

Design of Electromagnetic Actuator with Three-Link Mechanism for Air Circuit Breaker

김 래 은[†] · 곽 상 엽* · 정 현 교**
(Rae-Eun Kim · Sang-Yeop Kwak · Hyun-Kyo Jung)

Abstract - In this paper, an electromagnetic force driving actuator (EMFA) and three-link mechanism are proposed as a driving mechanism and connection device for low voltage air circuit breaker (ACB). As the result of dynamic characteristic analysis, the actuator and link mechanism are designed from the simulation and manufactured. The magnetic field of the EMFA is analyzed using the finite element method (FEM). The dynamic characteristic analysis with calculation of the circuit equation and kinetical equation is performed by the time difference method (TDM). Also, the result of the analysis is verified through the experiment of the fabrication model. In this paper, the EMFA size is smaller than the actuator for high voltage circuit breaker. Thus, the dynamic characteristic is analyzed with end-winding inductance that is calculated by the same method which is applied on the circle type end-winding of motors. The designed model for 1600 ampere-frame ACB and the three-link mechanism for connecting contact part with actuating part are manufactured. It is confirmed that the three-link mechanism is possible for improving the circuit breaker efficiency and reducing the size of the EMFA. It is proved that the improved 2-D analysis is more accurate than established method.

Key Words : Electromagnetic actuator, EMFA, Three-link mechanism, Endwinding inductance, ACB, FEM

1. 서 론

송배전 계통을 보다 효율적으로 관리하기 위한 노력의 일환으로 전력 IT 사업이 진행되고 있다. 전력 IT의 핵심 사업 중 하나인 배전 자동화 시스템은 전력의 송전에서부터 사용에 이르기까지 일련의 과정을 원격으로 감시, 관리 및 제어하기 위한 전력 관리 체계라고 할 수 있는데, 이러한 배전 계통의 전력 기기중 대표적인 것이 바로 기중차단기, 배선용 차단기 등이다. 그동안 관련 업계에서는 배전 자동화 시스템 구축을 위한 다양한 기술을 개발하고, 새로운 제품을 선보이고 있으나, 소프트웨어에 비해 하드웨어적인 면은 기존의 기술을 응용하는 수준에 머물러 있다. 특히, 차단기의 접점을 구동하기 위한 방식은 대부분 스프링 등을 사용하는 기계적인 방식이며, 원격 구동은 이와 같은 기계식 구동부를 가지는 차단기의 손잡이를 모터 등을 이용하여 조작시키는 형태로 구현하고 있다.

본 논문에서는 배전 계통의 차단기의 원격화를 위한 기술로 기중차단기의 기계적인 방식의 조작부를 전자석으로 대체하고자 한다. 이를 위해 기 개발된 조작방식으로 영구 자

석형 조작기(permanent magnetic actuator, PMA)를 검토하였다 [1]. 1990년대 후반에 등장한 영구 자석형 조작기는 전자기력을 이용한 차단기 구동 메커니즘으로, 구조가 간단하고 원격 개폐가 가능하며, 외부의 전원 없이 영구자석으로 접점을 붙잡아주는 기능이 있어 고전압 진공 차단기용으로 사용되고 있다 [2]. 그러나 이동자의 스트로크 길이에 비해 부피가 커서 기중차단기와 같이 크기가 작은 차단기에는 적용이 곤란하다. 이와 같은 단점을 극복하고자 개발된 전자석 조작기(electromagnetic force driving actuator, EMFA)는 코일이 움직이는 방식으로, 로렌츠 힘에 의해 동작하기 때문에 이동자의 스트로크 길이를 길게 가져갈 수 있는 장점이 있다 [3-4]. 또한 작은 크기로도 큰 힘을 낼 수 있어 배전 계통의 저압 차단기에 응용이 가능하다. 이러한 점에 착안하여 본 논문에서는 전자석 조작기를 1600A급 기중 차단기의 구동 메커니즘으로 적용하였다. 적용 과정에서 차단기의 성능 향상에 도움이 되는 운동 전달 구조인 3절 링크를 고안하였다. 3절 링크는 그림 1과 같이 전자석 조작기와 접점부를 연결시켜 힘을 전달하고 접점을 지지하는 역할을 한다.

전자석 조작기를 설계하기 위해 유한요소법을 이용하여 영구자석 및 외부 전류원으로부터 발생되는 자계를 해석하였고, 시간 차분법을 통해 동작 특성 해석을 수행하였다. 해석시 3차원 성분인 엔드와인딩을 고려하여 해석 방법을 개선하였고, 실험 결과와의 비교를 통해 기존 해석 기법보다 정확함을 검증하였다. 3절 링크의 운동은 링크가 이루는 각

* 정 회 원 : 두산인프라코어 기술원 선임연구원
** 펠로우 회원 : 서울대학교 전기공학부 정교수
† 교신저자, 정회원 : 서울대학교 전기공학부 석사과정
E-mail : comesilver@empal.com
접수일자 : 2008년 12월 30일
최종완료 : 2009년 5월 8일

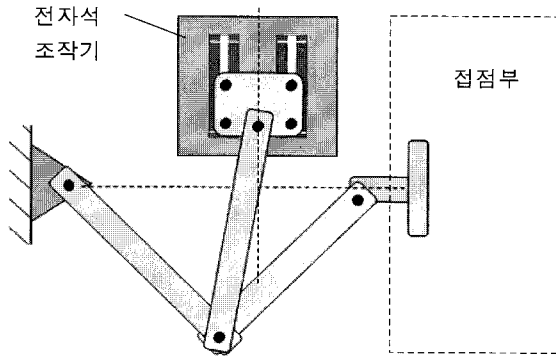


그림 1 3절 링크의 구조
Fig. 1 Structure of the three-link mechanism

도를 기준으로 계산하여 입력에 대한 출력의 관계식으로 도출하였고, 실험을 통해 차단기의 성능 향상을 확인하였다.

