

동특성을 고려한 전자석조작기(EMFA)의 설계 변수 선정

배병준, 강중호, 정현교
 서울대학교 전기·컴퓨터공학부

Design Variable Selection of Electromagnetic Force driving Actuator(EMFA) considering Dynamic Characteristic Analysis

Byung-Jun Bae, Jong-Ho Kang, Hyun-Kyo Jung
 School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

Abstract - 영구자석형 조작기 PMA(Permanent Magnetic Actuator)는 간단한 구조와 높은 내구성으로 기존의 기계식 조작기가 지니고 있는 문제점을 해결했지만 긴 스트로크를 요구하는 고압용 차단기에는 적용이 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 보완한 전자석 조작기인 EMFA(Electromagnetic Force driving Actuator)는 PMA에 비해 상대적으로 긴 스트로크를 구현할 수 있으나 아직까지는 설계에 대한 연구가 정립이 되어 있지 않고 있다. 본 논문에서는 EMFA의 각 설계 변수를 변화시켜 동특성을 해석 및 비교하였고, 이러한 해석 결과를 바탕으로 EMFA의 동특성에 큰 영향을 주는 설계 변수를 선정하였다.

1. 서 론

기존의 차단기용 구동 매커니즘이 지니고 있는 기구적인 신뢰성을 보완하고자 영구자석형 조작기 PMA(Permanent Magnetic Actuator)가 개발되었으나 구현할 수 있는 스트로크가 상당히 제한적이기 때문에 그 적용 역시 상대적으로 낮은 스트로크를 요구하는 전압 등급에 국한되고 있는 실정이다[1]. 이러한 문제를 해결하기 위해 전자석 조작기인 EMFA(Electromagnetic Force driving Actuator)가 제안되었고 여러 등급의 차단기에 적용하기 위해 개발 중에 있다[2]. EMFA는 평행하게 놓인 영구자석 사이에 코일을 놓고 전류를 흘려 발생하는 로렌츠 힘을 이용하여 구동하는 방식으로 PMA에 비해 긴 스트로크를 구현하는데 어려움이 없다[3]. 따라서 고전압 차단기 뿐 아니라 중압 및 저압에 이르기까지 그 적용에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이렇게 다양한 모델에 EMFA를 적용하기 위해서는 그에 맞는 특성을 발휘할 수 있도록 개별적인 설계가 이루어져야 한다. 그러나 차단기의 투입과 차단상태를 유지시켜주는 홀딩력에 대한 연구는 진행되었지만 동특성에 관여하는 변수들에 대한 연구는 부족한 상태이다[4]. EMFA는 간단한 구조로 이루어져 있기는 하지만 설계를 진행함에 있어서 고려해야 할 변수는 적지 않다. 빠르고 효율적인 설계를 위해서는 특성에 큰 영향을 주는 변수들에 대한 선정이 반드시 수반되어야 하기 때문에 본 논문에서는 각 변수들을 변화시켜 동특성 해석을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 우선적으로 고려해야 할 설계 변수를 선정하였다.

2. 본 론

2.1 EMFA 구조 및 동작원리

EMFA는 기계식 조작기와는 달리 간단한 구조로 이루어져 있다. 그림 1은 EMFA의 기본 구조와 단면에서의 자계 분포도를 나타낸다. EMFA는 이동자를 감싸고 있는 철심과 철심 내에서 평행하게 놓인 영구자석이 고정자를 이루고 있고, 이동 철심과 코일부가 예폭시 수직으로 물딩되어 이동자를 이루고 있다. 고정자 부분에서 영구자석은 길이가 긴 영구자석이 주자석의 역할을 하여 공극에서 균일한 자속밀도를 발생시켜 코일에 전류를 흘리면 전자기력이 발생되게 한다. 그림 1(a)와 같이 전류를 인가하면 로렌츠 힘이 아래 방향으로 작용하여 이동자는 그 힘을

받아 아래로 이동하게 된다. 이동자가 하단부에 위치해 있을 때에는 이전과 반대 방향의 전류를 흘려주어 이동자를 위쪽으로 이동시킬 수 있다. 즉, 전류의 방향으로 이동자의 이동 방향을 제어할 수 있게 된다. 주자석의 상, 하에 부착된 보조자석은 투입 및 개방 동작 시 그 상태를 유지할 수 있도록 이동자를 잡아주는 홀딩력을 발생시킨다. 이동자의 이동 속도는 차단부 접점의 이동속도와 비례하기 때문에 이 이동자의 속도가 실제로 차단기의 성능을 좌우할 수 있는 가장 중요한 요소라 할 수 있다.

