

엔드와인딩을 고려한 전자석 조작기의 동작 특성 해석

김래은, 강종호, 박상엽, 정현교
 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부

Dynamic Characteristic Analysis of Electromagnetic Force Driving Actuator
 Considering End-winding

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

Abstract - 고전압 가스차단기용 조작기로 개발된 전자석 조작기(EMFA)는 크기에 비해 큰 힘을 낼 수 있고 긴 스트로크를 갖는 장점으로 다양한 차단기에 적용이 시도되고 있다. 특히 기중차단기(ACB)와 배선용 차단기(MCCB) 등 저압 차단기를 구동하기 위한 연구가 진행 중이다. 그러나 적용할 차단기의 전압 등급이 낮아짐에 따라 조작기의 크기 또한 작아져야 하며, 설계 및 해석 시 고려해야 할 요소 또한 달라진다. 특히 조작기의 두께가 얇아지면서 코일의 엔드와인딩(end-winding)에 의한 영향이 상대적으로 커지게 되는데, 본 논문에서는 전자석 조작기의 동작 특성 해석시 엔드와인딩 인덕턴스를 고려한 2차원 해석을 시도하였다. 엔드와인딩 형상은 원형으로 가정하였고, 동작 특성 해석에는 유한요소법과 시간차분법을 적용하였다.

1. 서 론

2000년대 들어 전력 산업과 정보통신 기술을 융합한 전력 IT 산업이 정부에 의해 추진되면서 [1], 발전이 정제되고 있던 송·배전 계통, 전력 기기 등에 IT를 접목하고자 하는 노력이 시도되고 있다. 국내 뿐만 아니라 해외에서도 이미 전력산업에 IT를 접목한 기술들을 선보여 왔고, 앞으로도 관련 산업 육성을 위해 경쟁을 할 것으로 보인다.

전력 IT의 핵심 사업 중 하나인 '배전 자동화 시스템'은 전력 송전에서부터 사용에 이르기까지 일련의 과정을 원격으로 감시 및 제어하고 고장이나 사고 등에 유연하게 대처하기 위해 필요한 전력 관리 체계라고 할 수 있다. 배전 계통의 전력 기기 중 대표적인 것이 바로 기중차단기(ACB), 배선용 차단기(MCCB) 등 저압 차단기이다. 그동안 관련 업계에서는 배전 자동화 시스템을 구축하기 위해 다양한 기술을 개발하고 제품을 선보이고 있으나, 소프트웨어에 비해 하드웨어적인 면은 기존의 기술을 응용하는 수준에 머물러 있다. 배전 계통의 차단기에서도 마찬가지로, 차단기의 접점을 구동하기 위한 조작기의 대부분이 스프링을 사용하는 기계적인 방식이다. 스프링에 저장된 에너지를 래치 등을 통해 해제시키면서 차단을 시키는 원리인데, 개방 동작은 용이하나 투입시 원격으로 조작하기가 곤란하다.

이러한 문제점을 보완하고자 [2]에서 스프링 방식의 조작기를 전자석 조작기(EMFA)로 대체하고자 하는 시도가 있었으며, 본 논문에서는 이에 대한 실험 결과와 함께 개선된 2차원 동작 특성 해석 방법을 제안하고자 한다. 조작기 설계 모델의 전자계 해석은 유한요소법을 이용하였으며, 동작 특성 해석에는 유한요소법과 시간차분법을 적용하였다. 기존의 해석 방법은 엔드와인딩(end-winding)을 배제하고 2차원 성분만을 고려하였으나, 본 논문에서는 엔드와인딩을 고려한 인덕턴스 계산으로 3차원 성분을 2차원으로 해석하고자 한다.

2. 배선용 차단기에 적용한 전자석 조작기

2.1 기존의 해석 방법

전자석 조작기는 직육면체 형태로 이루어져 있어 2차원으로의 설계 및 해석이 매우 용이하다. 특히 자석과 철심으로 이루어진 고정자 몸체의 경우 2차원 평면해석에 두께를 적용하는 방식으로 해석하며, 이동자 코일의 경우는 평면을 수직으로 뚫고 들어가거나 빠져나오는 전류로 가정하여 해석한다. 이 과정에서 고정자 몸체의 두께가 코일의 엔드와인딩에 비해 매우 두껍기 때문에 엔드와인딩 효과가 거의 없다고 가정하였다.