2. 전자석 조작기 설계 및 특성 해석

2.1 정자계 해석

기중 차단기는 고전압 가스 차단기나 진공 차단기와 달리 절연 매질을 포함하지 않고 공기 중에서 차단 과정이 이루어지기 때문에 매질에 따른 반발력이나 마찰은 일반적으로 고려하지 않는다. 다만, 차단기가 투입되어 부하와 배전 선로를 연결시켜 주는 경우 접점을 안정적으로 눌러 주는 접점 스프링은 저압 차단기에도 사용되기 때문에 스프링의 힘이 조작부에 미치는 영향을 고려해야 한다.

전자석 조작기 설계 과정은 크게 2단계로 구분할 수 있다. 차단기의 접점이 투입된 상태와 관련된 정자장 설계와, 로렌츠 힘 및 이동자의 동작과 관련된 코일 설계이다. 정자장 설계를 통해 조작기가 필요한 홀딩력을 결정하고 코일부의 면적과 코일 직경, 턴수 등을 설계하여 동작 특성 해석을 수행한다. 이때 차단기가 필요로 하는 동작시간, 이동자의 속도 등을 고려하여 코일 설계 값을 수정 및 보완하여 조작기를 설계한다. 설계 흐름은 그림 2와 같다.

전자석 조작기는 그림 3과 같이 직육면체 형태로 2차원 설계 및 해석이 매우 용이하다. 특히 자석과 철심으로 이루어진 고정자 몸체는 2차원 평면으로 해석하고 두께를 적용한다. 이동자 코일은 평면을 수직으로 통과하는 전류로 가정하여 해석하는데, 기존 해석 기법에서는 엔드와인딩을 고려하지 않았다. 전자석 조작기에서 홀딩력에 가장 직접적인 영향을 주는 요소는 보조 영구 자석과 이동자 철심의 크기이다. 영구 자석은 홀딩력의 원천이 되고, 이동자 철심은 이동자의 상·하단에 위치하여 동작 완료 후 이동자를 고정시키는 역할을 한다 [5]. 코일부는 홀딩력에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 보조 영구 자석과 이동자 철심의 크기를 통해 홀딩력을 결정한다. 유한요소법을 이용한 정자장 해석에서 맥스웰 응력 텐서법(Maxwell stress tensor)을 통해 식 (1)과 같이 힘을 계산할 수 있다.

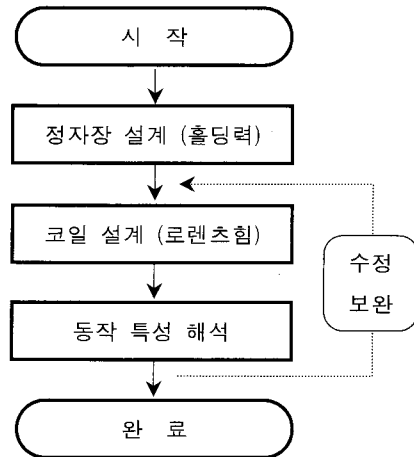


그림 2 전자석 조작기 설계 순서도
Fig. 2 Design flowchart

$$\vec{F}_m = \iint_S \left\{ \frac{1}{\mu_0} (\vec{B} \cdot \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} |\vec{B}|^2 \vec{n} \right\} ds \quad (1)$$

여기서 \vec{F}_m 은 이동자가 받는 전자력, μ_0 는 진공 투자율이고, \vec{B} 는 자속밀도, \vec{n} 은 이동자를 둘러싼 폐곡면을 빠져나가는 수직방향의 단위벡터를 의미한다.

정자장 설계를 통해 대략적인 크기를 설계한다. 포화를 고려하여 전자석 조작기의 중앙 철심폭과 좌우 및 상하 철심폭을 결정하는데, 중앙 철심폭은 좌우 및 상하 철심폭의 1.5~2배 이하에서 결정되며, 철심을 통과하는 평균 자속밀도의 최대값이 2T를 넘지 않도록 한다. 부피가 결정되면 코일 설계를 통해 조작기의 크기를 확정하고 동작 특성 해석을 수행한다. 코일은 구동회로에서 요구하는 전압, 전류 등의 조건에 따라 선정하는데, 특히 최대 전류값의 경우 전자회로 소자의 용량과 밀접하기 때문에 회로의 능력을 초과하지 않도록 코일의 직경과 턴수를 결정해야 한다.

2.2 엔드와인딩을 고려한 동작 특성 해석

동작 특성 해석을 하기 위해서는 시간 차분법과 유한요소법을 번갈아 적용해야 하며, 시간 간격을 설정하여 회로방정

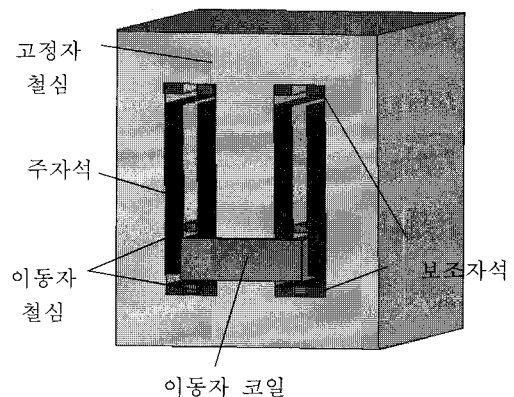


그림 3 전자석 조작기의 구조
Fig. 3 Basic construction of EMFA

식으로부터 전류 및 로렌츠 힘을 계산하고 운동방정식을 통해 이동자를 이동시킨다. 그림 4는 구동 회로를 포함하는 전자석 조작기의 등가회로를 나타낸다. 이로부터 식 (2)와 같은 회로방정식을 얻을 수 있다.

