

진공 차단기용 다단계 코일 영구 자석형 조작기의 동작 특성 해석

신동규, 강종호, 배채윤, 박상훈, 정현교
서울대학교

Dynamic Characteristic Analysis of Permanent Magnetic Actuator with Multi-stage Coils for Vacuum Circuit Breaker

Dong-Kyu Shin, Jong-Ho Kang, Chae-Yoon Bae, Sang-Hoon Park and Hyun-Kyo Jung
Seoul National University

Abstract - In this paper, a new type of permanent magnetic actuator (PMA) with multi-stage coils is proposed. Although the conventional type of PMA has many advantages, it cannot be applied in the high voltage circuit breakers due to its short stroke length. The new type of PMA has long stroke length by using multi-stage coils, so it can be applied as an actuator for the high voltage circuit breakers. Dynamic characteristics are calculated by the finite element method (FEM), equation of electric circuit and dynamic equation. The position of plunger and the current of coils in case of the actuator applied in 38kV, 40kA vacuum circuit breaker are presented.

1. 서 론

영구 자석형 조작기(Permanent Magnetic Actuator)는 성능이 뛰어나고, 높은 신뢰성과 안정성을 가진다. 뿐만 아니라 다른 구동 메커니즘인 전동 스프링 조작기에 비해 수명이 길고, 유지 보수 비용이 저렴하다. 이러한 장점을 가지는 영구 자석형 조작기는 1998년 처음 시장에 나온 이후 지금까지 중저압 진공 차단기(Vacuum Circuit Breaker)의 구동 메커니즘 역할을 성공적으로 수행하고 있다. 하지만 영구 자석형 조작기는 여러 가지 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 스트로크(Stroke)가 짧아서 고압 진공 차단기에는 적용될 수 없었다. 고압 진공 차단기는 진공 인터럽터(Vacuum Interrupter)의 특성상, 중저압 진공 차단기에 비해 접점 간극이 길다. 영구 자석형 조작기가 이러한 고압 진공 차단기의 구동 메커니즘으로 적용되기 위해서는 보다 긴 스트로크를 가져야 하는데, 기존의 모델 형태에서는 스트로크를 길게 하는 것이 매우 어려운 일이다.

본 논문에서는 긴 스트로크를 가지면서 기존 영구 자석형 조작기의 장점을 그대로 유지하는 다단계 코일 영구 자석형 조작기(Permanent Magnetic Actuator with Multi-stage Coils)를 제안하고, 동작 특성 해석을 통해 고압 진공 차단기에의 적용 가능성을 보일 것이다.

2. 본 론

2.1 기본 구조 및 동작 원리

다단계 코일 영구 자석형 조작기는 기존의 영구 자석형 조작기와 비교하여 기본 구조 및 동작 원리가 비슷하다. 다단계 코일 영구 자석형 조작기는 크게 가동자, 철심, 영구 자석 그리고 코일로 구성되어 있으며, 개방 및 투입 상태에서 영구 자석에 의해 가동자가 고정되고, 코일의 전류에 의한 기자력으로 가동자가 움직여 개방 및 투입 동작을 수행한다.

2.1.1 기본 구조

다단계 코일 영구 자석형 조작기는 그림 1에서와 같이 Transmission Rod, 가동자, 가동자 공극, 영구 자석, 철심 그리고 개방 코일과 투입 코일로 구성되어 있다.

가동자 양 측면에 있는 두 개의 공극(그림1의 3)은 투입 상태에서 영구 자석에 의해 발생하는 자계가 두 투입 코일(그림1의 8, 9) 사이로 지나가는 것을 막음으로써 홀딩력(Holding Force)을 크게 한다. 개방 상태에서는 투입 상태와 같은 큰 홀딩력을 필요로 하지 않으므로 자계가 두 개방 코일 사이로 지나가게 하여 홀딩력을 감소시킨다. 이는 기존의 영구 자석형 조작기에서 차폐판이 하는 역할을 다단계 코일이 하는 것이다.

