

3링크를 적용한 기중차단기용 전자식 조작기(EMFA) 해석

이승민, 강종호, 광상엽, 정현교
서울대학교 전기컴퓨터 공학부

Dynamic Characteristics Analysis of Electric Actuator (EMFA) for Air Circuit Breaker (ACB) with Three-bar Linkage structure

Seung-Min Lee, Jong-Ho Kang, Sang-yup Kwak, and Hyun-Kyo Jung
School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

Abstract - In this paper, a new type of electromagnetic actuator, an electro magnetic force driving actuator (EMFA) is developed and analyzed, applicable to air circuit breaker (ACB). 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 coupled problems of electrics and mechanics governing equations are solved using the time difference method (TDM). Also according to interception rate of each contactor, investigation about load condition of contactor spring is conducted, applied it to three-link system. And comparison about dynamic characteristics of three-link simulation and experiment data are performed.

1. 서 론

저전압 기중 차단기는 1940년 이래로 전력 시스템에서 중추적인 역할을 담당해 왔다. 비록 퓨즈나 MCCB (Molded Case Circuit Breaker)와 같은 장치들이 등장하였지만, 저전압에서 기중 차단기는 여전히 가장 널리 쓰이는 차단기이다[1].

많은 기중 차단기는 아크 접점과 전류 접점으로 나누어져 있다. 이러한 기중 차단기는 접점 끝단의 접촉 저항을 줄이기 위해 큰 접점 하중을 요구하는데, 이를 충족시키기 위해 주로 접점 스프링을 이용하게 된다. 하지만 차단기의 개로시 이러한 접점 하중들은 부하로 작용하여 더 큰 조작기의 요구 스트로크와 힘을 요구하게 된다. 이러한 접점 조건과 아크 발생구간에서의 요구 속도를 충족시키기 위해 전통적으로 스프링이나 유압 액추에이터를 사용하여 왔다. 이러한 전통적인 액추에이터는 높은 에너지 밀도를 가져 큰 힘을 낼 수 있지만, 액추에이터에 들어가는 많은 부품 수는 각각 발생하는 부품별 공차의 문제와, 연결되는 여러 링크부들은 다른 계속적인 유지와 보수가 필요로 하게 되어 결국 액추에이터의 신뢰성을 떨어뜨리게 된다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 최근 전자식 액추에이터가 각광받고 있다. 솔레노이드나 PMA(Permanent Magnetic Actuator)가 그것이다[2]. PMA는 적은 부품 수에 따른 높은 신뢰성과 그에 따른 유지와 보수에 어느 정도 자유로울 뿐만 아니라, 입력하는 전압과 전류를 조정함으로써 액추에이터를 조작할 수 있다[3]. 하지만 PMA는 긴 스트로크를 요구하는 고전압용 액추에이터에는 PMA의 구조상 발생하게 되는 큰 자기저항 때문에 적용이 힘들다. 또한 전통적인 액추에이터들에 비해 에너지 밀도가 작아서 상대적으로 큰 부피를 필요로 한다.

그 결과 새로운 형상의 전자식 조작기 EMFA (ElectroMagnetic Force driving Actuator)가 개발되었다[4]. EMFA는 구조상 긴 스트로크와 큰 부하를 견딜

수 있을 뿐만 아니라, PMA에 비해 에너지 밀도가 높아서 작은 부피로 설계가 가능하다. 긴 스트로크에도 공기층을 통과할 때 생기는 자기 저항이 적어서 높은 힘을 낼 수 있다.

또한 3링크를 기중 차단기용 EMFA에 적용함으로써 스트로크 끝단에 집중되어 있는 접점 부하를 스트로크 전체로 분산할 수 있게 될 뿐만 아니라, 링크 비틀 조절함으로써 필요 스트로크와 요구속도를 쉽게 조절할 수 있게 된다.

