

배선용 차단기(MCCB) 구동용 전자식 조작기(EMFA) 설계

김래은, 강종호, 박상엽, 정현교
서울대학교 전기컴퓨터공학부

Design of Electromagnetic Force driving Actuator for Molded Case Circuit Breaker

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

Abstract - Recent years have witnessed that the Korean government prompts the 'Power IT' enterprise to combine electric power industry with information technology (IT). Especially, in a move to shore up the distribution automation system, the necessity for remote control of molded case circuit breaker (MCCB) is getting more and more important. In this paper, we aimed to propose a remote-controlled MCCB of which the driving device is substituted to electrical equipment for mechanical parts. Driving device of MCCB was designed with the Electromagnetic Force driving Actuator (EMFA). Electromagnetic force and dynamic characteristics of the designed EMFA are analyzed using 2-D finite element method (FEM).

1. 서 론

전력 IT는 전통적 성숙산업으로 인식되고 있던 전력 산업과 정보통신 기술을 접목하여 국가 발전의 차세대 성장 동력으로 육성하기 위해 정부에서 의욕적으로 추진하고 있는 사업이다. 2000년대 들어서 본격적으로 전력 IT에 대한 논의가 진행되었고, 2004년에는 '전력 IT 종합 대책'을 수립하여 단계별로 구체적인 사업 추진 방향을 제시하였다.

그 중의 하나인 '배전 지능화 시스템'은 전력 공급에서부터 전력 사용에 이르기까지의 모든 설비 및 장치를 원격으로 감시 및 제어, 고장 예측 및 복구 등 관리, 운영을 효율적으로 하기 위한 소프트웨어와 하드웨어를 개발하는 배전계통의 IT 기술이다. 이를 위한 일환으로 본 논문에서는 배선용 차단기의 원격 제어를 위한 전자식 액추에이터 설계 및 동특성 분석을 수행하였다.

배선용 차단기의 접점을 구동하는 조작부는 현재 스프링의 힘을 이용하는 기계식 구조로 제작되고 있다. 과전류가 흐를 경우, 바이메탈을 이용하거나, 전류 검출기를 통해 솔레노이드로 기계식 조작부의 래치를 해제시켜 트립 동작을 하는 원리이다. 그러나 이와 같은 방식은 원격으로 차단기를 조작시키기 어려운 단점이 있어 전력 IT화를 구축하는데 걸림돌로 작용할 것으로 예상된다. 원격 제어를 하기 위해서는 기계식 조작부를 전자식으로 바꾸

는 등의 기술 개발이 필요하다.

진공차단기용 전자식 액추에이터로 사용되고 있는 PMA는 구조가 간단하고 동작이 명확하여 신뢰성이 높은 장점이 있으나[1], 이동자의 스트로크가 짧고, 스트로크에 비해 크기가 큰 단점으로 인해 배선용 차단기에 적용하기엔 적절하지 않다. 반면, PMA의 단점을 보완하기 위해 개발된 EMFA는 스트로크가 길면서도 크기가 작고, 영구자석을 사용하여 외부 전원 없이도 홀딩력을 유지하는 특징이 있어[2], 배선용 차단기의 기계식 메커니즘을 대신할 수 있다. EMFA는 직사각형 구조의 철심에 평행한 자석을 삽입하고, 그 사이에 이동자 코일을 배치한 형태이다[3]. 홀딩력 계산 및 동특성 시뮬레이션에는 유한요소법을 이용하였다.

2. 본 론

2.1 배선용 차단기의 구조 및 특성

그림 1은 현재 시판중인 100AF급 배선용 차단기이다. 그림 1(a)는 외형을, 그림 1(b)는 내부 구조를 나타내는데, 기계식 조작부가 접점을 들어 올리고 내리면서 개폐하는 원리이다. 기계 장치는 스프링과 링크, 래치 등으로 조립되었고, 스프링을 늘어 저장된 힘을 래치 해제를 통해 운동에너지로 바꾸어 접점을 개방시킨다. 가동접점은 스프링을 통해 구동축과 연결되어 있는데, 이는 통전시 안정성을 위한 장치이며 접점을 지속적으로 눌러주는 역할을 한다. 과전류가 흐르면 가동접점과 연결된 바이메탈에 의해 트립 장치 동작하고 기계장치의 래치를 해제, 접점을 들어 올려 회로를 차단한다. 이 때 접점 사이에 발생하는 아크는 소호실에 있는 아크 챔버(arc chamber)에서 소멸된다.

