

규정된 동적특성을 위한 회로차단기의 스프링 설계변수의 최적화

안길영#, 정광영*

Optimization of the Spring Design Parameters of a Circuit Breaker for Satisfying Specified Dynamic Characteristics

Kil Young Ahn# and Kwang Young Jeong*

ABSTRACT

In a vacuum circuit breaker mechanism, a spring-actuated linkage system is used to satisfy the desired opening and closing characteristics of electric contacts. If the type and structure of the linkage system required to the circuit breaker is predetermined, the stiffness, free length and attachment points of a spring become the important design parameters. In this paper, based on the energy conservation that the total system energy is constant throughout the operating range of the mechanism, a systematic procedure for optimizing the spring design parameters is developed and applied to the simplified mechanism of a circuit breaker. Then, in order to consider the complex dynamics of the circuit breaker mechanism rather well, the developed procedure is converted to the environment of a multi-body dynamics program ADAMS.

Key Words : Vacuum Circuit Breaker(진공 회로차단기), Spring Design Parameter(스프링 설계변수), Least Square Error(최소자승오차), Polynomial Function(다항식 함수), Multi-body Dynamics Program(다물체 동역학 프로그램)

기호설명

F_V = contact force on the moving contact

g = gravity constant

I_o = moment of inertia of the link

k = spring constant

l_o = free length of the spring

m_c = mass of the moving contact

m_f = mass of the follower

T = kinetic energy

T_f = friction torque acting on the rotational axis

V_e = potential energy of the elastic spring

V_g = potential energy by gravity

W^{nc} = work done by nonconservative force

θ_i = initial rotational angle of the link

θ_o = rotational angle of the link

Ψ = sum of the square errors between the desired and the calculated velocities

접수일: 2003년 11월 4일; 게재승인일: 2004년 2월 4일

교신저자: LG 산전 전력연구소

E-mail kyahn@lgis.com Tel. (043) 261-6523

* 공주대학교 기계공학부

1. 서론

고전압과 고전류가 흐르는 송배전 계통에서 과전류, 단락 등에 의한 사고 발생시에 그 과급효과를 최소화하기 위하여 고압 회로차단기(power circuit breaker)가 사용된다. 현재 고압 차단기는 여러 형태로 발전되어 왔으며, 회로 접점의 개폐시에 발생하는 아크(arc)의 소호매질에 따라 공기, 자기, 가스, 진공 회로차단기 등으로 분류되고 있다.¹ 이들 중에 3.6 ~ 38 kV의 중전압급에서 급속히 보급되는 진공 회로차단기(vacuum circuit breaker: VCB)는 진공 인터럽터(vacuum interrupter: VI)내에서 아크를 소호시키는 것으로, 소형으로 고성능이며 보수 점검이 용이한 장점을 가지고 있다.

VCB는 VI 내의 전기 접점을 수십 ms(millisecond) 내에 투입(closing) 또는 차단(opening)시키기 위하여, 스프링에 미리 충전된 탄성에너지를 캠 및 링크들로 이루어진 기구부로 운동에너지를 전달하는 스프링구동 링크기구를 사용한다. 따라서 스프링을 제외한 링크기구가 결정되어 있을 때, 전기적 특성에 의해 규정된 접점의 차단과 투입특성은 링크기구를 구동하는 스프링에 의해서 결정된다.

스프링구동 링크기구에서 스프링 설계변수에 관한 연구로서, 먼저 스프링을 제외한 링크기구가 설계된 가정 하에서 규정된 운동과 에너지를 기준으로 스프링의 강성과 연결 위치를 결정하는 해석적인 방법을 제안하였다.² 이 연구는 규정된 에너지 레벨을 근사시키기 위하여 스프링의 자유장을 영(zero)으로 제한하였으며, 설계자들에게는 복잡한 단점이 있다. 스프링 설계변수들을 결정하는 연구로서, 링크기구의 정적 균형(static balancing)을 위해 에너지방법을 이용한 방법이 제안되었다.^{3, 4} 이 연구에서는 중력과 스프링에 의한 포텐셜 에너지 사이에서 시스템의 전체 포텐셜 에너지가 일정하게 되도록 하였다. 그러나, 스프링의 연결위치와 링크기구의 동특성에 대해서는 고려하지 않았다. 스프링 설계변수에 대한 또다른 연구로, 규정된 힘과 위치를 만족시키기 위해 스프링의 포텐셜 에너지를 이용하여 메커니즘의 스프링을 설계한 연구가 있으며, 규정된 위치와 스프링의 포텐셜 에너지를 이용하여 링크의 길이, 스프링의 강성과 자유장을 결정하는 방법이 제안되었

