

345kV이하 송전선로용 현수애자련 및 점퍼선의 횡진해석 및 적용연구

손 홍 관*, 이 은 응**
한국전기연구원*, 충 남 대**

A Study on the Swing Analysis and Application of Suspension Insulating Sets and Jumper wires for 154kV and 345kV Overhead Lines.

H. K. Sohn*, E. W. Lee**
KERI*, ChungNam Univ.**

Abstract - It is important to determine of tower type whether suspension or tension tower in overhead transmission lines. When we select to tower type, we have need to check of swing angle for suspension string sets. And jumper wire of T/L in the strong wind area have to analysis of swing angle in order to clearance or length of tower arms. This paper is summarized the methods to calculate of swing angle for suspension string sets and jumper wires, and is calculated the swing angle. The calculated result have proposed to improved design specifications of overhead transmission line.

송전선로 설계시 지지물의 종류를 결정하기 위해서는 현수애자련의 횡진을 검토하여 필요한 절연조건들을 만족시키는지 여부를 확인해야 한다. 즉 바람과 선로 수평각에 의한 현수애자련의 횡진이 Clearance Diagram의 횡진각 범위내에 있으면 현수철탐를 사용하고, 그렇지 않으면 내장철탐를 사용하거나 다른 현수철탐를 사용할 필요가 있다.

현수애자련의 횡진은 일반적으로 식 (1)이 사용된다 [2].

$$\phi = \tan^{-1} \frac{W_w S_m \cos^2 \frac{\theta}{2} + 2T \sin \frac{\theta}{2} + \frac{I_w}{2}}{W S_m + T \left(\frac{h_1}{S_1} + \frac{h_2}{S_2} \right) + \frac{I}{2n}} \quad (1)$$

1. 서 론

여기서

송전선로를 설계하는 단계에서 철탐을 현수철탐로 할 것인지 아니면 내장철탐로 할 것인지를 결정하기 위하여 검토하는 항목 중의 하나가 현수애자련의 횡진이다. 이 현수애자련의 횡진을 검토하는 방식은 일반적으로 많이 알려져 있으며, 현재도 많이 사용되고 있다. 그러나 우리나라에서 사용되는 여러 종류의 현수애자련과 도체 및 도체방식에 대한 해석결과를 종합적으로 비교 검토한 문헌은 없다.

- S_m : 지지점 양측의 평균경간 [m]
- W_w : 전선의 풍압하중 [kg/m]
- W : 단위길이당 전선중량 [kg/m]
- θ : 선로의 수평각 [°]
- T : 전선의 수평장력 [kg]
- I_w : 애자련의 풍압하중 [kg]
- I : 애자련의 자중 [kg]
- S_1, S_2 : 지지점 양측의 경간 [m]
- h_1, h_2 : 지지점 양측의 고저차 [m]

또한 특별히 강한 바람이 예측되는 지역에 설치되는 내장철탐의 점퍼선에 대해서는 점퍼선의 횡진을 검토하여 절연거리의 확보여부 및 철탐암의 길이를 결정하고, 필요시 횡진억제대책을 수립해야 한다. 그런데 현재 송전선로 설계의 기준이 되고 있는 한전 설계기준에 현수애자련의 횡진에 대해서는 기술되어 있으나 점퍼선의 횡진에 대한 기준이 없는 상태이므로 송전선로 설계시에 점퍼선의 횡진에 대한 검토는 하고 있지 않다. 그러나 점퍼선의 횡진에 의한 섬락사고의 발생이 일부 보고되고 있고[1], 원인은 규명되지 않았으나 점퍼선의 섬락사고로 추정되는 사고도 보고된 예[1]가 있으므로 이에 대한 검토결과 특별히 횡진이 심한 개소는 별도의 대책을 수립하는 것이 바람직하다고 판단된다.

2.2 점퍼선의 횡진이론

점퍼선의 횡진은 풍속의 변동에 따라 동적인 진동상태에서 그 최대치가 나타날 확률이 높으며, 점퍼선의 길이가 길어지면 사용전선의 비틀림강성 및 애자련의 비틀림 특성의 영향도 무시할 수 없는 정도로 된다.

