

차단기 내 조작기에서 작용하는 힘에 관한 해석

박상훈, 배채윤, 김홍규*, 정현교
 서울대학교 전기공학부, *전기연구원

Analysis on Forces operating in Chamber of Puffer Circuit Breaker

Sang-Hun Park, Chae-Yoon Bae, Hong-Kyu Kim*, Hyun-Kyo Jung
 Seoul National University, *KERI

Abstract - 차단기 내에 위치하는 이동부에서 작용하는 힘은 외부 조작력 외에도 여러 가지가 존재하며 이들 힘의 상호작용으로 인해 이동부의 스트로크 곡선이 결정된다. 또한, 이 힘들에 따라 차단기에서의 아크 소호시간, 차단기의 성능 등이 영향을 받으므로 이동부에서 작용하는 힘들의 해석이 필요하다. 이 힘들은 유체의 밀도와 압력, 이동부의 기계적 구조 등을 고려하여 해석이 되며, 이 힘들을 해석함으로써 결과적으로는 차단기의 동작특성을 파악할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 힘들을 정의하고 이들 각각에 대하여 해석한다. 이동부에서 작용하는 힘들을 해석하기 위해서 먼저 이동부에서의 운동방정식을 세우고 이를 시뮬레이션하여 스트로크 곡선과 이동부에서의 힘들을 얻는다. 이렇게 얻어진 결과를 실험값과 비교하고 이동부에서 작용하는 힘들에 대하여 한다.

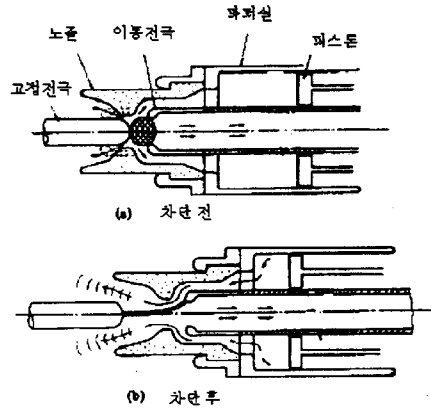


그림 1. 파퍼식 차단기

1. 서론

차단기의 차단 과정은 차단기의 물리적 이동과 아크의 발생으로 기계적, 열적, 전기적 현상 등이 수반되고 이들의 상호작용으로 인해 복잡한 양상을 나타낸다. 파퍼식 차단기는 아크를 소호하기 위하여 조작기를 이용하는 데 절연물질을 아크로 분사하기 위해 필요한 물리적 힘을 조작기로부터 제공받는다. 또한 차단 과정에서 차단기의 이동부는 기계 시스템에 의해 작동하고 이에 대해 유체 압력, 스프링에 의한 힘 등이 이 기계 시스템에 다시 작용을 한다.

그러나 조작기는 내부 시스템 자체가 복잡한 링크 구조와 여러 가지 기계적 요소로 이뤄져 있어서 이에 대한 정확한 모델링이나 해석이 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 조작기를 간략화하여 모델링하고 차단기 내 조작기에서 작용하는 힘들을 해석한다. 그리고 이에 대하여 논의하고자 한다.

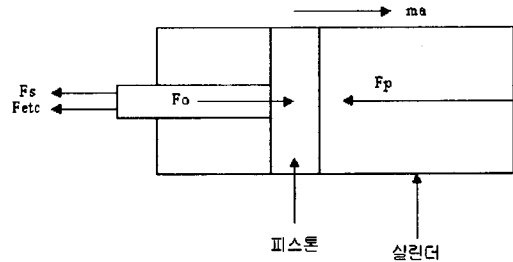


그림 2. 조작기 모델링

2. 조작기의 작동 과정과 모델링

2.1. 조작기의 작동 과정

조작기는 절연 물질이 들어 있는 파퍼실을 비롯하여 피스톤과 연결된 기계적 구조, 여러 가지 기계 요소 등을 포함하는 시스템으로서 차단기의 고장 전류 차단 과정에서 필요한 물리적 힘을 제공하는 역할을 한다. 그림 1에서 보는 바와 같이, 차단기는 고장전류가 발생할 경우, 이를 차단하기 위해 조작력이 작용하여 노즐, 이동 전극, 파퍼실이 움직이고 고정 전극과 이동 전극이 분리된다.

이를 세부적으로 살펴보면 먼저 외부 조작력이 작용하고 외부 조작력을 발생시키는 부분과 연결되어 있는, 노

즐, 이동 전극, 파퍼실 등이 동시에 이동을 한다. 그리고 조작기 내부에서 이들과의 링크 구조로 연결되어 있는 스프링, 대시팟(Dashpot) 등이 작동하게 된다. 이들이 작용하는 힘은 모두 외부 조작력에 대해 반대 방향으로 작용하며 이와 같은 조작기 내부 힘들의 작용으로 노즐, 이동 전극, 파퍼실 등이 피스톤에 대해 상대적인 운동을 한다. 그리고 이러한 운동으로 인해 피스톤이 파퍼실 안에 있는 절연 물질을 미는 역할을 하게 된다. 그와 같은 결과로 파퍼실 내부에 압력이 생겨 절연 물질이 아크로 분사된다.

