

조작기 내 힘 해석을 통한 초고압 SF₆ 가스 차단기의 냉가스 유동 해석

박상훈*, 김홍규*, 정현교**, 이용한*
한국전기연구원*, 서울대**

Cold Gas Analysis of SF₆ Gas Circuit Breaker Using Analysis of Forces in Driving Mechanism

Sang-Hun Park*, Hong-Kyu Kim*, Hyun-Kyo Jung**, Yong-Han Lee*
Korea Electrotechnology Research Institute*, Seoul National University**

Abstract - 본 논문에서는 조작기에 의해 동작하는 초고압 SF₆ 가스 차단기의 냉가스 유동 해석에 대해 다룬다. 조작기 내에서 작용하는 힘들을 해석하여 나온 변위를 이용하여 차단기의 동작을 모의하였다. 차단기의 냉가스 유동 해석 시 FVFLIC법을 이용하여 압력을 결정하였고 이것은 조작기의 힘 해석에 사용되었다. 해석 결과인 스트로크, 힘, 피스톤 전면 압력 상승은 실험 결과들과 비교하여 검증되었다.

1. 서 론

전력 계통에서 사고 발생 시 기기를 보호하기 위해 사용되는 초고압 SF₆ 가스 차단기는 절연 특성이 우수한 SF₆ 가스를 사용하여 차단 능력이 탁월한 것으로 알려져 있다[1,2]. 초고압 차단기가 동작하기 위해서는 차단기에 물리적인 힘을 가해줄 수 있는 조작기가 필요하다. 이 때 조작기의 성능에 따라 차단기의 차단 능력이 크게 달라지며 실제로 조작기에 의한 차단 실패가 전체 차단 실패 중에서 상당한 비중을 차지한다. 실제 차단 현상이 발생하는 차단기는 차단기 내 구조물의 기하학적 형상 등에서 기인하는 유동 현상에 따라 그 성능이 달라진다. 이는 조작기의 성능 뿐 아니라 차단기 자체의 성능도 차단 성능에 있어 매우 중요함을 의미한다[2]. 따라서 차단기의 차단 성능을 예측하기 위해서는 고장 전류의 차단 및 사고 제거에 있어 중요한 역할을 하는 조작기와 차단기에 대한 정확한 해석이 필수적이다. 또한 차단 시 조작기와 차단기가 링크 구조로 연결되어 있으므로 조작기와 차단기를 동시에 해석하는 방법이 필요하다. 그러나 현재까지는 이러한 접근 방법을 고려하지 않았기 때문에 차단 시스템의 실제적인 동작 및 해석을 수행할 수 없었다.

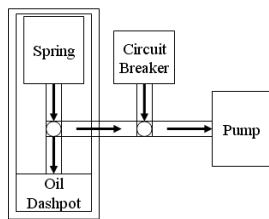
본 논문에서는 이러한 차단 시스템의 해석을 위하여 조작기 내 작용하는 힘 해석을 통해 차단기 내 유동 해석을 수행하였고 이들의 해석 방법을 제시하였다. 해석된 결과들은 실험 결과들과 비교하여 검증되며 이것으로부터 해석 방법의 타당성을 확인한다.

2. 차단 시스템 해석

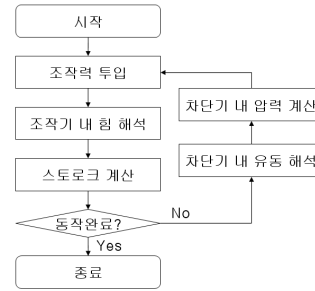
2.1 차단 시스템의 해석 방법

본 논문에서 해석된 차단 시스템은 그림 1에서 보는 바와 같이 조작기와 SF₆ 가스 차단기로 구성되어 있다. 조작기가 동작하면 차단기가 그에 따라 움직이도록 조작기와 차단기가 연결되어 있으며 차단기의 움직임으로 인한 차단기 내 압력 변화는 링크 구조를 따라 조작기에 그대로 전달되어 조작기의 동작에 영향을 준다[3,4]. 따라서 조작기 내 힘의 변화는 차단기의 동작, 즉 스트로크로 나타날 것이며, 차단기의 동작에 의한 압력 변화는 조작기 운동에 대한 반발력으로 작용하게 될 것이다.

조작기와 차단기의 이러한 상호작용을 고려하여 그림 2에서 보이는 과정에 의해 해석을 진행할 수 있다. 먼저 조작기에 조작



〈그림 1〉 차단 시스템 모델



〈그림 2〉 차단 시스템 해석 흐름도

력이 투입되면 조작기 내 부품 및 링크 구조들을 고려하여 조작기 내 힘 해석을 수행한다. 이는 차단기의 스트로크인 변위를 다음 단계에서 결정하는데 사용된다. 이 변위가 차단기가 동작을 완료하는 지점에 이르면 해석을 완료하며 그렇지 않으면 차단기 내 유동 해석을 통하여 차단기로부터 조작기에 가해지는 압력 및 그로 인한 반발력을 계산하여 다시 조작기의 힘 해석에 사용된다. 이러한 과정을 반복하면서 조작기와 차단기를 동시에 해석한다.

