

전류 차단기 메커니즘에서 에너지방법을 이용한 차단 속도에 따른 차단 스프링 모델링

권병희*

Opening Spring Modeling of Current Circuit Breaker Mechanism with respect to Opening Speed using Energy Method

Byung-Hee Kwon

Key Words : Current Circuit Breaker (전류 차단기), Opening Spring(차단 스프링), Opening Speed (차단 속도), Energy Method(에너지 방법), Vacuum Circuit Breaker(진공 차단기), Design Parameter(설계 변수), Moving Contactor(가동 접점)

Abstract

This study proposed design parameters of opening spring of circuit breaker that cut off the over-current in order to protect the electric device about opening speed using the energy method. We simulated the opening kinetic energy, the potential energy of opening spring and the design parameters of opening spring with respect to opening speed of VCB (Vacuum Circuit Breaker)'s moving contactor, which has 24kV 25kA break capacity. From the result of simulation the initial tensional force and the final tensional force of the opening spring chose 107kgf and 282kgf respectively. Through the dynamic analysis using ADAMS, We verified that the opening speed of moving contactor satisfied break capacity of VCB and analyzed opening dynamic characteristics of VCB such as the opening displacement, the opening velocity and the opening acceleration of moving contactor in time domain.

1. 서론

사고 전류를 감지하여 전류를 차단하여 주는 차단기는 단 시간내에 전류를 차단하여 외부 장비의 사고를 막아주는 역할을 한다. 이러한 차단기의 차단특성은 차단 속도에 따라 전류의 차단 용량을 결정하게 되고, 차단 속도는 기계적인 메커니즘에 의해서 결정되어진다. 차단기 메커니즘의 구조는 접점의 규정된 사항인 접점거리, 접점 가압력 등에 의해서 먼저 결정되고, 다음 가동접점의 차단과 투입 특성을 만족시키기 위해 스프링들이 사용된다. 특히, 차단기에서 차단동작은 단순히 스프링들의 에너지에 의해서 가동접점의 차단특성이 결정되므로, 스프링의 초기힘, 최종힘과 메커니즘에서

스프링의 연결위치들은 중요한 설계변수가 된다. 본 연구에서는 차단기 메커니즘의 동특성을 만족시키는 스프링의 설계 변수중 메커니즘의 연결 위치는 결정되어진 상태에서 초기 스프링력과 최종 스프링력을 결정하는 방법을 제안 하고자 한다.

기존의 스프링 설계에 관한 연구에서는 메커니즘의 정적 평형을 위해 에너지 방법을 사용하여 스프링을 결정하였다. 이 연구들은 중력과 스프링에 의한 포텐셜 에너지들 사이에서 시스템의 전체 포텐셜 에너지가 일정하도록 스프링을 설계하였을 뿐 메커니즘의 동특성은 고려하지 않았다⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾.

본 연구에서는 에너지방법을 이용하여 차단기 메커니즘의 차단 동특성중 차단 속도를 만족시키는 차단 스프링의 설계 변수인 초기 스프링력과 최종 스프링력을 결정하는 방법을 제안하고, 제안된 방법을 이용하여 24kV 25kA 의 차단 용량을 가진 진공 차단기 메커니즘을 적용하여 차단속도와 스프링 에너지, 스프링력에 관한 시뮬레이션을 수행하

* 회원, LG 산전 전력연구소 전력기술연구팀

였다. 시뮬레이션 결과로부터 진공 차단기의 차단 속도를 만족하는 차단 스프링을 선정하여 진공 차단기의 차단 동특성을 분석 하였다. 본 연구에서는 ADAMS 를 이용하여 차단기 메커니즘의 동역학 모델링과 해석을 수행하였다.

2. 차단 스프링 모델링

그림 1은 기본적인 차단기 메커니즘을 나타낸 것이다. 구동 메커니즘이 인장된 차단 스프링의 구속을 해제하고, 차단 스프링의 포텐셜 에너지에 의해 가동 접점은 아래로 병진운동하므로써 고정 단자와 분리되고, 전류는 통전되지 않는다. 그림 1에서 접압 스프링은 차단기가 투입되어 전류가 통전되고 있을 때, 가동 접점과 고정 단자 사이의 압축력을 생성 시켜 전기저항을 줄여주는 역할을 하게 된다. 이 접압 스프링은 전기적 특성에 의해 설계되어지는 스프링으로 차단시 차단 운동에너지의 한 요소가 된다.

