2002년도 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집 (2002.11.14-16)

자계해석을 통한 영구자석형 차단기 조작기의 동작특성 해석

강종호, 박상훈, 배채윤, 정현교
서울대학교

ANALYSIS OF MAGNETIC FIELD AND DYNAMIC BEHAVIOR OF THE PERMANENT MAGNETIC ACTUATOR

Jong Ho Kang, Sang Hoon Park, Chae Yoon Bae and Hyun Kyo, Jung
Seoul National University

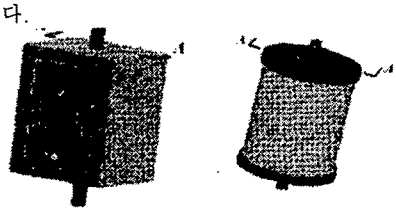
Abstract - *This paper formulates the principle of the permanent magnetic actuator (PMA) and its dynamic characteristic calculation. Some results of the calculation and analysis of the dynamic curves are presented. Due to its great advantages, PMA that presented recently drew great attention from engineers all over the world. We present the magnetic field and actuator using finite element method associated to parameter calculating the displacement of the moving parts and the supplying current when the actuator is DC voltage supplied or capacitor supplied. In this paper, We will do compare of dynamic behavior between DC voltage supplied and capacitor discharge supplied.*

1. 서 론

최근에는 영구자석형 차단기(PMA)의 우수한 특성으로 인해, 세계 여러 나라에서 관심을 가지고 있다. 초기에는 기계적인 조작기를 이용하였으나, 이는 많은 부품으로 이루어져 있고, 또 그 동작 또한 순수하게 기계적인 힘만을 이용함으로써 지속적인 부품들의 유지보수 등 여러 가지 단점을 지니고 있다. 새로운 개념을 도입함으로써 부품 수를 획기적으로 줄일 수 있고, 그에 따른 비용 절감과 높은 안정성, 그리고 전기적인 파라미터를 이용하여 보다 쉽게 제어 할 수 있는 장점을 가질 수 있다. 영구자석형 차단기(PMA)에서는 자기적인 현상과 기계적인 현상 뿐 아니라 영구자석과 비선형적인 특성을 지닌 물질들의 특성을 고려해주어야 한다. 설계 시 가장 중요하게 다루어야 할 측면 중 하나는 시간에 따른 각 설계요소들의 반응을 정확히 예측 할 수 있어야 한다. 그 중에서 중요요소는 동작하는 부품(가동자)의 변위와 DC 전압원 혹은 커패시터 전압원에 따른 여자전류이다. 동작 부품들의 변위와 코일에서의 전기적인 전류는 전압이 인가되었을 때, 전기회로방정식과 기계적인 운동방정식에 의한 시뮬레이션을 통해 그 값들을 얻을 수 있다. 이러한 방정식을 해결하기 위해서는, 이미 우리가 구할 수 있는 값들(파라미터, 영구자석에서 발생되는 자속 그리고 가동자에 미치는 힘)과 실험으로 측정해야 하는 값들(여자되는 전류, 움직이는 부품의 변위)이 있다. 실험을 통해서 얻어지는 값 등은 유한요소법을 이용한 정자계 해석을 통해 알 수 있다. 이러한 구조가 간단하고, 조작하기가 보다 용이한 새로운 형태의 영구자석형 차단기는 미래에 널리 사용될 것이다.

2. 특성해석

영구자석형 차단기(PMA)는 전자기장치와 영구자석을 연결시킴으로써 완전히 새로운 동작원리를 가진다. 이전에 사용되던 기계적인 에너지를 이용한 차단기와는 조작기안에 동작하는 부품이외에는 거의 모든 부품 수를 과감히 줄였다. 결과적으로 기계적인 시스템의 안정도가 향상되었고, 기계적인 장치에서의 에너지 절감효과가 눈에 뛰게 좋아졌을 뿐 아니라, 회로 차단기의 유지 보수 비용에서 부담을 덜게 되었다. 여러 많은 형태의 영구자석형 차단기가 있지만 그림 1에서 보는바와 같이 일반적으로 사각방형 모양의 차단기와 원통형 모양이 주로 사용된다.



