

현수리력을 부가한 점퍼장치의 횡진억제효과 분석

손홍관
한국전기연구소

이은웅
충남대

The Swing Restraint effects for Suspension I string type Jumper Devices

H. K. Sohn,
KERI

E. W. Lee
ChungNam Univ.

Abstract

The jumper devices of overhead transmission lines are getting increased in size with the adoption of higher voltage and bundled conductor. Increase of jumper devices' size caused to large swing angle and flashover with tower post or arm. The suspension I type string type jumper devices are used for swing restraint of suspension type. This paper is compared and analyzed to its swing characteristics. The results showed that suspension I string type has a good effects.

1. 서 론

가공송전선의 점퍼장치는 내장철탄에서 양측을 연결시켜 주는 중요한 송전설비의 하나이며, 송전선로의 초고압화, 다도체화에 따라 그 규모가 점점 커질 수밖에 없는 구조를 하고 있다. 그런데 점퍼장치의 규모가 커지면 바람에 의한 횡진동특성이 나빠지게 되고, 이로 인해 철탄 주주재 또는 철탄 압과의 섬락사고를 일으키게 된다. 따라서 이러한 문제점들을 개선하기 위해서 외국에서는 여러 종류의 점퍼장치를 개발하여 사용하고 있으며, 이 중의 하나가 점퍼선의 중앙부와 철탄압 끝간에 현수1련형 애자련을 설치하여 횡진동특성을 개선하고자 하는 방식이다. 국내에서도 일부 지역에서 사고의 사례가 보고되었으며 이 방식을 사용하여 효과를 보고 있다.

그러나 그 효과에 대한 정확한 이론적인 분석이 실시된 예가 없으며, 다만 개략적인 추정에 의해 실시되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 345kV 송전선로의 점퍼선에 대한 횡진동특성 해석과 현수1련을 부가한 경우의 횡진동특성 해석을 통하여 그 효과를 비교해 보고자 한다.

점퍼장치의 횡진동특성은 점퍼장치의 자체무게와 이에 가해지는 풍압의 벡터합이 연직선과 이루는 각도로 정의할 수 있지만 실제적으로는 애자련의 비틀림강성, 점퍼선의 강성, 애자련의 횡진, 점퍼장치의 중량, 풍압면적 등의 여러 가지 조건에 의해 영향을 받기 때문에 간단히 해석하기가 곤란하다.^{[1][2]}

점퍼장치의 횡진동특성은 정적인 횡진동특성과 동적인 횡진동특성으로 나눌 수 있다. 정적인 해석은 바람이 점퍼장치와 직각방향으로 일정한 속도로 불 때 점퍼장치가 횡진하는 각도를 해석하는 것이며 이때의 각도를 평균횡진각이라고 한다. 그러나 실제로는 바람이 일정한 속도, 일정한 방향으로 불지 않고 매우 불규칙하게 발생하고, 점퍼장치도 바람에 의해 동적인 진동을 하므로 같은 풍속이라도 횡진각이 항상 같게 나타나지는 않는다. 따라서 바람에 의해 동적으로 진동하면서 어느 순간에 최대횡진각을 발생시키는 데, 이 각도를 표현하는 방법은 최대횡진각이 평균횡진각을 중심으로 정규적인 분포를 한다고 가정하여 정규분포에 대한 표준편차를 구함으로써 식 (1)과 같이 점퍼장치의 최대횡진각을 구하는 것이 일반적이다.^[1]

$$\theta_{max} = \theta_{avg} + N\sigma \quad (1)$$

2. 점퍼선의 횡진특성 해석모델

점퍼장치의 형태는 일반적으로 그림 1. 과 같이 간략하게 나타낼 수 있다. 즉 조립식 점퍼장치는 좌우의 내장애자장치, 철탄 압, 점퍼스페이서 등으로 구성되어 있다.

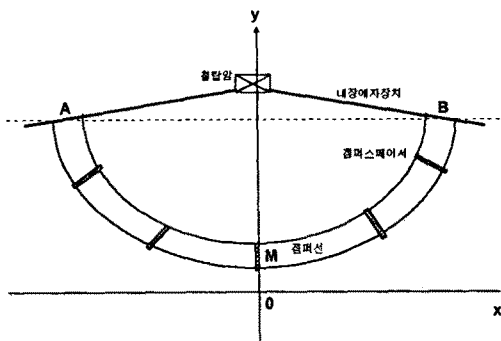


그림 1 현수식 점퍼선의 형상
Fig 1. Suspension type jumper wires.