다.^{5, 6}

본 논문에서는 에너지방법을 이용하여 차단기 메커니즘의 규정된 동적특성을 만족시키기 위한 스프링의 모든 설계변수들을 최적화하는 간결한 방법을 먼저 제안한다. 이는 차단기의 단순화된 링크기구에서 스프링 설계변수들을 선정하는데 사용된다. 그리고 제안된 설계변수의 최적화 방법을 차단기의 동특성을 분석하기 위한 동적모델에 사용되는 다물체 동역학프로그램인 ADAMS 환경으로 변환한다. 이것은 복잡한 구조의 링크와 스프링들로 이루어진 차단기의 설계에 이용될 수 있도록 하기 위함이다. 마지막으로 ADAMS 환경에서 최적화 방법을 사용하여 실제 복잡한 차단기의 스프링을 설계한다.

2. 스프링 설계변수의 최적화

2.1 스프링구동 링크기구의 설계

개발하고자 하는 차단기의 전기적 특성에 의해 규정된 접점의 차단과 투입특성을 알고 있을 때, 링크기구의 세부적인 설계절차는 다음과 같다. 첫째로 접점의 운동을 일으키는 링크기구를 선택하거나 설계한다. 다음에 접점의 동특성을 만족시킬 수 있는 링크기구를 구동하는 스프링 설계변수(spring design parameter)인 강성(stiffness)과 자유장(free length), 그리고 스프링의 연결 위치를 결정한다. 마지막으로 결정된 설계 변수들로부터 실제 스프링의 형상, 권선수, 직경 등을 설계한다. 이러한 절차는 Fig. 1과 같다.

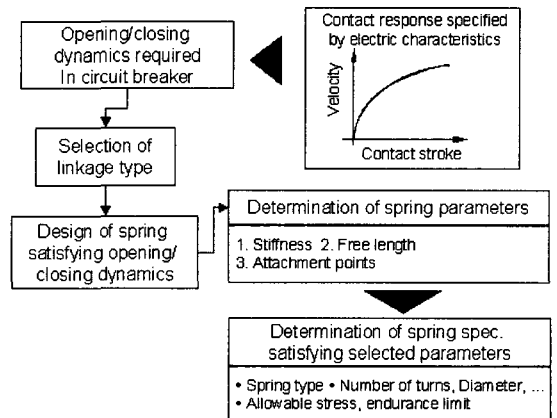


Fig. 1 Spring design process in circuit breaker

2.2 설계방법 및 최적화

보편적인 뉴턴 방정식을 이용한 접근은 구속력(constrained force), 힘이나 모멘트의 방향 등을 필요로 한다. 그러나 에너지를 이용한 접근은 이들에 대한 정보가 필요하지 않으므로 해석과 설계 방법을 아주 간단하게 만든다. 특히 차단기 메커니즘의 경우, 스프링과 링크로 구성되므로 에너지 접근방법이 더욱 용이하다. 따라서 차단기 메커니즘의 스프링 설계는 에너지 접근을 바탕으로 차단기의 규정된 동적 특성을 고려함으로써 이루어진다.

주어진 메커니즘이 임의의 한 위치에서 다른 위치로 움직일 경우에 대한 일과 에너지 방정식은 식 (1)과 같다.

$$W_{1 \rightarrow 2} = T_2 - T_1 = V_1 - V_2 + W_{1 \rightarrow 2}^{nc} \quad (1)$$

여기서, T 는 링크들의 운동 에너지(kinetic energy)를, V 는 중력과 탄성스프링에 의한 포텐셜 에너지를, $W_{1 \rightarrow 2}^{nc}$ 는 비보존력(nonconservative force)에 의한 일을 나타낸다.