그림 1은 유한요소법으로 자속을 계산하기 위한 벡터 포텐셜의 선적분 경로이다. 코일의 전류가 화살표와 같은 방향으로 흐를 경우, 오른쪽과 왼쪽의 코일 영역에서의 벡터 포텐셜 값을 각각 A_1 , A_2 라 하면 경로 1-2-3-4에 따른 적분값은 무한한 길이의 코일을 가정한 2차원 해석이므로 경로 1과 3에 의해 식 (1)로 표현된다.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l} = (A_1 - A_2)l \quad (1)$$

여기서 $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ 는 코일에 의해 생성되는 자속이고, \vec{B} 는 자속 밀도이며 \vec{A} 는 자기 벡터 포텐셜이다. 식 (1)을 유한요소법으로 해석하고자 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi = \frac{l}{S} \sum a(A_1^e + A_2^e + A_3^e) \Delta^e \quad (2)$$

여기서, S 는 코일 면적, A_i^e 는 삼각형 요소 각 절점의 벡터 포텐셜 값이고, Δ^e 는 삼각형 요소의 면적이다. a 는 전류 방향에 따라 ± 1 의 값을 갖는다. 이로부터 계산된 자속의 값은 동작 특성 해석을 위한 회로방정식에 사용된다.

그림 2는 전자석 조작기의 구조와 2차원 해석을 통한 자속밀도 단면도를 보여주고 있으며, 등가회로는 그림 3과 같다. 구동회로는 그림 3의 오른쪽 점선 부분과 같이 캐패시터로 간단하게 표시하였고, 조작기는 그림의 왼쪽과 같이 이동자의 코일 저항과 인덕턴스로 나타내었다. 등가회로로부터 얻은 회로방정식은 식 (3)과 같다. 전류가 인가되면 식 (4)의 우변 2항과 같은 변압기 기전력

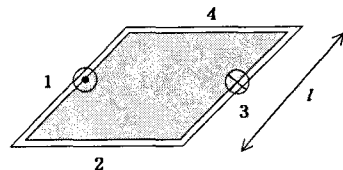
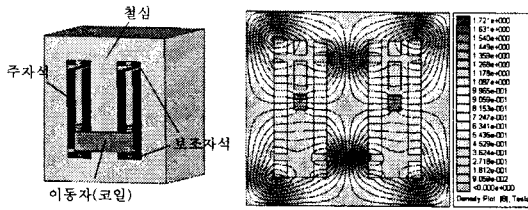


그림 1. 자속 계산을 위한 선적분 경로



(a) 전자석 조작기 (b) 2차원 정자계 해석 결과
 그림 2. 전자석 조작기의 구조 및 자속밀도 분포도

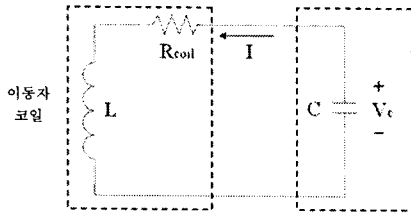


그림 3. 전자석 조작기의 등가회로

(transformer voltage)이 발생되며, 이동자가 움직이기 시작하면 우변 3항과 같은 속도 기전력(speed voltage)이 생성된다.

$$V_c = IR_{coil} + L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

$$V_c = (L_0 + di)R_{coil} + L_i \left(\frac{di}{dt}\right) + L_x \left(\frac{dx}{dt}\right) \quad (4)$$

여기서, L_i 와 L_x 는 각각 전류와 변위에 의한 인덕턴스를 의미하며 식 (5)와 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

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

$$L_x = N \frac{d\Phi(i, x)}{dx} \quad (6)$$

여기서, N 은 코일의 턴수이다. 이와 같은 계산을 거쳐 정자계 해석을 하고 이동자의 위치를 옮겨주며, 시간 차분법을 적용하여 동작 특성 시뮬레이션을 수행 하였다.