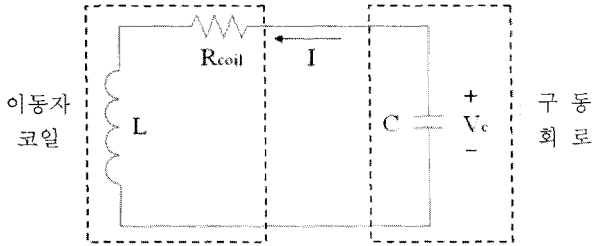


그림 4 구동회로를 포함한 전자석 조작기의
Fig. 4 Equivalent circuit of EMFA

$$V_C = IR_{coil} + L \frac{di}{dt} = IR_{coil} + N \frac{d\Phi(i, x)}{dt} \quad (2)$$

여기서, L 은 코일의 인덕턴스, N 은 턴수이고, Φ 는 자속을 나타낸다. 전류가 증가되면 인덕턴스의 변화가 일어나고, 전류 증가에 의해 로렌츠 힘이 홀딩력보다 커지면 이동자가 동작하면서 변위에 따른 인덕턴스 변화가 나타나는데, 이를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_C = (I_0 + di)R_{coil} + L_i \frac{di}{dt} + L_x \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

여기서, I_0 는 코일에 인가되는 최초 전류값, di 는 전류 변화량이다. L_i 와 L_x 는 각각 전류와 변위에 의한 인덕턴스를 의미하며 식 (4)와 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$L_i = N \frac{d\Phi(i, x)}{di} \quad (4)$$

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

식 (4)는 전류 변화에 의한 변압기 기전력, 식 (5)는 변위 변화에 의한 속도 기전력이며, 충전된 전압을 떨어뜨려 이동자의 동작을 방해하는 성분으로 작용한다. 인덕턴스가 증가하면 구동회로의 전압의 전압을 떨어뜨려 이동자 코일에 흐르는 전류를 감소시키고, 전류 감소로 인해 로렌츠 힘이 줄어들어 동작 특성이 나빠지는 것이다.

이동자의 운동은 식 (6)과 같이 운동방정식을 계산하여 해석에 반영한다. 가속도로부터 속도 및 변위를 계산하여 이동자의 위치를 옮겨주는 방식으로 동작 특성 해석을 하게 된다.

$$m \left(\frac{dv}{dt} + g \right) = \vec{F}_{operate} + \vec{F}_{spring} + \vec{F}_{friction} \quad (6)$$

여기서, m 은 이동자의 질량, \vec{F}_{spring} 은 접점 스프링이 작용하는 구간에서의 스프링 탄성력이고, $\vec{F}_{friction}$ 은 마찰력을

나타낸다. $\vec{F}_{operate}$ 는 식 (7)과 같이 전류에 의한 로렌츠 힘과 자석에 의한 홀딩력으로부터 얻어지는 이동자를 동작시키는 힘이다.

$$\vec{F}_{operate} = \vec{F}_{Vcentz} + \vec{F}_m \quad (7)$$

선행 연구된 전자석 조작기는 고전압 차단기용으로 그 크기가 커서 엔드와인딩을 고려하지 않고 해석하였으나, 저압 차단기용으로 적용하기 위해 크기를 줄이면서 엔드와인딩이 차지하는 비율이 상대적으로 커져 해석과 실험 결과에 다소 차이가 발생하였다. 이를 개선하고자 엔드와인딩을 원형으로 가정하고 인덕턴스를 계산하여 엔드와인딩 효과를 해석에 반영하였다. 기존 방법으로 해석시 코일 형상은 그림 5.(a)와 같이 직사각 형태로 가정하였다. 실제 코일은 그림 5.(b)와 같이 둥근 모서리를 가지는 사각형으로 감기는데, 이를 그림 6.(a)와 같이 원형으로 가정하고 식 (8)을 이용하여 엔드와인딩 인덕턴스를 계산하였다.

$$L_{end} = \frac{\mu_0 N^2 D}{2} \ln \left(\frac{4D}{GMD} - 2 \right) \quad (8)$$

여기서, D 는 그림 6.(b)에 표시된 것과 같이 엔드와인딩의 유효직경이다. GMD 는 도체간의 기하평균 거리(geometric mean distance)를 의미하며, 코일부의 단면적을 S 라고 한다면 $GMD = 0.447\sqrt{S}$ 로 계산한다 [6-8]. 이로부터 계산된 값을 앞의 식 (4)와 (5)에 각각 더한 뒤 동작 특성 해석을 수행한다.