Fig. 2 는 1 자유도를 가진 간단한 스프링구동 링크기구를 나타낸다. 여기서 스프링의 한 끝은 점 A 에서 지면(ground)에 연결되어있고, 다른 한 끝은 링크의 한 점 B 에 연결되어 있다. 점 A 의 좌표는 고정된 X-Y 좌표계에서 (U, V) 이고, 점 B 의 좌표는 x-y 좌표계에서 (s, t) 로 나타내어진다. 중동절에 고정되어 있는 x-y 좌표계는 X-Y 좌표계를 점 O 에서 θ_i 만큼 회전시킨 좌표계이며 두 좌표계의 z 축은 같다. 링크가 초기위치 θ_0 에서 θ_i 만큼 회전할 때 일과 에너지식은 다음과 같다.

$$V_e(\theta_0) + V_g(\theta_0) - V_e(\theta_i) - V_g(\theta_i) + W^{nc} - (T(\theta_i) - T(\theta_0)) = 0 \quad (2)$$

여기서,

$$V_e(\theta_i) = \frac{k}{2} \left(\sqrt{[U - (s \cos \theta_i - t \sin \theta_i)]^2 + [V - (s \sin \theta_i + t \cos \theta_i)]^2} - l_0 \right)^2 \quad (3)$$

$$V_g(\theta_i) = m g e \sin \theta_i \quad (4)$$

$$T(\theta_i) = \frac{1}{2} I_o \dot{\theta}_i^2 \quad (5)$$

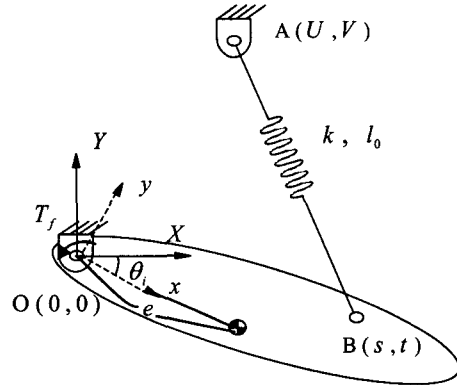


Fig. 2 Simple spring-actuated link mechanism with one degree-of-freedom

$$W^{nc} = T_f (\theta_i - \theta_0) \quad (6)$$

$V_e(\theta_0)$, $V_g(\theta_0)$, $T(\theta_0)$ 는 식 (3), (4), (5)에 θ_i 대신 θ_0 를 대입하여 얻게 된다. e 는 회전축에서 링크의 질량중심까지의 거리이고, k 와 l_0 는 스프링의 강성과 자유장을, I_o 는 링크의 회전축에 대한 관성모멘트를, T_f 는 회전축에 작용하는 마찰토크를 나타낸다.

위 식 (2)에서 결정될 설계변수는 스프링의 강성(k)과 자유장(l_0), 스프링의 한 끝이 연결될 링크 위의 점 B 의 위치(s, t), 스프링의 다른 끝이 연결될 지면 위의 점 A 의 위치(U, V)로서 총 6 개가 된다. 이러한 6 개의 설계변수는 규정된 특성곡선인 링크의 회전각에 대한 회전속도의 곡선과 임의의 설계변수에 대하여 식 (2)에 의해 계산된 곡선 사이의 오차 자승이 최소화되도록 함으로써 결정된다. 즉 다음과 같은 최적화 방법에 의해 결정된다.

먼저 j 번째 위치에서 원하는 속도를 $\dot{\theta}_j$ 라 하고, 어떤 설계값과 식 (2)를 이용하여 계산된 j 번째 위치에서 속도를 $\hat{\theta}_j$ 라 하면, 두 속도간의 자승 오차(square error)는 $(\dot{\theta}_j - \hat{\theta}_j)^2$ 이 된다. 그리고 임의의 위치를 N 개 선택한다면 그 전체적인 오차는 다음 식과 같다.

$$\Psi = \sum_{j=1}^N (\dot{\theta}_j - \hat{\theta}_j)^2 \quad (7)$$

위의 식 (7)을 최소화되도록 스프링의 강성, 자

유장, 연결 위치들을 정한다면 규정된 회전각과 속도 곡선에 가장 근접하게 운동하는 스프링구동 링크기구를 얻게 된다.

2.3 적용 및 결과

Fig. 3 은 정격전압이 12kV 이고 차단전류가 40kA 인 진공 회로차단기의 스프링구동 링크기구를 나타내고 있다. 3 상의 가동접점(moving contact)이 중동절에 연결되어 있으며, 중동절에 대해 대칭으로 연결된 2 개의 차단스프링, 그리고 진공 인터럽터와 대기 사이에 작용하는 자폐력이 고려될 것이다.

