

고전압 가스 차단기용 전자석 조작기에 대한 해석

이승민, 강종호, 김래은, 정현교
서울대학교 전기컴퓨터 공학부

Analysis of New Type of Switchgear for High Voltage Gas Circuit Breaker

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

Abstract - In this paper, a new type of switchgear, electro magnetic force driving actuator (EMFA), is developed and analyzed, applicable to high voltage gas circuit breaker (HGCB). Transient analysis is performed in order to obtain the dynamic characteristics of the EMFA. The distribution of static magnetic flux is obtained using the finite element method (FEM). The governing electric and kinematical equations are solved using the time difference method (TDM). Fabrication and experiments were performed in order to prove the applicability of HGCB for overall class. In comparing the experiment with simulated data, it is confirmed that analysis of the dynamic characteristics of EMFA is appropriate for design.

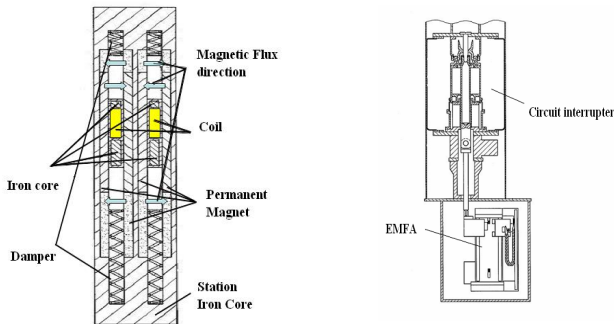
1. 서 론

고전압용 가스차단기는 차단 전류를 효율적으로 소호시키기 위해 짧은 시간 내에 높은 절연내력을 위한 긴 스트로크와 높은 가스 반발력을 요구한다. 이를 충족시키기 위해 기존의 고전압 차단기의 구동 메커니즘은 공압식, 유압식, 스프링 등의 기계적 장치가 사용되어 왔다. 하지만 이러한 기계적인 구조는 소음이 심하며, 많은 링크와 부품수로 인해 주기적인 보수와 교환을 필요로 한다.[1] 따라서 이를 보완하고자 PMA와 같은 전자석 액추에이터가 개발되어, 높은 내구성과 안정성을 확보하였다. 하지만 고전압의 경우, 긴 스트로크를 순간적으로 차단하는데 필요한 큰 힘과 속도를 내기 어렵기에, PMA는 스트로크가 짧은 진공 차단기에 한정되어 적용되고 있다.[2]

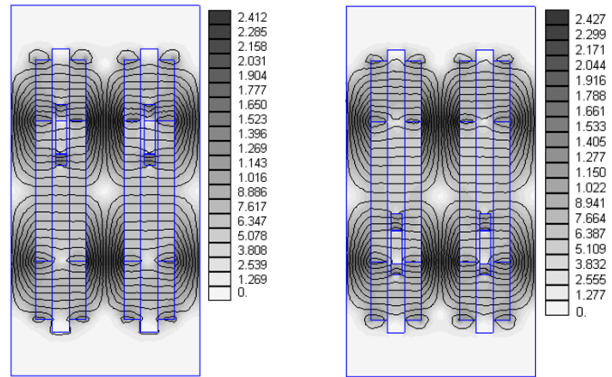
EMFA(Electro-Magnetic Force driving Actuator, EMFA)는 이러한 문제점을 극복하기 위한 새로운 방식의 전자석 조작기가 개발되었다.[3] 고전압 가스차단기(HGCB)에서 요구되는 스트로크와 힘을 구현하기 위해 EMFA는 평행한 자석판 사이에 코일을 위치시켰다. (그림. 1(a)) 로렌츠 힘으로 이동자가 움직이기에 큰 스트로크를 가지며, 인가 전류의 세기에 따라 이동자의 힘을 조절할 수 있다. 본 논문에서는 EMFA의 동특성 해석 시뮬레이션 결과와, 실험값을 비교해 보고, EMFA가 고전압 가스차단기에 적합한 특성을 가짐을 확인하였다. 이러한 EMFA의 동특성 자장 해석에는 유한요소법(FEM)을, 회로 방정식 계산에는 시간 차분법(TDM)을 적용하였다.