배선용 차단기는 투입(ON), 개방(OFF), 트립(TRIP)의 3가지 상태를 갖는다. 과전류에 의해 트립이 일어난 뒤 다시 통전을 하고자 할 때, 수동핸들을 개방동작으로 바꾸어 준 다음 투입동작을 통해 회로를 통전시키게 된다.

2.2 차단기 구동을 위한 사양

전자식 조작기를 적용할 기본 모델은 앞에서 언급한 100AF급 3상 배선용 차단기이다. 차단기로서의 동작을 수행하기 위한 요건은 아크를 빨리 소호시킬 만한 소호실과 아크 챔버, 접점 사이의 최대 스트로크, 차단 동작

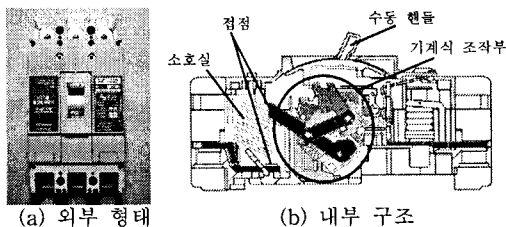
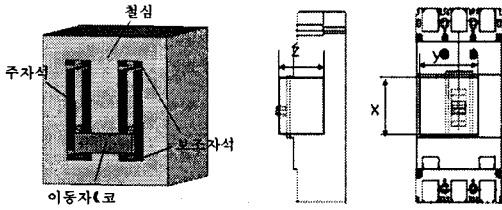


그림 1. 배선용 차단기의 구조

표 1. 100AF급 MCCB 사양과 조작기 설계 기준

구분	배선용 차단기 사양	조작기 설계 기준
접점 스트로크	24mm	14.1mm
접점 하중	470g / 상	10N / 상
접점 wipe	4.2mm	2.1mm
차단 시간	100ms 이내	50ms 이내
순시트립시간	1사이클(17ms) 이내	1사이클(17ms) 이내



(a) EMFA 구조 (b) MCCB 내부 설치 가능 공간
그림 2. EMFA 구조 및 MCCB의 내부 공간

시간, 점점 하중 등이다.

기본 모델의 점점 스트로크는 표 1에 제시된 바와 같이 24mm이며, 점점 하중은 상당 470g이다. 고장 전류 차단 시간은 순시트립시간으로 1사이클 이내(약 17ms)에 아크 소화를 완료하면 된다. 과전류 차단은, 저압차단기이므로 0.1초 이내로 차단을 완료하면 된다. 기계장치가 가동 점점을 움직이는 부분은 점점을 지지하는 구동축의 일부인데, 구동축으로부터 점점방향으로 튀어나온 부분에 링크를 연결하여 힘을 전달하고 있다. 즉, 지렛대의 원리로 힘이 작용하며 그 비는 2:1이다. 따라서 전자석 조작기로 대체할 때 고려해야 하는 스트로크는 12mm가 된다. 점점을 누르는 하중은 3상 기중으로 약 1.5kg이므로 조작기의 홀딩력을 30N 이상을 두고 조작기를 설계해야 한다. 또한 가동점점은 스프링이 장착되어 구동축에 연결되어 있기 때문에 통전의 안정성을 위해 점점을 4.2mm 정도 더 늘려주어야 한다. 차단 시간은 설계의 기준을 두기 위해 요구된 시간의 절반인 50ms 이내로 설정하였다. 단, 고장전류로 인한 순시트립 시간은 17ms 이내가 되도록 설계하였다. 전자석 조작기를 사용하게 되면 개방과 트립을 따로 구분하지 않아도 되기 때문에 하나의 동작으로 구현하였다.

