

## 고속 DC 차단기용 영구자석형 엑추에이터 설계 및 동작특성 해석

김한균, 김중경, 이정근, 한성진

동아대학교 전기공학과

### Dynamic Characteristics Analysis and Design of Permanent Magnetic Actuator for High Voltage DC Circuit Breaker

Kim Han Kyun, Kim Joong Kyoung, Lee Jeong Geun, Hahn Sung Chin

Dept. of Elec. Eng. Dong-A Univ.

**Abstract** – 전기철도나 지하철 분야에 사용되고 있는 고속 DC 차단기의 조작부는 solenoid actuator 방식이나 motor charging 방식을 주로 채택하고 있으나 구조가 복잡하고 부품수가 많아 부피가 크다는 단점이 있다. 이에 반해 magnetic actuator 방식은 동작시간과 제어가 용이하고 부품수가 감소하여 신뢰성과 반복성이 뛰어나다.

본 논문에서는 고속 DC 차단기 조작부를 영구자석 엑추에이터(PMA)방식으로 적용하고자 영구자석(PM)의 개략적 설계 및 이를 이용한 PMA 설계를 하였고, 유한 요소 해석을 통해 이들의 동작특성을 해석하였다.

### 1. 서 론

현재 고전압의 직류를 사용하는 전기철도나 지하철의 직류회로의 개폐 및 과전류·사고전류로부터 보호 장치의 하나로 DC 차단기와 보호 계전기가 결합된 직류 차단기 배전반을 사용하고 있다. 이러한 DC 차단기를 고속차단기(high speed circuit breaker)라 한다. 이는 양방향 주극성 전류 트립장치로부터 구동력을 이용하여 접점을 개리 시켜 자동으로 회로를 차단하는 역할을 하며, 철도차량의 직류전원 특성을 고려한 전자 감응식 차단방식과 이때 발생하는 대형 아크를 소화하기 위한 전자계유도방식의 아크소호기로 구성된다. DC 전원은 AC전원과 달리 단락고장이 일어났을 때 고장전류의 증가가 대단히 빠르고 영접 전류가 존재하지 않기 때문에 단락고장에 의한 큰 고장전류 유입 시 차단이 매우 어렵고, 차단이 된다 할지라도 드립장치가 작동하기 전에 사고전류가 부하단에 영향을 미쳐 사고를 유발하기 때문에 0.02초 정도의 단시간에 자동적으로 차단하여 고장전류가 너무 커지지 않도록 하여야 한다. 즉 DC 차단기는 차단기 스스로 사고전류의 견지능력을 가지고 있어야 하며, 자력으로 접점을 개방하는 기구와 사고전류가 커지지 않는 사이에 재빠르게 전류를 차단하여 회로와 기기의 손상을 방지하는 성능을 요구하고 있다. DC 차단기의 조작방식은 Solenoid 방식이나 Motor charging 방식을 대표적으로 사용하고 있다. 그러나 이러한 조작방식은 구조가 복잡하고 부품수가 많이 들어가 공간을 많이 필요로 하고 고장이 쉽게 발생하는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 영구자석 엑추에이터 방식은 구조가 간단하고 부품수가 적어 비용의 감소 그리고 높은 신뢰성이 있어 유지 보수 가 거의 필요하지 않는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 고속 DC 차단기 조작부를 Solenoid 방식이나 Motor charging 방식이 아닌 영구자석 엑추에이터(permanent magnetic actuator) 방식으로 적용하고자 영구자석(permanent magnet)의 개략적 설계와 이를 이용하여 개략적인 엑추에이터 설계를 하였다. PMA의 동작특성을 해석하기 위해 유한요소법과 외부회로 방정식을 함께 결합하여 해석하였다. 자계분포는 가동부의 움직임을 고려하여 자계분포 해석을 하였으며, 코일에서의 전

류, 가동부의 변위, 가동부의 속도와 아마추어에 인가된 힘 등의 과도특성을 해석하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 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,  $V$ 은 전압원,  $\Phi_i$ 는 코일의 쇄교자속,  $R$ 은 코일의 저항,  $N$ 은 턴수  $I$ 는 적용된 전류를 나타내고 있다.

$$\Phi_i = \int_{S_i} \int B \, ds \quad (2)$$

여기에서  $S_i$ 는 코일턴 전류  $i$ 에 의한 면적,  $B$ 는 영역  $S_i$ 에서의 자속밀도를 나타낸다.