2. 구조와 동작원리

EMFA의 기본 구조는 그림1(a)에서 나타나 있듯이 이동자 코일, 이동자 철심, 외부 철심, 영구자석과 구동축의 5가지 부분으로 구성되어



(a) EMFA의 기본 구조 (b) EMFA가 장착된 가스차단기
<그림 1> EMFA의 구조



<그림 2> EMFA의 자속분포

있다. 이동자 코일과 이동자 철심, 구동축은 같이 움직인다. 이동자 코일은 전류를 인가시킬 경우 영구자석과 연동해서 로렌츠 힘을 발생, EMFA의 선형운동을 일으킨다. 이동자 철심은 정지 상태에 홀딩력을 발생시킨다. 로렌츠 힘은 차단기의 개폐 속도를 결정하며, 홀딩력은 높은 전자반발력을 흡수하고 전류의 위치를 안정적으로 유지시켜주는 역할을 한다. 외부 철심은 조작기의 외형을 이루어 조작기의 부피에 밀접하게 관련되며, 자속의 경로를 형성해 이동자가 받는 힘의 특성에 영향을 준다. 그리고 구동축은 EMFA의 구동을 차단부에 전달하는 역할을 한다.[4]

그림 1(b)는 EMFA에 연결된 가스 차단기의 구조를 나타낸 것이다. 가스 차단기용 EMFA는 영구 자석에 의한 홀딩력으로 이동자를 지지하기 때문에 부가적인 결속장치가 필요없다. 그리고 스트로크 구간의 양 끝단에는 이동자의 속도를 줄이기 위해 스프링 완충장치를 사용하였다. 이 완충장치는 이동자와 외부철심이 부딪히는 부위의 충격을 흡수하게 된다. 그림(2)는 EMFA의 전자력에 의한 개방과 투입시의 자속밀도의 분포를 나타내었다. 인가된 전류에 의한 로렌츠힘이 홀딩력보다 커질 때 이동자는 개폐작용을 일으키게 된다.

3. 특성 해석

고전압 가스차단기용 EMFA의 성능을 예측해야 할 때 동특성 해석이 필요하다. 시간의 변화에 따른 전류밀도와 자속을 전자계 해석을 통해 도출한 후, 회로 해석을 통해 전류와 인덕턴스를 통해 이동자의 변위와 속도를 계산하게 된다.

3.1 전자계 해석

해석에 필요한 전자기 방정식은 (1)과 같다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_o + \vec{J}_e + (\nabla \times \frac{1}{\mu} \vec{M}_r) \quad (1)$$

여기서 \vec{J}_o 는 전류밀도이고 \vec{J}_e 는 와전류 밀도, \vec{M} 은 자화, \vec{M}_r 은 자석의 잔류자화 벡터이다. A 는 자기 벡터 포텐셜이고 μ 는 투자율이다.

전자력은 두가지 식, 홀딩력에 대한 식(2), 구동력에 대한 식(3)으로 나타내어진다. 홀딩력은 전류와 관계없이 영구자석에 의해 생성된다.

$$\vec{F}^{hold} = \int \int_s \left(\frac{1}{\mu_0} (\vec{B} \cdot \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \cdot \vec{n} \right) ds \quad (2)$$

\vec{F}^{hold} 는 홀딩력이고, s 는 이동자 철 코어의 외곽 부분 면적이다. n 은 수직 방향의 단위벡터이다.

외부 전류가 인가되면, 로렌츠의 힘에 의해 구동력 생성되며 이는 식(3)과 같다.

$$F^{operate} = q\vec{v} \times \vec{B} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (3)$$

$F^{operate}$ 는 구동력인 로렌츠의 힘이고, q 는 전하, v 는 속도이다.