네 개의 코일(그림1의 6, 7, 8, 9)은 각각 독립된 전원을 가지고 있는데, 이는 개방 동작(Opening Operation)이나 투입 동작(Closing Operation) 동안 두 개의 코일이 서로 독립적으로 기자력을 발생시켜, 가동자에 큰 힘을 가하는 역할을 한다. 그리고 개방 코일(그림1의 6, 7)이나 투입 코일(그림1의 8, 9) 사이의 철심은 전류에 의한 자계가 긴 스트로크 공극을 지나지 않고, 짧은 철심 경로로 지나게 한다. 이는 작은 전류값으로도 가동자에 큰 힘을 가하기 때문에, 전류의 여자 시간을 단축시켜 전체적인 동작 시간을 줄이는데 큰 기여를 한다.

2.1.2 동작원리

그림 2는 다단계 코일 영구 자석형 조작기의 투입 동작 원리를 설명해 준다. 그림 2의 (a)는 개방 상태에서 자기력선의 분포를 나타낸 것이다. 영구 자석에 의한 자

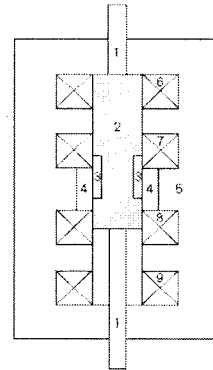


그림 1. 다단계 코일 영구자석의 기본 구조
1-Transmission Rod; 2-가동자; 3-가동자 공극;
4-영구자석; 5-철심; 6-개방 코일 2; 7-개방 코일 1;
8-투입 코일 1; 9-투입 코일 2

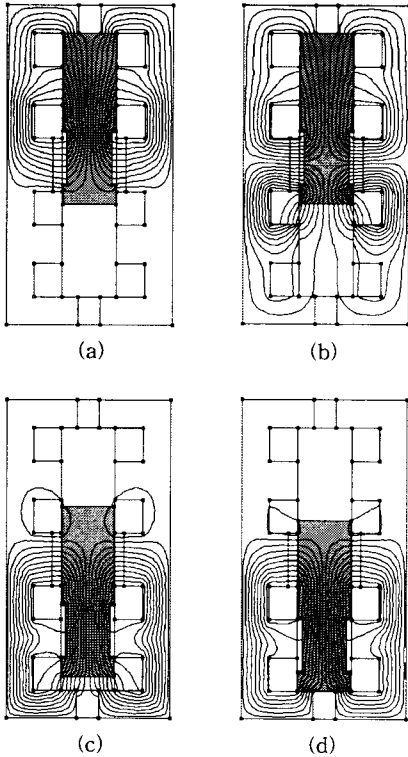


그림 2. 다단계 코일 영구 자석형 조작기의 동작에 따른 자기력선 분포

계는 가동자를 통과하면서 두 경로(개방 코일 사이의 철심과 가동자의 윗부분)로 지나간다. 개방 코일 사이의 철심으로 지나가는 자계는 가동자에 미치는 홀딩력을 감소시키는데, 이는 만약 개방 코일 사이로 자계가 지나지 않으면 가동자의 윗부분으로 더 많은 자계가 지나게 되어 홀딩력이 커지기 때문이다. 실제로 개방 상태에서 홀딩력을 내는 것은 가동자의 윗부분으로 지나가는 자계이다. 다단계 코일 영구 자석형 조작기가 개방 상태에 있다가, 투입 신호를 받으면, 먼저 투입 코일 1에 전류가 인가된다. 그 후, 수 밀리 초가 지나고 투입 코일 2에 전류가 인가되는데, 이는 초기에 가동자를 움직이게 하는 힘은 투입 코일 1 전류에 의해 투입 코일 사이의 철심 경로를 지나가는 자계로부터 발생하기 때문이다. 그림 2의 (b)는 투입 코일 1과 2에 전류가 인가되고, 가동자에 투입 방향(-y 방향)의 힘이 작용하여, 가동자가 움직이기 시작하는 순간의 자기력선 분포를 나타낸 그림이다. 투입 코일 1 전류에 의한 자계가 투입 코일 사이의 짧은 철심 경로로 지나면서 가동자에 큰 힘을 가하고 있다. 그림 2의 (c)는 가동자가 전체 스트로크의 80% 정도 움직이고, 진공 인터럽터의 압점력을 받기 시작하는 순간의 그림이다. 가동자 양 측면의 공극이 투입 코일 사이의 철심으로 자계가 지나는 것을 방해하므로, 대부분의 자계는 가동자의 아랫부분으로 지난다. 이는 가동자에 큰 힘을 제공하기 때문에 가동자가 압점력을 극복하고 계속 투입 방향으로 움직일 수 있게 한다. 그림 2의 (d)는 가동자가 스트로크 전 구간을 다 이동하여 동작을 마치고, 투입 코일 1, 2의 전류를 모두 차단한 상태를 나타낸 것이다. 가동자의 공극은 투입 상태에서 영구 자석에 의한 자계가 투입 코일 사이의 철심으로 지나는 것을 막고, 대부분 가동자의 아랫부분으로 지나게 하여 홀딩력을 크게 한다.