2. 본 론

2.1 EMFA와 3링크의 일반적인 구조

2.1.1 EMFA의 구조

EMFA의 일단적인 구조는 그림 1과 같이 크게 5가지 부분, 코일과 내부 철심, 외부 철심, 영구자석과, 구동축으로 이루어져 있다. 그중 이동자는 코일과 내부 철심, 구동축으로 구성되어 있다. 코일과 내부 철심은 물딩으로 처리되어 내구성을 높였고, 구동축은 그림 1과 같이 이동자의 외부에 부착되어 있다. 내부 철심은 영구자석과 자속의 경로를 만들어 홀딩력을 형성하며, 코일은 전류를 인가받아 구동력인 로렌츠힘을 만들게 된다. 구동축은 EMFA에서 형성한 힘을 접점이나 3링크에 전달하는 역할을 하며, 외부 철심은 자계의 경로를 제공하며, EMFA의 외함을 형성한다.

DC나 AC 전압원을 캐패시터와 연결해 O-CO 동작조건을 만족시키고, 스위칭 소자로서 IGBT를 사용해 전류와 코일의 인덕턴스를 조절하여 이동자의 힘과 속도를 조작하게 된다[5]-[6]. 이렇게 설계된 1KV/3.2KA 기중 차단기용 EMFA의 상세 사양은 표 1과 같다.

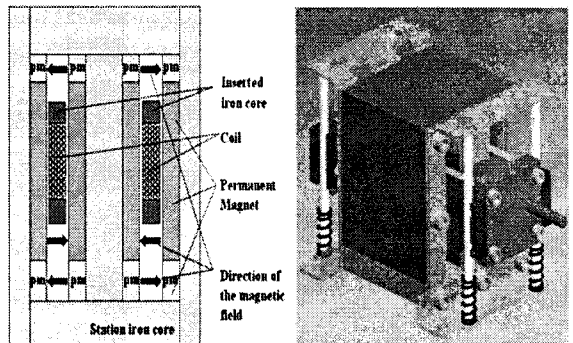


그림 1. EMFA의 구조

표 1
1KV/3.2KA 기중 차단기용 EMFA의 상세 사양

X축 길이	112[mm]
Y축 길이	121[mm]
Z축 길이	100[mm]
스트로크	43[mm]
이동자의 무게	1.3[kg]
코일저항	1.17[Ω]
코일직경	1.1[mm]
코일턴수	165

2.1.2 3링크와 연결된 EMFA

그림 2는 각각 개로와 폐로 상태의 3링크를 나타낸다. 축 L1은 고정링크 D에 연결되며, 축 L2는 접점부와 연결되는 Y방향 이동링크 A에 연결된다. 그리고 축 L3은 축 L1과 링크 C로 연결되어 X방향에 부착된 액추에이터와 연결되게 된다.

3링크는 그림 2의 초기 각 θ_1, θ_2 의 크기와 축 L1, L2, L3의 길이에 따라 여러 비선형 운동을 하게 된다. 이런 3링크의 특성은 아크 발생 영역에서의 접점의 요구속도를 잘 맞출 수 있게 될 뿐만 아니라, 폐로시 스트로크의 끝단에 집중된 점접 하중을 스트로크의 여러 영역으로 분산시키는 역할을 하게 된다. 이에 따라 설계된 기중 차단기용 EMFA의 3링크의 상세는 표 2와 같다.