(a)사각방형 구조 (b)원통형 구조
그림 1. 일반적인 영구자석형 차단기 구조

본 논문에서는 사각방형 구조에 대한 해석을 하고, 그 해석을 통해 얻어진 코일에 여자된 전류와 동작하는 부품의 변위 등을 그래프로 나타낼 것이다. 그림 2를 보면 조작기는 크게 6부분으로 이루어져있다. 고정된 철심, 움직이는 중심축(가동자), 두개의 영구자석, 두 개의 독립된 코일로 이루어져 있다. 양쪽에 감겨져 있는 코일에, 전류가 전혀 흐르지 않는다면, 순수한 영구자석에서 발생되는 자력(F^{mag})에 의해서만 고정되어 있게 된다. 이때, 반대쪽 코일에 전압이 인가되어 전류가 흐르게 되면 자력(F^{e})이 발생하게 되며, 이 힘으로 인하여 F^{mag} 의 방향이 F^{e}의 방향으로 그 힘이 나뉘어 진다. 이 나뉘어 지는 힘은 코일에 여자전류를 발생하게 된다. F^{mag}의 힘이 나뉘어져 코일의 전류에 의한 증가하는 F^{e}와 같아지는 시점부터 가동자가 움직이기 시작하고, F^{e} 방향으로 가속도가 발생한다.

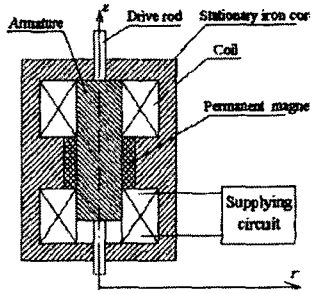


그림 2. 영구자석형 조작기의 일반적인 구조

2.1 영구자석 자계 모델과 계산

영구자석형 조작기에서, 영구자석은 동작 후, 가동자를 고정시키는 데 필요한 힘을 제공한다. 이러한 동작 특성해석을 하기 위해서 영구자석에 대한 수치해서 모델을 정해야 한다. 조작기 안에 있는 영구자석은 결국 자기력을 띠고 있고 그 자신은 전류를 흐르고 있지 않지만, 자력이 존재하는 양쪽 끝 부분에서는 자력과 상응하는 표면 전류 $\vec{J}$가 나타난다.(그림 3)

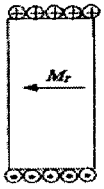


그림 3. 영구자석의 자력에 대한 표면 전류 모델

$$\vec{j} = \frac{\vec{M}_r \times \vec{n}}{\mu_0} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (3)$$

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

$$\vec{M} = \chi \vec{H} + \vec{M_0} \quad (5)$$

$\vec{H}$: 자계의 세기, $\vec{B}$: 자속밀도,

$\vec{J}$: 전류밀도, $\vec{M}$: 자화의 세기,

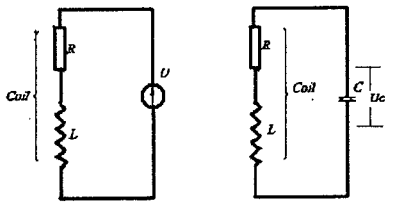
χ' : 피상자화율, χ : 자화율,

$\vec{M}_0$: 잔류자화의 세기.

$$\vec{B} = \mu_0(1+\chi')\vec{H} + \mu_0\vec{M}_0 = \mu'\vec{H} + \vec{B_r} \quad (6)$$

2.2 전기회로 방정식과 기계적인 운동방정식

동작 특성에 대한 분석은 전압원이 DC회로로 이루어져 있는지 또는 커패시터의 축방전 회로로 이루어져 있는지에 대해서, 코일에 여자된 전류와 동작하는 부품의 기계적인 변위 분석을 따로 수반한다. DC 전압원 회로와 커패시터의 축방전 회로는 그림 4에 각각 보여진다.



(a) DC전압 공급원 (b) 커패시터 축방전 공급원

그림 4. 각 전류 공급원 회로

유동해석에서 동작특성은 전기회로와 기계적인 운동방정식을 만족하고, 자기장에서는 맥스웰 방정식을 만족하고 그 식은 다음과 같다.

A. DC 전압 공급원의 경우

$$V = RI + \frac{d\lambda}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F^{mag} - F^e}{M} \quad (8)$$

$$I = AJ \quad (9)$$

$$\lambda = N\Phi \quad (10)$$

V는 전압원, R은 코일 저항, I는 외부에 흐르는 총 전류, λ는 가동자에 미치는 전체 자속, A는 코일의 단면적, J는 전류밀도, N은 코일의 권선수, Φ는 자속이다.

