설계 변수 변화에 따른 고전압 가스 차단기용 전자석 조작기(EMFA)의 특성 해석

김래은, 강종호, 최상민, 정현교
서울대학교 전기·컴퓨터공학부

Characteristics Analysis of Electro-Magnetic Force driving Actuator for High Voltage Gas Circuit Breaker by Changing Design Parameter

Rae-Eun Kim, Jong-Ho Kang, Sang-Min Choi and Hyun-Kyo Jung
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

Abstract - 영구자석형 조작기(PMA)의 단점을 보완한 고전압 차단기용 전자석 조작기인 EMFA는 긴 스트로크를 가지는 차단기에도 사용이 가능하며, 특히 진공 차단기(VCB)용 조작기를 비롯하여, 가스 차단기(GCB)에 적용한 모델도 이미 개발되었다. 다양한 모델에 대한 설계 및 연구가 추가적으로 진행되고 있으나, 아직 설계 방법이 정형화되어 있지 않아 모델에 따라 그 형상이 달라지는 경우가 많다. 이러한 점을 개선하기 위해, 본 논문에서 EMFA의 설계 변수를 변화시켜 가며 나타나는 특성을 홀딩력과 자속밀도를 통해 분석하였다. 나아가 이를 바탕으로 설계 방법의 정형화에 대한 실마리를 제공하고자 한다. 해석에는 2차원 유한요소법을 이용하였고, 설계 변수는 조작기의 초기상태를 기준으로 설정하였다.

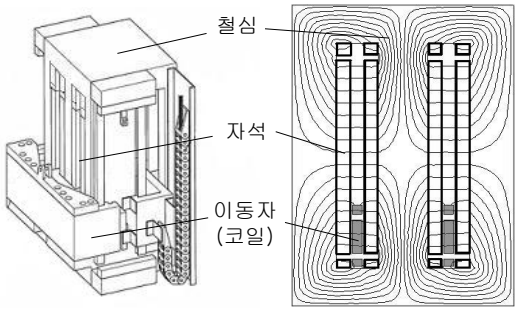
1. 서 론

고전압 차단기의 구동 메커니즘에는 공압식, 유압식, 스프링 등이 있고, 주로 기계적인 장치가 사용되어 왔다. 기계적인 구조는 주기적인 보수와 부품의 교환을 필요로 하며 소음 등의 단점이 있다. 이를 보완하고자 PMA와 같이 영구자석을 이용한 전자식 액추에이터가 등장하였다[1]. 그러나 PMA는 긴 스트로크를 순간적으로 차단하는 데에 필요한 큰 힘과 속도를 내기 어렵기 때문에 가스반발력을 고려치 않고 스트로크가 짧은 진공 차단기에만 사용하고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 연구의 결과로 새로운 방식의 전자석 조작기(Electo-Magnetic Force driving Actuator, EMFA)가 개발되었다[2]. EMFA는 평행한 자석판 사이에 코일을 위치시켜 전류를 흘려 발생하는 로렌츠힘을 이용한다. PMA가 전자력을 이용하기 때문에 이동자와 철심 사이의 공극 간격이 넓어지기 힘든 반면, EMFA는 로렌츠힘을 바탕으로 하기 때문에 자계가 형성된 공간에서 전류가 흐르는 이동자를 공극 간격과 상관없이 움직일 수 있다. 따라서 긴 스트로크 길이를 가지는 조작기에도 적용 가능하고, 인가 전류에 따라 원하는 만큼의 큰 힘을 낼 수도 있다[3].