그림 1 과 같은 형상의 점퍼선이 바람에 의해 진동한다고 할 경우 점퍼장치는 그림 1에서 축 AB를 중심으로 횡진을 하게 되므로 직선 AB를 축으로 하는 회전 모멘트를 구함으로써 해석이 가능하다. 따라서 점퍼선에 대한 횡진동특성을 해석하기 위해서는 점퍼선의 형상을 수학적인 함수로 표현하여야 한다. 즉, 그림과 같이 x, y축을 가정할 때 점퍼선은 식 (2)와 같이 카테너리 곡선으로 간단히 표현할 수 있다.^[3]

$$y = m \cosh \frac{x}{m} \quad (2)$$

여기서 m은 카테너리상수이다.

또한 점퍼선의 모멘트는 일반적으로 비틀림상수와 회전각의 곱으로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M = K\theta_{avg} \quad (3)$$

여기서 M은 점퍼선의 모멘트를 나타내고, K는 애자련 및 점퍼선이 회전하지 않으려는 저항력, 즉 비틀림상수이다. 따라서 점퍼선의 모멘트 M과 비틀림상수 K를 구하면 점퍼선의 평균횡진각을 구할 수 있게 된다.

한편 점퍼장치의 동적인 횡진동특성을 해석하기 위해서는 점퍼선의 동적인 운동방정식을 유도함으로써 가능하다. 점퍼선의 횡진각을 $\theta_p = \theta_{avg} + \varphi$ 라 두고 평균횡진각 θ_p 를 중심으로 미소한 각 φ 만큼 변동한다고 가정하면 점퍼선의 운동방정식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{d\varphi}{dt} + n^2\varphi = F \frac{\Delta V}{V_0} \quad (4)$$

여기서 φ : 평균횡진각 θ_{avg} 로부터의 변동각

ε : 감쇠상수

n : 진동율

V_0 : 평균풍속

ΔV : 평균풍속으로부터의 풍속변동분

F : 풍압에 관한 계수

그런데 식(4)의 계수 ε , n , F 는 점퍼장치의 종류에 따라 다르므로 각 점퍼장치의 특성에 따라 각 부분의 풍압모멘트, 관성모멘트, 자중 등에 의해 그 계수를 산정해야 한다.

이들 계수는 점퍼장치의 평균횡진각의 표준편차를 추정하는데 사용되는데, Davenport의 난류이론에 의하면 지표면 저항계수를 k 라 할 때 다음과 같이 간략화할 수 있다.

$$\sigma_\varphi \approx 0.3077 \frac{\sqrt{k} F V^{1/3}}{\sqrt{\varepsilon} n^{11/6}} \quad (5)$$

즉, 점퍼장치의 횡진각은 평균횡진각 θ_{avg} 와 분산 σ_φ^2 을 갖는 정규 분포 특성을 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 점퍼장치의 최대횡진각은 식 (1)의 관계에 의해서 구할 수 있다.

3. 현수식 점퍼선의 횡진특성 해석

현수식 점퍼장치의 평균횡진각은 식(3)을 이용하여 점퍼선의 모멘트를 구함으로써 해석할 수 있다. 현수식 점퍼장치에서 점퍼선이 연결된 양측 지지점간의 거리를 $2a$, 이도를 d 라고 할 경우 모멘트를 포함한 현수식 점퍼선의 평균횡진각은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_{avg} = \frac{1}{K} f\left(\frac{a}{m}\right) \times \left(\frac{\ell}{\ell^*} \rho \cos \theta_{avg} - w \sin \theta_{avg}\right) \quad (6)$$

θ_{avg} : 평균횡진각

K : 애자런 및 점퍼선의 비틀림상수

ρ : 점퍼선 단위길이당 풍압 [kg^2/m]

w : 점퍼선 단위길이당 중량 [kg^2/m]

$$f\left(\frac{a}{m}\right) = m^2 \sinh \frac{a}{m} \cosh \frac{a}{m} - am$$

$$\ell = \sqrt{a^2 + d^2}$$

$$\ell^* = \sqrt{a^2 + d^2 \cos^2 \theta_{avg}}$$

한편 현수식 점퍼장치의 동적인 횡진특성을 해석하기 위한 운동방정식 (4)의 계수는 점퍼선에 의한 관성모멘트, 점퍼선의 풍압에 의한 모멘트, 점퍼선의 자중에 의한 모멘트를 산출하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{g}{2V} \frac{w^2 \tan^2 \theta_{avg} + \rho^2 \cos^2 \theta_{avg} + \varepsilon_0}{w \tan \theta_{avg}}$$

$$n^2 = \frac{g}{2mf\left(\frac{a}{m}\right)} \left[\frac{K}{wm^2} + f\left(\frac{a}{m}\right) \cdot \left\{ \cos \theta_{avg} + \sin \theta_{avg} \tan \theta_{avg} + \frac{\rho^2}{w^2} \cos^3 \theta_{avg} \right\} \right] \quad (7)$$

$$F = \frac{gf\left(\frac{a}{m}\right)}{mf\left(\frac{a}{m}\right)} \cdot \sin \theta_{avg}$$