B. 커패시터 전원 공급원의 경우

$$V_c = RI + \frac{d\lambda}{dt} \quad (11)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{F^{mag} - F^e}{M} \quad (12)$$

$$I = C\frac{dV_c}{dt} \quad (13)$$

$$\lambda = N\Phi \quad (14)$$

C는 커패시터, V_c는 커패시터의 전압이다.

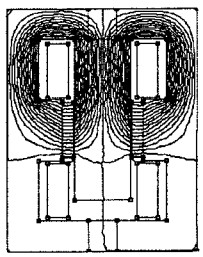
2.3 수치해석

이 시스템에서 가동자의 변위와 여자된 전류의 크기를 알기 위해서는 가동자에 미치는 힘(F^{mag})과 가동자에 미치는 전체자속(λ)을 알아야 한다. 이러한 변수들(F^{mag}, λ)은 유한요소법을 통해서 알 수 있으며, 이를 통해 여자전류 값과, 가동자가 움직이는 가속도 ,속도에 따른 변위 그리고 작동하는데 걸리는 시간을 알 수 있게 된다.

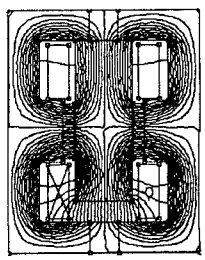
3. 해석 결과 및 분석

3.1 자기장 분포해석

그림 5는 가동자의 위치에 따른, 자계의 형태를 나타내고 있다. 전류를 흘리지 않았을 때의 가동자의 위치는 한쪽에 고정되어 있는 데, 이는 영구자석의 자기장의 힘이 상대적으로 공극이 작은 쪽으로 치우쳐 발생하기 때문이다. 그림 5(a)는 전류를 흘려주지 않았을 때, 영구자석의 자계의 힘을 나타내고 있고, 이 자계의 힘으로 가동자는 외부의 어떠한 힘이 주어지지 않아도 고정될 수 있다. 그림 5(b)는 가동자가의 반대편 코일에 전류를 흘렸을 때, 영구자석의 자력과 코일에서 흘려준 전류에 의해 발생된 자력을 나타내주고 있다. 이때 코일의 전류에 의한 자계에 의해 영구자석의 자계의 힘이 분산되어 나타나는 것을 볼 수 있다.

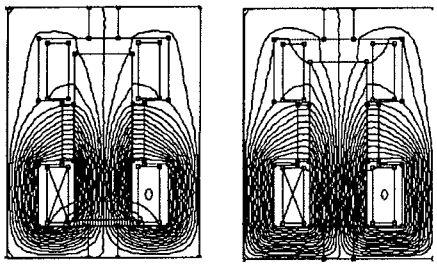


(a)전류를 흘리지 않았을 때, 영구자석의 자계분포



(b)전류를 흘렸을 때, 가동자가 움직이기 직전의 자계분포

그림 5(c)는 코일에 의해 발생된 자력(dF^e)과 분산된 영구자석에서 발생된 자력(dF^{mag})의 합산된 힘이, 순수한 영구자석의 힘에서 분산된 힘($F^{mag} - dF^{mag}$) 보다 커지기 시작할 때, 가동자의 움직임을 나타내고 있다. 그림 5(d)는 가동자가 이미 반대편 쪽에 다다랐을 때의 전류에 의한 자계와 영구자석의 자계가 합하여진 모습을 나타내고 있다.