2.3 전자석 조작기(EMFA) 설계

EMFA의 형상은 그림 2(a)와 같이, 직육면체 모양의 철심 속에 평행한 영구자석을 위치시키고 그 사이에 코일을 삽입한 형태이다. 상하단의 보조 영구자석은 홀딩력을 내며, 가운데의 주 영구자석은 로렌츠힘에 필요한 자속을 발생시킨다[3][4].

전자석 조작기를 내장하기 위한 공간은 기계식 조작부와 트립 장치를 들어낸 공간의 일부이다. 그림 2(b)는 EMFA가 들어갈 수 있는 공간을 표시하고 있다. 배선용 차단기 크기는 가로가 90mm, 세로가 155mm이며 두께는 수동 핸들의 높이 포함 80mm이다. 그런데 기존 모델 및 배전반 시스템과의 호환성을 위해서는 수동 핸들 덮개 부분의 길이 x는 50mm를 넘지 않아야 한다. 차단기의 두께는, 수동 핸들이 돌출된 부분 만큼인 약 30mm정도 더 두꺼워져도 기존의 시스템과 조화를 이룰 수 있고, 점점의 구동축이 들어가는 부분 역시 30mm를 차지하기 때문에 조작기가 들어갈 공간의 높이 z는 80mm이다. y값은 차단기의 가로 길이를 충분히 활용하면 되기 때문에 90mm의 공간을 사용할 수 있다. 즉, 점점을 구동하기 위해 사용할 EMFA가 들어갈 수 있는 공간은 가로(x) 50mm, 세로(z) 80mm, 두께(y) 90mm가 된다. 이는 EMFA의 이동자와 점점의 구동축을 연결하는 가이드 및 링크 연결 공간을 포함한다.

이 공간을 만족하면서 표 1의 설계기준에 맞춰 EMFA를 설계하였다. 통전시 점점 하중이 작용하기 때문에 조작기는 투입 상태에서 홀딩력으로 점점이 떨어지지 않도록 지지해야 한다. 3상이므로 조작기에 작용하는 점점 하중은 지레비에 의해 약 30N인데, 실제 제작시 누설되는 자속과 오차 등을 고려하여 1.5배의 가중치를 두었고, 이를 바탕으로 설계한 조작기의 홀딩력은 약 48N이다. 하중이 작용하는 점점 workspace 구간에서 조작기의 이동자는 계속 이동하지만, 점점은 이미 붙은 이후이기 때문에

지레비를 적용한 스트로크 12mm에 하중 구간 2.1mm를 더한 14.1mm가 되도록 설계하였다. 개방 상태에서는 조작기에 작용하는 힘이 존재하지 않으므로, 외부의 충격이나 진동 등에 견디면서 주자석이 내는 자속의 대칭성을 거스르지 않은 수준으로 보조 자석의 크기를 결정하였고, 이때의 홀딩력은 약 30N으로 계산되었다. 홀딩력 계산에는 식 (1)과 같이 유한요소법의 맥스웰 응력 텐서법(Maxwell stress tensor method)을 이용하였다.

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

여기서, μ_0 는 공극의 투자율, \vec{B} 는 영구자석에 의한 자속 밀도이고 \vec{n} 은 힘이 작용하는 면에 수직인 단위벡터이다.