ε_0 : 무풍시의 감쇠상수

g : 중력가속도 ($9.8 [m/sec^2]$)

$$f\left(\frac{a}{m}\right) = \cosh^2 \frac{a}{m} \sinh \frac{a}{m} - \frac{2}{3} \sinh^3 \frac{a}{m} - \frac{a}{m} \cosh \frac{a}{m}$$

4. 점퍼I런이 부가된 점퍼장치의 횡진특성 해석

일반적으로 현수식 점퍼장치는 바람에 의한 횡진각 특성이 좋지 않기 때문에 여러 가지 방법에 의해 이를 개선하고 있다. 본고에서는 이들 중에서 점퍼I런을 부가하는 방법에 대한 해석을 통하여 그 효과를 분석해 보고자 한다.

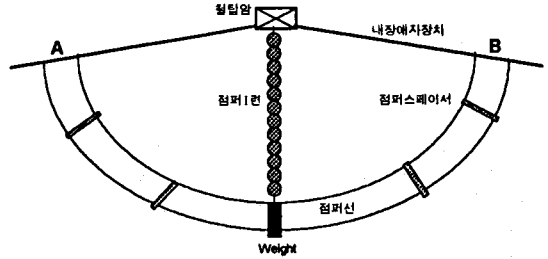


그림 2 현수I런을 부가한 점퍼장치의 형상

Fig 2. Jumper device of suspension I string type.

이 방법은 그림2와 같이 현수식 점퍼장치에 현수애자런을 철탑암으로부터 점퍼선의 중앙부와 직결함으로써 횡진을 억제하는 방식이다.

이 방식의 점퍼장치에 대한 평균횡진각은 수평각을 δ , 점퍼선 중앙의 중추(Weight) 무게를 I_w , 이 중추의 풍압을 P_w , 현수I런 애자의 중량, 풍압을 각각 I_g , P_g 라 하고, 내장애자런의 카테너리 평균각도를 α 라고 할 때 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_i = m^2 f\left(\frac{a}{m}\right) \left(\frac{\ell}{\ell^*} \rho \cos \theta_i - w \sin \theta_i \right) + d(P_w + 0.5P_g) \cos \theta_{AB} - \alpha(I_w + 0.5I_g) \sin \theta_{AB} \quad (8)$$

$$\text{여기서, } \theta_{AB} = -\frac{L_s}{d_0} \sin \frac{\delta}{2}$$

L_s : 내장애자런의 길이

d_0 : 철탑암에서 점퍼선 중앙까지의 거리

한편 동적인 횡진각 해석을 위한 운동방정식의 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon = \frac{g}{2V} \left[\frac{\rho}{w} \left(\frac{\ell}{\ell^*} + \frac{\ell \cos^2 \theta_i}{\ell^*} \right) + \frac{P_w + P_g/3}{I_w + I_g/3} (1 + \cos^2 \theta_{AB}) \right] + \varepsilon_0$$

$$n^2 = \frac{g}{2mf\left(\frac{a}{m}\right)} \left[\frac{K}{wm^2} + f\left(\frac{a}{m}\right) \cdot \left\{ \frac{\rho}{w} \left(\frac{\ell}{\ell^*} + \frac{d^2 \cos^2 \theta_i}{\ell \ell^*} \right) \sin \theta_i + \cos \theta_i \right\} \right] + \frac{g[(I_w + 0.5I_g) \cos \theta_{AB} + (P_w + 0.5P_g) \sin \theta_{AB}]}{2L_s(I_w + I_g/3)} \quad (9)$$

$$F = g \left[\frac{\rho \ell^* \cos \theta_i f\left(\frac{a}{m}\right)}{m w \ell f\left(\frac{a}{m}\right)} + \frac{P_w + P_g/2}{L_s(I_w + I_g/3)} \cdot \frac{d}{d_0} \cos \theta_{AB} \right]$$

여기서 L_s : 현수I런의 길이

5. 사례연구

본 논문에서는 345kV 실선로에서 점퍼장치의 횡진으로 인한 섬락사고가 발생한 철탑의 현수식 점퍼장치에 대해 횡진특성을 해석하고, 또한 이의 대책으로 현수I련을 부가했을 경우의 효과를 분석하였다.

먼저 해석에 사용된 입력데이터는 표 1과 같으며, 이 데이터를

표 1 해석에 사용된 입력데이터
Table 1. Input data of swing estimation.