2.1 동작 특성 해석

자기 벡터퍼텐셜을 이용하여 FEM을 통한 자계해석을 아래 식과 같이 수행한다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 + \left(\nabla \times \frac{1}{\mu_r} \vec{M} \right) \quad (5)$$

여기서 J_0 는 권선 전류 밀도, M 은 자화량, A 는 자기벡터 퍼텐셜, 그리고 M_r 은 잔류자화량이다.

자계해석을 수행한 뒤, 이동자가 받는 힘은 맥스웰 스트레스 텐서법(Maxwell stress tensor method)을 이용하게 되고 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{F} = \iint_S \frac{1}{\mu_0} (\vec{B} \cdot \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \vec{n} ds \quad (6)$$

여기서 \vec{B} 는 공극에의 자속밀도, \vec{n} 은 텐서라인에서 외곽에 대해 수직방향인 단위벡터이다.

맥스웰 스트레스 텐서법으로 구한 전자기력은 운동방정식에 대입해 시간차분법을 기반으로 각 스텝별로 이동자의 변위 및 속도를 반복해서 구하였다.

2.2 설계 변수 선정

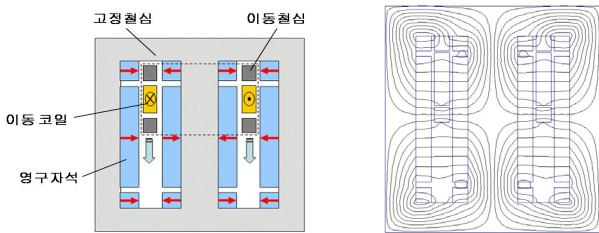
EMFA의 기본 구조는 몇 개의 부품으로 구성되어 있을 만큼 간단하지만, 설계를 함에 있어서 고려해야 할 변수는 적지 않다. 특히 EMFA는 비선형 특성을 가지는 영역에서 동작하기 때문에 설계변수를 고려하는데 많은 어려움이 따른다. 따라서 본 논문에서는 설계 변수를 변화시켜가면서 동특성 해석을 수행하여 그 영향을 확인하였다. 고려한 설계 변수는 그림 2와 같다. 자속이 흐르는 경로인 철심 중앙부분의 폭, 철심 좌측과 우측 폭, 철심 상측과 하측 높이, 이동자 철심 및 코일 슬롯 폭, 철심 및 자석 두께, 코일의 직경을 변수로 선정하였다. 초기모델은 ACB 용으로 설계된 EMFA를 이용하였고 설계 변수에 대한 초기치와 변경 범위, 증가량에 대해서는 표 1에 나타내었다.

동특성 해석을 위한 인가전원과 설계 변수에 포함되지 않은 영구자석의 폭 및 스트로크 길이는 표 2에 나타내었다. 여기서 영구자석의 폭은 최대전류가 흐를 때의 전류밀도를 감안하여 감자가 되지 않는 조건에서 설정한 값이다.

일반적으로 EMFA에서 이동자의 위치는 상측, 하측에 고정되어 있을 때 투입 또는 개방을 나타내지만 본 해석상에서는 차단부에 연결하지 않고 순수하게 EMFA만의 해석을 수행하였으므로 모든 해석에서 접점 부에서 주어지는 부하인 질량과 스프링은 없다고 가정하고 이동자가 위에서 아래로 이동하도록 전류를 인가하고 그에 대한 동특성을 해석하였다.