가동접점이 고정접점(fixed contact)과 붙어있을 때의 초기위치에서 임의의 회전각 θ_i 까지 운동할 때 일과 에너지식은 식 (8)로 표현된다.

$$V_e(\theta_0) + V_g(\theta_0) - V_e(\theta_i) - V_g(\theta_i) + W^{nc} - (T(\theta_i) - T(\theta_0)) = 0 \quad (8)$$

식 (8)은 식 (2)와 같은 모양이나 스프링의 탄성에너지를 제외하고는 각 성분이 다르다. 이 식에서 중동절의 회전각 θ_i 는 고정좌표계 X-Y 좌표계에 대한 중동절에 고정된 x-y 좌표계의 회전각도이다.

스프링의 탄성에너지 $V_e(\theta_i)$ 는 식 (3)과 동일하며 중력에 의한 포텐셜에너지 $V_g(\theta_i)$ 와 운동에너지 $T(\theta_i)$ 는 3 개의 가동접점을 고려해야 하므로 다음 식으로 나타내어진다.

$$V_g(\theta_i) = m_f g d_f \sin(\psi + \theta_i) + 3m_c g d_c \sin(\phi + \theta_i) \quad (9)$$

$$T(\theta_i) = \frac{1}{2} I_o \dot{\theta}_i^2 + \frac{3}{2} m_c (d \dot{\theta}_i \cos \theta_i)^2 \quad (10)$$

여기서, d_f 와 d_c 는 원점에서 중동절과 가동접점의 질량 중심의 위치인 C_f 와 C_c 까지의 거리를 각각 나타내며 $\psi = \angle C_f O B$, $\phi = \angle C_c O B$ 이다. F_V 는 각각의 가동접점에 작용하는 자폐력을 나타내며 자폐력이 한 일은 다음 식과 같다.

$$W^{nc} = 3F_V d (\sin \theta_i - \sin \theta_0) \quad (11)$$

$V_e(\theta_0)$, $V_g(\theta_0)$, $T(\theta_0)$ 는 식 (3), (9), (10)에 θ_i 대신 θ_0 을 대입하여 얻게 된다.

2.3.1 링크의 규정된 운동곡선 설계

Fig. 3 의 진공 회로차단기에서 가동접점이 고정접점과 분리되어 차단될 때 중동절이 만족해야 할 조건은 아래와 같다.

$$\theta(t_0) = -2.0783 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$\dot{\theta}(t_0) = 8.9226 \text{ rad/s at } t_0 = 15.85 \text{ msec}$$

$$\theta(t_s) = 9.5343 \times 10^{-2} \text{ rad at } t_s = 25.80 \text{ msec}$$

여기서 t_0 는 가동접점이 차단되기 시작하는 시간을, t_s 는 가동접점이 10 mm 의 접점간격을 움직였을 때의 시간을 나타낸다.

t_k 는 차단기의 중요한 성능기준인 전체 스트로크의 0 %에서 90 %까지의 평균차단속도(average opening velocity)로부터 다음 식과 같이 계산된다.

$$t_k = t_0 + \frac{0.9d_c}{v_c} \quad (12)$$

여기서 v_c 는 1 m/s 의 차단속도를, d_c 는 접점간격 10 mm 를 나타내며, $t = t_k$ 일때의 중동절이 만족할 조건은 아래와 같다.

$$\theta(t_k) = 8.5575 \times 10^{-2} \text{ rad at } t_k = 24.85 \text{ msec}$$

위의 네 조건을 만족하는 중동절의 회전변위를 다항식 함수(polynomial function)를 이용하여 구

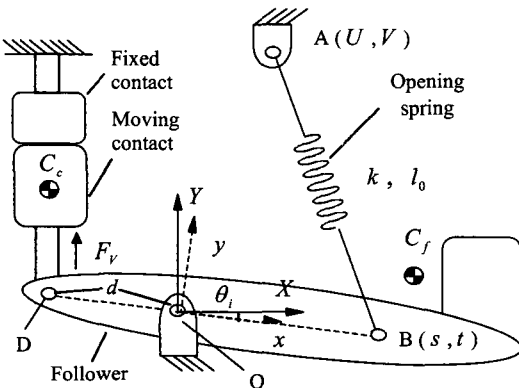


Fig. 3 Spring-actuated linkage of vacuum circuit breaker for opening operation

하면 식 (13)과 같다.⁷ 이 식으로부터 시간에 대한 변위와 속도를 얻을 수 있고, 최종적으로 차단시 중동절이 만족해야 할 회전각과 속도에 대한 곡선인 Fig. 4 가 얻어진다.

