상대적으로 자기저항이 작은 상부에 집중되어 있음을 확인할 수 있다. Plunger는 여자전류없이 영구자석에 의해 유지된다.

<그림 2.2>는 하부 코일에 전류를 인가했을 때의 자속밀도분포를 나타낸다. 이 때에는 영구자석에 발생한 자속과 여자된 코일에서 발생한 자속이 더해져 공극이 큰 하부에서도 자속이 순환하는 것을 확인할 수 있다.

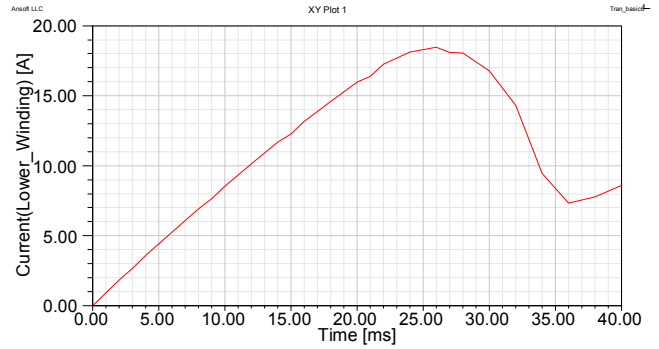
### 3.3 동특성해석



<그림 3> Time Vs. Force

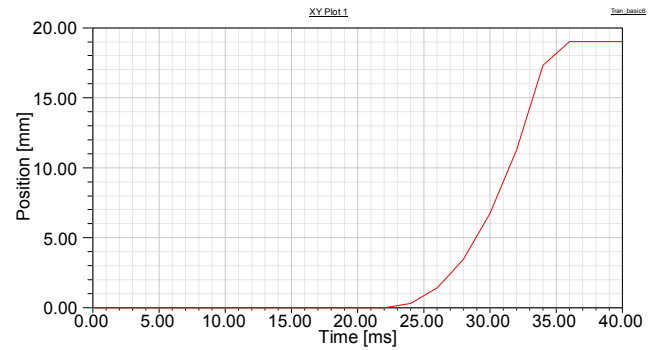
<그림 3>은 Plunger에 작용하는 힘을 나타낸다. 초기 영구자석에서 1618 [N]의 힘으로 유지되며, 20 [ms]에서 영구자석에 의해 발생한 힘을 이겨내고 PMA의 하부로 힘이 작용하는 것을 확인할 수 있다. 34 [ms] 부근에서 힘이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 영구자석에 의한 에너지와 여자코일에서 발생한 에너지가 더해져 작용한다는 것을 알 수 있다. PMA의 설계시 영구자석에 의한 힘을 이겨낼 수 있도록 여자코일의 기자력을 계산하는 것이 PMA의 설계시 중요한 요소임을

알 수 있다.



<그림 4> Time Vs. Current

<그림 4>는 코일에 투입되는 전류 파형을 나타낸 그림이다. 외부회로의 전원전압은 DC 40 [V]이며, 코일에 인가되는 최대전류는 18.5 [A], PMA의 동작완료시간은 36 [ms]로 확인할 수 있다. 마지막 부분에서 전류가 다시 증가하는 것은 Plunger가 변위의 마지막 부분에 정지함으로써 코일에 발생하는 역기전력의 감소로 인한 것을 나타낸다.



<그림 5> Time Vs. Position

VCB 동작시 PMA의 평균 이동속도는 1.5 [m/s] 이상을 만족해야하므로 <그림 5>에서 변위에 따른 시간을 계산해 본 결과, 평균 이동속도는 1.52 [m/s]로 만족하는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 배전급 진공차단기에 사용되는 PMA의 조작부로서의 동특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 먼저, 해석영역의 정의와 각 물질의 비선형성, 외부회로를 이용하여 해석의 정확성을 높였으며, 3D 유한요소법을 이용하여 PMA의 동작특성인 개방·투입 유지력, 변위에 따른 힘, 동작시간, 시간에 따른 이동부의 위치를 나타내었다.

앞서 도출한 결과들을 바탕으로 PMA의 경량화·소형화를 위한 최적 설계 및 PMA의 동작특성의 향상을 통한 진공차단기의 차단성능을 높일 수 있도록 연구를 진행할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 최명준, 석복렬, 김창욱, 최영찬, 박일환, “자기 액츄에이터를 이용한 진공차단기 구동 메카니즘 개발”, 대한전기학회논문지, 8, 381-389, 2003
- [2] 박정홍, 김진기, 김태진, 김귀식, 오연호, 윤일주, 한성진, “중저압 PM-type 재폐로(Recloser) 차단기의 FEM을 통한 조작부 구동 메카니즘 연구”, 대한전기학회 EMECS 추계학술대회 논문집, 1, 107-109, 2003
- [3] Lin Xin, Gao Huijun, Cai Zhiyuan, “Magnetic field calculation and dynamic behavior analyses of the permanent magnetic actuator”, ISDEIV, 2, 532-535, 2000