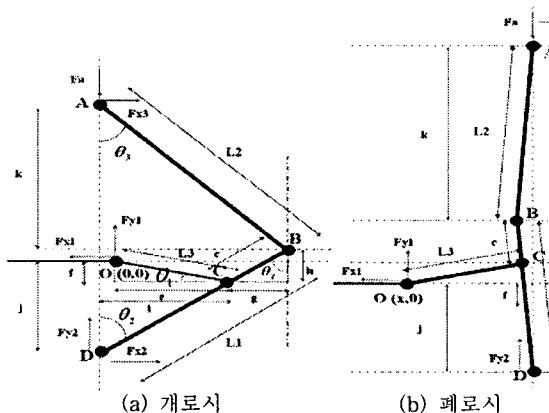


그림 2. 3링크 도식도

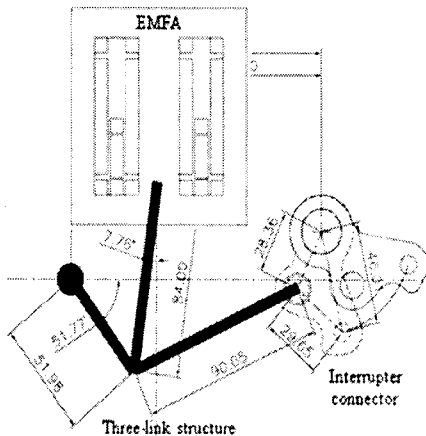


그림 3. 3링크에 연결된 EMFA

표 2
1KV/3.2KA 기중 차단기용 3링크의 상세 사양

L1	90.05[mm]
L2	51.98[mm]
L3	84[mm]
θ_1	7.76[degree]
θ_2	51.77[degree]

2.2 EMFA의 특성 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 J_o 는 전류밀도이고 J_e 는 와전류 밀도, M 은 자화, 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.

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

F^{hold} 는 홀딩력이고, s 는 이동자 철 코어의 외곽 부분 면적이다. n 은 수직 방향의 단위벡터이다. 외부 전류가 인가되면, 로렌츠의 힘에 의해 구동력 생성되는 식(3)과 같다.

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

$F^{operate}$ 는 구동력인 로렌츠의 힘이고, q 는 전하, v 는 속도이다. 개폐 동작시 캐패시터로부터 코일로 흐르는 전류는 시간에 따라 바뀌게 된다. 따라서 순시해석이 필수적이며, 해석 방법으로서 시간차분법을 사용하였다.

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

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

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

V_c 는 캐패시터의 전압이고, I_o 는 인가 전류의 초기값이다. R 은 코일의 저항이고, N 은 코일의 턴수이며, L 은 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.

그리고, 기본 운동 방정식은 식(9)이다.

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

m 은 이동부의 무게이며, 차단기의 이동자와 구동축의 무게를 포함한다. z 는 스트로크이며, g 는 중력가속도, F^{spring} 은 점점스프링의 반발력이며, F^{fric} 은 마찰력이다.

2.3 결과분석

그림 4는 측정된 기중 차단기용 EMFA의 스트로크에 따른 점점부하와, 점점 부하에 3링크를 연결하였을 때의 점점부하를 나타낸다. 3링크의 비선형적 특징이 선형인 점점 부하를 그림 4와 같이 비선형적 점점 부하로 바꾸게 된다. 이에 따라 나타난 부하의 특성은 최대 부하가 약 30%나 감소하였을 뿐만 아니라, 스트로크 끝단에 집중된 부하가 스트로크의 앞부분으로 이동시키게 된다. 그림 5는 3링크를 적용하였을 시 점점의 스트로크와 액추에이터의 스트로크의 비를 나타낸 그림이다. 일반적인 다이렉트 링크와 달리, 3링크는 비선형적인 특징을 보이게 된다. 특히 스트로크의 앞단에서의 기울기가 큰 점은 개로시 아크 발생구간에서 평균 속도를 더 빨리 가져갈 수 있는 특성을 제공하며, 스트로크 끝단의 수평인 기울기는 점점끼리 충돌 시 발생할 충격과 마모를 줄일 뿐만 아니라 충돌로 발생할 채터링을 줄여주는 역할을 하게 된다. 또한 그림 2와 3에서 보이듯이 3링크 구조는 점점과 액추에이터가 서로 90도 위상을 가지며 힘을 주고받게 된다. EMFA는 영구자석이 홀딩력을 제공하는 구조이기 때문에 래치를 필요로 하지 않지만, 홀딩력은 차단기가 개폐시 부하가 된다. 하지만 이와 같은 3링크 구조를 사용함으로써 액추에이터가 제공해야 할 점점의 필요 홀딩력을 상당부분 줄일 수 있게 된다.