2.2 조작기 내 힘 해석

해석을 위해 사용된 조작기는 내부에 스프링, 오일 대시팟 등을 포함하고 있다. 이들 각각에 대한 해석은 참고문헌[3]을 참조하여 구할 수 있으며 다음과 같은 식 (1)로부터 스트로크를 얻을 수 있다.

$$F_o = M \cdot a + F_p + F_b + F_s + F_{etc} \quad (1)$$

여기서 F_o 는 조작기에 가해지는 조작력, M 은 가동부의 전체 질량을, a 는 가속도를, F_p, F_b, F_s, F_{etc} 는 각각 차단기 내 압력 상승에 의한 반발력, 오일 대시팟으로부터의 반발력, 스프링에 의한 힘, 기타 힘을 나타낸다. 조작기에 가해지는 조작력인 F_o 와 질량 M 은 실험값으로부터 알고 있는 값이며 나머지 항은 자체 부품의 구조 및 특성 등을 고려하여 계산할 수 있다.

2.3 차단기 내 유동 해석

SF₆ 가스 차단기의 냉가스 유동 해석을 위해서는 Navier-Stokes 방정식을 풀어야 한다. 그러나 본 논문에서는 차단기의 축대칭 형상, SF₆ 가스의 무점성 가정 등을 고려하여 식 (2)-(5)에서 표현되는 오일러 방정식을 풀었다. 수치 해석 방법으로는 구현이 용이하고 충격파 등을 고려할 수 있는 FVFLIC(Finite Volume FLuid In Cell) 방법[5,6]을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho ur)}{r \partial r} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 r)}{r \partial r} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial z} = - \frac{\partial(p r)}{r \partial r} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v r)}{r \partial r} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u E r)}{r \partial r} + \frac{\partial(\rho v E)}{\partial z} = - \frac{\partial(p u r)}{r \partial r} - \frac{\partial(p v)}{\partial z} \quad (5)$$

여기서 ρ , t , u , v , p , E 는 각각 밀도, 시간, z 방향의 속도, r 방향의 속도, 압력, 비총에너지를 나타낸다.

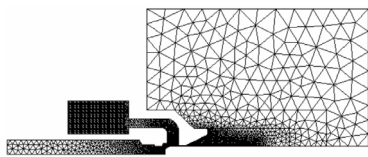
해석 시 차단기 내 SF₆ 가스는 이상기체 상태방정식을 만족한다고 가정하였다. 위의 식을 풀어써 나온 결과인 압력은 앞에서 언급한 바와 같이 조작기의 힘 해석 시 차단기 내 압력 상승에 의한 반발력인 F_p 를 구하는데 사용된다.

3. 결과 및 고찰

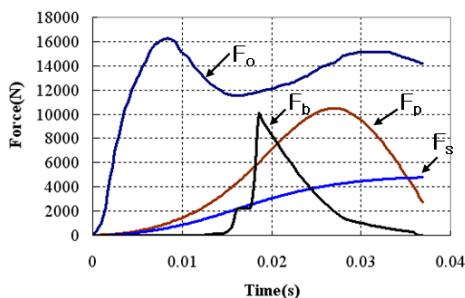
본 논문의 해석 시 사용된 차단기의 스트로크는 158mm, 차단기 내 가스의 초기 압력 및 초기 온도는 각각 0.5MPa, 298K이다. 차단기 내 유동 해석을 위하여 그림 3에서와 같은 요소 분포를 사용하였고 해석 시 사용된 요소의 개수는 약 6500개이다.

그림 4는 조작기 내 힘들을 해석하여 나온 결과를 보여준다. 조작기에 가해지는 조작력은 동작 초기에 힘이 급격히 상승하여 감소와 증가를 계속하는 형태를 보여주며 이는 조작기 구동 시 조작력의 특성을 잘 보여준다. 또한 차단기 내 압력 상승으로 인한 반발력은 차단기가 동작을 하면서 점점 상승하다가 약 27ms 정도에서 최대값을 나타내고 그 이후 감소하는 것을 볼 수 있다. 대시팟으로부터의 반발력은 스트로크 중간 부분에서 갑자기 상승하여 최대값을 가지다가 급격히 감소하며 스프링에 의한 힘은 스트로크가 진행되면서 점점 증가하는 것을 볼 수 있다. 기타 힘은 위 힘들의 벡터합에 의해 구해지며 본 논문에서는 중요한 의미를 가지지 않으므로 생략하였다. 이렇게 위의 힘들을 해석하면서 식 (1)에 의해 그림 5와 같은 스트로크를 얻을 수 있으며 이는 실험값을 기준으로 1.6%의 오차를 나타내어 상당히 정확하게 계산되었음을 알 수 있다. 또한 스트로크가 진행되면서 조작기 내에 위치하는 스프링에 의한 힘이 증가하는 것을 그림 4와의 비교를 통해 알 수 있다. 그림 6은 조작기의 힘과 그로 인한 스트로크를 따라 차단기가 동작할 때의 냉가스 유동 해석을 수행한 결과인 피스톤 전면에서의 압력 상승을 실험 결과와 비교하여 보여준다. 계산된 값은 실험값에 잘 맞는 것을 확인할 수 있으며 이 결과 역시 그림 4와의 비교를 통해 압력 상승으로 인한 반발력이 그대로 조작기에 전달되는 것을 알 수 있다.