3.2 회로 해석

개폐 동작시 캐패시터로부터 코일로 흐르는 전류는 시간에 따라 바뀌게 된다. 따라서 순시해석이 필수적이며, 해석 방법으로 시간차분법을 사용하였다.

$$V_c = (I_o + di)R + e \quad (4)$$

$$e = N \frac{\partial \Phi(i, x)}{\partial t} \quad (5)$$

$$\Phi = L(i, x)I \quad (6)$$

V_c 는 캐패시터의 전압이고, I_o 는 인가 전류의 초기값이다. R 은 코일의 저항이고, N 은 코일의 턴수이며, L 는 인덕턴스이다. 전자기 해석을 통해서 구해진 자속과, 인덕턴스, 역기전력을 방정식(4), (5), (6)을 통해 외부 전류의 변화를 구할 수 있다. 자속은 전류의 변동과 코일의 위치에 영향을 받는다. 따라서 정확한 순시 해석을 위해 전류의 변화와 코일의 위치에 따른 인덕턴스 변화도 고려되어야 한다.

이에 따라 회로방정식은 이동자가 움직이지 않고 인가 전류가 바뀔 때 자속이 외부전류에 영향을 주는 방정식(7)과, 이동자의 위치와 인가 전류가 바뀔 때 자속이 외부전류에 영향을 주는 방정식(8)로 표현된다.

$$V = (I_o + di)R + N \left(\frac{\partial \Phi}{\partial i} \right) \left(\frac{di}{dt} \right) \quad (7)$$

$$V = (I_o + di)R + N \left(\frac{\partial \Phi}{\partial i} \right) \left(\frac{di}{dt} \right) + N \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (8)$$

초기상태에서 홀딩력은 구동력보다 세다. 외부전류가 코일에 서서히 인가되더라도, 이동자는 움직이지 않는다. 이 구간은 식 (7)로 표현된다. 하지만 외부에서 인가되는 전류가 계속 커짐에 따라, 구동력은 홀딩력보다 커지게 되어 이동자가 움직이게 된다. 이는 식 (8)으로 표현된다.

3.3 운동방정식

조작기는 전기에너지를 운동에너지로 바꾸는 시스템이다. 기본 운동방정식은 식(9)이다.

$$m \left(\frac{d^2z}{dt^2} + g \right) = F^{hold} + F^{operate} + F^{gas} + F^{fric} \quad (9)$$

m 은 이동부의 무게이며, 차단기의 이동자와 구동축, 회로 차단기의 무게를 포함한다. z 는 작동길이이며, g 는 중력가속도, F^{gas} 은 삽입된 SF6가스의 반발력이며, F^{fric} 은 마찰력이다.

이동자의 속도는 식(10)을 이용하여 얻을 수 있으며 이로부터 변위를 계산할 수 있다.

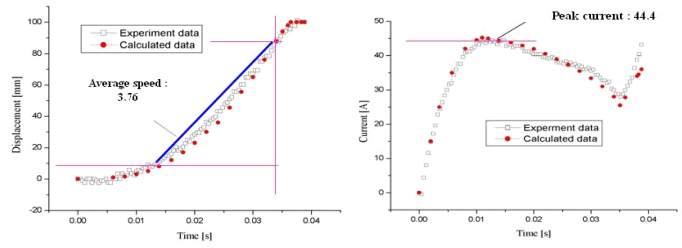
$$dv = \frac{(F^{hold} + F^{operate} + F^{gas} + F^{fric} - mg) dt}{m} \quad (10)$$