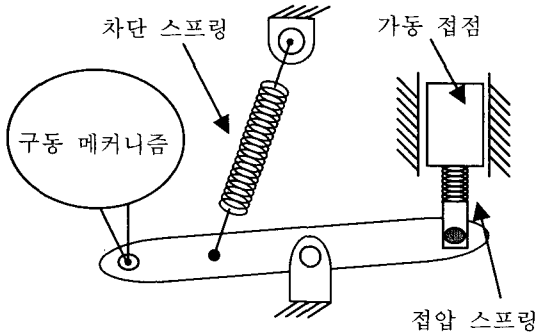


Fig. 1 The Basic Mechanism of Circuit Breaker

차단 스프링을 결정하기 위해서는 가동 접점의 차단 속도에 따른 차단 운동 에너지를 알아야 한다. 메커니즘 전체의 운동에너지를 가동 접점부의 등가질량 에너지로 변환하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{k_o} = \frac{1}{2}MV_o^2 = \sum_i \frac{1}{2}(m_i v_i^2 + I_i \omega_i^2) \quad (1)$$

여기서, E_{k_o} 는 전체 시스템의 차단 운동에너지, M 은 가동 접점상오의 등가질량, V_o 는 가동 접점의 차단속도를 나타내고, m_i , v_i , I_i , ω_i 는 각각 i 번째 구성 물체의 질량, 병진 속도, 주관성 모멘트, 각속도를 나타낸다.

식 (1)을 가동 접점상의 등가질량에 대해 정리하

면 다음과 같다.

$$M = \frac{\sum_i (m_i v_i^2 + I_i \omega_i^2)}{V_o^2} \quad (2)$$

식 (1)의 차단 운동에너지는 스프링들의 포텐셜 에너지와 외력에 의한 일 에너지의 합으로 나타낼 수 있다.

$$E_{k_o} = E_{s_o} + E_{s_w} + E_j \quad (3)$$

여기서, E_{s_o} 는 차단 스프링의 포텐셜 에너지를 나타내고, E_{s_w} 는 접압 스프링의 포텐셜 에너지를 나타낸다. E_j 는 외력에 의한 일에너지로 다음과 같이 나타낸다.

$$E_j = -F_j \times S \quad (4)$$

여기서, 차단기 메커니즘에 작용하는 외력 F_j 는 진공용기와 대기사이의 압력차에 의해서 가동 접점을 차단 반대 방향인 고정 단자쪽으로 끌어당기는 자폐력이고, S 는 가동 접점의 차단 변위이다. 식 (3)에서 중력에 의한 구성 물체들의 위치에너지는 다른 에너지에 비해 무시할 수 있을 정도의 미미한 값으로 본 연구에서는 고려하지 않았다.

식 (1) ~ (4)에서 차단 스프링의 포텐셜 에너지에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$E_{s_o} = \frac{1}{2}MV_o^2 - E_{s_w} + F_j \times S \quad (5)$$

차단 스프링의 초기길이는 L_1 , 최종 길이는 L_2 , 초기 인장력은 P_1 , 최종 인장력이 P_2 일 때 차단 스프링의 포텐셜 에너지를 구하면 다음과 같다.

$$E_{s_o} = P_1(L_2 - L_1) + \frac{1}{2}(P_2 - P_1)(L_2 - L_1) \quad (6)$$

식(5)와 (6)에서 차단 스프링의 초기 인장력과 최종 인장력 항으로 정리하면 다음과 같다.

$$P_1 + P_2 = \frac{2 \times \left(\frac{1}{2}MV_o^2 - E_{s_w} + F_j \times S \right)}{(L_2 - L_1)} \quad (7)$$

초기 인장력 P_1 은 차단기 메커니즘이 차단 전에 정적 평형이 되도록 선정되며, 최종 인장력 P_2 는 식 (7)에 의해 결정할 수 있다.