점퍼선의 정적인 횡진과 동적인 횡진을 고려한 최대횡진각은 일반적으로 식 (2)로 검토한다.

$$\theta_{max} = \theta_{avg} + N \sigma \quad (2)$$

- θ_{max} : 점퍼선의 최대횡진각
- θ_{avg} : 점퍼선의 평균횡진각(평균풍속시)
- σ : 평균횡진각의 표준편차
- N : 표준편차의 배수(2.0~3.2) (N=2.0)

점퍼선의 정적인 횡진을 계산하는 방식은 吉田의 이론식과 大月の 이론식, 松林의 이론식 등이 알려져 있다.[3-5] 본 연구에서는 765kV 송전선로 설계에 적용된 松林의 이론식 (3)을 적용하였다[6].

$$\theta_{avg} = \frac{m^2}{K} \left(\sinh \frac{a}{m} \cosh \frac{a}{m} - \frac{a}{m} \right) \left(\frac{\ell^*}{\ell} P_j \cos \theta_{avg} - W_j \sin \theta_{avg} \right) \quad (3)$$

여기서

- 2a : 점퍼선의 양지지점간 직선거리 [m]
- d : 점퍼선의 이도 [m]
- m : $d = m \left(\cosh \frac{a}{m} - 1 \right)$ 를 만족하는 값
- K : 애자련, 점퍼선의 합성비틀림상수 [kg.m/rad]
- $\ell = \sqrt{a^2 + d^2}$, $\ell^* = \sqrt{a^2 + d^2} \cdot \cos^2 \theta_{avg}$

2. 현수애자련 및 점퍼선의 횡진이론

2.1 현수애자련의 횡진이론

송전선로의 절연간격은 뇌격에 대해서 표준절연간격을 적용하고, 내부이상전압에 대해서는 최소절연간격을 적용하는 것이 일반적이다. 그런데 전선 및 애자련은 바람에 의해 진동하므로 각종 조건에 대한 진동상태를 충분히 고려하여 선로 및 지지물을 설계해야 한다.

P_j : 접퍼선의 단위길이당 풍압[kg/m]

W_j : 접퍼선의 단위길이당 중량[kg/m]

한편 수시로 변하는 바람에 대한 접퍼선의 동적인 진동의 표준편차는 Davenport의 Power Spectrum 밀도로부터 식 (4)와 같이 구할 수 있다.[2]

$$\sigma = 0.3077 \frac{\sqrt{k F V^{1/3}}}{\sqrt{\epsilon n}} \quad (4)$$

여기서,

k : 지표면 저항계수 ($k=0.04$)

V : 평균풍속 [m/sec]

ϵ, n, F : 감쇄상수, 진동율, 풍압에 관한 계수

3. 풍압력의 적용 및 해석조건

3.1 풍압력의 적용

현수애자련 및 접퍼선의 횡진에 적용되는 전선 및 애자련의 풍압은 설계기준에 식(5)와 같이 명시되어 있다.

$$P = \frac{1}{2} \rho V^2 \times \alpha \cdot \beta \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot C \cdot A \quad [kg] \quad (5)$$

여기서 애자련 및 전선의 풍압력 계산에서는 상공체중계수(α) 및 구조규모에 의한 저감계수(β), 차폐계수(K_1)는 일반적으로 고려하지 않는다[7]. 따라서 본 연구에서 고려한 각 계수의 값은 표 1과 같다.

표 1. 풍압력 산정을 위한 계수의 적용
Table 1. Coefficients for wind pressure

구분	전선	애자련	비고
공기밀도(ρ)	0.1195	0.1195	
평균풍속(V[m/s])	0~40		지상10m기준 10분평균
상공체중계수(α)	1.0	1.0	
구조규모저감계수(β)	1.0	1.0	
구조물종류계수(K_1)	1.15	1.15	
차폐계수(K_2)	1.0	1.0	
풍력계수(C)	0.95/1.0/1.05	1.4	
풍압면적(A[m ²])	전선직경		

3.2 현수애자련의 적용현황

현재 154kV 및 345kV 실선로에서 사용중인 현수애자련 및 전선의 종류 및 해석조건은 표 2와 같다.

