

One Coil을 이용한 VCB의 PMA 설계

김진철, 김지호, 이향범  
 송실대학교 전기공학과

Design of Permanent Magnetic Actuator for VCB with One Coil

Jin-cheol Kim, Ji-ho Kim, and Hyang-beom Lee  
 Department of Electrical Engineering, Soong-sil University

**Abstract** - In this paper, a new design of permanent magnetic actuator (PMA) for vacuum circuit breaker (VCB) with one coil is proposed. Electromagnetic characteristic analysis is performed numerically using finite element method (FEM) considering the nonlinearity of magnetic core and permanent magnet. The characteristics of proposed PMA with one coil is similar with that of the conventional PMA with two coils. The proposed PMA can simplify the control circuit because of the usage of one coil. Therefore, the reliability of VCB can be improved with the proposed model.

1. 서 론

급속한 산업발달로 인하여 전기에너지의 사용량은 급속도로 증가하고 있다. 이런 막대한 양의 전기에너지를 발전소에서 수용가까지 안정적으로 보내는 전력계통 설비는 아주 중요하다. 전력 계통의 한 쪽에 문제가 발생하면 경우 다른 부분에 대한 영향을 최소화하기 위해서는 빠른 대처가 중요하며, 이를 위해 차단기와 같은 전기기기가 매우 중요한 역할을 한다. 현재 고압용에는 가스차단기, 중·저압용에는 환형 진화적인 진공차단기가 가장 많이 쓰이고 있다. 진공차단기에 관한 연구에는 차단 성능을 향상시킬 수 있는 진공인터럽트의 개발과 동작특성을 향상시킬 수 있는 구동 메커니즘부에 관한 연구로 분류된다.[4]

최근 진공차단기의 구동 메커니즘은 스프링을 기초로 하는 구동방식에서 영구자석을 이용한 구동방식으로 연구가 진행되고 있는 상황이다.[1][2] 자기적으로 동작하는 PMA는 전기적인 신호를 작은 변위의 기계적인 직선 운동으로 변환하는 장치로, 구조가 간단하고 경제적이며, 정밀제어가 가능한 장점이 있다. 또한, 차단기의 반복특성이 우수하고, 고장률이 적기 때문에 신뢰성이 우수한 특징을 갖는다. 이러한 PMA는 2 coil을 이용한 방식에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 1 coil을 이용한 방식에 대한 연구는 미비한 편이다.[2]

본 논문에서는 현재 많은 연구가 진행되고 있는 opening coil과 closing coil을 이용한 방식의 제어회로 간편화를 위하여 한 개의 coil만을 이용한 PMA를 설계하였다. 한 개의 coil을 이용한 PMA의 형상설계를 위해 유한요소법을 이용한 전자기 수치해석을 수행하였다. 전압원 과도상태 해석을 하였으며 코어 및 영구자석에 대한 비선형 특성을 고려하였다. 1 coil을 이용한 PMA의 영구자석 자기회로를 설계하였고, 감자에 대한 대응을 고려한 설계를 하였다. 유한요소법을 이용한 동작특성 계산 프로그램을 작성하여 코일 형태에 따른 동작특성을 비교하였다. 기존의 2 coil 방식과 유사한 동작특성을 나타내는 새로운 형태의 PMA 형상을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 PMA의 특성 해석.

2.1.1 지배방정식

영구자석을 포함한 정자장의 지배방정식은 맥스웰 방정식을 기초로 한다.

$$\nabla \times \vec{H} = J \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \tag{3}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{B}_r \tag{4}$$

식(2)로부터 자기벡터포텐셜 (Magnetic Vector Potential)  $\vec{A}$  를 정의하면

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{5}$$

식(4)과 식(5)를 식(1)에 대입하면 식(6)과 같은 포아손 방정식 형식의 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \left\{ \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A} - \vec{E}_r) \right\} = J \tag{6}$$

여기서,  $\vec{H}$ 는 자기장의 세기(magnetic field intensity),  $J$ 는 전류밀도(current density),  $\vec{B}$ 는 자속밀도(magnetic flux density),  $\vec{B}_r$ 은 잔류자속밀도(remanent magnetic flux density)이다.