3. 차단기 메커니즘 동역학 모델링

차단기 메커니즘과 같이 구속 다물체의 거동을

표현하기 위해서 라그랑지 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$M\ddot{q} + \Phi_q^T \lambda = Q \quad (8)$$

여기에서, M 은 질량행렬, q 는 일반좌표, Φ 는 구속 방정식, λ 는 라그랑지 승수, Q 는 일반력을 각각 나타내고 있다. 본 연구에서는 동역학 모델링을 위해서 ADAMS를 이용하여 메커니즘의 거동을 모사하였다. ADAMS에서는 아래와 같이 미분 대수방정식을 이용하여 각 강체요소의 위치와 속도, 가속도를 구하게된다.

$$G(X) = \begin{bmatrix} M\ddot{q} + \Phi_q^T \lambda - Q \\ \Phi(q) \\ U_0^T (q_{n+1} - q_n - h\dot{q}_{n+1}) \\ U_0^T (\dot{q}_{n+1} - \dot{q}_n - h\ddot{q}_{n+1}) \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

4. 차단 스프링 시뮬레이션

차단 속도에 따른 차단 스프링의 시뮬레이션을 위하여 24kV 25kA의 차단 용량을 가진 진공 차단기의 메커니즘을 적용하여 동역학 해석을 수행하였다. Fig. 2는 ADAMS를 이용하여 동역학 모델링을 한 것이다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터들은 다음의 Table 1과 같다.

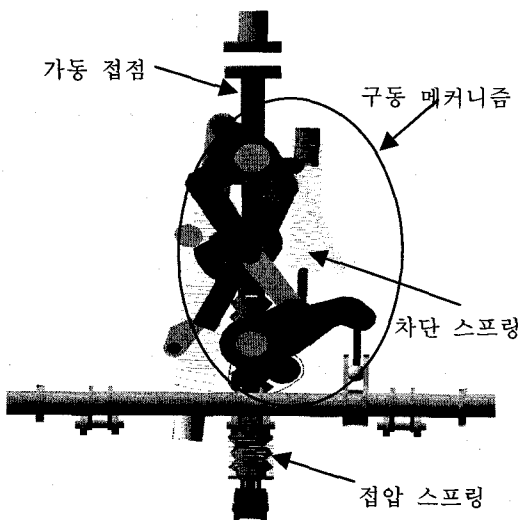


Fig. 2 VCB ADAMS Modeling

Table 1 Simulation Parameters

Parameter	Value
등가질량 (M)	56.1 (kg)
접압 스프링에너지 (E_{s_w})	2618.9 (kgf · mm)
자폐력 (F_f)	16.8 (kgf)
차단 변위 (S)	17 (mm)
차단 스프링 초기 길이 (L_1)	108 (mm)
차단 스프링 최종 길이(L_2)	153 (mm)

Table 2는 차단 속도에 따른 차단 운동에너지, 차단 스프링 에너지, 차단 스프링의 초기 인장력과 최종 인장력의 합을 시뮬레이션한 결과이다. Fig. 3은 Table 2의 시뮬레이션 결과를 도식화한 그래프이다. Fig. 3에서 보듯이 차단 운동에너지와 차단 스프링에너지는 차단 속도의 제곱에 비례하여 증가하는 차단 속도의 2차식의 관계를 가지고 있으며, 차단 스프링에너지는 차단 운동에너지 값을 에너지축 상으로 접압 스프링에너지와 자폐력에 의한 일 에너지를 합한 값만큼 아래로 평행이동 시킨것과 일치한다. 식 (1)과 (5)를 통해 알수 있듯이 차단 운동에너지와 차단 스프링 에너지는 동일한 증분율로 변화하고 있다.

$$\frac{dE_{k_o}}{dV_o} = \frac{dE_{s_o}}{dV_o} = MV_o \quad (10)$$

식 (7)에서 차단 스프링의 초기 인장력과 최종 인장력 합의 증분율은 차단 에너지와 차단 스프링 에너지에서 차단 스프링 변위차의 역수배를 한 것과 같다.

$$\frac{d(P_1 + P_2)}{dV_o} = \frac{1}{(L_2 - L_1)} \frac{dE_{k_o}}{dV_o} \quad (11)$$

Table 2 Simulation Result of Vacuum Circuit Breaker with respect to Opening Speed

