

권선형태에 따른 permanent magnet actuator의 동작 특성 비교

윤일주, 민경조, 한성진  
 동아대학교

Transient characteristics comparison of permanent magnet actuator by coil type

Yoon Iel Joo, Min Kyung Jo, Hahn Sung Chin  
 Dong-A University

**Abstract** - 최근 배전용 차단기의 조작방식은 스프링 구동 방식에서 영구자석 액츄에이터(PMA) 구동방식으로 바뀌고 있다. PMA로 작동하는 중고압 차단기는 여자전류 권선의 수에 의해 단권선형과 이권선형으로 구분한다.

본 논문에서는 PMA의 동특성을 해석하기 위하여 유한요소법과 외부회로 방정식을 결합하였다. 가동부의 움직임을 고려하여 자계분포를 해석하였으며 가동부의 속도와 흡인력을 구하여 비교하였다. 해석된 결과는 PMA 설계에 이용될 수 있을 것으로 기대한다.

1. 서 론

빠른 스위칭 장치로서 스프링형 조작방식으로 작동되는 차단기는 중전압 회로 차단에 널리 사용되고 있다. 이 스프링으로 구동되는 기계시스템은 유지와 보수비용이 비싸고 구조가 꽤 복잡한 불편함을 가지고 있다.

최근, 중고압(medium voltage)차단기의 동작을 위한 조작방식은 스프링 구동 방식에서 영구자석 액츄에이터(PMA) 구동방식으로 변화되고 있다.

이 기기는 작동이 빠르고, 제어가 용이하며 부품수가 적어지는 이점을 가지고 있고, 스프링 구동 메커니즘과 비교하여 높은 신뢰성을 가지고 있다.

PMA로 작동하는 중고압 차단기는 일반적으로 여자전류 권선의 수에 의해 두 가지 형태로 분류한다. 이 두 형태는 특히 권선과 전류 제어방법에서 각각 차이를 가지고 있다.

단권선(one-coil type) PMA는 가동부와 차단부가 연결축에 직렬로 결합되어 있어 크기가 더 작다. 그러나 이권선(two-coil type) PMA는 축이 직렬이 아닌 mechanical arm을 통해 차단부가 연결되어 있다.[1]

한편, 단권선 PMA는 오직 하나의 전력원만 필요하다. 반면에 이권선 PMA는 두 개의 전력원을 필요하고 단권선 PMA보다 더 큰 힘을 낼 수가 있다.

본 논문에서는 유한요소법과 회로방정식 및 운동방정식을 이용하여 단권선 PMA와 이권선 PMA의 동작특성을 비교한다. [2]-[4]

PMA의 동특성을 해석하기 위해 유한요소법과 외부회로 방정식을 함께 결합하여 해석하였다. 자계분포는 가동부의 움직임을 고려하여 자계분포 해석을 하였으며, 코일에서의 전류, 가동부의 변위, 가동부의 속도와 아마추어에 인가된 힘 등의 과도특성을 두 모델에 대하여 구한 후 이를 비교하였다.

2. 코일형태에 의한 자기 액츄에이터 모델

Fig. 1과 2는 각각 다른 형상을 가진 두 액츄에이터 모델의 단면도를 보여준다. 동작 방식은 거의 동일하다. 개로상태에서 가동부는 하단부에 위치하고 폐로상태에서 가동부는 영구자석에 의해 고정되어있다. 그러나 폐로와 차단에서 동작 방식은 반대방향의 전류공급방식을 사용한다.

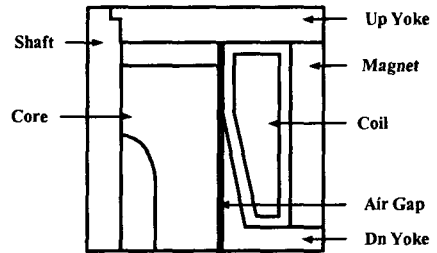


Fig. 1. one-coil type PMA

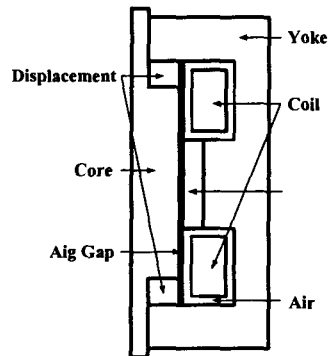


Fig. 2. two-coil type PMA

3. 해석 이론

지배방정식

전기-기계적 결합 문제의 해석에서 주요 요소는 인가된 힘과 이동부분의 변위뿐만 아니라 공급전압에 의해 주어진 여자전류가 있다.