2.2 시뮬레이션 및 실험 결과

설계한 전자석 조작기의 크기는 가로, 세로, 두께가 각각 46.5mm, 41mm, 40mm로 고전압 차단기용 조작기에 비해 매우 작다. 이를 100AF급 배선용 차단기에 적용하였고, 고전압 차단기용으로 개발된 전자석 조작기가 소형으로도 적용 가능한지 판단하기 위한 시도의 일환으로 그림 4와 같이 간단하게 제작하였다. 전자석 조작기를 지지할 수 있는 구조와 부피, 아크에 의한 영향 등은 배제하였다. 기존의 스프링 조작기가 연결되어 있던 접점 구동축을 그대로 두고 전자석 조작기를 연결하였다. 접점의 스트로크는 트립시 접점의 위치를 기준으로 설정하

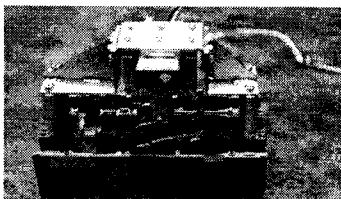
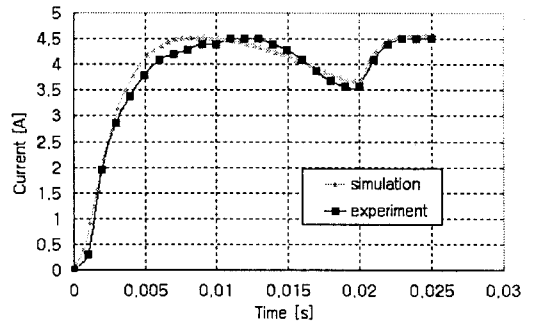
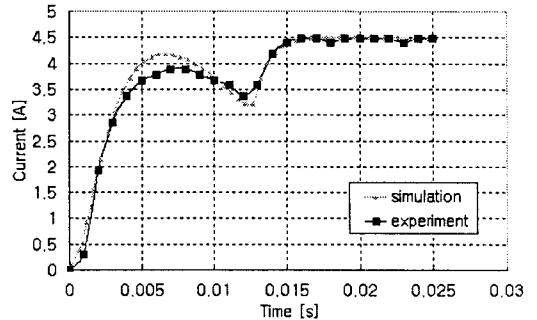


그림 4. 배선용 차단기에 적용한 전자석 조작기



(a) 투입시 전류 변화 양상



(b) 개방시 전류 변화 양상

그림 5. 기존 방법으로 수행한 해석과 실험결과

여 이동자를 장착하였으며, 스프링에 의한 점접하중도 기존의 방식과 동일하게 고려하였다.

그림 5는 2차원 동작 특성 해석 결과와 실험 결과를 비교해 놓은 그래프이다. 실험 결과 얻은 전류 파형은 시뮬레이션에서 예측한 것과 대체로 비슷한 개형을 나타낸다. 전류가 포물선 형태로 증가하다가 감소하여 다시 증가하기 직전의 지점이 바로 이동자의 동작이 완료된 지점이다. 이러한 전류 파형은 전자석 조작기의 일반적인 특징으로, 이동자가 문제없이 배선용 차단기의 접점을 동작시킬 수 있음을 보여주는 것이다.

그러나 전류가 최대치까지 도달되는 시간은 시뮬레이션과 실험 결과가 약간의 차이를 보이고 있다. 투입과 개방시 시뮬레이션에서는 각각 8.6ms, 6.2ms 일 때 전류 최대치에 도달하였으나, 실험에서는 각각 12ms와 8ms 일 때 전류가 최대가 되었다. 최대 전류값은 로렌츠 힘과 직접 연관되어 동작 특성에 결정적인 영향을 미친다. 전류 인가시 이동자가 받는 로렌츠 힘이 홀당력을 신속히 이기고 이동자를 재빠르게 동작시킬수록 차단기의 접점 개폐 제어가 용이하기 때문이다. 또한 전류 최대치에 도달하는 시간이 줄어들면 결국 이동자가 동작을 완료하는 전체 동작 시간 또한 실제보다 짧아지게 된다.