3. 3절 링크 고안 및 운동 계산

3.1 3절 링크의 구조

차단기 시스템은 접점을 포함하고 있는 차단부와 접점 구동을 위한 조작부로 이루어지는데, 이를 연결시켜 운동을 전

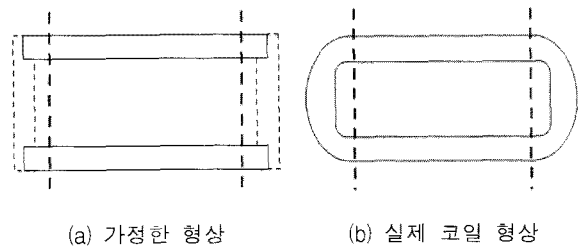


그림 5 기존 해석시 가정한 코일과 실제 형상
Fig. 5 Winding shape of the mover of EMFA

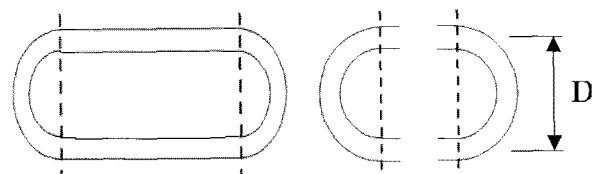


그림 6 원형 엔드와인딩 해석 형상
Fig. 6 Proposed end-winding shape for calculating inductance

달하는 수단으로 캠(cam), 레버(lever) 등을 이용한다. 그러나 일반적인 레버 구조의 경우 조작부의 운동에너지가 최대가 될 때, 즉 움직이는 속도가 가장 빠를 때 차단부의 접점이 충돌하게 되어 접점의 마모 및 떨림 현상이 발생하는 문제점이 있다. 접점의 입장에서 보면 고정 접점과 가동 접점이 접촉할 때 충격이 작아지는 것이 유리하지만 레버 등을 이용한 운동 전달 방식은 접점에 충격을 그대로 가해주게 된다.

이러한 단점을 개선하고자 운동 전달 방식으로 3절 링크를 고안하였다. 3절 링크는 그림 1에서 언급한 구조로, 이를 간단히 도식화하면 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 조작기와 접점의 운동 방향이 수직이면서 비선형 관계이기 때문에 투입 동작시 접점이 받는 충격을 줄이게 된다. 또한 개방시의 속도를 증가시켜 차단기의 성능을 향상시키는 효과를 낼 수 있다.

이밖에도 3절 링크를 차단기의 연결 구조에 적용함으로써 얻는 장점은 투입 상태에서 확인할 수 있다. 투입 상태에서 원활한 도체 역할을 수행하며 전류를 통전시켜 주기 위해서는 조작부에서 접점이 떨어지지 않도록 지지해주어야 하는데, 자체적인 구조로 이를 수행할 수 있다. 레버를 사용하는 경우 전자식 조작기가 접점을 직접 누르거나 붙잡아야 하는데, 레버 비(lever ratio)에 의해 접점을 누르는 힘을 조작기에서 전적으로 감당해야 하는 문제점이 있다. 스프링 조작기의 경우에는 래치(latch) 등의 장치로 지지를 해주어야 하기 때문에 구조가 복잡해지고 부품의 수가 많아져야 한다. 그러나 3절 링크 구조는 조작기와 접점이 수직으로 놓이기 때문에 링크가 일직선이 되는 사점(dead point)에 위치하게 되면 조작기가 접점을 지지해주는 힘은 필요 없게 된다. 사점을 약간 지나치도록 조작기의 위치와 스트로크를 설정할 경우, 외부의 충격이나 주변의 진동에도 접점이 떨어지지 않는 구조가 되어 구조 자체적으로 접점을 지지할 수 있다. 즉, 전자식 조작기가 접점을 붙잡는 홀딩력의 크기를 작게 하여 조작기의 크기 또한 줄일 수 있는 것이다.

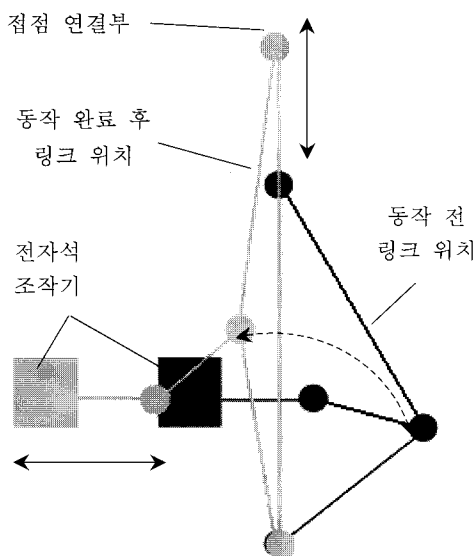


그림 7 3절 링크 구조의 도식화
Fig. 7 Schematic diagram of three-link mechanism

3.2 링크에 의한 운동 계산

3절 링크에 의해 조작기에서 접점으로 전달되는 과정에서 중요한 요소는 전자식 조작기의 스트로크 길이 및 크기와 연관되는 변위와 힘이다. 먼저 조작기의 스트로크 길이와 접점의 스트로크 길이 사이의 관계식을 구하기 위해 그림 8과 같이 도식화하였다. 그림 8로부터 조작기의 이동자 변위 (Δx)에 따라 달라지는 접점의 변위 (Δy)를 계산하기 위해 각각의 변위를 각도에 대한 식으로 나타내고, 이를 다시 소거하여 변위 비를 계산해야 한다. 투입 전 이동자가 정지한 상태에서의 초기값 X_0 와 접점의 초기 위치 Y_0 는 각각 다음과 같은 식으로 계산된다.