외부에서 전원을 공급할 경우, 전압원 방정식을 고려하여야 한다. 외부 회로의 저항과 인덕턴스를 고려하고, 커패시턴스를 무시한 전기적 회로 방정식은 다음과 같다.

$$v = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + \frac{d\lambda}{dt} \tag{7}$$

$V$ 는 인가전압,  $R$ 과  $L$ 은 각각의 회로의 저항 및 인덕턴스,  $\lambda$ 는 코일의 쇠고 자속이며,  $d\lambda/dt$ 는 자기벡터포텐셜  $\vec{A}$  로 표현할 수 있다.

PMA의 전압원 방정식과 특성 방정식의 해석시에는 시간에 대한 미분 형태가 포함되고 있고, 이를 수치적으로 계산하여야 한다. 본 논문에서는 다음과 같은 식을 기초로 한 후퇴차분법( $\beta = 1$ ) (Backward Difference Method)이 적용되었다.

$$3 \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} \right\}^{t+\Delta t} + (1-3) \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} \right\}^t = \frac{A^{t+\Delta t} - A^t}{\Delta t} \tag{8}$$

후퇴차분법을 사용하는 목적은 미지수  $\left\{ A \right\}^{t+\Delta t}$ 를 계산하는 것이고, 수식상 전개되는  $\left\{ \frac{\partial A}{\partial t} \right\}^{t+\Delta t}$ 는 다음과 같이 치환된다.

$$\left\{ \frac{\partial A}{\partial t} \right\}^{t+\Delta t} \cong \frac{A^{t+\Delta t} - A^t}{\Delta t} \tag{9}$$

식 (7)에 식(9) 수식을 적용하면

$$i^{t+\Delta t} = R \cdot i^{t+\Delta t} + L \cdot \frac{i^{t+\Delta t} - i^t}{\Delta t} + \frac{\lambda^{t+\Delta t} - \lambda^t}{\Delta t} \tag{10}$$

식 (10)을  $t + \Delta t$ 항과  $t$ 항으로 분리하면

$$(R + \frac{L}{\Delta t})i^{t+\Delta t} + \frac{1}{\Delta t} \cdot \lambda^{t+\Delta t} = v^{t+\Delta t} + \frac{L}{\Delta t} i^t + \frac{\lambda}{\Delta t} \quad (11)$$

식(11)과 방정식을 얻을 수 있다.[5]

PMA 동작 특성은 코어 내부에서 동작하는 가동자에 운동방정식을 적용하여 해석할 수 있다. 2차원 해석에서 y축을 기준으로 상하운동을 할 경우, 적용되는 방정식은 다음과 같다.

$$F_{mag} = m \frac{d^2x}{dt^2} + J \frac{dy}{dt} + ky \quad (12)$$

여기서  $F_{mag}$ 는 직선운동을 하는 가동자의 총 자기력을 나타내며,  $m$ 은 가동자의 질량 (mass of moving part)이며,  $J$ 와  $k$ 는 각각 마찰계수 (friction coefficient constant)와 등가스프링계수 (stiffness coefficient constant)이다.

식 (12)를 거리와 속도와의 관계로 정리하고 (9)의 수식을 적용하면 다음과 같은 식이 된다.

$$v^{t+\Delta t} = v^t + \frac{F}{m} \Delta t \quad (13)$$

$$x^{t+\Delta t} = x^t + v^{t+\Delta t} \cdot \Delta t \quad (14)$$

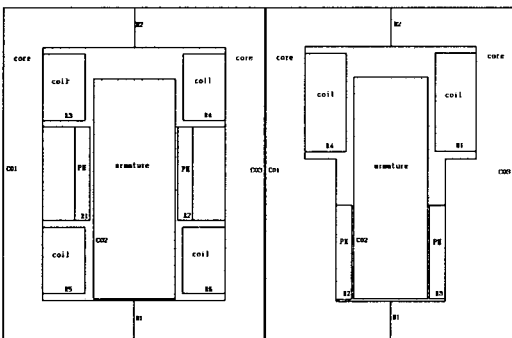
식(11)과 (13), (14)를 통하여 선정된  $\Delta t$ 로 시간변화에 따른 가동자의 이동거리, 속도 및 전류의 크기를 구할 수 있다.