자기회로 방정식:

자속밀도  $B$ 는 맥스웰 방정식에 의해 얻어진다.

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

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

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \quad (5)$$

2차원 모델에 대해 (3)-(5)를 간략화하면 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \right) = \vec{J}$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \quad (6)$$

여기에서  $\vec{J}_0$ 는 전워전류,  $\vec{J}_m$ 은 자화전류를 나타낸다.

운동 방정식:

PMA 동적특성은 코어내부에 존재하는 Plunger의 운동방정식을 풀음으로써 해석될 수 있다.

$$m \cdot \frac{dv}{dt} + Bv = F_{mag} - F_f \quad (8)$$

여기에서  $m$ 은 이동부의 질량,  $v$ 는 이동부의 속도,  $B$ 는 마찰계수,  $F_f$ 는 중력과 스프링을 포함한 전체적인 반발력이며,  $F_{mag}$ 는 전자기력이다.

위 식(8)에서 Plunger의 전자기력  $F_{mag}$ 을 구하기 위해

$$f = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (9)$$

따라서 자성체인 Plunger가 받는 전체적인 힘은

$$F_{mag} = \int_s f ds = \int_v f dv \quad (10)$$

여기서  $s$ ,  $v$ 는 Plunger의 면적과 체적이다.

개략설계 :

개략설계 과정에서 결정되는 초기 형상변수는 Plunger의 단면적, 영구자석의 단면적, Yoke의 단면적이다. 투입유지력을 선정하고 식(10)을 이용하여 Plunger의 단면적을 결정하고, 영구자석의 체적은 다음과 같은 방법으로 결정한다.

$$\text{자 속} : B_m S_m = \gamma B_g S_g \quad (11)$$

$$\text{기자력} : H_m l_m = g B_g l_g / \mu_0 \quad (12)$$

여기서  $B_g$ 는 공극의 자속밀도,  $S_g$ 는 공극의 단면적,  $l_g$ 는 공극의 길이,  $B_m$ 는 영구자석에서 발생하는 자속밀도,  $H_m$ 는 영구자석의 자화력,  $l_m$ 는 영구자석의 길이,  $S_m$ 는 영구자석의 단면적,  $g$ 는 기자력의 손실계수,  $\gamma$ 는 자속의 누설계수이다. 위의 식을 간략화하면

$$S_m l_m = V_m = \frac{\gamma \cdot g B_g^2 S_g l_g}{\mu_0 B_m H_m} \quad (13)$$

$$B_m / H_m = \mu_0 \cdot \frac{l_m}{S_m} \cdot \frac{S_g}{l_g} \cdot \frac{\gamma}{g} \quad (14)$$

식 (13)은 주어진 설계사양에 대하여  $B_m H_m$ 가 최대가 되는 놓작점 [ $BH_{max}$ ]으로 자석을 설계하면, 필요한 자석 체적이 최소가 되는 것을 보여준다. 식 (14)는 영구자석의 동작을 결정하는 식으로, 좌변의  $B_m / H_m$ 을 퍼미언스 계수라 부르며, 영구자석의 감자곡선과 교차하는 점을 놓작점이라 한다. 퍼미언스 계수가 최적동작점이 되도록 영구자석 면적과 길이를 결정한다.

