

공압식 조작기의 동작특성에 관한 해석

박상훈, 배채윤, 정현교
서울대학교 전기컴퓨터공학부

Analysis on Dynamic Characteristics of Air-Pressure Type Chamber in Puffer Circuit Breaker

Sang-Hun Park, Chae-Yoon Bae, Hyun-Kyo Jung
Seoul National University

Abstract - In this paper, various forces generated in the Gas Circuit Breaker(GCB) such as operating force, repulsive force, spring force, and dashpot force are analyzed with the fluid properties and the mechanical structure. The operation of GCB can be understood. A stroke curve from the result of simulation is compared with experimental one.

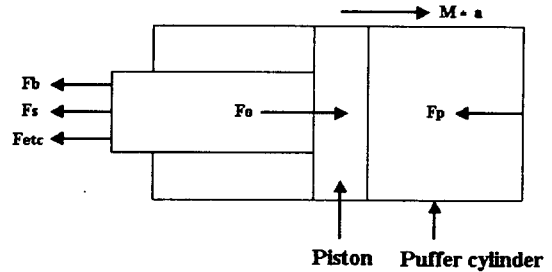


그림 2. 간략화된 조작기 모델

1. 서 론

파괴식 차단기는 고장전류가 발생할 경우, 전극을 분리시킴으로써 이를 차단한다. 이 과정에서 전극의 이동으로 인한 아크가 발생하고 기계적, 열적, 전기적 현상 등이 수반된다. 결과적으로 이러한 현상들이 복합되어 차단기의 차단 과정은 복잡한 양상을 띠게 된다. 차단 과정에서 절연물질 분사와 전극 이동을 위한 물리적인 힘이 필요하게 되는데 이 힘을 조작기에서 제공한다. 그리고 이러한 조작기의 역할로 인해 아크의 소호 시간, 차단기의 성능 등이 크게 영향을 받는다. 따라서 조작기의 동작특성에 관한 해석이 필요하다.

본 논문에서는 간략화된 조작기 모델을 통하여 조작기 내에서 작용하는 힘들을 해석하고 공압식 조작기의 동작특성에 대하여 논의하고자 한다.

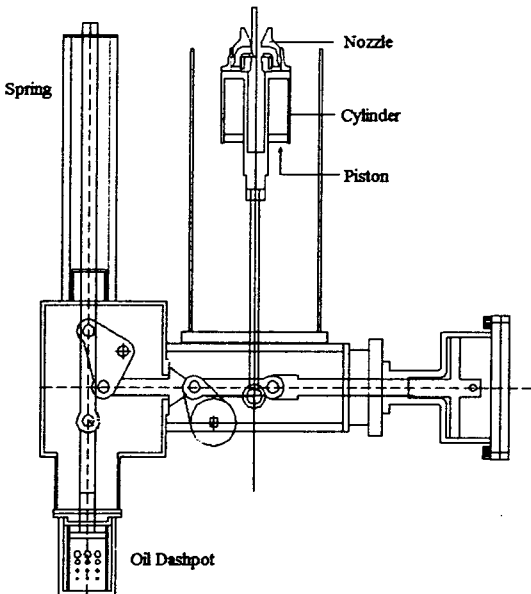


그림 1. 공압식 조작기

2. 공압식 조작기의 작동 과정과 모델링

2.1 조작기의 작동 과정

조작기는 여러 가지 기계 요소로 이루어진 시스템으로서, 차단 과정에서 중요한 역할을 하는 파퍼실, 노즐 등과 연결되어 있다. 그리고 고장 전류 발생시 이를 차단하기 위한 물리적인 힘을 차단기에 제공한다.

차단 과정에서 조작기의 작동은 다음과 같은 과정으로 살펴볼 수 있다. 먼저 고장 전류가 발생하면 조작기에 외부 조작력이 전달된다. 그리고 이 조작력은 조작기 내부의 링크 구조를 통하여 노즐, 파퍼실, 이동 전극 등에 작용한다. 이와 같은 작용으로 이들 요소들이 움직이고 이동 전극과 고정 전극이 분리된다. 또한 이와 동시에 조작기와 연결된 스프링(Spring), 대시팟(Dashpot) 등의 기계 요소에 외부 조작력이 가해지게 되어 결국 이들에 의한 힘이 조작기에 대한 반발력으로 작용하게 된다.

이 힘들의 작용으로 피스톤과 고정 전극이 나머지 요소에 대해 상대 운동을 하게 되고 파퍼실에서는 피스톤이 이동하여 파퍼실 내부의 절연 물질을 밀어내는 것과 같은 작용을 하게 된다. 그 결과 파퍼실 내부에 압력이 발생하여 절연 물질이 고정 전극과 이동 전극 사이에 생긴 아크 쪽으로 분사된다.