EMFA를 적용한 제품으로 현재 25.8kV/20kA(stroke length 20mm), 170kV/50kA(80mm) 등 짧은 스트로크를 가지는 진공 차단기를 비롯하여 72.5kV/20kA(100mm), 145kV/40kA(160mm) 가스 차단기 등이 개발되었다. 그러나 적용할 수 있는 모델이 다양하기 때문에 스트로크 길이 변화가 커서 모델마다 구조 및 형상이 달라지는 문제가 생긴다. 특히 요구되는 홀딩력 및 로렌츠 힘, 개폐 속도 등이 가스 차단기와 진공 차단기 간에 차이가 커서 자석의 형태나 공극의 위치 및 간격, 철심의 폭 등의 설계 변수 변화 양상이 매우 다양하게 나타난다. 개발 초기 단계라 정형화된 설계 방법이나 설계 변수에 대한 일정한 기준이 없는 실정인 것이다. 실제로 EMFA를 최초로 개발할 당시의 모델과 현재의 모델은 그 형태가 약간 다른 양상을 보이고 있다. 다양한 차단기 모델에 쉽게 적용하기 위해 EMFA에 대한 설계 변수를 설정, 동작 특성을 해석하여 설계 방법을 정형화하고자 하였다. 이번 논문에서는 전류 인가 전 초기 상태에서 철심에 형성되는 자속밀도와 이동자가 받는 힘인 홀딩력을 유한요소법을 이용한 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

2. EMFA의 구조와 동작원리

그림 1에서와 같이 EMFA는 전체 외형을 이루고 있는 철심과 철심 내에서 평행한 자계를 형성하는 영구자석, 영구자석과 철심 사이를 감고 있는 코일을 포함한 이동자 등 세 부분으로 구성되어 있다. 철심은 조작기의 외형을 이루면서 동시에 자속의 이동 통로가 된다. 외형을 결정하기 때문에 조작기가 차지하는 부피와 밀접하게 관련되고, 공극과 함께 자속의 이동경로를 형성하여 이동자가 받는 힘에도 영향을 미친다. 자석은 로렌츠 힘의 근간인 자계를 만드는 주 영구자석과, 개폐 전후 이동자를 잡아주는 홀딩력에 영향을 미치는 보조 영구자석으로 구분된다. 로렌츠 힘은 차단기 개폐 속도 및 스트로크 길이를 좌우하고, 홀딩력은 차단



(a) EMFA 기본 구조 (b) 단면 자계 분포도

<그림 1> EMFA의 구조

의 안정성과 연관되어 차단기 성능을 결정하는 중요한 역할을 하고 있다. 이동자의 코일에 전류를 인가시킬 경우 로렌츠 힘이 형성되는데, 전류의 세기에 비례하여 힘이 커지므로 자석과 함께 로렌츠 힘의 크기를 조절할 수 있다. 또한 전극과 직·간접적으로 연결되기 때문에 이동자의 이동속도는 곧 차단기의 개폐 속도가 된다[4].

3. 해석 및 결과

3.1 해석 모델

특성 해석을 위한 모델은 스트로크 길이 170mm인 액추에이터이다. EMFA의 개발 배경인, PMA가 구현하기 힘든 긴 스트로크를 가지는 차단기에의 응용을 목적으로 하고 있으며, 현재 160mm 스트로크의 145kV/40kA GCB가 개발된 상태이므로 성능을 향상시키는 일환에서 이 모델을 선정하였다. 또한 170mm 스트로크 모델은 자계분포를 쉽게 알 수 있고 자기회로 해석이 간단하며, 설계 변수의 변화 폭을 크게 하여 해석의 범위를 넓히는 이점도 있다. 해석시 초기값은 이미 개발된 160mm 스트로크 GCB용 EMFA의 설계값으로 표 1과 같다.

설계 변수는 자석의 크기, 철심의 중앙 및 좌우 폭, 이동자와 철심 사이의 공극으로 선정하였다. 본문 2.1에서 설명했듯이 조작기의 외형, 로렌츠 힘, 자속밀도와 홀딩력 등에 영향을 미치기 때문이다. 해석 범위 역시 설계에 필요한 홀딩력과 자속밀도가 의미 있는 값을 가지는 범위로 한정하였고, 차단기의 크기가 불필요하게 커지거나 작아지는 것을 고려하여 결정하였다(표 1).