표 2. 현수애자련 및 전선의 적용현황 및 해석조건
Table 2. Installed and applied conditions of suspension string sets and conductors

	154kV 송전선로	345kV 송전선로
전선	330mm ² , 410mm ²	480mm ² Rail, Cardinal
애자장치	단도체 1련현수 단도체 2련현수 복도체 1련현수 복도체 2련현수	복도체 1련현수 복도체 2련현수 4도체 1련현수 4도체 2련현수
애자	120kN × 10개	복도체:165kN × 20개 4도체:210kN × 18개
경간,고저차	경간:300m,고저차:0	경간:350m,고저차:0
수평각도	3°	3°
지역,기온	2지역, 10℃	2지역, 10℃
장력	330mm ² : T = 2000kg 410mm ² : T = 2816kg	Rail : T = 2063kg Card.: T = 3040kg

3.3 내장애자련의 적용현황

현재 154kV 및 345kV 실선로에서 사용중인 내장애자련 및 접퍼선의 종류 및 해석조건은 표 3과 같다.

표 3. 내장애자련 및 접퍼선의 적용현황 및 해석조건
Table 3. Installed and applied conditions of tension string sets and jumper wires

	154kV 송전선로	345kV 송전선로
접퍼선	330mm ² , 410mm ²	480mm ² (Rail, Cardinal)
애자장치	단도체 1련내장 단도체 2련내장 복도체 2련내장	복도체 2련내장 4도체 2련내장
애자 (청정지역)	165kN × 10개	복도체:165kN × 20개 4도체:300kN × 16개
접퍼길이	1.65m	3.3m
카테너리각	좌우 : 10[도]	좌우 : 10[도]
수평각도	20°	20°
지역, 기온	2지역, 10℃	2지역, 10℃
장력	330mm ² : T = 2000kg 410mm ² : T = 2816kg	Rail : T = 2063kg Card.: T = 3040kg

4. 해석결과 및 평가

4.1 현수애자련의 횡진해석

(1) 해석결과

현수애자련의 횡진에 있어서 빙설하중은 고려하지 않았으며, 장력은 2지역에 대한 장력을 적용하였다. 또한 지지점간의 고저차는 없는 것으로 해석하였다. 각 전선 및 애자련에 대한 해석결과 표 4와 같고, 풍속에 따른 횡진각의 변화는 그림 1 및 그림 2에 나타낸다.

표 4. 현수애자련의 횡진해석 결과
Table 4. The result of swing analysis for suspension string sets

전압종류	애자련도체종류	도체종류	풍속 V [m/sec]							
			0	10	15	20	31.7	36.6	40	
154kV	단도체	1련	330	13.58	20.18	27.71	36.71	56.45	62.61	66.12
		410	15.29	21.15	27.87	36.03	54.73	60.86	64.43	
	2련	330	12.57	18.75	25.87	34.55	54.32	60.70	64.38	
		410	14.37	19.93	26.37	34.29	52.97	59.26	62.96	
	복도체	1련	330	14.00	20.63	28.16	37.15	56.77	62.87	66.34
		410	15.66	21.52	28.23	36.37	54.96	61.05	64.59	
	2련	330	13.50	19.92	27.26	36.11	55.77	61.98	65.53	
		410	15.21	20.93	27.51	35.54	54.14	60.31	63.91	
			최대값	15.66	21.52	28.23	37.15	56.77	62.87	66.34
	345kV	복도체	Rail	10.19	16.44	23.71	32.66	53.24	59.90	63.72
Card			13.10	18.61	25.03	32.98	51.97	58.42	62.21	
2련		Rail	9.76	15.76	22.79	31.52	52.02	58.78	62.70	
		Card	12.62	17.95	24.18	31.97	50.87	57.41	61.28	
410mm ²		1련	Rail	10.38	16.68	23.99	32.97	53.52	60.14	63.94
		Card	13.32	18.85	25.28	33.25	52.20	58.62	62.40	
2련		Rail	10.02	16.11	23.22	32.02	52.51	59.22	63.10	
		Card	12.91	18.30	24.58	32.41	51.31	57.80	61.63	
		최대값	13.32	18.85	25.28	33.25	53.52	60.14	63.94	
		적용	20	40	70	70	70			