코일권선에 흐르는 전압은 몇몇 물리적 현상으로 나타나는데 다음의 방정식으로 설명할 수 있다.

전기회로 방정식:

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

여기에서,

- V : 전압원
- $\Phi$  : 코일턴 전류 i의 누설자속
- R : 코일의 저항
- N : 턴수
- I : 적용된 전류

(2)

여기에서,  $S$ : 코일턴 전류  $i$ 에 의한 면적  
 $B$ : 영역  $S$ 에서의 자속밀도

자기회로 방정식:

자속밀도  $B$ 는 맥스웰 방정식에 의해 얻어진다:

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

$$\vec{j} = \nabla \times \vec{H} \quad (4)$$

$$\vec{H} = \nu \vec{B} \quad (5)$$

2차원 모델에 대해 (3)-(5)를 간략화하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \nu \frac{\partial A}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \nu \frac{\partial (r \cdot A)}{\partial r} \right) \quad (6)$$

$$= -J_c + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma_z \frac{\partial A}{\partial z}$$

여기에서,  $J_c$ : 코일영역에서 전류밀도

$$I = J_c \frac{S}{N} \quad (7)$$

여기에서,  $S$ : 코일영역에서 면적  
 $N$ : 코일의 턴수  
 $\sigma$ : 도전율  
 $\nu$ : 도자율  
 $v_z$ : 속도

운동 방정식:

힘과 구동부의 변위는 운동법칙에 적용하여 다음과 같은 값을 구하게 된다:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} + B \cdot v = F_{mg} - F_f \quad (8)$$

$$v = \frac{dz}{dt} \quad (9)$$

여기에서,  $m$ : 이동부의 질량  
 $v$ : 이동부의 속도  
 $B$ : 마찰계수

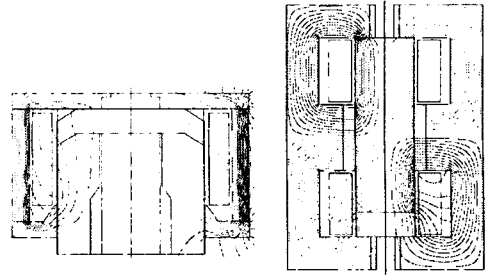
자기포화를 무시하면, 자기력은 공극의 자속밀도를 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(10)$$

여기에서,  $S_A$ : 공극의 교차영역  
 $\mu_0$ : 공극의 투자율

#### 4. 해석 결과

전자계와 회로계를 결합하여 유한요소법을 이용하여 영구자석 액츄에이터의 동특성을 해석하였다.



a) Flux distribution ( $t = 16$  msec)      b) Flux distribution ( $t = 7.2$  msec)

Fig. 3. Flux distribution

Fig. 3은 여자 전류가 각각 제어회로에 공급될 때 두 PMA 모델에서의 자속분포를 보여주고 있다. 한번 코일 전류가 제어회로에 흐르면 액츄에이터에서 자속은 전류의 증가와 함께 변한다. 그래서 가동부는 반대편으로 움직인다. 그 후에 가동부는 하단부에 도달하고 코일에는 더 이상의 전류가 흐르지 않는다.

본 논문에서 다루는 철심 S45C의 비선형 B-H 곡선은 Fig.4에 나타났다. 이 B-H 곡선은 전기기와 변압기에서 많이 사용하는 저탄소강의 강자성체 철심 재료의 특성곡선이다.

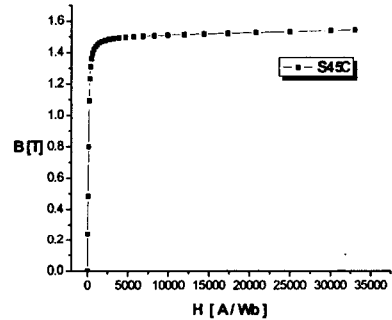


Fig. 4. B-H curve of core material

Fig. 5에서 7까지는 두 모델의 흡인력, stroke와 속도 와 같은 동특성을 보여주고 있다. Fig. 6에서는 위치의 마이너스 값은 반대방향을 의미한다. 이권선 모델의 stroke 거리는 단권선 모델보다 약 1.5배로 길어서, 이권선 PMA는 차단부에 연결된 추가적인 축을 사용하기 위해 충분한 거리가 필요하다.