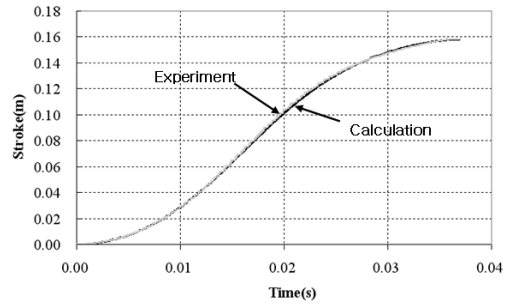
그림 4부터 그림 6까지의 결과를 종합해 보면 스트로크가 진행되어 차단기가 동작하면서 조작기 내에 여러 힘들의 변화가 있는 것을 알 수 있다. 이러한 힘들의 변화는 다시 차단기의 동작에 영향을 주는 스트로크의 변화로 나타난다. 이러한 과정을 고려하여 볼 때 조작기에 가해지는 조작력이 급격하게 증가하는 스트로크 초기에서는 조작력에 대한 반발력의 힘이 매우 작기 때문에 스트로크는 빠르게 진행될 것이며 따라서 차단기의 동작 속도도 계속 증가하게 될 것임을 유추할 수 있다. 그러나 차단기의 동작 속도가 최대가 되는 스트로크 중간 부분에서는 속도에 비례하는 힘을 내는 대시팟으로부터의 반발력이 증가하고 차단기 내의 압력 상승에 의한 반발력 및 스프링에 의한 힘이 점점 증가하면서 조작기에 가해지는 조작력에 미치는 반발력의 힘이 커지게 된다. 따라서 스트로크 중간 이후부터는 동작 속도가 감소하게 되며 후반부에서는 이러한 경향이 더욱 커지게 된다. 그 결과로 스트로크는 S 형태의 곡선을 가지게 된다.



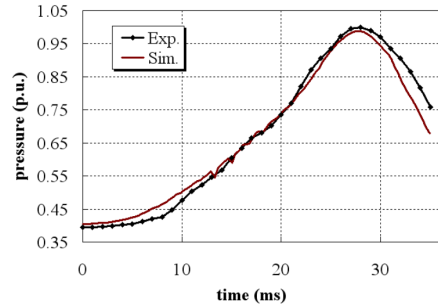
<그림 3> 해석 시의 차단기 형상 및 사용된 요소



<그림 4> 조작기 내 힘 해석 결과



<그림 5> 스트로크



<그림 6> 차단기 내 피스톤 전면 압력 상승

3. 결론

본 논문에서는 초고압 SF₆ 가스 차단기의 동작을 조작기 내 힘 해석을 통해 모의하여 스트로크를 결정하였고 차단기의 동작에 따라 발생하는 피스톤 전면에서의 압력 상승을 계산하여 냉가스 유동 해석을 수행하였다. 해석 결과인 조작기 내의 힘, 스트로크, 차단기의 피스톤 전면에서의 압력 상승 등은 실험 결과와 비교하여 정확하게 계산되었음을 확인할 수 있었다. 또한 해석 결과들을 이용하여 차단 시스템의 동작에 따른 차단기 내에서의 차단 현상을 해석할 수 있었다. 본 논문에서 제시된 해석 방법은 다른 방식의 조작기로 동작되는 차단 시스템의 해석 시 유용하게 사용될 수 있으며 이는 향후 추가로 연구되어야 할 과제이다.

[참고 문헌]

- [1] H.J. Lingal, A.P. Strom and T.E. Browne, "An investigation of the arc quenching behaviour of sulphur hexafluoride", *AIEE Trans.*, vol. PNAS-72, Part 3, pp. 242-246, 1953
- [2] H.M. Ryan and G.R. Jones, "SF₆ switchgear", *Peter Peregrinus Ltd.*, 1989
- [3] S.H. Park, C.Y. Bae, H.K. Jung, H.K. Kim, and K.Y. Park, "Analysis of Forces Generated in Hydraulic Operating Mechanism", *International Journal of Power & Energy Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 140-144, 2007.
- [4] 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
- [5] 김홍규, 신승록, 정현교, 김두성, 권기영, "Puffer식 차단기 내의 냉가스 유동 해석", 대한 전기학회 논문지, vol. 48B, no. 7, pp. 41-50, 1994
- [6] 신승록, 김홍규, 정현교, "Modified FLIC법과 아크 모델을 이용한 차단기 내의 아크 유동 해석", 대한 전기학회 논문지, vol. 49B, no. 3, pp. 170-172, 2000