개방 동작 원리는 투입 동작 원리와 유사하다. 개방 코일 1에 먼저 전류가 인가되고, 수 밀리 초 후에 개방 코

일 2에 전류가 인가되어서 가동자를 움직인다. 특별히 개방 동작 시에는 압점 구간에서 압점력이 가동자의 운동 방향과 같은 방향으로 작용하기 때문에 전체 동작 시간이 투입의 경우보다 짧다.

2.2 동작 특성 해석

본 논문에서는 유한 요소법과 시간 차분법을 이용하여 다단계 코일 영구 자석형 조작기의 동작 특성을 해석하였다. 동작 특성을 구하기 위해 맥스웰 방정식과 전기 회로 방정식 그리고 기계 운동 방정식을 결합하여 조작기의 과도 상태를 해석하였다.

다단계 코일 영구 자석형 조작기의 성능을 검증하기 위해서 38kV/40kA급 진공 인터럽터를 적용하여 개발한 프로그램으로 동작 특성 해석을 시뮬레이션하였다. 본 논문에서는 동작 특성 해석을 투입 동작의 것만 나타내었는데, 이는 진공 인터럽터는 투입 동작 동안 압점력이 조작기에 부하로 작용하고, 개방 동작에서는 오히려 압점력이 조작기의 추력을 도와주어서 투입 동작 특성이 차단 조건에 만족하면, 개방 동작 특성도 조건에 만족하기 때문이다.

2.2.1 지배 방정식

맥스웰 방정식과 그 보조 방정식을 이용하여 해석 영역의 지배 방정식을 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 \quad (1)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (3)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 + \nabla \times \vec{M} \quad (4)$$

여기서, \vec{H} 는 자계의 세기, \vec{J}_0 는 권선 전류 밀도, \vec{B} 는 자계 밀도, \vec{M} 은 자화량 그리고 \vec{A} 는 자기 벡터 퍼텐셜이다.

전기 회로 방정식은 가동자의 운동 상태에 따라 다르게 해석해야 한다. 가동자가 정지해 있는 동안에는 전류의 증가량을 계산하는데, 이전 단계에서 구한 전류에 의한 자속의 변화량만 고려한다. 하지만 가동자가 움직이는 동안에는 전류에 의한 자속의 변화량과 함께 가동자 속도에 의한 자속의 변화량을 고려해야 한다. 식 (5), (6)은 가동자가 정지해 있는 동안 시간 차분법으로 전류의 증가량을 계산하기 위한 전기 회로 방정식이고, 식 (7), (8)은 가동자가 움직이는 동안의 전기 회로 방정식이다. 여기서 V_1 와 V_2 는 커패시터 전압, i_1 과 i_2 는 코일에 흐르는 전류, R_1 과 R_2 는 코일 저항, L_{11} 과 L_{22} 는 자기 인덕턴스, M_{21} 과 M_{12} 상호 인덕턴스, λ_1 과 λ_2 는 채교 자속, x 는 가동자의 변위 그리고 t 는 시간을 나타낸다.