## 2.2 PMA의 형상 설계

그림 1은 본 연구에서 개발하고 있는 1 coil 방식과 기존에 많은 연구가 진행되고 있는 2 coil 방식의 PMA를 설계한 형상이다. PMA의 동작특성을 해석하기 위해 인가한 전원전압은 DC 160V이고, 코일의 저항은 1.94Ω이다. 코일의 인덕턴스는 가동자의 이동범위 내에서 측정된 실험치를 사용하였다. 코일의 인덕턴스는 가동자의 중심부에서 측정하였으며 중심에서 멀어질수록 감소하는 경향을 나타내었다. 제작된 PMA의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 제작된 PMA의 사양

항목		사양	
		2 Coil	1 Coil
가동자	재질	SM45C	SM45C
	질량	2.64[kg]	2.64[kg]
	가동자의 치수	50×50×138[mm <sup>3</sup> ]	50×50×138[mm <sup>3</sup> ]
영구자석	이동거리	20[mm]	20[mm]
	계열	NdFeB	NdFeB
	자속밀도	1.27 [T]	1.27 [T]
코일	자석각수	52×9×50[mm <sup>2</sup> ]	60×9×50[mm <sup>2</sup> ]
	코일 턴수	650 turn	850 turn
	코일직경	1.6[mm]	1.6[mm]
인가전압	DC 160 [V]		



(a) 2 coil 방식 (b) 1 coil 방식  
그림 1. PMA 개발 형상 설계 모델

1 coil 방식은 기존의 방식과는 달리 윗부분에만 코일이 위치해 있다. 또한 가동자의 아랫부분에 영구자석이 위치하고 있다. 가동자의 투입과 복귀상태를 지속시켜 주기 위하여 영구자석의 길이를 기존의 방식보다 더 길게 설계하였다. 자기회로를 구성하기 위한 고정자 부분의 영구자석은 보자력이 큰 희토류 계열의 NdFeB 자석을 사용하였다. 네오디움 계열의 NdFeB 자석을 사용함으로써 영구자석과 자기회로의 크기를 축소할 수 있었다. 영구자석의 감자에 대한 영향을 고려하여 자기회로를 설계하였다. 가동자의 재질은 SM45C를 사용하였으며, 해석결과와 신뢰도를 높이기 위해 영구자석과 코어의 비선형을 고려한 비선형 해석을 하였다.

가동자의 이동에 따른 해석을 원활히 하기 위해서 2차원 비선형 해석을 하기 위한 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램은 코어 및 가동자의 비선형적인 부분을 고려하고 인가전압에 따른 과도상태 해석과 가동자의 동작 특성에 대한 운동방정식을 고려하였다. 개략적인 프로그램에 관한 Flow chart는 그림 2와 같다.