V_o (m/s)	E_{k_o} (kgf · mm)	E_{s_o} (kgf · mm)	$P_1 + P_2$ (kgf)
1.0	2859.3	1097.2	48.8
1.1	3459.8	1697.7	75.5
1.2	4117.4	2355.4	104.7
1.3	4832.3	3070.2	136.5
1.4	5604.3	3842.2	170.8
1.5	6433.5	4671.4	207.6
1.6	7319.9	5557.8	247.0
1.7	8263.5	6501.4	289.0

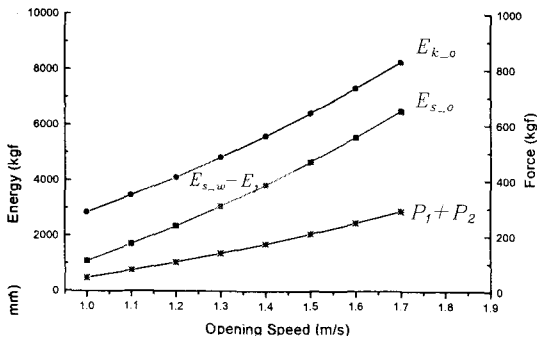


Fig. 3 Vacuum Circuit Breaker Simulation with respect to Opening Speed

5. 진공 차단기의 차단 동특성 분석

24kV 25kA 차단 용량을 만족시키기 위해서 가동 접점의 차단 속도는 1.7m/s 이상이 되어야 한다. Table 2 에서 1.7m/s 의 차단 속도를 내기 위해서 차단 스프링의 인장력 합은 289kgf 이다. 차단 동특성을 만족하도록 차단 스프링의 초기 인장력을 107kgf, 최종 인장력을 182kgf 로 설정하고 가동 접점의 차단 변위, 차단 속도, 차단 가속도의 결과를 시뮬레이션 하였다. 아래 Fig. 4 는 시간에 따른 가동 접점의 차단 변위를 나타내고, Fig. 5 는 시간에 따른 가동 접점의 차단 속도를 나타내고, Fig. 6 은 시간에 따른 가동 접점의 차단 가속도를 나타낸다. Fig. 4 에서 가동 접점은 17mm 의 차단 변위를 넘어서 진동을 하다가 최종 적으로 차단 변위인 17mm 에 수렴하고 있다. 여기서, 차단 변위를 넘어서 진동하는 영역을 바운싱 현상이라 한다. 바운싱 현상도 차단 스프링에 영향을 받는 차단 동특성 중의 하나이지만, 바운싱은 차단 스프링 뿐만 아니라, 물체들간의 충돌에 의한 에너지 손실등의 영향도 동시에 고려해야 하는 탄·소성 영역까지 포함하고 있다. 본 연구에서는 차단기 메커니즘의 구성 물체들을 강체로 정의하여 해석을 수행 하였기 때문에 바운싱 현상에 대한 차단 동특성은 고려하지 않았다. 향후에 차단기의 탄성 다물체 동역학 해석을 통하여 차단 스프링의 설계시, 바운싱 현상도 고려한 연구가 필요하다. Fig. 5 에서 가동 접점은 초기에 17mm 도달 할 때까지 속도가 증가하다가 17mm 를 넘어가게 되면 속도가 감쇠하는 것을 알 수 있다. 여기서 초기 17mm 까지의 평균 속도는 1.7m/s 로서 차단 속도를 만족하고 있다. Fig. 6 의 가속도 그래프에서 펄

스가 발생하는 부분은 가동 접점이 초기 정지 상태에서 운동을 시작하는 시점과 바운싱에 의해서 가동 접점의 운동 방향이 변화되는 시점이다. 펄스가 발생하는 부분외의 시간영역에서는 가동 접점의 가속도 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