이 모델의 경우 스트로크 길이와 동작 시간이 비교적 짧기 때문에 시뮬레이션과 실험 결과의 동작 완료 시간의 차이는 1ms 이내로, 큰 오차를 보이지 않았다. 그러나 이동자의 스트로크가 길어지거나 동작 시간이 긴 실제 모델의 경우 더 많은 오차를 나타낼 것이다. 따라서 보다 정확한 예측을 위해 동작 특성 해석 방법을 개선하였다.

3. 엔드와인딩을 고려한 동작 특성 해석

3.1 엔드와인딩 인덕턴스 계산 방법

인덕턴스는 전자석 조작기의 동작을 방해하는 요소이다. 식 (4)에서 전류에 의한 인덕턴스 또는 변위에 의한 인덕턴스 값이 증가하게 되면 구동회로의 전압을 떨어뜨

러 이동자 코일에 흐르는 전류를 감소시킨다. 전류가 감소하면 로렌츠힘이 줄어들기 때문에 동작 특성이 나빠지는 것이다. 따라서 보다 정확한 인덕턴스 계산이 필요하다.

기존의 방법은 그림 6.(a)와 같이 코일 형상을 직사각형 형태로 가정하고 해석하였다. 물출된 이동자 코일의 엔드와인딩을 고려하지 않으므로 실험 결과와 약간의 오차를 피할 수 없다. 따라서 3차원 해석으로의 검증은 거쳐야 하는 번거로움이 있었다. 그러나 3차원 동작 특성 해석은 시뮬레이션 시간이 매우 오래 걸리고, 상용 프로그램의 특성상 고려해야 할 요소가 까다로우며 설계 변수의 변화가 용이하지 않기 때문에 사용이 제한적이다.

이러한 문제점을 극복하고 기존 방법의 단점을 보완하기 위해 엔드와인딩 인덕턴스(end-winding inductance)를 고려한 2차원 동작 특성 해석을 수행하였다. 실제로 EMFA를 제작하면 코일은 그림 6.(b)와 같이 엔드와인딩의 형상이 직각이 아닌 타원에 가까운 형태로 감기게 된다. 이에 착안하여 전동기에서 사용하는 권선 형상 해석 방법을 도입하였다. 즉, 이동자 코일의 엔드와인딩을 그림 7.(a)와 같이 원형으로 가정하고 식 (7)을 이용하여 엔드와인딩 인덕턴스를 계산하였다 [4].

$$L_{end} = \frac{\mu_0 N^2 D}{2} \ln\left(\frac{4D}{GMD} - 2\right) \quad (7)$$

여기서, N 은 코일 턴수, D 는 그림 7.(b)에 표시된 것과 같이 엔드와인딩의 유효직경이다. GMD 는 도체간의 기하평균 거리(geometric mean distance)를 의미하며, 코일 부의 단면적을 S 라고 한다면 $GMD = 0.447\sqrt{S}$ 로 계산한다.

엔드와인딩 인덕턴스를 포함하여 계산하면 전자석 조작기의 인덕턴스는 식 (8), (9)와 같이 나타낼 수 있다.

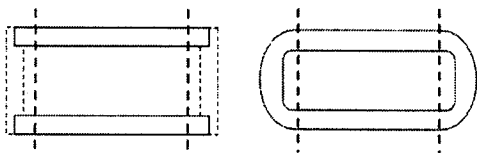
$$L_{i, total} = L_i + L_{end} \quad (8)$$

$$L_{x, total} = L_x + L_{end} \quad (9)$$

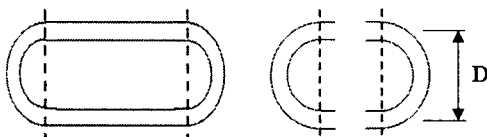
여기서, $L_{i, total}$, $L_{x, total}$ 은 각각 고려해야 할 전류에 의한 인덕턴스와 변위에 의한 인덕턴스의 총 합이다.