2.2 조작기 해석을 위한 모델링

그림 1에서 보는 바와 같이 조작기의 내부 구조는 기계적으로 복잡하다. 따라서 이를 해석하기 위해 그림 2와 같이 간략화된 모델을 사용한다. 그리고 조작기에 작용하는 힘을 다음과 같이 정의한다. 그 힘들은 외부 조작력(F_o), 파퍼실 내 가스 압축으로 인한 반발력(F_p), 대시팟에 의한 힘(F_s), 스프링에 의한 힘(F_b), 기타 힘(F_{etc})이다. 이 때 기타 힘은 마찰력이나 링크 구조에 의한 모멘텀의 변화 같은 조작기 내부의 복잡한 구조로 인한 힘이다.

3. 조작기에서 작용하는 힘들

3.1 외부 조작력 (F_o)

외부 조작력은 조작기의 방식에 따라 그 패턴이 달라 지는데 본 논문에서 사용된 외부 조작력은 공압에 의해 인가된 힘이다. 공압식 조작기의 경우, 외부에서 조작력이 인가되고 이것은 파이프라인의 압력, 면적, 유체의 속도 비율 등을 고려하여 얻을 수 있다. 그리고 이 힘은 피스톤을 움직이게 하는 힘으로서 전체 시스템의 입력이 된다.

3.2 파퍼실 내 가스 압축으로 인한 반발력 (F_p)

고장 전류의 차단과정 중 파퍼실에서 압력이 발생할 때 생기는 힘을 가스 압축으로 인한 반발력으로 정의한다. 이 힘을 구하기 위해서는 먼저 피스톤이 파퍼실 내의 가스를 밀었을 경우, 노즐을 통해 빠져나가는 가스의 양을 구하고 다음으로 이 가스의 양을 이용하여 피스톤에 작용하는 압력을 구한다. 가스 압축으로 인한 반발력은 피스톤에 작용하는 파퍼실 내의 가스 압력과 이 압력에 대하여 수직인 피스톤 면적의 곱으로 구할 수 있다.

또한 파퍼실 내부의 압력을 계산하기 위하여 다음과 같은 두 가정을 생각한다. 하나는 파퍼실 내부의 가스가 압축되는 과정이 등엔트로피임을 가정하는 것이고 다른 하나는 파퍼실 내부의 가스는 이상 기체 상태 방정식을 만족한다는 것이다. 이들 가정을 바탕으로 에너지 보존 법칙을 적용하면 실린더 내부의 압력을 계산할 수 있다.

먼저, 식 (1)에서 보는 바와 같이 외부 조작력이 최초로 가해질 때, 노즐을 통해 빠져나가는 기체의 양 (Fl) 을 구한다.

$$Fl = \left(\frac{2}{\text{gam} + 1} \right)^{\frac{1}{\text{gam} - 1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \text{gam} \cdot \rho_0 \cdot p_0}{(\text{gam} + 1)}} \quad (1)$$

(gam : 가스의 비열비, ρ_0 : 가스의 초기 밀도, p_0 : 파퍼실 내의 초기 압력)

$$Fl = \begin{cases} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{\text{gam}}} \cdot \sqrt{2 \cdot \text{gam} \cdot \rho \cdot p \cdot \frac{1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{\text{gam} - 1}{\text{gam}}}}{\text{gam} - 1}} & \left(\frac{p_0}{p} \geq 0.5878 \text{일 때} \right) \\ \left(\frac{2}{\text{gam} + 1} \right)^{\frac{1}{\text{gam} - 1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \text{gam} \cdot \rho \cdot p}{\text{gam} + 1}} & \left(\frac{p_0}{p} < 0.5878 \text{일 때} \right) \end{cases} \quad (2)$$

(ρ : 변화된 가스의 밀도, p : 변화된 파퍼실 내의 압력)

$$(\text{압력변화량}) = \frac{\text{gam}}{v} w \cdot \text{area}_p - \text{area}_k \cdot \frac{Fl}{\rho} \quad (3)$$

(v : 파퍼실 내 가스의 부피, w : 피스톤의 이동 속도, area_p : 피스톤에 가해지는 압력에 수직인 피스톤 면적, area_k : 누설 면적)

$$F_p = p \cdot (\text{area}_p) \quad (4)$$

(p : 피스톤에 가해지는 압력)

그 이후는 식 (2)에서 노즐을 통해 빠져나가는 양을 계산한다. 그리고 노즐을 통해 빠져나가는 기체의 양이 계산되면 식 (3)을 통하여 피스톤에 작용하는 압력을

구한다. 따라서 가스 압축으로 인한 반발력 (F_p)은 식 (3)을 이용하여 식 (4)로부터 구할 수 있다.