해석 모델의 자속밀도와 홀딩력은 식(1)-(3)과 같은 수식으로 표현할 수 있다. 초기 상태에서는 자기장을 형성하는 근원이 영구자석밖에 없기 때문에 식 (1)의 자기 쌍극자 모멘트에 비례하는 식으로 유도된다. 식 (2)는 자기 쌍극자 모멘트를 나타낸 식으로 N극과 S극을 각각 가상의 자기 전하(magnetic charge)로 볼 때 자기 전하의 세기와 극간 거리에 비례한다. 홀딩력은 유한요소법의 맥스웰 스트레스 텐서법(Maxwell stress tensor method)을 이용하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 m}{4R^3}(\vec{a_R} 2\cos\theta + \vec{a_\theta}\sin\theta) \quad (1)$$

<표 1> EMFA 설계 변수

구 분		초기값	해석 범위
자석의 크기(폭)		15mm	10~25mm
철심폭	중앙	50mm	40~65mm
	좌우	45mm	20~60mm
공극 간격		2mm	1~20mm

$$\vec{m} = q_m \vec{d} \tag{2}$$

$$\vec{F} = \iint_S \frac{1}{\mu_0}(\vec{B}\cdot\vec{n})\vec{B} - \frac{1}{2\mu_0}B^2\vec{n}\,ds \tag{3}$$

여기서, $\vec{m}$은 자기 쌍극자 모멘트, q_m은 자기 전하량, $\vec{d}$는 자석의 극 사이 거리 벡터, s는 이동자의 단면적, $\vec{n}$은 표면에 수직인 방향의 단위 벡터이다.

3.2 설계 변수에 따른 자속밀도와 홀딩력의 변화 양상

자석폭을 변화시켜가면서 철심에 형성되는 자속밀도와 이동자가 받는 힘을 측정하였고 결과 그래프는 그림 2와 같다. 자속밀도는 철심 중앙부의 최대 자속밀도를, 홀딩력은 이동자와 철심 사이의 공극을 기준으로 하였다. 자석의 폭을 넓히면 자계의 세기가 커지고 자속밀도 또한 증가한다. 자석이 커진다는 것은 곧 자기 쌍극자 모멘트가 커짐을 의미하고 (식 (2)), 자속밀도는 자기 쌍극자 모멘트에 비례하기 때문에 자속밀도는 당연히 증가하는 것이다(식 (1)). 홀딩력 역시 자석폭의 증가에 따라 커지는 양상을 보인다. 자속밀도가 증가하여 철심을 통해 이동자를 통과하는 자속의 양 또한 증가하기 때문이다.

그림 3과 같이 공극 간격이 커지면 홀딩력은 감소한다. 공극은 자계에서 에너지를 축적하는 역할을 하는데, 일정 자속량에 대해 공극이 커지면 공극에서의 자속밀도는 감소하게 된다. 식 (4)는 공극의 자계 에너지를 나타내는데, 철심에 저장된 에너지에 비해 공극에 저장된 에너지가 매우 큰 값을 갖기 때문에 식 (5)과 같이 쓸 수 있다. 식 (6)은 자계 에너지로부터 나오는 힘에 관한 식으로, 자속밀도가 감소하면 힘은 자속밀도의 제곱에 비례하여 줄어드는 것을 보여준다.

$$W_f = V_{core}\int H\,dB + V_{gap}\frac{B^2}{2\mu_0} \tag{4}$$

$$= V_{gap}\frac{B_g^2}{2\mu_0} = \frac{B_g^2}{2\mu_0}Sz \tag{5}$$

$$f_m = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{B_g^2}{2\mu_0}Sz\right) = \frac{B_g^2}{2\mu_0}S \tag{6}$$

여기서, W_f는 자계에 저장된 에너지, V_{core}, V_{gap}는 각각 철심과 공극의 체적을 나타내고, B_g는 공극의 자속밀도, z는 공극 간격을, f_m은 공극과 철심 사이에 작용하는 힘, 즉 홀딩력을 나타낸다. 이 그래프에서는 홀딩력을 아래(-) 방향에서부터 위(+) 방향까지 볼 수 있는데, 공극이 일정 간격을 지나면서부터는 더 이상 홀딩력이 작용하지 않음을 말해준다. (+)방향의 힘은 주 영구자석이 이동자의 상하단 자성체를 좌우에서 잡아당기는 힘이다. 공극에 작용하는 홀딩력은 가스 차단기에 비해 진공 차단기에서 더 중요하게 쓰인다.