2.4 EMFA 동특성 해석 결과

EMFA의 홀딩력이 점점 하중을 견디는지의 여부를 확인하였기 때문에 실제로 가동 점점을 들어 올릴 수 있는 지를 알아봐야 한다. 동작은 드라이빙 회로를 통해 공급되는 전류가 주자석의 자속과 작용하여 만들어지는 로렌츠 힘이 조작기의 이동자를 상하로 운동시키는 원리이다. 로렌츠 힘은 식 (2)와 같다. 이동자 코일은 직경 0.19mm 이고, 450턴을 감은 것으로 시뮬레이션 하였다. 코일의 전류는 배선용 차단기 모션으로부터 끌어오는 방법과 캐패시터를 사용하여 미리 충전된 전압으로부터 사용하는 방법이 있는데, 외부 회로로부터의 안전성을 확보하기 위해 본 논문에서는 캐패시터를 사용하는 것을 기본으로 하였다. 이 때 캐패시터 전압은 200V로 설정하였고, 회로방정식은 식 (3)과 같이 유도하였다.

$$\vec{F}_L = (\vec{J} \times \vec{B}) \quad (2)$$

$$V = IR + N \frac{d\Phi(i, x)}{dt} \\ = (I_0 + di)R + N \left(\frac{\partial \Phi}{\partial i} \right) \left(\frac{di}{dt} \right) + N \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (3)$$

$$\vec{F}_{operate} = \vec{F}_L + \vec{F}_{hold} \quad (4)$$

여기서, \vec{F}_L 은 로렌츠힘, N은 코일 턴수, Φ 는 코일전류에 의한 자속이고, x는 이동자의 변위, I_0 와 i는 각각 코일의 초기 전류값과 인가 전류이다.

그림 3의 힘은 조작기의 이동자에 영향을 주는 알짜 힘을 말하며 식 (4)와 같이 표현된다. 힘이 작용하는 방향은 홀딩력을 이기는 방향이므로 (-)로 표시하였다. 이동자에 미치는 로렌츠 힘이 보조 영구자석에 의한 홀딩력을 이기면서 이동자는 움직이게 되는데, 로렌츠 힘이 증가하다가, 개방시 12ms, 투입시 14ms 부근에서 줄어드는 모습을 볼 수 있다. 이는 식 (3)에서와 같이, 움직이는 코일의 인덕턴스에 의해 생기는 속도 기전력(speed voltage)이 증가함에 따라 전류를 감소시켜 로렌츠힘의 크기를 감소시키기 때문이다. 전류 감소 양상은 그림 4에서 확인할 수 있다.

투입 동작의 끝 부분인 20~23ms 구간과 개방 동작의 중간 부분인 8~10ms 구간을 보면 힘의 크기가 갑자기 떨어지는 양상을 보인다. 이는 점점 하중이 투입시에는 로렌츠 힘에 저항하는 방향으로, 개방시에는 기여하는 방향으로 작용하기 때문에 나타나기 때문이다. 즉, 투입 후 스트로크 끝단 2.1mm 구간에서 가동 점점과 연결된 구동축의 스프링에 의해 반발력이 나타나고, 차단 시작 후 2.1mm 스트로크 구간까지는 스프링이 점점을 밀어주어 알짜힘이 증가하는 것이다.

고장전류가 흘렀을 때 차단 동작은 1사이클인 17ms 이내에 순시트립이 일어나야 하는데, 고장전류 신호가

조작기에 전달되고 점점 분리가 일어날 때까지의 시간이 이에 해당한다. 설계한 모델은 이동자가 점점하중 구간인 2.1mm 이상을 움직이면 점점분리가 일어나며, 그림 5의 약 10ms 부근에서 확인할 수 있다. 이는 17ms 이내라는 차단 조건을 만족시키는 값이다.