$$V_1 = i_1 R_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + M_{21} \frac{di_2}{dt} \quad (5)$$

$$V_2 = i_2 R_2 + L_{22} \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} \quad (6)$$

$$V_1 = i_1 R_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + \left(\frac{\partial \lambda_1}{\partial x} \right) \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (7)$$

$$V_2 = i_2 R_2 + L_{22} \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \left(\frac{\partial \lambda_2}{\partial x} \right) \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (8)$$

가동자의 변위는 시간 차분법으로 기계 운동 방정식을 계산함으로써 구한다. 기계 운동 방정식은 압점력의 유무에 따라 두 가지가 있다. 식 (9)은 가동자가 압점력을 받지 않는 위치에서의 운동 방정식이고, 식 (10)은 가

동자가 압점 구간에 있을 때의 운동 방정식이다. 동작 특성 해석을 위한 시뮬레이션에서는 접시 스프링을 사용하였다는 가정 하에 압점력을 상수로 취급하였다. 여기서, m 은 가동자의 질량, g 는 중력 가속도, F_{mag} 는 영구 자석과 전류의 기자력이 가동자에 미치는 힘, F_{fric} 는 마찰력 그리고 F_{cont} 는 압점력이다.

$$m\left(\frac{d^2x}{dt^2} + g\right) = F_{mag} - F_{fric} \quad (9)$$

$$m\left(\frac{d^2x}{dt^2} + g\right) = F_{mag} - F_{fric} - F_{cont} \quad (10)$$

2.2.2 해석 결과

다단계 코일 영구 자석형 조작기의 성능을 검증하기 위해 본 논문에서는 38kV/40kA급 진공 인터럽터를 부하로 채택하여 삼상 일괄 투입 동작 동안의 그 특성을 나타내었다. 38kV/40kA급 진공 인터럽터는 접점 간극이 20mm이고, 압점구간은 5mm 그리고 압점력은 한상당 570kgf이다. 이 진공 인터럽터의 구동 메커니즘인 다단계 코일 영구 자석형 조작기는 스트로크가 100mm이고, 개방 상태에서 1200N, 투입 상태에서 5500N의 홀딩력을 가진다. 다단계 코일 영구 자석형 조작기의 스트로크와 진공 인터럽터의 압점 구간을 포함한 접점 간극이 4:1의 비율 가지므로 차단기 동작 동안 조작기는 추력은 4배, 속도는 1/4배를 인터럽터에 전달한다.

그림 3, 4, 5, 6은 다단계 코일 영구 자석형 조작기의 동작 특성을 나타낸 것이다. 여기서 커패시터 구동 전압은 150V이고, 투입 코일 1, 2의 저항은 1Ω, 턴수는 300턴이다. 그리고 투입 코일 1에 전류를 인가하고, 3ms 후에 투입 코일 2에 전류를 인가하였다. 다단계 코일 영구 자석형 조작기의 동작 특성 해석 결과를 살펴보면, 조작기의 총 동작 시간은 43ms이고, 동작 동안 최대 전류값은 110A이다. 그리고 조작기의 평균 속도(천체 스트로크의 10%에서 90% 사이의 평균 속도)는 4.4m/s이고, 실제 인터럽터의 평균 속도는 1.1m/s이다. 그림 6은 다단계 코일 영구 자석형 조작기의 추력과 진공 인터럽터의 압점력을 나타낸 것인데, 실제로 조작기는 추력과 압점력을 더한 합력에 의해 움직인다.