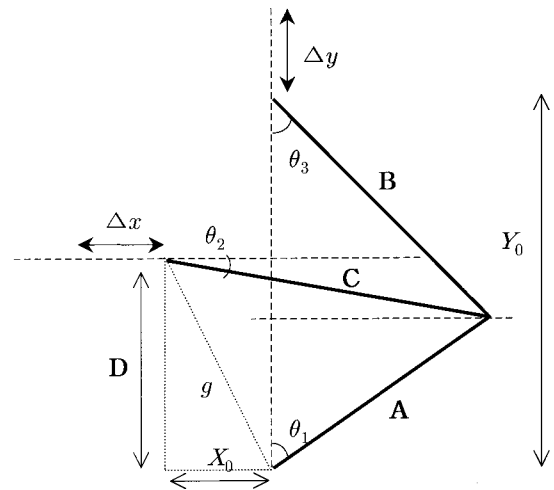


그림 8 변위 계산을 위한 3절 링크 도식화
Fig. 8 Schematic diagram of three-link mechanism for calculating displacement

$$X_0 = C \cos \theta_{20} - A \sin \theta_{10} \quad (9)$$

$$Y_0 = B \cos \theta_{30} - A \cos \theta_{10} \quad (10)$$

여기서 $\theta_{10}, \theta_{20}, \theta_{30}$ 은 각각 최초 위치일 때의 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 의 값을 의미한다. 접점의 위치를 변수 y 로 두면 위치의 변화는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있고, 이로부터 접점의 변위에 관한 식은 식 (12)와 같이 유도된다.

$$y = Y_0 + \Delta y \quad (11)$$

$$\Delta y = B \cos \theta_3 + A \cos \theta_1 - (B \cos \theta_{30} + A \cos \theta_{10}) \quad (12)$$

삼각함수 연산과 코사인 법칙으로부터 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 에 관한 식을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{A^2 + g^2 - C^2}{2Ag} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x}{D} \right) \quad (13)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{x}{D} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{C^2 + g^2 - A^2}{2Cg} \right) \quad (14)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{A \sin \theta_1}{B} \right) \quad (15)$$

여기서, g 는 직각삼각형의 빗변에 해당하므로, 식 (16)과 같이 계산한다.

$$g = \sqrt{x^2 + D^2} \quad (16)$$

이와 같은 계산식으로부터 접점의 변위를 이동자 스트로크 변위에 관한 식으로 나타내면 식 (17)과 같다.

$$\Delta y = B \left[\cos \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{A \sin \theta_1}{B} \right) \right\} - \cos \theta_{30} \right] + A \left[\cos \left\{ \cos^{-1} \left(\frac{A^2 + g^2 - C^2}{2Ag} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{X_0 + \Delta x}{D} \right) \right\} - \cos \theta_{10} \right] \quad (17)$$

3.3 링크에 의해 전달되는 힘 계산

링크에 의해 전달되는 힘 계산을 위해 3절 링크를 그림 9와 같이 도식화하였다. 힘 평형 방정식을 바탕으로 운동의 축이 되는 점에서의 모멘트를 계산하였다. 3절 링크를 하나의 운동계로 볼 때 계 전체에 작용하는 힘은 수평 방향과 수직 방향의 성분 각각 식 (18), (19)와 같이 나타낼 수 있다 [9].

$$-f_{x1} + f_{x2} + f_{x3} = 0 \quad (18)$$

$$f_{y1} + f_{y2} - f_{y3} = 0 \quad (19)$$

여기서, f_{x1} , f_{x2} , f_{x3} 와 f_{y1} , f_{y2} , f_{y3} 는 각각 그림 8의 점 S, O, P에서의 x 방향 및 y 방향으로 작용하는 힘이다. f_{x1} 은 이동자의 힘을, f_{y3} 은 접점이 받는 힘을 나타낸다. 운동계에서 힘의 기준이 되는 점 O에서의 모멘트는 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

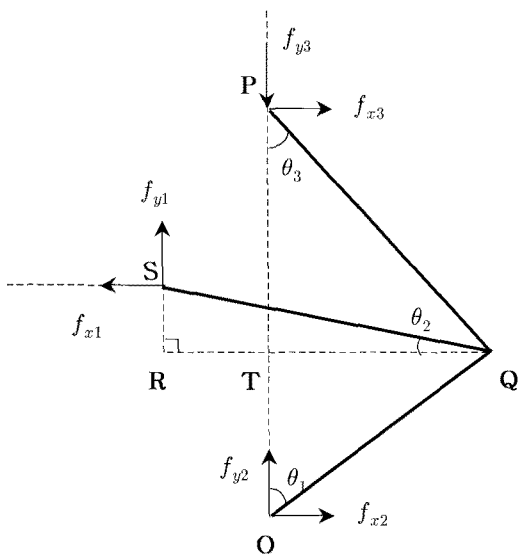


그림 9 힘 계산을 위한 3절 링크의 도식화
Fig. 9 Schematic diagram of three-link mechanism for calculating force

$$\sum M_O = (\overline{OT} + \overline{RS}) f_{x1} - \overline{RT} f_{y1} - \overline{OP} \frac{\overline{QT}}{\overline{PT}} f_{y3} = 0 \quad (20)$$

$\triangle QRS$ 에서의 삼각함수를 이용하여 각도와 선분에 대한 식을 정리하여 식 (20)에 대입하면, 이동자의 힘 f_{x1} 을 접점의 힘 f_{y3} 에 대한 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_{x1} = \frac{\overline{OP} \sin \theta_1 \cos \theta_2}{\overline{PQ} \cos \theta_3 \cos (\theta_2 - \theta_1)} f_{y3} \quad (21)$$

힘에 관한 식 (21)을 앞 절에서 구한 변위에 관한 식과 변수를 맞춰주면 식 (22)와 같이 정리할 수 있다.

$$f_{x1} = \frac{(Y_0 + \Delta y) \sin \theta_1 \cos \theta_2}{B \cos \theta_3 \cos (\theta_2 - \theta_1)} f_{y3} \quad (22)$$

전자석 조작기가 내는 힘 f_{x1} 은 동작 특성 해석을 통해 구하고, 링크에 의한 이동자와 접점의 변위 관계식으로부터 계산한 Δy 와 각도를 식 (22)에 대입하면 접점이 받는 힘 f_{y3} 를 얻는다. 반대로, 접점 스프링에 의한 힘을 f_{y3} 에 반영하여 전자석 조작기에 요구되는 힘을 유추할 수 있다.