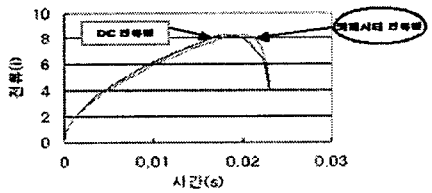


(c)가동자가 움직일 때, 자계분포 (d)가동자가 움직여 다른 한쪽에 다다랐을 때, 자계분포

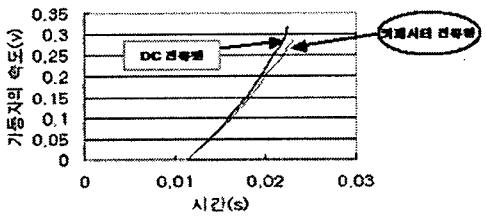
그림 5. 가동자의 위치에 따른 자계의 형태

3.2 동작 특성 분석

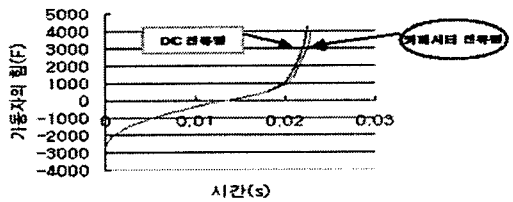
시간에 따른 여자 전류의 변화율을 그림 6(a)에서 나타내었다. 전류가 8.5 A부근에서 가동자는 이미 다른 한쪽으로 이동해버린다. 그때의 시간은 20ms 정도이고, 이 부근에서 전압원을 조절하여 시간에 따른 전류의 값을 감소시키면 가동자의 반대편에 닿을 때의 충격을 덜어줄 수 있다. 꺾여진 부분은 전압원으로 가동자의 속도를 제어할 수 있음을 나타낸다.



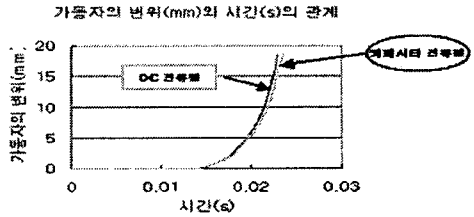
(a)전류(i)와 시간(s)과의 관계



(b) 가동자의 속도(v)와 시간(s)과의 관계



(c) 가동자의 힘(F)와 시간(s)과의 관계



(d) 가동자의 변위(mm)와 시간(s)과의 관계

그림6. 시간에 따른 조작기의 동작특성 해석

가동자의 동작거리는 코일의 의한 자력의 힘의 방향으로 전류가 증가함에 따라 커지게 되고 가동자가 움직이면서 영구자석의 자계의 힘이 합해짐으로서 코일에서 발생한 자계 방향으로 상대적으로 아주 큰 힘이 발생하게 되므로, 가동자의 속도가 어느 시점에서 급속히 빠르게 움직이게 된다. 이때 가동자가 반대쪽에 다다르기 전에 전압원을 적절히 제어한다면, 가동자가 부딪히는 충격을 덜어줄 수 있다. 하지만 차단시간을 고려해주어야 하므로 그림 6(b)에서 보면 알수 있듯이, DC 전압원의 경우보다 커패시터 전압원을 사용할 때, 전류의 변위에 따른 가동자의 속도가 완만하게 나타나므로, 제어하기가 용이하다. 하지만 차단시간에 중점을 둘 경우, 전류의 변화에 따른 빠른 속도로 반응을 보이는 DC 전압원을 사용하는 편이 이로울 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 유한요소법(FEMM)을 이용한 자계해석을 통하여 영구자석형 차단기의 동작특성을 나타내었다. 공급해준 전압원에 따른, 전류 크기의 변화, 가동자의 반응속도, 가동자에 미치는 힘 그리고 가동자의 움직임을 정량적으로 표현했다. 특히 가동자의 움직이는 변위를 계산하기 위해서는 영구자석의 자계힘과 공급되어진 전류에 의해 발생된 자계의 힘이 비 선형적인 동작특성을 나타냄으로 이에 대한 동작특성 분석이 필요하다.

[참 고 문 헌]

[1] Li Erping, P.M.McEwan, "Analysis of A circuit Breaker Solenoid Actuator System Using the decoupled CAD-FE-Integral Technique,"*IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.28,No.2,PP. 1279 -1282, 1992.

[2] Bruno Lequesne,"Dynamic modelof Solenoids Under Impact Excitation, Including Motion and Eddy Currents,"*IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.26,No.2,PP.1107-1116,1990.

[3] Lin Xin, Gao Huijun, Cai Zhiyuan, "Magnetic Field Calculation And Dynamic Behavior Analyses of The Permanent Magnetic Actuator"

[4] Z.Li,B.R.Varlow,LA.Renforth,D.W.Auckland and F.Shuttleworth, "Optimal design of autorecloser electromagnetic actuator"

[5] AUCKLAND,D.W, SHUTTLEWORTH,R.,SIMMS, J., and VARLOW,B.R.:'Rare-earth permanent magnets in switchgear actuators'.Proceeding of the twenty-fifth Universities Power Engineering conference, Aberdeen,1990.

[6] L.Bompa, P.Schueller and J.C. Sabonnadire, "Analysis and Synthesis of an Electromagnet used for circuit Breaker Operation," *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.21,No.6,1985.