4. 결과 분석

제작된 72.5KV/20KA GIS시스템용 EMFA의 기본적인 사양은 표1이며, 무부하 개로실험의 시뮬레이션과 실험 결과는 그림(3)에 나타나 있다. 그림3(a)의 그래프에서 스트로크의 80%에 해당하는 부분의 평균 속력은 약 3.76m/s로 측정되었다. 이는 개로시의 요구속도 3.2m/s를 충족

〈표 1〉 제작된 EMFA의 사양

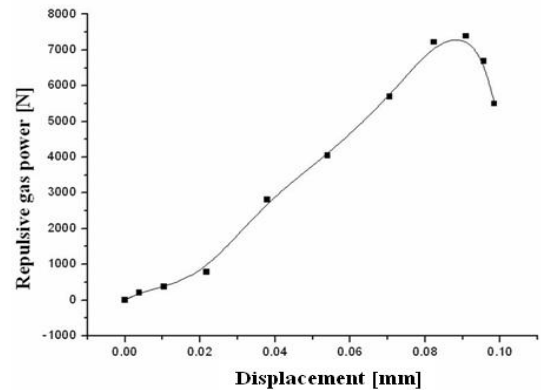
차단시간	3주기	
요구속도	개로시	3.2 [m/s]
	폐로시	2.3 [m/s]
이동자 무게	36 [kg]	
스트로크	100 [mm]	
최대SF ₆ 가스반발력	1460 [kgf]	
전압	220-280 [v]	
캐패시터	0.1 [F]	
저항	0.785 [Ω]	
폐로시 홀딩력	1800 [N]	



(a) 이동자의 변위와 평균속도

(b) 전류변화

〈그림 3〉 무부하 개로실험 결과와 시뮬레이션 비교



〈그림 4〉 스트로크에 따른 가스반발력

시킬 뿐만 아니라 실험결과와 해석결과는 유사한 것을 볼 수 있다. 그림 3(b)의 그래프에서는 전류가 44.4[A]까지 인가된 후 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 3(a)와 3(b)에서 나타나듯이 전류는 이동부가 움직이기 전까지는 최대값을 나타내고, 이동자의 속도가 증가하게 되면 이동자의 변위에 의한 역기전력의 발생으로 전류는 감소하게 된다.

그림 4는 스트로크에 따른 가스 반발력을 측정된 그래프이다. 가스반발력은 스트로크에 따라 서서히 증가 후, 스트로크의 후반부에 최대값을 가지게 된다. 즉 가스차단기는 스트로크 후반의 가스반발력을 이기도록 설계되어야 하는데, 그림3의 그래프에서 보이듯이 측정된 EMFA의 동작 특성은 가스차단기에 적용하기에 적합하다.

5. 결 론

본 논문에서는, 고전압 가스차단기에 적용되는 EMFA에 동작 특성을 해석하기 위해 유한요소법과 시간차분법을 결합하였다. 또한 실제 72.5kV/20kA 가스차단기에 적용한 EMFA를 설계 및 제작하여 동특성의 해석결과와 실험결과를 비교하여 제안된 해석기법에 정확성과 타당성을 검증하였다. 또한 EMFA는 높은 가스반발력과 긴 스트로크를 요구하는 고전압 가스차단기 적용에 적합함을 확인하였다.

〔참 고 문 헌〕

[1] Jong-Ho Kang, and Hyun-Kyo Jung, "Dynamic Behavior Analysis of Permanent Magnetic Actuator in Vacuum Circuit Breaker" *The Seventh International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp.256-259, 2004.

[2] Edgar Dullni, "A Vacuum Circuit-breaker with Permanent Magnetic Actuator for Frequent Operations", *IEEE 18th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum-Eindhoven*, pp. 688-691, 1998.

[3] 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 Linear Drives for Industry Applications*, pp. 383-386, September 2005.

[4] 김래은, 강종호, 최상민, 정현교, "설계 변수 변화에 따른 고전압 가스 차단기용 전자석 조작기(EMFA)의 해석 특성", 대한전기학회 EMECS 하계학술대회 논문집(CD), 2007.