$$\theta(t) = -0.105 + 3.42t + 2.34 \times 10^2 t^2 - 2.53 \times 10^3 t^3 \quad (13)$$

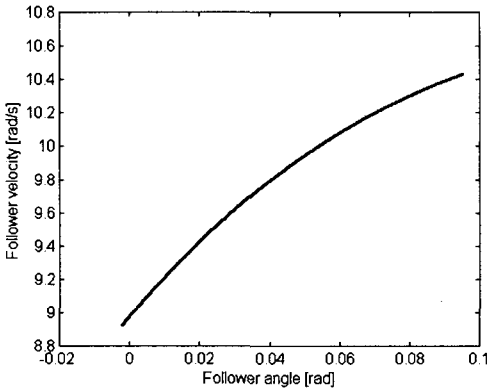


Fig. 4 Relation between desired angle and velocity

Table 1 Optimization of spring design parameters

	Original value	Optimal value
k [N/mm]	14.59	25.82
l_0 [mm]	128	147
U [mm]	83	71.3
V [mm]	207	147
s [mm]	135	146

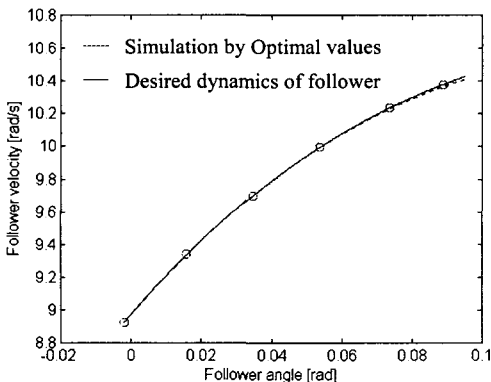


Fig. 5 Dynamic characteristics of follower

2.3.2 스프링 설계변수(k, l_0, U, V, s)의 결정

일반적으로 링크는 대칭성을 가지도록 설계되므로, Fig. 3의 차단스프링의 한 연결점 B는 점 O와 연결된 직선상에 위치하므로 설계변수 중에 t 는 xy -좌표계상에서 영(zero)이 된다. 따라서 결정될 스프링의 설계변수로는 k, l_0, U, V, s 로 줄어든다. 먼저 설계변수들의 초기값을 사용하여, Fig. 5와 같이 선택된 6개의 회전각에 대하여 식 (8)을 이용하여 속도를 계산한다. 다음 계산된 속도와 규정된 속도 사이의 에러 차승을 구하고, 이들 에러가 최소화되도록 설계변수들을 최적화한다. 여기서 최적화를 위하여 개량된 Simplex 방법을 사용하였다.⁸ Table 1과 같은 최적화된 설계변수들을 이용하여 중동절의 운동방정식을 풀면 Fig. 5와 같이 요구되는 중동절의 동특성에 근접함을 알 수 있다.

3. ADAMS 모델을 이용한 최적화

3.1 최적화 방법의 ADAMS 환경으로 변환

앞 장에서 제안된 방법이 복잡한 링크와 스프링들로 이루어진 실제 차단기의 스프링 설계변수의 결정에 적용되기 위해서는 차단기에 구성되어 있는 모든 요소를 고려하여 수식화해야 한다. 그러나 이러한 과정에는 시간이 많이 요구되며, 차단기의 링크기구의 형상과 치수가 다를 때마다 수식화를 전개해야 하는 단점이 있다.

최근에는 차단기와 같은 복잡한 기구의 동적 모델(dynamic model)이 ADAMS⁹와 같은 다물체 동역학 프로그램(multi-body dynamics program)을 사용하여 개발되고 있다.^{10, 11} 따라서 수식적으로 전개된 일과 에너지 식을 고려하는 것이 아니라 ADAMS를 이용하여 구축된 동적모델을 사용할 수 있도록, 앞 장에 제안된 스프링 설계변수의 최적화 방법을 ADAMS 환경으로 변환하고자 한다. 따라서 본 논문에서는 ADAMS 환경에서 스프링 설계변수의 최적화 과정이 수행될 수 있는 방법을 제안하고, 실제 복잡한 차단기의 차단스프링 설계에 적용한다.