4. 전자석 조작기와 3절 링크 제작 및 실험

4.1 3절 링크 설계 및 운동 해석

기중 차단기에 적용하기 위한 3절 링크는 조작부의 공간과 이동자 및 접점의 스트로크 길이 비를 고려하여 설계하였다. 이때 사점은 이동자가 동작 완료 1mm 전에 위치할 때를 기준으로 하였다. 표 1은 설계한 링크의 길이와 링크가 이루는 각도의 초기값을 나타낸다. 접점 스트로크 길이는 37.3mm이고, 3절 링크를 고려한 전자석 조작기의 스트로크 길이는 42mm가 되도록 설계하였다.

이동자와 접점의 스트로크 관계 곡선은 그림 10에 나타내었다. 접점 스트로크 후반부로 갈수록 이동자의 변위 변화에 대한 접점의 변위 변화량이 작아지는 것을 볼 수 있다. 즉, 3절 링크에 의해 고정 접점과 가동 접점이 접촉할 때 충격이 줄어들게 된다. 접점 스프링이 링크를 통해 전자석 조작기에 미치는 힘은 그림 11과 같은 양상으로 나타난다. 차단기의 접점 스프링은 접점 스트로크의 마지막 11mm 구간에서 작용하고, 힘의 최대값은 약 3800N이다. 3절 링크를 통해 조작기가 받는 힘은 이동자가 17.4mm 지점부터 동작을 완료하는 42mm 까지 분산되어 전달되고, 최대값은 약 1900N 정도이다.

표 1 3절 링크 설계안

Table 1 Design result of three-link mechanism

링크 길이 (mm)	초기각 (°)	
A	52	θ_1 51.77
B	90	θ_2 7.76
C	84	θ_3 27.00

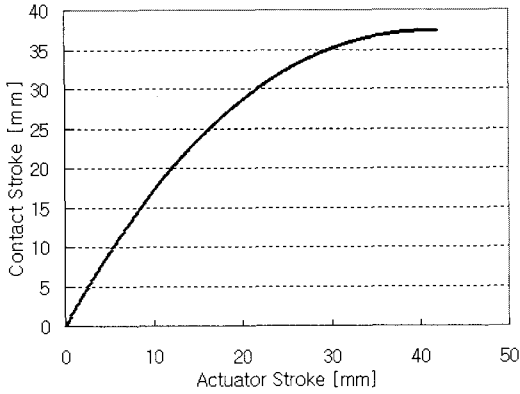


그림 10 조작기와 접점의 비선형 변위곡선
 Fig. 10 Displacement curve of actuator and contact by three-link

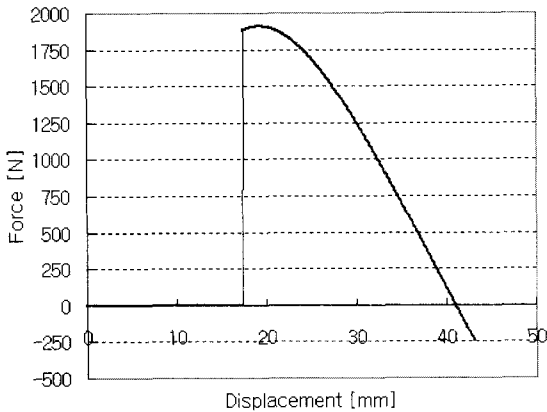


그림 11 이동자의 변위에 따른 접점 스프링 힘의 양상
 Fig. 11 Force response of mover of EMFA by contact spring

4.2 제작 및 실험

본 논문에서 적용한 기중 차단기는 1600A급이다. 그림 12는 전자석조작기와 3절 링크를 장착한 기중 차단기이다. 중앙의 육면체가 전자석 조작기이고, 아래 장착된 구조가 3절 링크이다. 전자석 조작기는 상하 대칭으로 설계하여 투입시와 개방시 모두 홀딩력이 약 1100N이다. 코일은 직경 1.1mm인 것을 165턴 감았으며, 저항은 1.5Ω으로 측정되었다.

2.2절에서 제안한 엔드와인딩 인덕턴스를 고려한 해석 기법을 검증하기 위해 전자석 조작기가 정상적으로 동작하는 구동 회로 조건인 전압 180V에서 실험을 수행하였고, 이를 그림 13에 나타내었다. 기존 해석 방법의 경우 전류의 양상은 실험 결과와 비슷하나, 전류가 실험 결과보다 빠르게 최대치에 도달하게 되고 이동자의 동작 완료 시점 또한 빨라진다. 즉, 실제로 제작한 모델이 설계시 고려한 동작 조건을 벗어나는 결과를 가져올 수 있는 것이다. 반면, 엔드와인딩을 고려한 해석은 동작 시간뿐만 아니라 최대 전류값에 있어서도 실험 결과와의 오차가 매우 작게 나타난다. 이를 통해 엔드와인딩을 고려한 해석이 기존 방법보다 더 정확함을 확인할 수 있다.