3.3 대시팟에 의한 힘 (F_b)

대시팟은 버퍼(buffer)의 일종으로서 피스톤 속도에 비례하는 반발력을 발생시킨다. 이는 피스톤 속도의 급격한 변화를 감소시키면서 조작기 내부의 기계 요소들 간의 물리적인 충격을 방지하는 목적으로 사용된다. 그리고 이 때 발생된 반발력을 대시팟에 의한 힘이라고 정의한다.

대시팟 내부는 오일로 채워져 있으며 스트로크가 진행될수록 크기가 점점 작아지는 구멍들을 가지고 있다. 그리고 이 구멍들 사이는 일정한 간격이 있다. 일단 외부의 힘에 의해 대시팟에 압력이 가해지면 대시팟에 채워진 오일이 구멍을 통하여 나오게 된다. 이 과정을 통해서 외부의 힘에 대한 반발력을 발생시킨다.

오일이 구멍을 통하여 나올 때, 구멍에서의 유동이 수축되었다가 팽창되므로 오일 압력의 손실이 있게 된다. 그리고 그 압력 손실은 다음과 같다.

$$\xi = \xi_{contract} + \xi_{expand} \\ = 0.5 \left(1 - \frac{D^2}{D_b^2} \right) + \left(1 - \frac{D^2}{D_b^2} \right)^2 \quad (5)$$

(D : 오일이 흘러나오는 구멍의 지름, D_b : 외부의 힘이 가해지는 부분의 대시팟 지름)

그리고 스트로크가 진행될수록 대시팟에 있는 구멍의 지름이 감소하므로 식 (5)를 사용하여 그 때마다 이에 대한 압력 손실 계수를 구할 수 있다.

따라서 대시팟에 의한 반발력은 위에서 구한 압력 손실 계수를 사용하여 다음 식으로 구할 수 있다.

$$F_b = \xi V^2 A \quad (6)$$

(V : 구멍을 통해 빠져나오는 오일의 속도, A : 오일이 빠져나오는 구멍의 면적)

3.4 스프링에 의한 힘 (F_s)

스프링은 조작기 내부의 링크 구조를 통해 연결되어 있으며 고장 전류 차단 과정에서 압축되고 정상 상태로 돌아가기 위해 필요한 복원력을 제공한다. 스프링이 압축될 때 스프링에 의한 힘은 외부 조작력에 대한 반발력으로 작용하게 된다. 따라서 외부 조작력이 가해질 때의 스프링에 의한 힘도 고려를 해야 한다. 이 힘은 식 (7)을 통해 계산할 수 있다.

$$F_s = K(t, x) \cdot x \quad (7)$$

(x : 피스톤의 이동거리, $K(t, x)$: 스프링 상수)

스프링 상수는 시간과 거리에 대한 함수로서 비선형적인 특징을 갖지만 스프링 상수가 시간과 거리에 대해 변화율이 적으면 일정한 값으로 놓고 스프링에 의한 힘을 구할 수 있다.

3.5 기타 힘 (F_{etc})

이 힘은 조작기 내부의 복잡한 구조와 기계 요소에 의한 힘들, 즉 마찰력이나 차단 과정에서 일어나는 모멘텀 변화에 의한 힘 등을 포함한다. 이러한 힘들은 모델링하기도 어려울 뿐 아니라 시스템에 따라 달라지기 때문에 이 힘들의 합을 기타 힘으로 생각한다.

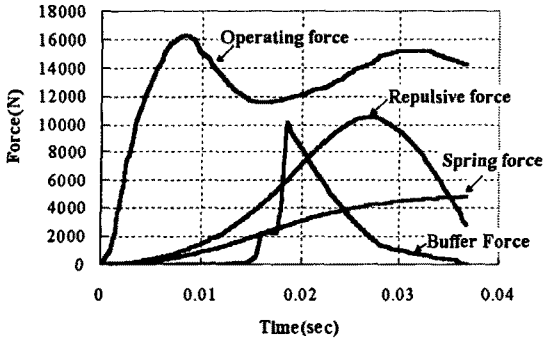


그림 3. 공압식 조작기에 작용하는 힘들

3.6 조작기에서의 운동 방정식

앞서 정의한 힘들을 이용하여 피스톤이 움직일 때의 운동 방정식을 세워보면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$F_o = ma + F_p + F_s + F_{ec} \quad (8)$$

(m : 이동부의 질량, a : 이동부의 가속도)

4. 해석 결과

그림 3은 공압식 조작기에서 나타나는 각각의 힘들을 보여준다. 여기서 외부 조작력은 측정값을 사용했으며, 가스 압축으로 인한 반발력, 대시팻에 의한 힘, 그리고 스프링에 의한 힘은 각각 식 (4), (6), (7)로 계산하였다. 대시팻의 구멍은 시간에 따라 선형적으로 감소함을 가정하였으며 스프링 상수는 시간과 거리에 대한 변화율이 적다고 가정하여 일정한 값으로 놓고 계산하였다.