Fig. 6은 차단기의 ADAMS 모델을 이용하여 앞 장에서 제안된 스프링 설계변수를 최적화하는 과정을 나타낸다. 여기서 기본적인 방법은 앞 장에서 제시된 방법과 동일하다. 즉 먼저 주어진 차단 용량에 적합한 접점의 차단 및 투입 곡선이 설계

된다. 이는 ADAMS 환경이 아니라 수치계산 프로그램에서 설계된다. 다음 초기 설계변수에 의해 차단기의 동적모델에서 접점의 동특성이 계산된다. 그리고 ADAMS 에서 계산된 접점속도와 규정된 접점속도의 에러 자승이 최소화되도록 한다. 여기서 최적화 프로그램은 ADAMS 의 DOT3 를 이용하였다.

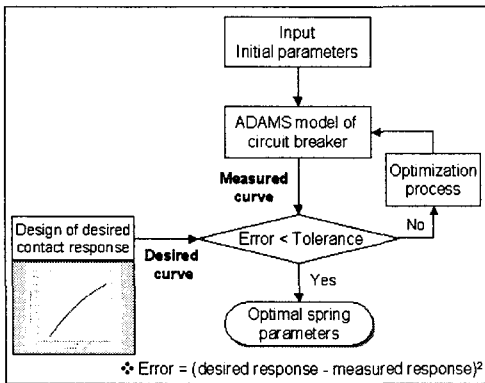


Fig. 6 Optimal design process of spring parameters using ADAMS

Table 2 Optimal Design results of opening spring

Iter.	Objective function	Stiffness (m/sec)	Free length(mm)
0	1.72E9	50	100
1	2.70E7	57.07	151.8
2	1.55E7	57.65	148.2
3	1.47E7	57.52	148.9

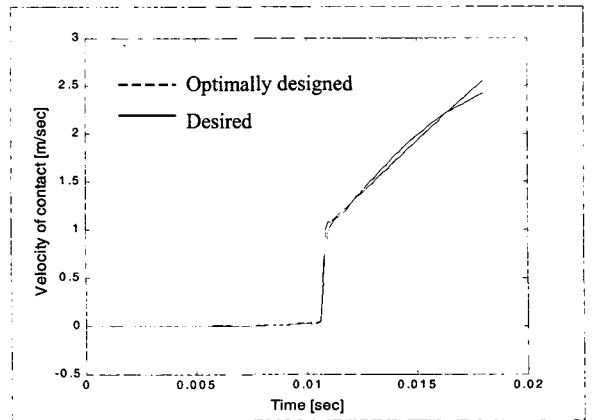


Fig. 8 Desired and optimal designed opening characteristics of moving contact

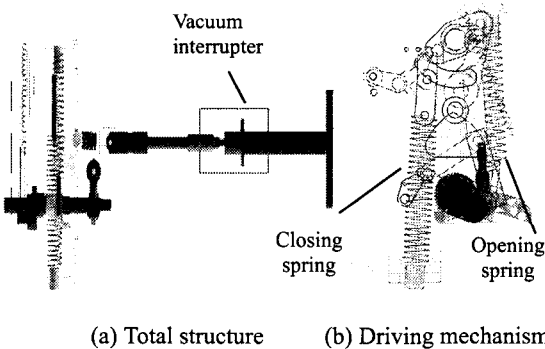


Fig. 7 Total structure and driving mechanism of vacuum circuit breaker

3.2 차단스프링의 최적설계

Fig. 7 은 Fig. 6 의 방법이 적용된 정격전압이 24 kV, 차단전류가 40 kA 인 차단기의 전체 구조와 구동메카니즘의 구조를 나타낸다. 여기서 진공 인터럽터내의 접점 스트로크는 17 mm 이다. 차단기의 차단특성에서 가장 중요한 성능기준은 차단속도로서 전체 스트로크의 0에서 90 % 까지의 평균속도를 말한다. Fig. 7 로 나타내어진 차단기의 차단속도를 1.80 m/sec 가 되도록 차단스프링을 최적

설계하고자 한다. 일반적으로 스프링이 연결되는 위치는 차단기의 조립공정의 편이상 기준의 위치를 유지하는 것이 요구되므로 설계변수에서 연결점의 위치는 제외하였다.