### 3. 해석 결과

그림 1은 개략설계 이론에 따라 설계된 영구자석의 자속분포를 나타내고 있다. PMA 투입 유지력 해석시 NdFeB 계열의 영구자석을 구동원으로 사용하였고, 2차원 해석의 경우는 해석모델이 좌·우 대칭이므로, 해석시간과 메모리를 줄이기 위해 해석영역의 1/2만 해석하였

다

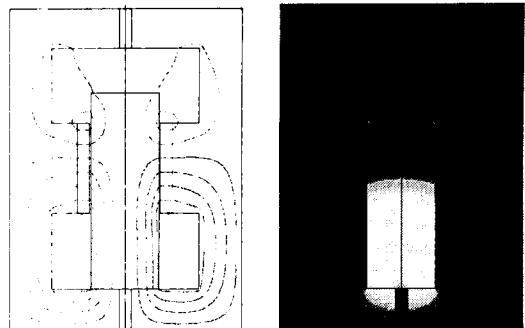


그림 1. 영구자석의 자속분포 및 자속밀도

그림 1을 보면 영구자석에 의해 발생한 자속의 대부분이 공극이 적은 PMA 하단부에 집중되는 것을 알 수 있으며, 단지 자속의 일부만이 영구자석 상부에서 Plunger의 상단부로 흘러가는 것을 알 수 있다. 개략설계 된 영구자석을 외부회로가 없는 단순화된 모델에 적용하여 타당성을 검증하였다.

유한요소법을 이용하여 전자계와 회로계가 결합된 PMA의 동적특성을 해석하였다.

그림 2는 시간에 따른 Plunger의 위치 및 자속분포를 나타내고 있다. 그림 2(a)는 여자전류가 바로 투입되었을 때의 Plunger 위치로서 영구자석 때문에 월부분에 고정되어 있고 구동되지 않는다. 그림 2(c), (c)는 제어부로부터 전류가 증가함에 따라 엑추에이터의 자속이 변하면서 Plunger가 아래방향으로 움직이는 것을 나타낸다. 그림 2(d)는 Plunger가 놓작 원료 지점의 자속분포를 보여주고 있다.

그림 3에서 5는 PMA의 흡인력, Plunger의 위치, 속도와 같은 동적특성을 나타내고 있다.

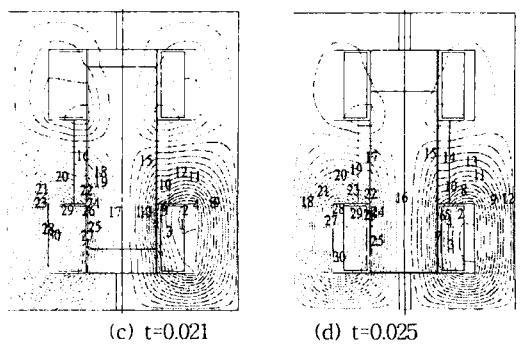
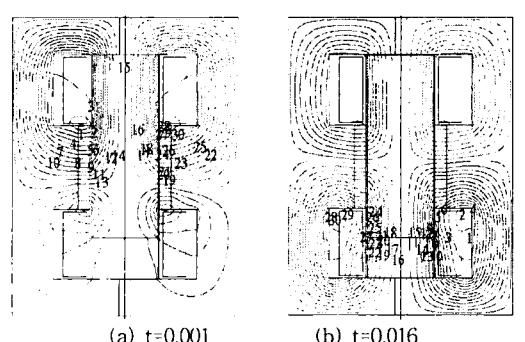