(2) 평가 및 적용

표 4의 결과는 표준경간 300[m] 또는 350[m]에서 지지점고저차가 없는 상태를 기준으로 해석한 것으로서 경간길이가 커지거나 지지점고저차가 있는 경우 값이 더 커질 수 있다. 그러나 설계의 기준을 위한 것이므로 표준절연간격에 해당하는 무풍시의 횡진각은 20° 이하로 적용하면 충분하다고 판단된다.

최소절연간격은 개폐 써-지 발생시 어느 정도의 바람을 상정할 것인가 하는 문제로써 전력사별로 약간 다르게 적용하고 있으나 대개 풍속 15[m/s] 또는 20[m/s]를 적용하는 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 풍

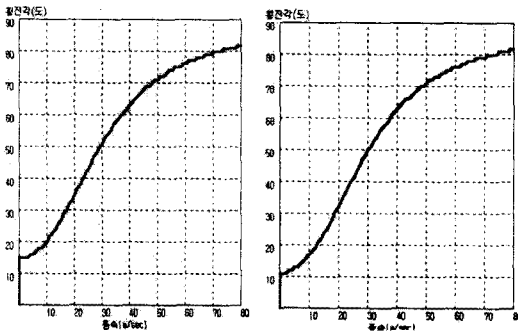
속 15[m/s]에 대해 횡진각 40° 이내로 유지하는 것으로 적용하고자 한다.

이상시절연간격은 지역별 최대풍속시 상용주파과전압에 의한 섬락을 방지하기 위한 최소거리로서 지역별 최대풍속에 대해서 70° 이하를 유지할 필요가 있다.

이상의 결과를 종합하여 현수애자련의 허용횡진각은 표 5와 같이 적용할 것을 제안한다.

표 5. 현수애자련의 허용횡진각
Table 5. maximum swing angle of suspension string sets

조건	평균풍속 (m/sec)	기준속도압 (kg/m ²)	전선온도 (°C)	허용횡진각 (도)	소요절연간격적용
1	0	0	10	20	표준절연간격
2	15	13.5	10	40	최소절연간격
3.1	31.7(3지역)	60.0	10	70	이상시절연간격
3.2	36.6(2지역)	80.0	10	70	이상시절연간격
3.3	40.0(1지역)	95.6	10	70	이상시절연간격



(a) 154kV, ACSF 410mm, 복도체 2련현수
(b) 345kV, ACSF 480mm(Rail), 4도체 2련현수

그림 1. 현수애자련의 횡진특성

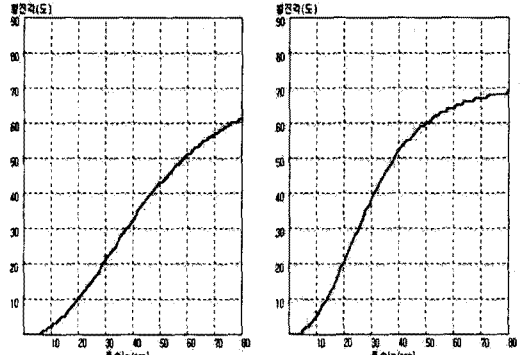
4.2 점퍼선의 허용횡진각

(1) 해석결과

점퍼선의 횡진특성에 대한 해석은 표 3을 기본으로 하고, 식 (2)의 N값은 2.0으로 적용하였다. 또한 카테너리각은 전원측 및 부하측 모두 10°로 가정하였으므로 카테너리각이 더 작은 경우에는 횡진각이 더 커질 수 있다. 따라서 카테너리각이 10° 이하, 즉 좌우카테너리각의 합이 20° 보다 작은 경우에는 별도의 검토를 필요로 한다.