초기의 차단 스프링의 강성은 50 N/mm, 자유장은 100 mm 일 때 차단속도는 2.64 m/sec 로서 실제 설계기준인 1.80 m/sec 에 비하여 훨씬 높다. 따라서 Fig. 6 과 같은 최적화 과정을 통하여 설계기준의 차단속도를 만족하는 차단스프링의 강성과 자유장을 설계해야 한다.

먼저 접점의 차단속도가 1.80 m/sec 가 되도록, 2.2.1 절에서 제시된 방법으로 접점의 스트로크에 대한 속도 곡선을 설계하였다. 설계된 차단 특성곡선을 Fig. 6 의 스프링 설계변수의 최적화과정에 적용하여 최적화된 스프링의 강성과 자유장을 Table 2 와 같이 얻을 수 있었다.

최적화로 얻은 강성과 자유장을 갖는 스프링에 의한 접점의 속도곡선을 점선으로, 요구되는 속도곡선을 실선으로 나타내어 Fig. 8 에 도시하였는데 두 곡선이 서로 근접함을 알 수 있다. 또한,

최적화로 구한 스프링을 사용한 차단기의 평균 차단속도는 1.77 m/sec 로서 설계기준인 1.80 m/sec 와 비교할 때 오차 2 % 이내의 만족한 결과를 얻었다.

4. 결론

주어진 차단기 메커니즘에 대하여 규정된 동특성을 만족하는 스프링의 설계변수들인 강성, 자유장과 두 연결 위치들을 최적설계하는 방법을 제안하였다. 그리고 제안된 기본적인 설계방법이 실제 복잡한 차단기의 환경에 적용될 수 있도록 차단기의 ADAMS 모델을 이용하는 최적화 과정으로 변환되었다. 제안된 설계방법은 실제 차단기의 차단특성을 만족시키기 위한 차단스프링의 설계에 적용되었고, 설계된 차단스프링을 사용한 접점의 평균차단속도는 오차 2 % 이내로 설계기준에 근접하였다. 제안된 동적모델을 이용한 최적화 과정은 스프링뿐만 아니라 링크의 길이와 질량 등의 기구/동역학적 변수들의 결정에도 사용될 수 있다.

참고문헌

1. Flurschein, C. H., Power Circuit Breaker Theory and Design, Short Run Press Ltd., 1975.
2. Matthew, G. K. and Tesar, D., "Synthesis of Spring Parameters to Satisfy Specified Energy Levels in Planar Mechanisms," Transaction ASME-Journal of Engineering for Industry, May, pp. 341 - 346, 1977.
3. Streit, D. A. and Gilmore, B. J., "Perfect Spring Equilibrators for Rotatable Bodies," Transaction ASME-Journal of Mechanisms, Transmission and Automation in Design, Vol. 111, pp. 451 - 458, 1989.
4. Walsh, G., Streit, D. A. and Gilmore, B. J., "Spatial Spring Equilibrator Theory," Mechanism and Machine Theory, Vol. 26, No. 2, pp. 155 - 170, 1991.
5. Huang, C. and Roth, B., "Dimensional Synthesis of Closed-Loop Linkages to Match Force and Position Specifications," Transaction ASME-Journal of Mechanical Design, Vol. 115, pp. 194 - 198, 1993.
6. Jenuwine, J. G. and Midha, A., "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, 1994.
7. Erdman, A. G. and Sandor, G. N., Mechanism Design, Analysis and Synthesis Vol. 1, Prentice-Hall, 1984.
8. Rao, S. S., Optimization Theory and Application, Wiley Eastern Limited, New York, 1978.
9. ADAMS(Automated Dynamic Analysis of Mechanical System) Reference Manual., Mechanical Dynamics incorporated, U.S.A, 2002.
10. Ahn, K. Y., Kwon, B. H., Oh, I. S., Yoon, Y. K. and Choe, J. W., "Dynamic Analysis of Air Circuit Breaker with Spring-Actuated Linkage," Proc. of the KSPE Fall Conference, pp. 812 - 815, 2001.
11. Ahn, K. Y. and Kim, S. H., "Dynamic Model and Analysis of a Vacuum Circuit Breaker Mechanism for High-Speed Closing and Opening Simulations," J. of the KSPE, Vol. 19, No. 10, pp. 163 - 170, 2002.