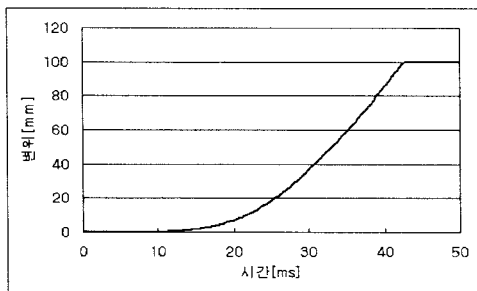


그림 3. 시간에 따른 가동자의 변위

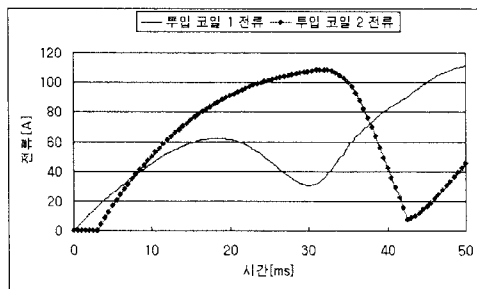


그림 4. 시간에 따른 투입 코일 1, 2의 전류

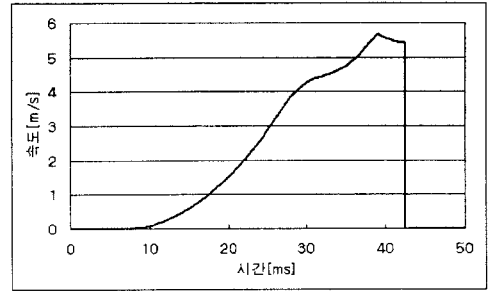


그림 5. 시간에 가동자의 속도

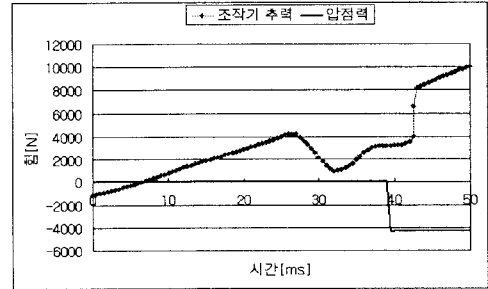


그림 6. 시간에 따른 조작기 추력과 압점력

3. 결 론

영구 자석형 조작기는 성능이 뛰어나고 높은 신뢰성과 안정성 가지며, 유지 보수 비용이 저렴하다. 하지만 스트로크가 짧기 때문에 고압 진공 차단기에는 적용될 수 없다. 이에 본 논문에서는 긴 스트로크를 가지면서 기존의 영구 자석형 조작기의 장점을 그대로 유지하는 다단계 코일 영구 자석형 조작기를 제안하고, 그것의 동작 특성을 시뮬레이션으로 해석함으로써 그 성능을 검증하였다. 38kV/40kA급 진공 인터럽터에 다단계 코일 영구 자석형 조작기를 적용해 보았을 때, 투입 시 총 동작 시간은 43ms이고, 최대 전류값은 110A, 그리고 인터럽터의 평균 속도는 1.1m/s를 나타내었다. 이 같은 동작 특성은 다단계 코일 영구 자석형 조작기가 38kV/40kA급 진공 차단기의 구동 메커니즘으로 적용될 수 있음을 보여 준다.

[참 고 문 헌]

- [1] F. Liu, H. Guo, Q. Yang, L. Zhang, and W. Yan, "An improved Approach to Calculate the Dynamic Characteristics of Permanent Magnetic Actuator of Vacuum Circuit Breaker," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 14, no 2, pp. 1918-1921, Jun. 2004.
- [2] E. Dullni, "A vacuum circuit breaker with permanent magnetic actuator for frequent operations," *18th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, pp. 688-691, 1998.
- [3] E. Dullni, H. Fink, M. Heimbach and C. Reuber, "A family of vacuum circuit-breakers with worldwide applications using common components," in *CIGRE/IEEE 16th International Conference and Exhibition, Conference Publication*, no. 482, Jun. 2001.
- [4] B.A.R. Mckean and C. Reuber, "Magnets & Vacuum the perfect match," in *proceedings 1998 IEE Trends in Distribution Switchgear*, London, pp.73-79, 1998.
- [5] M. Shaohua and W. Jimei, "Research and Design of Permanent Magnetic Actuator for High Voltage Vacuum Circuit Breaker", *20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, pp.487-490, 2002.