3.2 시뮬레이션 및 실험결과 비교

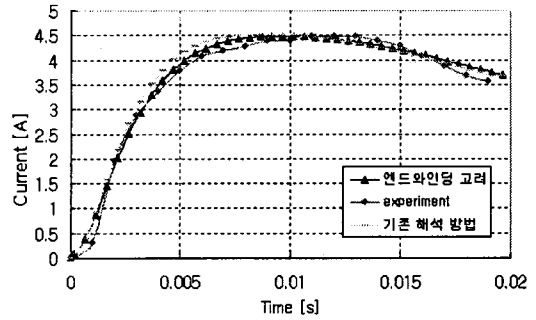
엔드와인딩 인덕턴스를 고려한 2차원 동작 특성 해석 결과는 그림 8과 같다. 제안하는 해석 방법으로 시뮬레이션한 전류의 파형이 투입과 개방 동작 모두 기존의 해석 방법보다 실험값과 더 비슷한 개형을 보이고 있다. 최대 전류값에 도달하는 시간 역시 엔드와인딩을 고려한



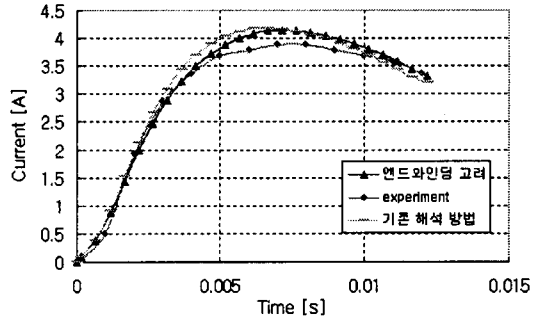
(a) 가정한 형상 (b) 실제 코일 형상
그림 6. 해석시 가정한 코일 형상과 실제 형상



(a) 가정한 코일 형상 (b) 원형 엔드와인딩
그림 7. 도입한 엔드와인딩 해석 형상



(a) 투입시 전류 변화 양상



(b) 개방시 전류 변화 양상

그림 8. 엔드와인딩을 고려한 해석 방법과 실험 결과 및 기존 해석 방법과의 비교

시뮬레이션이 투입과 개방시 각각 10ms와 7.2ms로 기존의 방법에 비해 실험 결과와의 오차가 더욱 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

고전압 차단기용 조작기로 개발된 전자석 조작기를 저압 차단기인 배선용 차단기에 적용하여 기본적인 동작 실험을 수행하였다. 그리고 이로부터 확인한 기존 해석 방법의 문제점을 보완하고자 엔드와인딩을 고려한 해석 방법을 제안하였으며, 기존의 방법에 비해 실험 결과와의 오차를 줄일 수 있었다.

배선용 차단기는 전류 등급에 따라 그 크기가 매우 다양하여, 전자석 조작기를 적용할 경우 조작기의 크기 역시 다양하게 설계해야 한다. 또한 배전 자동화 시스템 구축을 위해 기중 차단기와 같은 저압 차단기에도 전자석 조작기의 도입이 예상된다. 이와 같이 저압 차단기에 적용하는 전자석 조작기를 설계할 경우 엔드와인딩 효과는 고전압 차단기용과 같은 대형 전자석 조작기에 비해 매우 커지므로 본 논문에서 제안하는 해석 방법이 유용하게 사용될 것으로 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 전력 IT 추진 종합대책(안) [산업자원부 생활산업국 · 에너지심의관실], 산업자원부 정책안, 2004.
- [2] 김래은, 강종호, 박상엽, 정현교, “배선용 차단기 구동용 전자석 조작기 설계”, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 춘계학술대회 논문집, 29-31, 2008.
- [3] 최상민, 고전압 진공차단기용 전자석 액추에이터 동작특성 해석 및 설계, 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 공학석사학위논문, 16-20, 2008.
- [4] J.R. Hendershot Jr. and TJE Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Oxford: Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1994, 5-59-5-61.