데이터 종류	전원측	부하측	비 고
철탑높이	42.1[m]		상단압
전선종류	Cardinal		480[mm]
수평각도	L 10° 49'		-10.82°
점퍼길이	3300[mm]		
경간거리	299[m]	449[m]	
지지점고저차	-56.2[m]	29.6[m]	
애자수량	18개	18개	300kN
애자장치 종류	2련내장	2련내장	
카터너리각도	-4.0°	9.0°	
점퍼선의 길이	12.5[m] × 4도체		
I련용 애자중량	11[kg/개]		
중추(Weight)	130[kg]		

기초로 하여 현수식 점퍼장치에 대해 해석한 결과 그림 3과 같이 풍속 대 횡진각의 특성을 얻었다. 또한 현수I련을 부가한 경우에 대한 특성은 그림 4와 같이 나타났다. 이 결과에 의하면 현수I련을 부가함으로써 횡진특성이 대폭 개선되고 있음을 알 수 있으며, 또한 동적인 횡진각 특성의 변동폭이 아주 작게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이것은 현수I련이 평균횡진각 뿐아니라 동적인

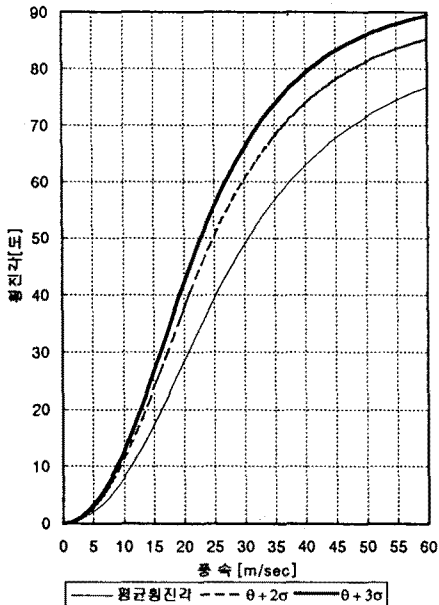


그림 3 현수식 점퍼장치의 횡진특성 해석결과

Fig 3. The swing analysis of suspension type jumper

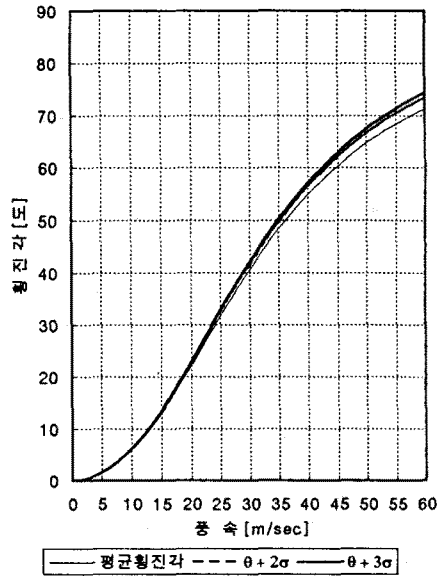


그림 4 현수I련식 점퍼장치의 횡진특성 해석결과

Fig 4. The swing analysis of suspension I string type jumper devices.

횡진각을 억제하고 있다고 볼 수 있다.

결국 점퍼장치의 섬락사고는 평균풍속과 함께 돌풍에 의해서 섬락이 발생할 가능성이 높으므로 현수I련을 현수식 점퍼장치에 부가함으로써 횡진에 의한 섬락사고 억제에 효과가 있음을 알 수 있었다. 풍속 35[m/sec]를 기준으로 할 때 횡진각이 약 20[도]이상 억제되는 것으로 나타났다. 그러나 그 효과의 정도는 점퍼장치가 설치된 철탑의 여러 가지 조건에 따라 달라질 수 있기 때문에 대책을 검토할 때는 좀더 상세한 검토가 필요하다.

6. 결 론

본 논문에서는 현재 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 현수식 점퍼장치의 횡진특성을 해석하고, 이의 대책으로 현수I련을 부가한 경우에 대한 특성해석을 통하여 그 효과를 비교해 보았다.

비교결과 현수식 점퍼장치에 현수I련만을 부가함으로써 나타나는 횡진각의 억제효과가 실용상 충분히 큰 것으로 해석되었다.

이 결과는 현재 운용중인 345[kV] 송전선로 중에서 지형적으로 취약한 곳에 위치한 점퍼장치나 섬락사고가 발생했던 개소에 대한 횡진억제 대책으로 이용할 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 전기협동연구회, "다도체용 전선부속품", 전기협동연구, 제41권 제3호, pp.34-59, 1985.12
- [2] 손흥관의 2인, "조립식점퍼장치의 횡진동특성 해석에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 제46권 제9호, 1997. 9
- [3] Y.Shichiri, Y.Matsubayashi, "Study of horizontal swing of jumper wire during Typhoon - (1)(2)(3)(4)", Smitomo Denki,