2.2. 조작기 해석을 위한 모델링

기계적인 구조가 복잡한 조작기를 해석하기 위해 본 논문에서는 그림 2에서 보는 바와 같이 이를 간략화시

켜 모델링한다. 그리고 조작기에 작용하는 힘을 네 가지로 규정한다. 그 힘들은 피스톤을 밀어주는 힘인 외부 조작력(F_o), 실린더 내 가스 압축으로 인한 반발력(F_p), 스프링에 의한 힘(F_s), 기타 힘(F_{etc})이다. 이 때 기타 힘은 조작기의 복잡한 구조 때문에 발생하는 힘들, 예를 들어 조작기 내부의 마찰력, 대시팟(Dashpot) 등을 고려한 힘이다.

3. 조작기에서 작용하는 힘

3.1 조작기에서의 운동 방정식

조작기를 해석하기 위해 간략히 모델링한 그림 2를 바탕으로 피스톤이 움직일 때의 운동 방정식을 세워보면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$F_o = ma + F_p + F_s + F_{etc} \quad (1)$$

(m : 이동부의 질량, a : 이동부의 가속도, F_o : 외부 조작력, F_p : 피스톤의 가스 압축으로 인한 반발력, F_s : 스프링에 의한 반발력, F_{etc} : 기타 힘)

3.2 외부 조작력(F_o)

외부 조작력은 외부에서 힘을 주어 피스톤을 움직이게 하는 힘으로서 전체 시스템의 입력이 된다. 또한 외부 조작력은 조작기의 방식에 따라 서로 다른 패턴을 보이게 되는데 유압이나 공압의 경우, 외부 조작력은 외부에서 주어지고 파이프라인의 압력, 면적, 유체의 속도 비 등을 고려하여 얻을 수 있다. 그리고 스프링에 의한 경우는 기계적 구조를 고려하여 해석해야 한다.

3.3 실린더 내 가스 압축으로 인한 반발력(F_p)

외부 조작력의 작용으로 파퍼실 안에서 피스톤이 이동할 때, 파퍼실 안에 있는 절연 가스 중 일부는 노즐을 통해 빠져나가고 나머지는 압축이 된다. 이 압축으로 인해 외부 조작력에 대한 반발력이 발생하는데 이 힘이 가스 압축으로 인한 반발력이다.

가스 압축으로 인한 반발력을 구하기 위해, 피스톤이 파퍼실 내의 가스를 밀었을 경우, 노즐을 통해 빠져나가는 가스의 양을 구하고 이를 이용하여 피스톤에 작용하는 압력을 구한다. 가스 압축으로 인한 반발력은 피스톤에 작용하는 압력과 이 압력에 대하여 수직인 피스톤 면적의 곱으로 구해진다.

파퍼 실린더 내부의 가스가 압축되는 과정이 등엔트로피임을 가정하고, 에너지 보존 법칙을 적용하면 다음과 같이 실린더 내부의 압력을 계산할 수 있다.

먼저, 식 (2)에서 보는 바와 같이 외부 조작력이 최초로 가해질 때, 노즐을 통해 빠져나가는 기체의 양(Fl)을 구한다.

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

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

그 이후는 식 (3)과 같은 식으로 노즐을 통해 빠져나가는 양을 계산한다.

그리고 노즐을 통해 빠져나가는 기체의 양이 계산되면

$$Fl = \begin{cases} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{gam}} \cdot \sqrt{2 \cdot gam \cdot \rho \cdot p \cdot \frac{1 - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{gam-1}{gam}}}{gam-1}} & \left(\frac{p_0}{p} \geq 0.5878 \text{일 때} \right) \\ \left(\frac{2}{gam+1} \right)^{\frac{1}{gam-1}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot gam \cdot \rho \cdot p}{gam+1}} & \left(\frac{p_0}{p} < 0.5878 \text{일 때} \right) \end{cases} \quad (3)$$

(ρ : 변화된 가스의 밀도, p : 변화된 파퍼실 내의 압력)

$$(\text{압력 변화량}) = \frac{gam}{v} w \cdot area_p - area_k \cdot \frac{Fl}{p} \quad (4)$$

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

식 (4)를 통하여 피스톤에 작용하는 압력을 구한다. 따라서 가스 압축으로 인한 반발력(F_p)은 식 (4)를 이용하여 식 (5)로부터 구할 수 있다.

$$F_p = p \cdot (area_p) \quad (5)$$

(p : 피스톤 부에 가해지는 압력)

3.4 스프링에 의한 힘(F_s)