그림 4는 철심의 폭에 따른 자속밀도 및 홀딩력의 변화를 나타낸 그래프이다. 철심은 두 자계가 만나는 중앙의 폭과 각각의 자계가 통과하는 좌우 폭에 따라 자속밀도와 홀딩력의 변화 양상이 차이를 보였다. 중앙의 철심폭을 넓히면 자속밀도와 함께 이동자에 작용하는 힘이 줄어드는 반면, 좌우 철심폭이 넓어질수록 자속밀도와 홀딩력은 증가하는 것이다. 좌우 평행한 자석판 쌍의 자계 방향이 서로 반대이기 때문에 철심의 중앙부분에는 자속이 몰려 높은 자속밀도가 생긴다. 식 (7)에서와 같이 자속밀도와 단면적은 반비례 관계에 있으므로, 일정한 자속의 양에 대해 통과할 수 있는 단면적이 넓어지면 자속밀도는 감소한다.

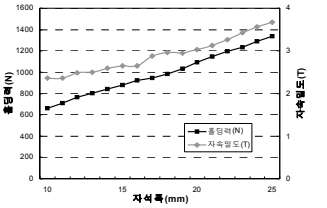
$$\Phi = \int \vec{B}\cdot\vec{ds} = BS \tag{7}$$

여기서, S는 자속이 통과하는 면적, 즉 중앙 철심의 폭과 조작기의 두께가 이루는 단면적이다. 홀딩력은 철심의 폭이 넓어짐에 따라 감소하는데 이는 자속밀도에 영향을 받기 때문이다. 그림 4(b)에서 주목할만한 부분은, 폭이 증가함에 따라 힘이 증가하다가 일정 간격 이상에 대해서는 더 이상 증가하지 않는다는 것이다. 중앙의 철심은 자속이 서로 밀어내면서 몰리게 되지만, 철심 좌우측은 자속이 경로를 따라 각각 돌아서 들어오는 부분이기 때문에 일정 폭 이상에서는 홀딩력에 큰 영향을 주지 못한다. 이 결과는 EMFA의 외형 및 철심의 좌우 폭에 대한 효율적인 설계의 단서를 제공할 수 있다.

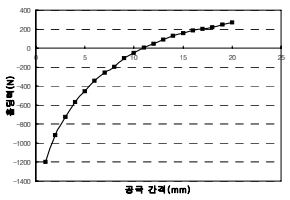
3.3 특성 해석 결과

로렌츠 힘을 높이는 데 필요한 자속밀도를 증가시키기 위해서는 자석을 크게 하면 된다. 실제로 EMFA 설계시 자석의 폭을 넓히면 보다 큰 힘을 얻을 수 있다. 그러나 자석의 폭을 증가시면 비용이 많이 들게 되고, 불필요한 공간에 자속이 흐르거나 자속밀도의 포화로 인한 손실을 유발하게 된다. 철심폭을 증가시키는 경우에도 이 점을 고려해야 한다.

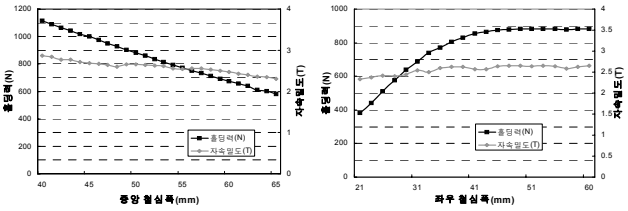
자석의 크기가 정해진 경우, 일정 자속량에 대해 철심폭을 줄이면 자속밀도가 높아지기 때문에 어느 시점에서는 결국 포화 상태에 도달하게



〈그림 2〉 자석폭과 홀딩력 및 자속밀도



〈그림 3〉 공극 간격과 홀딩력



(a) 중앙의 철심폭 변화 (b) 좌우 철심폭 변화

〈그림 4〉 철심의 폭 변화에 따른 홀딩력 및 자속밀도의 변화

된다. 일정한 철심의 폭에 대해 자석의 폭을 계속 증가시키다 보면, 마찬가지로 자속량이 늘어나는 데에 비해 자속이 통과하는 단면적은 한정되기 때문에 결국엔 포화에 도달할 것이다. 철심의 좌우폭에 대한 홀딩력을 살펴보면, 약 40mm 부근에서부터 폭 증가에 따른 홀딩력의 증가가 둔해진다. 이는 EMFA 제작시 내구성 문제가 아닐 경우 좌우 폭을 불필요하게 넓게 만들 필요가 없음을 보여주는 것이다.