2.3 해석 및 결과

그림 3~8은 다른 변수는 고정시킨 뒤 하나의 변수만을 변화시켜 가며 동특성 해석을 수행한 결과이다. 그림 3에서 철심 중앙 폭이 커질수록 평균속도는 약간씩 감소하는데 이것은 EMFA가 철심 포화 영역에서 동작하기 때문에 폭이 커질수록 반대 극성으로 놓인 주자석의 자속이 상쇄되고 로렌츠 힘에 기여하는 두께 방향의 코일 성분이 아닌 철심 중앙부를 돌아가는 성분이 증가함에 따라 저항 및 인덕턴스가 증가해 전



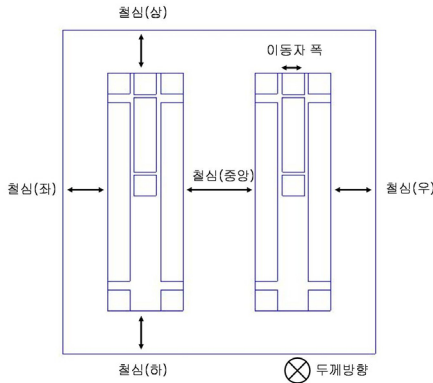
(a) EMFA 기본 구조 (b) EMFA 자계 분포도
〈그림 1〉 EMFA의 구조

류 증가를 억제하여 나타나는 현상이다. 그러나 평균속도의 저감이 크지 않음을 알 수 있다.

그림 4와 그림 5에서처럼 철심 좌우 및 상하 폭을 증가시키수록 평균속도가 증가하는데 이는 달리 자속이 흐를 수 있는 충분한 경로를 제공해 주기 때문이다. 그렇지만 철심 좌우 폭은 상하 폭에 비해 그 영향이 약 1/3정도임을 알 수 있다.

그림 6에서와 같이 철심 및 자석의 두께를 증가시키면 로렌츠 힘에 직접적으로 영향을 주는 성분인 두께방향으로의 코일길이가 자석이 증가하기 때문에 그에 대한 영향이 결과에서 볼 수 있듯이 거의 선형적으로 증가한다.

그림 7은 이동자의 폭을 증가시킬 때의 양상을 보여준다. 평균속도가 크게 떨어짐을 알 수 있는데 이에 대한 원인으로 크게 2가지에 대해 고려해 보았다. 먼저 코일 직경을 일정하게 고정시켜 놓았기 때문에 이동자의 폭을 증가시키수록 턴수가 증가하고 코일의 전체 길이가 증가하게 된다. 이것으로 인해 철심 중앙 폭을 증가시킬 때와 마찬가지로 저항과 인덕턴스가 증가하게 된다. 특히 인덕턴스는 턴수의 제곱에 비례하기 때문에 그 영향이 저항보다 더욱 클 것으로 보인다. 다음으로 증가된 폭에 대한 공극자속밀도의 감소이다. EMFA는 공극에서의 자속밀도로부터 코일에 로렌츠 힘을 발생시켜 구동하는 원리인데 구리의 비투자율은 공기의 비투자율과 같기 때문에 이동자의 폭을 증가시킴에 따라 자기저항이 증가해 충분한 자속밀도를 확보하지 못하는 결과를 초래한다. 이처럼 이동자 폭을 변화시킬 때의 영향은 철심 폭의 변화에 비해 3배가량의 증감을 야기하기 때문에 가장 중요한 설계 변수라 할 수 있다.



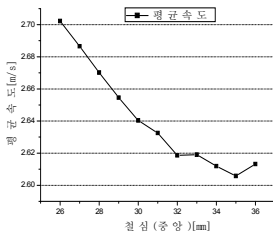
〈그림 2〉 EMFA 설계변수

〈표 1〉 설계 변수

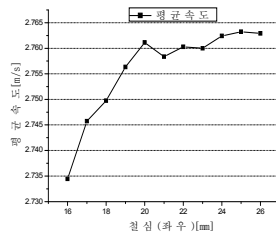
구분	초기값	해석 범위	증가량
철심(중앙)[mm]	26	26~36	1
철심(좌우)[mm]	16	16~26	1
철심(상하)[mm]	16	16~26	1
철심 및 자석두께[mm]	100	100~120	2
이동자 폭[mm]	8	8~13	0.5
코일 직경[mm]	1.0	2.0	0.1