그림 2. 자속분포

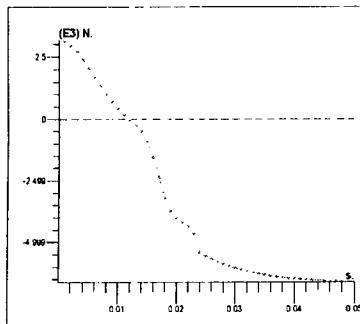


그림 3. 흡인력과 시간과의 관계

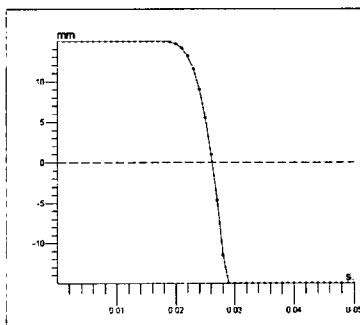


그림 4. Plunger의 위치와 시간과의 관계

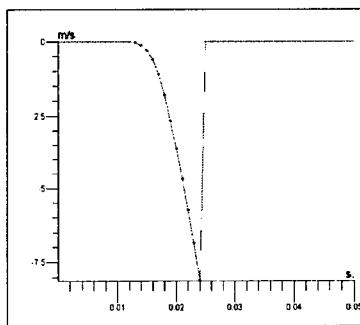


그림 5. 속도와 시간과의 관계

그림 3은 시간에 따른 Plunger의 힘을 나타내고 있다. 영구자석이 Plunger가 움직이지 못하도록 고정시키는 역할을 하고 있으므로 전류를 흘려주어 가동자가 움직이는 반대방향의 힘을 가지고 있다.

그림 4는 시간에 따른 Plunger의 변위관계를 나타내고 있다. Plunger가 0.016s에 Plunger가 움직이기 시작하고 0.025s에 동작이 완료되는 것을 보여준다.

그림 5는 Plunger 속도와 시간과의 관계를 나타낸 그 랙프이다. 전류가 커지고 Plunger가 다른 쪽으로 움직이게 되면, 영구자석의 자계 또한 전류에서 발생된 자계가 흐르는 방향으로 흐르게 되어 가동자의 속도를 가속화시키게 된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 DC 고속도 차단기의 구동 메커니즘으로 사용되어온 Solenoid 방식이나 Motor charging 방식을 대체할 수 있는 PMA(Permanent magnetic actuator) 개발에 수반되는 영구자석의 개략설계를 하여 그 타당성을 검증하였다. 전자계와 회로계를 결합한 유한요소법을 사용하여 이 모델의 동적특성을 해석하였다. PMA 동적특성으로 자속분포와 흡인력, Plunger 속도 등을 해석

하였다. 자계해석시에는 DC 220[V] 구동원을 이용한 시 간차분법을 이용했고, 동특성해석시에는 마찰 및 스프링 계수를 무시한 운동방정식을 이용하였다. 동적특성 해석 결과 일반적인 DC 고속도 차단기의 PMA가 0.02sec 정도에 동작이 완료되어야 하나 개략적인 영구자석의 설계로 현재 0.025sce 정도에서 동작이 완료되었다.

향후 영구자석의 상세설계와 3차원 모델의 동적특성 해석으로 PMA의 동작완료 시간을 개선하고자 한다. 그리고 실제 모델의 제작을 통해 실험값과 특성해석 값을 비교분석하고자 한다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Lin Xin, Gao Huijun, Cai Shiyuan, "Magnetic Field Calculation and Dynamic Behavior Analysis of the Permanent Magnetic Actuator", IEEE 19th Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2000.
- [2] K. Payne, C. Langridge, "Hand portable 10kA injection tester for LUL DC circuit breakers", POWER ENGINEERING JOURNAL AUGUST, PP14~1511, 1997.
- [3] Z. Li, L. A. Renforth, "Computer Aided Optimal Design of Magnetic Actuator for Autorecloser Application", IEE Trends in Distribution Switchgear, Conference Publication No.450, pp80~85, 1998.
- [4] 최명준, 석복열 “자기 액츄에이터를 이용한 전공차단기 구동 메커니즘 개발”, Trans. KIEE. Vol.52B, No.8, AUG. 2003.
- [5] 中田高義：“交直電磁石의 設計와 應用” 第10章 森長北出版社, 日本, 1991.

본 연구는 산업 자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2003-B-271) 주관으로 수행된 과제임