홀딩력은 가스 차단기보다는 진공차단기에서 중요한 역할을 한다. 스트로크 길이가 짧기 때문에 차단 전후의 전극 접점에 대한 안정성을 확보해야 할 필요가 있기 때문이다. 이 결과를 적용하여 EMFA를 설계할 때 모델에 따라 홀딩력의 크기에 맞게 공극을 설정할 수 있다. 진공차단기에서 공극은 일반적으로 1mm 이하로 두고 설계를 하는데, 홀딩력의 차이가 크게 나지 않는 여러 모델의 조작기를, 하나의 모델로 공극 간격을 조절해 가면서 제작한다면 경제성 또한 확보할 수 있다.

4. 결 론

EMFA는 기존의 기계적인 메커니즘을 대체할 수 있는 새로운 방식의 전자식 액추에이터이다. PMA의 한정된 사용범위를 개선하여 가스 차단기에까지 적용할 수 있는 EMFA 모델이 개발되었고, 추가적인 연구가 수행중이다. 본 논문에서는 설계 방법의 정형화를 위한 첫 단계로 몇 가지 설계 변수를 선정하여 각 변수들이 조작기의 동작에 얼마나 영향을 미치는지를 분석하였다. 차단기 개폐시 이동자의 움직임에 영향을 미치는 자석은 크기가 클수록 큰 힘을 발휘하였고, 외형을 형성하는 철심 또한 중앙, 좌우 폭을 조절함에 따라 자속밀도와 홀딩력에 영향을 미침을 볼 수 있었다. 공극과 홀딩력의 관계에서는, 해석 모델이 170mm 스트로크의 조작기였음에도, 진공 차단기에서 필요한 특성을 확인할 수 있었다.

보다 효율적이고 경제적인 EMFA 모델을 설계하기 위해, 전류 인가 전 초기상태, 즉 차단기가 동작하기 전 상태에서의 변수들에 따른 동작 특성을 해석하였다. 설계 방법을 보다 정형화시키기 위해서는 이동자의 형태와 코일의 배치, 주 영구자석과 보조 영구자석의 형상 및 배치 등이 동작 특성에 얼마나 영향을 미치는 지에 관한 연구가 필요하다. 또한 전류가 인가되어 차단 동작을 하는 동안의 이동자 및 자속, 로렌츠 힘 등이 어떤 변수에 따라 어떻게 영향을 미치는 지에 대한 종합적인 분석이 요구된다. 원하는 힘, 이동자의 속도 등을 설계 변수들을 통해 미리 정확히 예측할 수 있다면, 비단 차단기뿐만 아니라 다양한 산업 분야에도 EMFA를 적용할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] E. Dullni, “A Vacuum Circuit Breaker with Permanent Magnetic Actuator for Frequent Operations”, in IEEE 18th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp.688-691, 1998.

[2] Jong-Ho Kang and Hyun-Kyo Jung, “Development and Characteristic Analysis of New type Actuator, Electro Magnetic driven Force Actuator applicable to High Voltage Circuit Breaker”, The Fifth International Symposium on LDIA, pp.359-362, 2005.

[3] Jong-Ho Kang, and Hyun-Kyo Jung, “Development and Analysis of New Type of Switchgear for High Voltage Gas Circuit Breaker : Electromagnetic Force driving Actuator”, IEEE CEFC, 2006.

[4] 최상민, 강종호, 정현교, “고전압 가스차단기용 EMFA 3차원 동작특성 해석”, 대한전기학회 EMECS 춘계학술대회, pp.122-123, 2007.