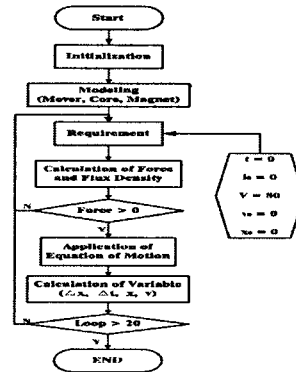


그림 2. 수치해석을 위한 Flow chart

가동자의 이동부분에 대한 해석은 그림 3과 같이 하부에서 상부로 또는 상부에서 하부로 이동할 때의 가동자의 이동거리를 고려하였다. 이 경우 가동자가 1[mm]씩 이동할 때마다 mesh를 해주어야 하는 문제점이 생긴다. 이는 해석시의 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 해석에 필요한 메모리의 용량이 커지는 등의 비효율적인 방법이 될 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 이동거리를 고려한 mesh의 새로운 패턴을 적용하였다. 각각 20개의 step으로 만들어 각 부분이 이동할 때마다 해석을 하며 이동거리가 1[mm]로 수렴하도록 프로그램을 설계하였다. 이는  $\Delta t$ 의 시간을 고려하여 이동할 때마다 오차 범위에 포함되는 값을 얻기 위하여 각 step에서 이동거리가 1[mm]를 찾을 때까지 각 step을 반복적으로 해석하게 된다. 가동자가 1[mm]를 이동하는데 걸리는 시간을 고려하여 트럼시의 전류, 속도 및 가동자의 트럼시 걸리는 힘 등을 계산할 수 있도록 설계하였다.

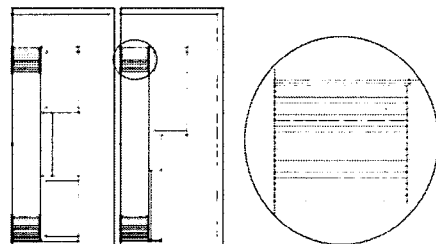
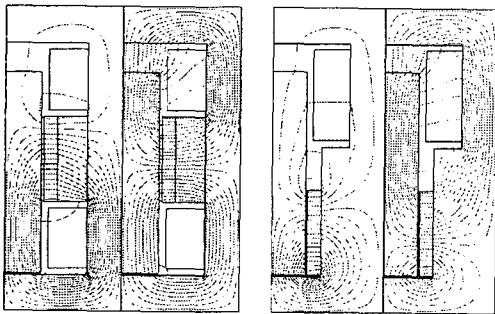


그림 3. 가동자의 이동거리별 해석 방법(확대부)

## 2.3 해석 결과 및 분석

### 2.3.1 PMA의 자속분포

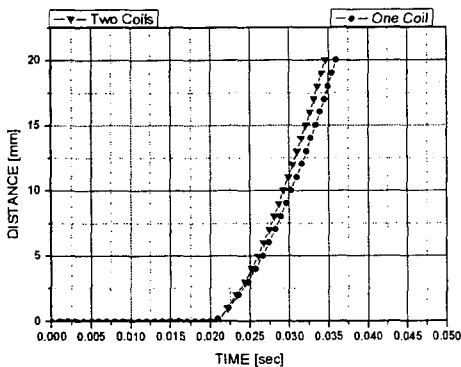
그림 4는 전압 인가 시와 미인가 시 1 coil과 2 coil의 자속분포를 비교한 그림이다. FEM Program으로 2차원 비선형 정자계 해석을 수행하였다. 해석모델이 좌우 대칭이기 때문에 해석시간과 프로그램의 메모리 용량을 고려하여 1/2 모델만을 해석하였다. 전압 미인가 시 영구자석에 의해 발생한 자계의 자속밀도는 가동자의 하부에 집중하며 투입유지력이 발생한다. 전압 인가 시에는 자속이 윗부분에 집중되며 가동자를 끌어올리는 힘이 생기게 된다. 전자기력의 해석 결과는 자속밀도와 비례적으로 나타났으며 1 coil을 이용한 PMA의 투입 및 트립에 의한 힘은 기존의 2 coil 방식과 유사하게 나타났다. 이러한 방법은 투입 및 트립 코일의 기능을 전류의 방향을 바꿔줌으로써 1 coil로 모두 수행할 수 있다.