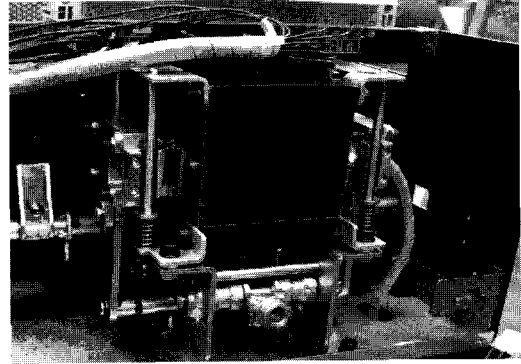


그림 12 1600A급 기중 차단기에 장착된 전자석 조작기
 Fig. 12 Air circuit breaker with EMFA

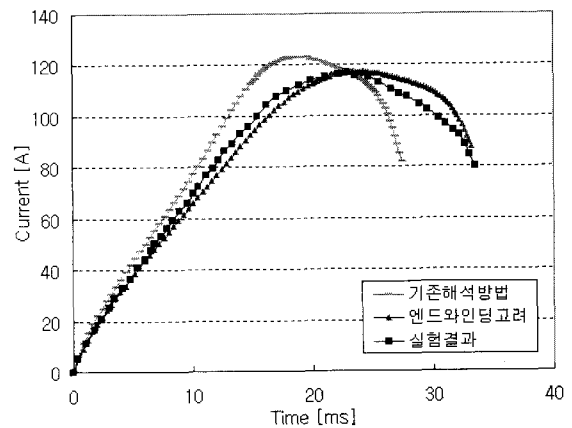
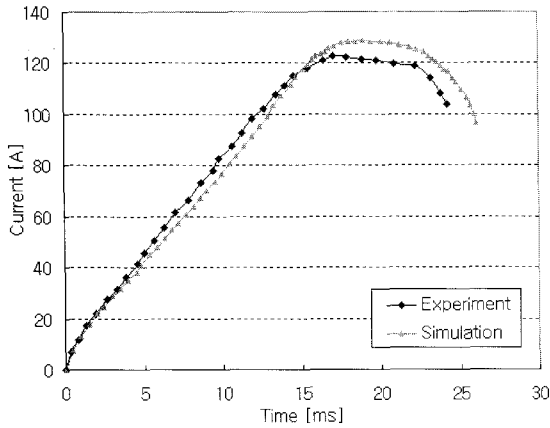


그림 13 엔드와인딩을 고려한 해석과 실험 결과의 비교
 Fig. 13 Comparison between experiment and simulation considering end-winding

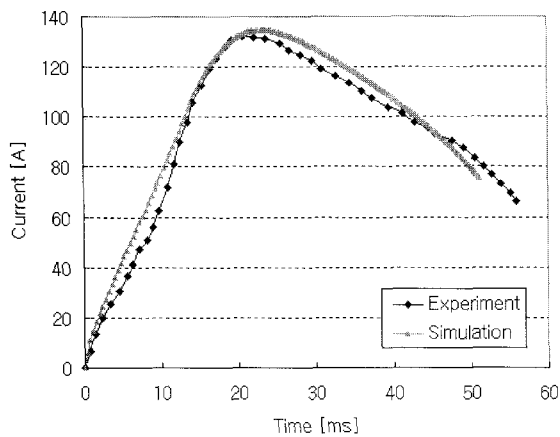
설계한 전자석 조작기의 동작 환경은 구동회로 전압이 200V일 때이며, 이동자 코일에 약 100ms 이내의 시간 동안 전류를 흘려주어야 한다. 전자석 조작기에서의 저항은 코일에만 존재하므로 전류 공급 시간이 길어지면 코일이 탈 위험이 존재하기 때문이다. 구동회로의 캐패시터는 용량이 0.047F인 것으로, 투입과 개방시 각각 별도의 것을 사용하여 전압을 공급한다. 실험 결과는 그림 14와 같다.

코일에 흐르는 전류의 최대값은 개방과 투입시 각각 122.8A와 132.3A로 측정되었다. 동작 속도는 각각 24.3ms와 55.9ms로 나타났다. 이는 전류값 128.7A와 134.8A, 동작 시간 26.1ms와 51.2ms인 해석 결과와 약간의 오차를 보이고 있다. 투입 동작 간에는 이동자가 스프링의 힘을 이겨야 하기 때문에 시간상으로도 개방에 비해 오래 걸리는데, 부하로부터 받는 힘이 해석시 고려한 시간 구간보다 길게 작용하여 동작 시간의 오차가 크게 발생한 것으로 추정하였다. 개방 및 투입 동작 모두 전류값에 비해 동작 시간의 오차가 더 크게 나타났다. 링크 제작 및 연결시의 공차에 의한 영향으로, 이에 대한 세밀한 분석이 요구된다.

전류는 구동 회로의 소자 성능에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 코일 설계시 고려할 필요가 있다. 전류 최대값은 구동회로의 소자 성능에 영향을 미치는데, 회로 구성시



(a) 개방 동작시 전류 파형



(b) 투입 동작시 전류 파형

그림 14 200V로 동작 시킨 전자석 조작기의 전류 파형
Fig. 14 Current curve of opening and closing operation

IGBT 등의 소자를 150A급으로 선정하여 제작했기 때문에 안정된 동작을 할 수 있었다. 동작 시간 중, 접점이 떨어진 직후부터 동작 완료까지의 아크 소호 기준 시간이 20ms 이내인데, 실험 결과 13.7ms로 동작을 완료하여 차단기로서의 조건을 충족하였다.