표 6. 점퍼선의 횡진특성
Table 6. The result of swing analysis for jumper wire

전압종류	애자련종류	도체종류	풍속 V[m/sec]						
			10	20	30	31.7	36.6	40	
154kV	단도체	1련	330	1.81	7.11	15.24	16.81	21.45	24.70
		410	0.83	3.29	7.30	8.12	10.68	12.59	
	2련	330	1.35	5.33	11.62	12.86	16.64	19.37	
		410	1.00	3.94	8.70	9.66	12.64	14.85	
	복도체	2련	330	2.64	10.22	21.22	23.23	28.98	32.83
		410	2.01	7.85	16.72	18.41	23.39	26.84	
최대값			2.64	10.22	21.22	23.23	28.98	32.83	
적용				15		40	40	40	
345kV	단도체	2련	Rail	4.32	16.27	31.59	34.12	40.96	45.24
		Card	3.88	14.72	29.17	31.63	38.37	42.67	
	4도체	2련	Rail	5.67	20.87	38.59	41.28	48.15	52.12
		Card	5.15	19.15	36.27	38.96	45.98	50.13	
	최대값			5.67	20.87	38.59	41.28	48.15	52.12
	적용				20		50	50	50



(a) 154kV, ACSF 330mm, 복도체 2련내장
(b) 345kV, ACSF 480mm(Rail), 4도체 2련내장

그림 2. 점퍼선의 횡진특성 예

(2) 평가 및 적용

해석결과 154kV와 345kV 점퍼선의 횡진특성 차가 커서 통일된 기준을 적용하기가 곤란하므로 전압별로 기준을 적용하였다. 154kV의 경우에는 횡진각에 여유가 많은 편이므로 문제되지 않으나, 345kV 내장철탑용 점퍼선의 경우에는 횡진각이 매우 크게 나타나고 있으나 경제적인 철탑설계를 위해 허용횡진각의 여유를 거의 고려하지 않았다. 따라서 345kV 점퍼선에 대해서는 신중한 횡진각의 검토가 필요하다고 판단된다. 특히 345kV 4도체 선로에 Rail 전선을 사용하는 경우 점퍼선의 횡진각에 대한 주의가 필요하다.

이상의 결과를 통해 점퍼선의 허용횡진각은 표 7과 같이 적용할 것을 제안한다.

표 7. 점퍼선의 허용횡진각
Table 7. maximum swing angle of jumper wires

조건	평균풍속 (m/sec)	기준속도압 (kg/m ²)	전선온도 (°C)	허용횡진각(도)		소요절연간격적용
				154	345	
1	20	23.9	10	15	20	표준절연간격
2.1	31.7(3지역)	60.0	10	40	50	이상시절연간격
2.2	36.6(2지역)	80.0	10	40	50	이상시절연간격
2.3	40.0(1지역)	95.6	10	40	50	이상시절연간격

4. 결 론

이상의 검토결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- ① 현수애자련의 횡진은 145kV 및 345kV에 대해 표 5의 허용횡진각 이내가 되도록 설계합이 바람직하다.
- ② 점퍼선의 횡진은 표 7과 같이 154kV 및 345kV에 대해 별도로 정하는 것이 타당하며, 이 기준을 초과하는 개소에 대해서는 별도의 대책을 수립해야 한다.

[참고문헌]

- [1] "이상돌풍 대비 송전선로 고장방지", 한전 동해전력소 송전과, 1997.10
- [2] 일본전기학회, "架空送電線路の絶縁設計要綱", 전기학회기술보고 II부 제220호, 1986.5
- [3] 吉田 章, 磯部 務, "風圧によるジャンパ線の横振れ", 전기학회잡지, Vol.85-5, No.920, 1965.5
- [4] 星野 智彦, 大月 晃, "ジャンパ線補強装置について(第1-3報)", 藤倉電線技報, 第20.21.23号, 1961-1962
- [5] 松林 義数, 永富 和彦, "ジャンパ線の横振れに関する研究", 住友電氣, 第115号, 1978.8
- [6] 조성배, 손홍관, 이은용, "조립식 점퍼장치의 횡진동특성 해석에 관한 연구", 대한전기학회논문지, Vol.46, No.9, 1997.9
- [7] "설계기준-1111(가공송전용 철탑설계기준)", 한전, 송전편, 1997