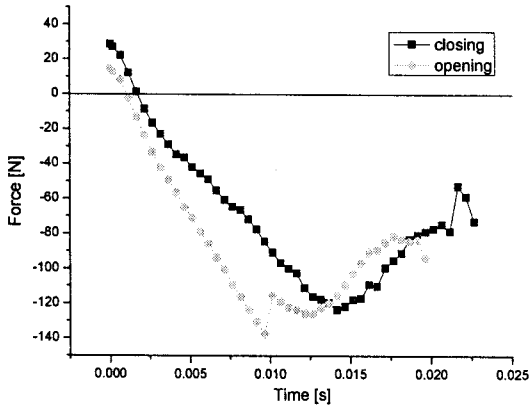


그림 3. 이동자에 작용하는 힘

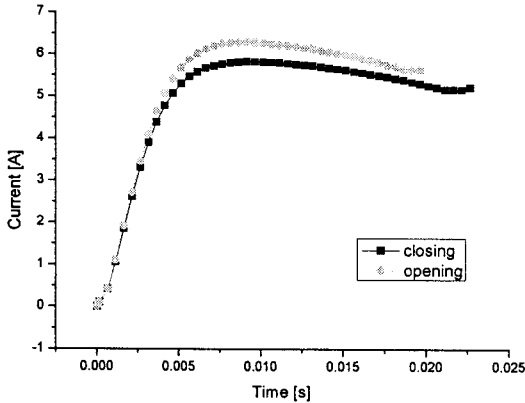


그림 4. 이동자 코일의 전류 변화 양상

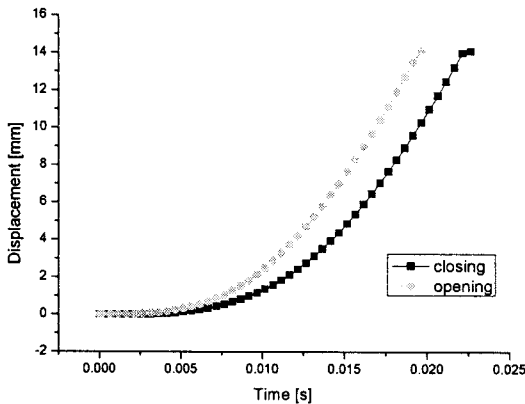


그림 5. 시간에 따른 변위 변화 곡선

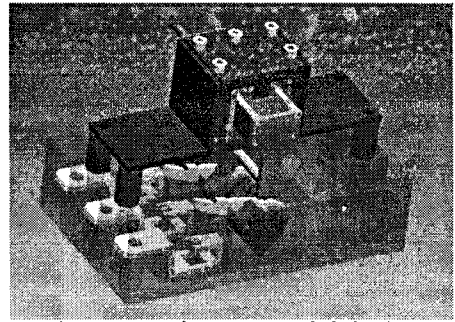


그림 6. MCCB에 EMFA를 장착한 개념도

3. 결 론

기계식 조작부를 대체하여 배선용 차단기(MCCB)의 원격 제어를 하고자 설계한 전자식 조작기(EMFA)를 시뮬레이션 한 결과, 요구 조건을 충분히 만족하였다. 3상 및 지레비를 고려하여 점점 하중 30N을 상회하는 48N의 힘으로 점점을 지지할 수 있고(홀딩력), 차단 시간이 요구 조건인 100ms의 1/4정도 밖에 걸리지 않을 정도로 우수한 동작 특성을 나타내었다.

본 논문에서 제안한 전자식 조작기는 현재 제작 중에 있고, 그림 6과 같은 형태로 MCCB에 장착될 것이다. 시제품이 완성되고 시험에 성공하면 원격 감시 및 제어가 가능한 배선용 차단기가 최초로 개발되는 것이다. 이는 전력 IT 산업 기술의 일환인 ‘배전 지능화 시스템’을 이루는 핵심 기술을 확보할 수 있게 된다는 것에 매우 큰 의의를 가진다.

또한 고전압 차단기용 조작기로 개발된 EMFA를 배선용 차단기와 같은 작은 크기에 맞는 소형 모델로도 널리 활용 가능함을 확인할 수 있고, 따라서 기타 전력 IT 관련 산업에 파급효과도 상당할 것으로 기대된다.

[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 Linear Drives for Industry Applications(LDIA), pp.359-362, 2005.
- [3] Jong-Ho Kang, Hong-Kyu Kim, Won-Seok Kim and Hyun-Kyo 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.
- [4] 김태은, 강종호, 최상민, 정현교, "고전압 가스차단기용 전자식 조작기(EMFA)의 설계변수 변화에 따른 특성 해석", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집(CD), 2007.