〈표 2〉 해석 사양

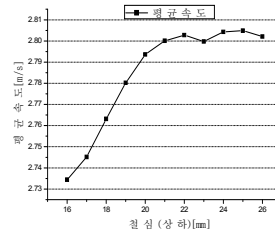
전압[V]	캐패시터[μF]	영구자석 폭[mm]	스트로크[mm]
250	60,000	8	23



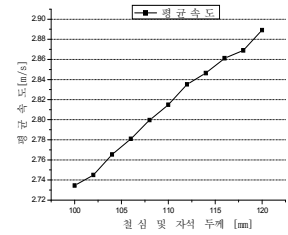
〈그림 3〉 철심(중앙) 폭 변화



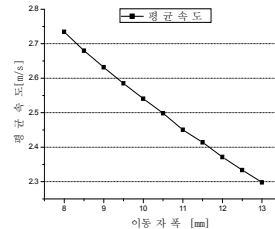
〈그림 4〉 철심(좌우) 폭 변화



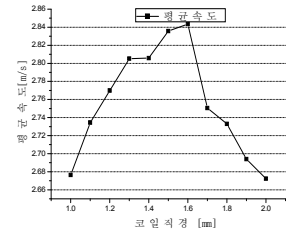
〈그림 5〉 철심(상하) 폭 변화



〈그림 6〉 철심 및 자석 두께 변화



〈그림 7〉 이동자 폭 변화



〈그림 8〉 코일 직경 변화

그림 8은 코일 직경을 변화시켜 가면서 얻은 평균속도를 나타낸다. 큰 폭으로 상승한 뒤 다시 크게 감소하는 양상을 보이는데 이는 초기에 코일 직경이 증가할 때는 턴수가 감소해 로렌츠 힘을 감소시키는 영향은 상대적으로 적고 인덕턴스 및 저항이 감소해 전류의 증가량이 커져 평균속도가 증감한 것으로 보이고, 속도가 감소하는 영역에서는 앞에서의 영향과는 반대로 턴수가 감소해 로렌츠 힘을 감소시키는 영향은 상대적으로 크고 인덕턴스 및 저항이 감소해 전류의 증가량이 커지는 영향은 작기 때문인 것으로 보인다.

지금까지 6개의 변수에 대해 다른 변수는 고정하고 하나의 변수만 변화시켜가면서 평균속도와 동작시간에 대한 결과를 분석하였다. 차단기의 성능에 직접적으로 연관되는 평균속도를 기준으로 이에 큰 영향을 주는 변수를 우선적으로 나열하면 이동자 폭, 코일 직경, 철심 및 자석 두께, 철심 중앙 폭, 철심 상하 폭, 철심 좌우 폭 순서가 됨을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 EMFA의 동특성에 큰 영향을 주는 변수를 선정하고자 6개의 설계 변수를 단계적으로 변화시켜가면서 동특성 해석을 수행하였다. 이를 위해 시간차분법을 기반으로 FEM 이용한 자체해석을 운동방정식과 연계하여 각 스텝별로 변위 및 속도를 계산했다. 각 변수에 대한 영향을 분석한 결과 이동자 폭, 코일 직경, 철심 및 자석 두께, 철심 중앙 폭, 철심 상하 폭, 철심 좌우 폭 순으로 그 영향이 큼을 알 수 있었고, 차후에 수행하게 될 최적화에 감안할 변수들을 우선순위에 따라 선정할 수 있도록 기준을 제시하였다. 이러한 변수들을 잘 고려해 각 등급의 차단부에서 요구하는 특성을 발휘할 수 있는 EMFA가 설계된다면 뛰어난 성능의 차단기를 개발하는데 기여할 것으로 기대된다.

[참고 문헌]

- [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 LDIA, pp.359-362, 2005.
- [3] Jong-Ho Kang, and Hyun-Kyo Jung, "Development and Analysis of New Type of Switchgear for High Voltage Gas Circuit Breaker : Electromagnetic Force driving Actuator", IEEE CFC, 2006.
- [4] 김래은, 강종호, 최상민, 정현교 "설계 변수 변화에 따른 고전압 가스 차단기용 전자석 조각기(EMFA)의 특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회, pp.911-912, 2007.