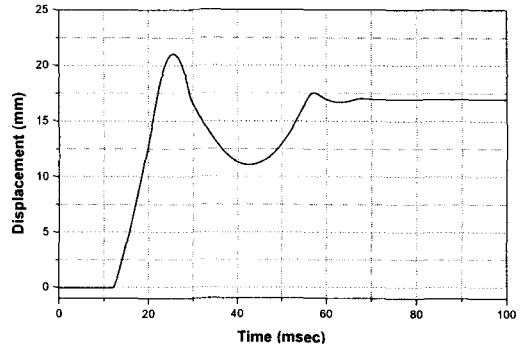


Fig. 4 Displacement of Moving Contactor

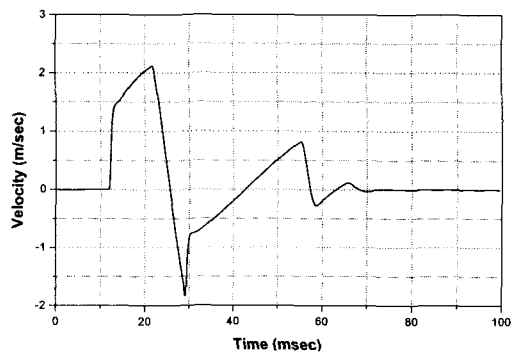


Fig. 5 Velocity of Moving Contactor

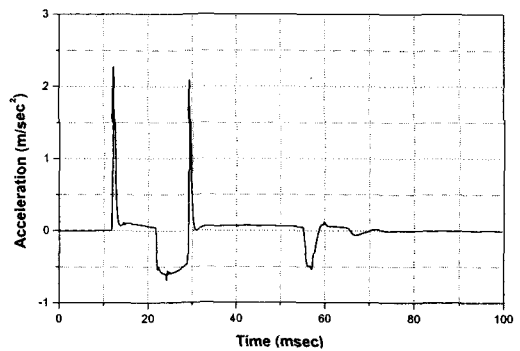


Fig. 6 Acceleration of Moving Contactor

6. 결론

본 연구에서는 에너지 방법을 이용하여 차단 속도에 따른 차단 스프링 설계변수(초기 인장력, 최종인장력)의 선정을 제시하였고, 제안된 방법을 이용하여 24kV 25kA의 차단 용량을 가진 진공 차단기 가동 접점의 차단 속도에 따른 차단 운동에너지, 차단 스프링 에너지, 스프링 설계 변수를 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과로부터 차단 스프링의 설계 변수인 초기 인장력과 최종 인장력을 107kgf, 182kgf로 선정하여 동역학 해석을 수행하였다. ADAMS 동역학 해석을 통하여 선정된 차단 스프링이 진공 차단기의 차단 용량을 만족하는 차단 속도임을 확인하였다. 또한 진공 차단기의 차단 동특성인 가동 접점의 시간에 따른 차단 변위, 차단 속도, 차단 가속도를 분석하였다. 향후 연구에서는 탄성 다물체 동역학 해석을 통하여 가동 접점의 차단 바운싱 현상을 고려한 스프링 설계가 필요하다.

참고문헌

- (1) P. Pracht, P. Minotti, and M. Dahan, 1987 "Synthesis and Balancing of Cam-Modulated Linkages," Proceedings, 1987 ASME Design Automation Conference, Boston, pp.221-226
- (2) D. A. Streit and B. J. Gilmore, 1989 "Perfect Spring Equilibrators for Rotatable Bodies," Transaction ASME-Journal of Mechanisms, Transmission, and Automation in Design, Vol. 111, pp. 451-458
- (3) G. Walsh, D. A. Streit and B. J. Gilmore, 1991 "Spatial Spring Equilibrator Theory," Mechanism and Machine Theory, Vol. 26, No. 2, pp. 155-170
- (4) C. Huang and B. Roth, 1993 "Dimensional Synthesis of Closed-Loop Linkages to Match Force and Position Specifications," Transaction ASME-Journal of Mechanical Design, Vol. 115, pp. 194-198
- (5) J. G. Jenuwine and A. Midha, 1994 "Synthesis of Single-Input and Multiple-Output Port Mechanisms with Springs for Specified Energy Absorption," Transaction ASME-Journal of Mechanical Design, Vol. 116, pp. 937-943
- (6) K. Y. Ahn et al, 1997 "Modeling and Analysis for a High Speed Cam-Follower Mechanism of Power Circuit Breaker", *Asia-Pacific Vibration Conf. '97*, pp. 55-59
- (7) A. M. Wahl, 1963 "*Mechanical Spring*", McGraw-Hill
- (8) N. Tsujiuchi, 1995 "Optimum Design for Dynamic Characteristic of VCB", *Asia-Pacific Vib. Conf.*, pp.810-815
- (9) H. Walser, 1996 "Using ADAMS in The Development of High Voltage Switching gears", *ADAMS User's Conf.*, Vol 11, pp. 365-375