그림 6은 3링크를 적용한 EMFA의 시뮬레이션과 속도결과와 고속 카메라로 측정된 실험 속도 결과의 비교이다. 초기 0.1ms에서 6ms구간의 실험 속도는 3링크를 제작 시 생긴 공차로 인한 오차로 분석된다. 공차로 인한 링크가 순차적으로 힘을 전달하지 못하여 생긴

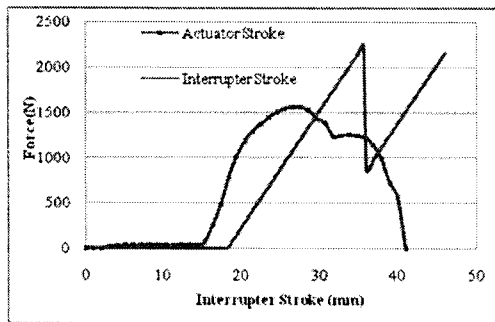


그림 4. 스트로크에 따른 점점부하

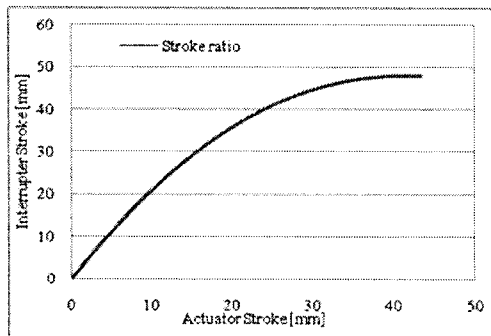


그림 5. 3링크를 적용한 스트로크 비

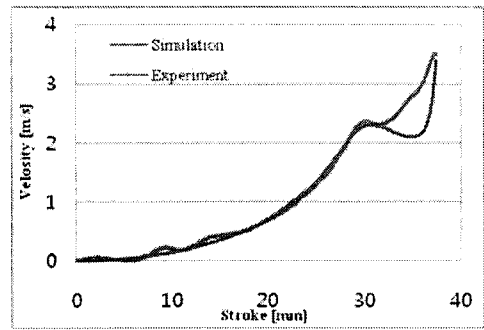


그림 6. 시뮬레이션과 실험의 속도 비교

오차이다. 그리고 스트로크 끝단에 생긴 오차는 점점 스프링의 탄성력에 따른 반작용과 EMFA의 관성을 정확히 고려하지 못하여 생긴 오류이다. 비록 몇 부분에서 시뮬레이션의 오류가 있지만, 전체적인 속도의 개형은 시뮬레이션이 실험결과와 부합하는 것을 볼 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 1KV/3.2KA 기중 차단기용 EMFA에 3 링크를 적용하였다. 이에 따라 EMFA의 전자계 해석을 위해 유한요소법을 사용하였으며 동특성 해석을 위하여 시간차분법을 사용한 결과, 소개된 3링크를 적용한 EMFA는 기중 차단기에 적합한 특성을 보여주었다. 또한 실제 1KV/3.2KA 기중 차단기용 EMFA를 설계 및 제작하여 동특성의 해석결과와 실험결과를 비교하여 제안된 해석기법에 정확성과 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] W. S. Jackson, Vice President "The air circuit breaker 50 years of technology" Digital Object Identifier 10.1109/TEXCON. 1997
- [2] E. 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] Xiong, Guangyu, Yamada, "Dynamic analysis of a cylindrical moving-core linear oscillator actuator", Linear Drives for Industry Applications 95 Nagasaki, JAPAN, pp. 405-408, 1999.
- [4] J.H. Kang and H. K. 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, 25-28 September 2005, pp. 383-386.
- [5] W. Kim, S. Y. Kwak, J. Lee, D. Choi, H. K. Jung, K. Seong, and S. Hahn, "Design of HTS magnets for a 600 kJ SMES," IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 16, no. 2, pp. 620-623, May 2006.
- [6] Ma Shaohua, and Wang jimei, "Research and Design of Permanent Magnetic Actuator for High Voltage Vacuum Circuit Breaker", IEEE XXth international Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, pp. 487-490, 2002