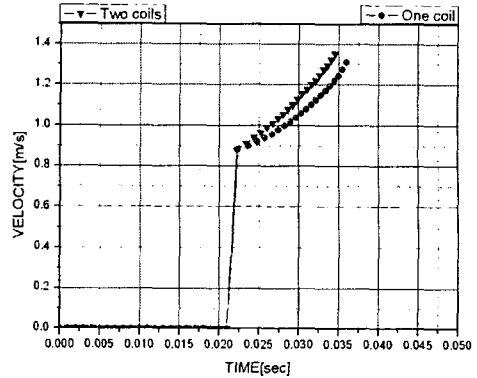
(a) 2 coil 방식 (b) 1 coil 방식  
그림 4. PMA의 자속분포

### 2.3.2 PMA의 특성 해석

1 coil 방식의 동작특성 해석의 타당성을 검증하기 위하여 2 coil 방식의 해석된 결과와 비교 검토하였다. 또한 각각의 방식에서 동작특성 해석의 출력인 가동자의 이동거리와 속도를 비교하여 1 coil 방식의 타당성을 검증하였다. PMA의 동작특성에서 가장 중요한 변수는 PMA의 트립 시 PMA의 코일부에서 나타나는 이동거리와 이동시간이다. 차단기는 3 ~ 8cycle 사이에 동작을 완료해야 하며 이는 구동부의 메커니즘을 결정하는데 중요한 요인이 된다. 아래의 그림 5는 이동시간에 대한 이동거리 및 속도를 나타낸 그래프이다. 그림에서 나타난 바와 같이 1 coil 과 2 coil의 동작특성이 유사한 것을 알 수 있다. 이러한 1 coil 방식을 이용할 경우 2 coil 방식에 비하여 제어회로의 간편화로 구동부의 부품을 줄일 수 있다.



(a) 이동시간에 따른 거리의 변화



(b) 이동거리에 따른 속도의 변화  
그림 5. 코일 형태에 따른 동작특성

## 3. 결 론

본 논문에서는 2 coil을 이용한 VCB의 PMA 제어회로를 단순화시키기 위하여 1 coil을 이용하여 VCB의 PMA를 설계하였다. 특성해석을 위해 2차원 정자계 수치해석을 수행하였다. 코어 및 영구자석의 비선형 특성을 고려하였다. 또한 시간의 변화에 따른 전압원 과도상태 해석을 할 수 있도록 설계하였다. 해석 시간과 프로그램의 메모리의 용량을 고려해 1/2 모델만을 해석하였다. 동작특성계산 프로그램을 작성하여 코일과 영구자석에 배치에 따른 1 coil 방식과 2 coil 방식을 비교·분석하였다. 그 결과 1 coil 방식과 2 coil 방식의 이동거리와 이동시간 및 속도가 비슷한 것을 수치해석 결과 알 수 있었다. 1 coil 구동 방식은 기존의 방식에 비해 제어회로를 반으로 줄일 수 있다. 구동부의 부품을 줄임으로써 유지보수가 필요 없는 구동 메커니즘을 개발할 수 있게 된다. 이는 전력계통 신뢰도의 향상을 가져올 수 있을 것으로 기대된다. 향후에는 최적설계를 통한 소형·경량화 및 차단성능을 향상시킬 수 있는 PMA에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Lin Xin, Gao Huijun, and Cai Shiyuan, "Magnetic Field Calculation and Dynamic Behavior Analysis of the Permanent Magnetic Actuator," IEEE 19th Int. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum Xi'an, pp532 535, 2000
- [2] Edgar Dullni, "A Vacuum Circuit Breaker With Permanent Magnetic Actuator For Frequent Operations", IEEE 18th Int. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum Eindhoven, pp688 691, 1998
- [3] AJW Lammers, PP Leufkens, and GC Schoonenberg, "MV Vacuum Switchgear Based On Magnetic Actuators" IEE Conference Publication No. 459, pp86 90, 1998
- [4] Yundong Cao, Xiaoming Liu et al., "Design and Research on Novel Permanent Magnetic Actuator in Low Voltage and High Current Vacuum Circuit Breaker" IEEE 20th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp471~474, 2002.
- [5] 이항범, "Finite Element Analysis of Induction Motors Considering Skew Effects", 工学博士學位論文, 1995