그림 3에서 보는 바와 같이 스트로크 초기에는 외부 조작력을 제외한 나머지 힘들이 상당히 약하다. 그러나 스트로크가 진행되면서 이들 힘이 계속 증가함을 볼 수 있다. 가스 압축에 의한 힘은 스트로크 후반부에 최대값을 보이다가 감소하고, 스프링에 의한 힘은 계속 증가하는 형태를 나타낸다.

대시팻에 의한 힘은 스트로크 중간에 최대값을 보이다가 감소한다. 스트로크 초기에는 오일 구멍이 크므로 대시팻의 영향이 거의 없다가 스트로크 중간까지는 피스톤의 속도는 증가하고 대시팻의 오일 구멍은 작아지기 때문이다. 또한 대시팻에 의한 힘은 특정 시간에서 갑자기 상승하는 특징을 보인다. 이는 오일 구멍의 영향 때문인 것으로 생각된다. 대시팻의 오일을 밀어내는 피스톤이 오일 구멍들 사이를 지나가는 동안에는 구멍의 크기는 변하지 않고 속도만 변한다. 그러나 이 피스톤이 오일 구멍을 지나게 되면 오일 구멍의 크기와 피스톤의 속도 모두가 변한다. 따라서 이러한 곳에서 대시팻에 의한 힘이 갑자기 크게 증가함을 볼 수 있다.

그림 4는 공압식 조작기의 스트로크 곡선을 보여준다. 이를 통하여 파퍼실 내부의 피스톤이 처음에는 속도가 증가하다가 스트로크 중간에는 등속도를 갖게 되고 스트로크 후반에는 속도가 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 측정된 스트로크와 비교하여 볼 때 계산된 스트로크가 잘 맞는 것을 볼 수 있다.

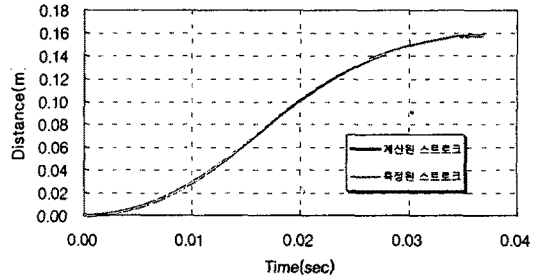


그림 4. 스트로크 비교

공압식 조작기에서 작용하는 힘들과 스트로크 곡선을 고려하여 볼 때 공압식 조작기는 차단 초기에는 큰 외부 조작력으로 인해 피스톤의 속도가 점점 증가한다. 그러나 차단 과정이 계속되면서 외부 조작력에 대한 반발력 즉, 가스 압축으로 인한 반발력, 대시팻에 의한 힘, 스프링에 의한 힘 등의 작용으로 피스톤의 속도는 점점 감소하고 스트로크 곡선을 S자 형태를 띤다.

5. 결 론

본 논문에서는 공압식 조작기에서 나타나는 힘에 대하여 정의하고 시뮬레이션하였다. 그리고 그 결과들을 통하여 공압식 조작기의 동작 특성을 해석하여 보았다.

더 명확한 해석을 위해서는 아직 찾아내지 못한 힘들에 대한 정의와 모델링이 선행되어야 하며, 조작기 내부의 기계 요소에 대한 비선형성 등도 고려해야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Yanabu, H. Mizoguchi, H. Ikeda, K. Suzuki, M. Toyoda, "Development of Novel Hybrid Puffer Interrupting Chamber for SF₆ Gas Circuit Breaker Utilizing Self-Pressure-Rise Phenomena by Arc", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, pp. 355-361, January 1989.
- [2] X. Chen, Z. Ma and P. Siarry, "Theoretical and Experimental Study on the Opening Characteristic of Puffer Circuit Breakers", *IEEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 147, No. 2, pp. 141-145, March 2000.
- [3] SIII, W., "Hydraulic Mechanism of Breaker", Mechanical Engineering Press, Beijing, 1990.
- [4] JHANG, B., "Designing and computing on oil buffer", *High Voltage Apparatus*, 1997, 6.
- [5] K. Suzuki, H. Ikeda, H. Mizoguchi, Y. Ozaki, S. Yanabu, "Investigation of Interruption performance of Newly developed 300kV 3-phase-in-one-tank-type GCB and Its application to a Reduced size GIS
- [6] 박상훈, 배체운, 정현교, "차단기 내 이동부의 동작특성 해석", 2001 대한전기학회 하계학술대회 연구기관 특별 session 논문집, pp. 155-157, 2001.7.
- [7] 박상훈, 배체운, 김홍규, 정현교, "차단기 내 조작기에서 작용하는 힘에 관한 해석", 대한전기학회 추계학술대회 논문집 pp. 3-5, 2001.10.