차단기의 성능을 확인하기 위한 조건은 접점이 제대로 동작했는지의 여부와 유효 구간의 평균 속도 등이 있다. 접점은 고속 카메라 촬영을 통해 이상 없이 동작함을 확인하였다. 유효 구간에서의 평균속도에 대한 실험 결과는 표 2에 나타내었다. 차단기로서의 유효 구간의 평균속도는 개방시 접점이 분리되기 시작한 이후의 70% 스트로크 구간과, 투입시 접점이 맞닿기 전 30% 구간에서 계산된다. 기존 방식의 기중 차단기의 개방 및 투입 속도는 각각 2.6m/s, 1.3m/s이다. 유효 구간의 두 지점에서 측정된 시간으로부터 계산한 속도는 개방시 3.1m/s, 투입시 1.5m/s로 모두 기존 방식의 평균속도를 상회하는 결과를 보이고 있다. 특히 개방시의 속도는 아크 소호와 직결되어 차단기의 성능을 나타내는데, 실험 결과 그 속도가 기존의 방식에 비해 매우 빠르게 나타났다. 이는 차단기의 성능 향상과 연관 지어 생각할 수 있다. 즉, 접점 개방속도가 증가하면 접점 사이의 아크를 보다 빨리 소호시켜 차단기의 성능을 향상시키게 된다.

표 2 유효 구간의 평균속도 비교

Table 2 Comparison between requirement condition and experiment : velocity

	해석결과	실험결과	기존방식
개방속도(m/s)	3.4	3.1	2.6
투입속도(m/s)	1.7	1.5	1.3

5. 결 론

본 논문에서는 전력 IT의 배전 자동화 시스템 기술 개발의 일환으로 배전 계통에 사용되는 기중차단기에 전자석 조작기를 적용하여 부가장치 없이 차단기를 원격 제어하고자 하였다. 동작 특성 해석을 바탕으로 설계 및 제작하였고, 설계 과정에서 차단기의 성능을 높일 수 있는 운동 전달 구조인 3절 링크를 고안하였다. 또한 엔드와인딩을 고려한 동작 특성을 제안하여 그 타당성을 설명하였다.

2차원 해석시 선행 연구된 전자석 조작기에서 배제하였던 이동자 코일의 엔드와인딩을 원형 엔드와인딩으로 가정하여 인덕턴스를 계산하였고, 이를 동작 특성 해석에 적용하였다. 3차원 해석의 필요성이 제기되지만, 상용 프로그램의 경우 설계자가 고려할 수 있는 요소가 많지 않고 2차원 해석에 비해 시간이 매우 오래 걸리는 문제점이 있어 사용이 제한된다. 본 논문에서 제안한 엔드와인딩 인덕턴스를 고려한 2차원 해석 기법은 기존의 해석 방법보다 실험 결과와 잘 일치하고 있다.

3절 링크의 적용은 차단 속도를 증가시켜 차단기의 성능을 향상시킴을 확인할 수 있다. 또한, 투입 상태에서 별도의 장치 없이 링크 구조 자체적으로 접점을 눌러 주기 때문에 접점의 스프링 압축력이 조작기로 전달되지 않는다. 즉, 홀딩력을 감소시켜 부피를 줄이는 등 전자석 조작기 설계를 효율적으로 할 수 있다.

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] E. Dullni, H. Fink, and C. Reuber, "A Vacuum Circuit-Breaker with Permanent Magnetic Actuator and Electronic Control", in Proc. of The 15th International Conference on Electricity Distribution (CIRED), 1999.
- [3] J.H. Kang, D.K. Shin, H.K. Jung, et al., "Development and Characteristic Analysis of New type Actuator, Electro Magnetic driven Force Actuator applicable to High Voltage Circuit Breaker", in Proc. of The Fifth International Symposium on Linear Drives for Industry Application, pp.359-362. 2005.

- [4] J.H. Kang, H.K. Kim, W.S. Kim and H.K. Jung, "Development and Analysis of New Type of Switchgear for High Voltage Gas Circuit Breaker : Electromagnetic Force driving Actuator", IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC) 10576, 2006.
- [5] S.M. Choi, Dynamic Characteristic Analysis and Design of Electromagnetic Force Driving Actuator, M.S. Thesis, School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University, Feb., 2008.
- [6] J.R. Hendershot Jr. and TJE Miller, Design of Brushless Pemanent-Magnet Motors, Oxford : Magna Physics Publishing and Clarendo Press, 1994, pp.5-59~5-61.
- [7] A.R. Bergen, Power Systems Analysis, New Jersey : Prentice-Hall, 2000.
- [8] Jörgen Engström, "Inductance of Slotless Machines", in Proc. of the IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, NORpie 2000, pp.266-270, Jun., 2000.
- [9] A. Bedford and W.L. Fowler, Engineering Mechanics : Statics, Upper Saddle River, N.J. : Pearson/Prentice Hall, 2005. Fig. 13. Comparison between experiment and simulation considering end-winding.



정 현 교 (鄭 炫 教)

1955년 8월 17일생. 1979년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 정교수.

Tel : 02-880-7262

Fax : 02-878-1452

E-mail : hkjung@snu.ac.kr

저 자 소 개



김 래 은 (金 來 垠)

1981년 4월 15일생. 2004년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2009년 동 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(공학석사). 현재 현대로템(주) 기술연구소 연구원.

Tel : 031-596-9489

Fax : 031-596-9766

E-mail : rekim@hyundai-rotem.co.kr



곽 상 엽 (郭 尙 燁)

1974년 5월 20일생. 2002년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2008년 동 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(공학박사). 현재 두산인프라코어(주) 기술원 선임연구원.

Tel : 031-270-1385

Fax : 031-270-1399

E-mail : sangyeop.kwak@doosan.com