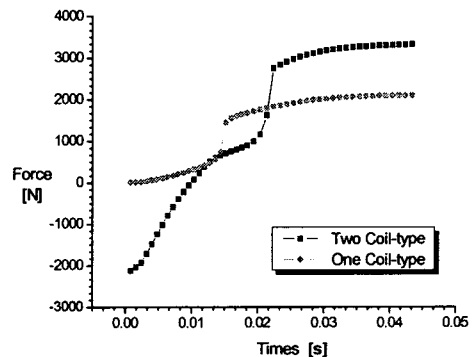


Fig. 5. Attracting force versus time

## 5. 결 론

본 논문에서 전자계와 회로계를 결합한 유한요소법을 사용하여 단권선과 이권선 PMA의 동적특성을 해석, 비교하였다. 두 모델의 자속분포와 흡인력, stroke과 속도와 같은 동적특성을 두 모델에 대해서 보았다. 두 모델이 다른 설계를 가지므로 우리는 전체 체적(체적당 힘)을 두 모델에서 체적당 힘을 비교하기 위한 새로운 힘의 변수로 소개했다.

그 결과, 단권선 PMA의 체적당 힘이 이권선 PMA보다 더 크고 이것은 차단기의 크기를 줄이고 단권선 PMA로 동작하는 진공차단기의 효율을 증가시키는 것이 가능해짐을 나타낸다.

## [참 고 문 헌]

- [1] B.A.R Mckean., "Magnets and vacuum the perfect match [MV distribution switchgear] Trends in Distribution Switch-gear : 1998. Fifth International Conference on (Conf. Publ. No. 459) ,Nov. 1998, pp.73 79
- [2] B. Lequesne, "Dynamic model of solenoids under impact excitation, including motion and eddy currents" Magnetics, IEEE Transactions on,26,2,1990 pp. 1107 1116
- [3] A.J.W Lammers, P.P Leeufkens and G.C. Schoonenberg, "MV vacuum switchgear based on magnetic actuators" Trends in Distribution Switchgear, 1998. Fifth International Conference on (Conf. Publ. No. 459),10-12 Nov, 1998, pp. 86 - 90
- [4] Lin Xin, Gao Huijun, Cai Zhiyuan, "Magnetic field calculation and dynamic behavior analyses of the permanent magnetic actuator" Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2000. Proceedings. ISDEIV. XIXth International Symposium on ,2,2000 pp.532 - 535

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2003-B-084)주관으로 수행된 과제임.

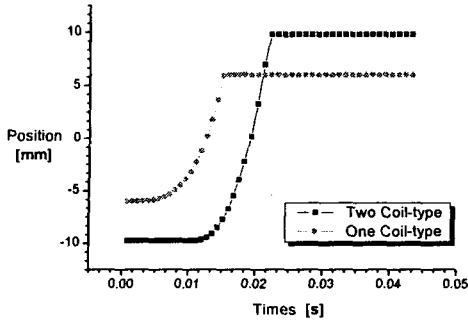


Fig. 6. Strokes versus time

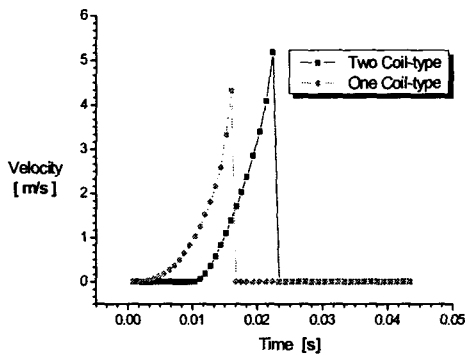


Fig. 7. Velocities versus time

Fig. 6에서는 목표지점(하단)에 도달하기 위한 stroke의 시간이 이권선 PMA의 경우보다 단권선 PMA의 경우가 더 빠르다.

그 결과로, 이권선 모델보다 단권선의 효율이 더 좋게 나타난다. 그러나 직접적으로 이전에 언급된 곡선을 사용하면 단권선과 이권선의 PMA를 비교할 의미가 없다. 왜냐하면 두 모델은 다른 설계로 되어있기 때문이다. 그래서 우리는 전체 체적(체적당 힘)에서 힘의 새로운 변수를 도입하였다. Fig. 8에 의하면 단권선 PMA의 체적당 힘은 이권선 PMA보다 약 23.2% 더 크다.

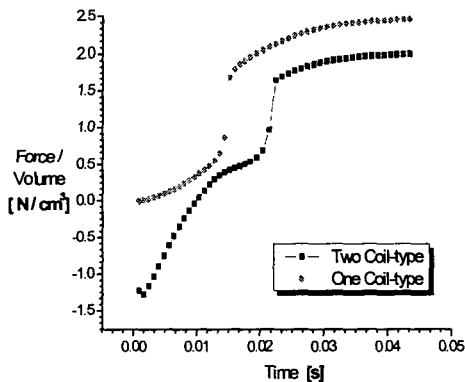


Fig. 8. Volume forces