차단기는 고장 전류를 차단하기 위하여 피스톤을 제외 한 나머지 부분이 움직인다. 그리고 이 부분이 복잡한 링크 구조를 통해 스프링과 연결되어 있어서 차단기가 고장 전류를 차단할 때, 이 스프링이 압축되고 차단기가 고장 전류를 차단하기 이전의 상태인 정상 상태로 돌아갈 때 필요한 복원력을 제공한다. 따라서 외부 조작력이 가해질 때의 스프링에 의한 힘도 고려를 해야 한다. 이 힘은 식 (6)을 통해 계산할 수 있다.

$$F_s = K(t, x) \cdot x \quad (6)$$

(x : 피스톤의 이동거리, $K(t, x)$: 스프링 상수)

스프링 상수는 일반적으로 시간과 거리에 대한 함수이지만 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 힘들을 포함한다. 조작기 내부에서 발생하는 힘들을 모두 찾아낼 수 없고 시스템에 따라 그 힘들이 모두 달라지기 때문에 이 힘들의 합을 기타 힘으로 고려하였다.

4. 해석 결과

그림 3은 외부 조작력(F_o), 가스 압축으로 인한 반발력(F_p), 스프링에 의한 힘(F_s)을 고려하여 얻은 이동부의 스트로크 곡선을 나타낸다. 외부 조작력(F_o)은 측정값을 사용했으며, 가스 압축으로 인한 반발력(F_p)과 스프링에 의한 힘(F_s)은 각각 식 (5)와 식 (6)으로 계산하였다. 그리고 스프링에 의한 힘(F_s)을 계산할 때의 스프링 상수는 시간과 거리

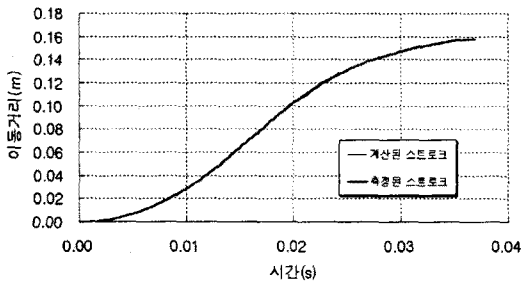


그림 3. 스트로크 비교

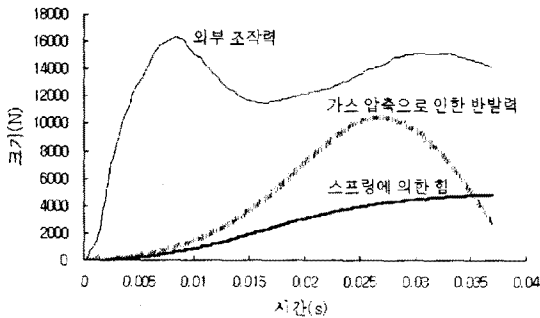


그림 4. 조작기에 작용하는 힘들

에 대해 변화율이 적다고 가정하여 일정한 값으로 놓고 계산하였다. 이들 힘은 그림 4에 나타나 있다.

먼저 그림 3에서 보는 것처럼 앞서 언급한 힘을 계산하여 얻은 결과가 측정값과 잘 맞는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 4에서 보는 바와 같이 스트로크 초기에는 외부 조작력(F_o)이 다른 힘들에 비해 매우 크고 그 크기가 빠르게 증가하므로 파퍼실 내에 있는 피스톤은 점점 빠르게 움직인다. 그러나 스트로크가 진행될수록 가스 압축으로 인한 반발력(F_g)과 스프링에 의한 힘(F_s)이 작용하여 스트로크 중간 부분에서는 피스톤의 속도가

일정하게 되는 등속도 구간이 생기게 된다. 그리고 스트로크가 더 진행되면 외부 조작력에 대한 반발력으로 작용하는 힘들의 합이 외부 조작력보다 크게 되어 피스톤은 속도가 점점 감소한다. 그리고 파퍼실 내의 절연 가스가 계속 빠져나가면서 가스 압축으로 인한 반발력(F_g)이 감소해 스트로크가 끝나게 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 차단기 내 조작기에서 작용하는 힘에 대하여 시뮬레이션하고 이를 바탕으로 측정값과의 비교를 통하여 조작기에서의 힘들을 해석하여 보았다. 조작기에 작용하는 힘들은 전체 시스템의 입력이 되는 외부 조작력(F_o)과 이에 대한 반발력으로 작용하는 가스 압축에 의한 힘(F_g), 스프링에 의한 힘(F_s)이 있고 조작기 내부 구조에 따른 기타 힘(F_{ac})이 있다. 그리고 이러한 힘들의 상호 작용으로 피스톤이 이동하고 실험값과 거의 일치하는 스트로크가 얻어졌다.

그러나 차단기 내 조작기에서 발생하는 힘들을 더 명확하게 해석하기 위해서는 조작기 내부 구조 및 비선형성에 대한 정확한 모델링과 스프링 상수의 변화에 따른 조작기 운동의 영향, 유부하에서의 기존 힘들의 변화에 대한 연구도 이뤄져야 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] 박상훈, 배채운, 정현교, "차단기 내 이동부의 동작특성 해석", 2001 대한전기학회 하계학술대회 연구기관 특별 session 논문집, pp155-157, 2001.7