

송전용 철탑 풍하중 설계기준에 관한 연구

변 강* 민병욱* 신태우* 위화복* 박재웅**

Reserch on Wind Fressure Criteria of the Transsmision Tower

Byung.Gang* Byeong-wook.Min* Tai-woo.Shin* Hwa-bok.Wi* Jai-Woong.Pak**
KEPCO* Hanbat Univ.**

Abstract - This paper focuses on the effects of wind pressure on transmission towers. It recommends the need for an application method to strengthen some existing towers, especially those in areas regularly affected by typhoons, and to be applied to new constructions. Some considerations taken into account were modifying existing towers exposed, which can cause significant damage to the power system and the effects of damage on third parties.

1. 서 론

제14호 태풍 "매미"로 인하여 2003년 9월12일 경남 부산지역에서 송전철탑 8기가 도괴되고 3기가 파손되었으며 송전철탑 피해로 인하여 경남 거제지역이 장시간 전력공급이 중단되었다. 이번 태풍은 1904년 우리나라에서 기상관측을 시작한 이래 최대순간풍속 극값을 경신하였으며 태풍"매미"는 제주도를 경유하여 경남 사천시로 상륙한 후 경남 합안을 거쳐 울진 해안 동해상으로 빠져나가므로써 경남과 부산지역에 막대한 전력설비의 피해를 가져왔다. 본 논문에서는 기상이변에 따른 태풍 및 강풍의 최대 순간풍속이 높아짐에 따라 가공송전용 철탑설계기준을 중심으로 태풍 다발지역의 철탑 설계방법 보안을 위한 방안에 대하여 고찰하였다.

2. 철탑에 적용하는 풍압하중

2.1 풍속기준의 변경내역

가공송전선로의 철탑설계기준은 1987년 6월에 개정하였으며 개정 전에는 전국에 걸쳐 일률적으로 34.6m/s의 풍속을 적용하였으나, 1986년 8월에 발생한 태풍"베라"에 의한 철탑 도괴와 1987년 4월 강풍에 의한 철탑도괴가 연속적으로 발생하여 이에 대한 대책으로 철탑설계기준을 전면적으로 개정하였다. 1987년 풍속기준 변경 전·후의 풍압하중을 비교하면 풍속 2지역에서 약 2배 정도의 풍압하중의 차이가 있다.

이번 제14호 태풍"매미"로 인하여 경남지역이 8기가 도괴되고 3기가 파손되면서 경남 거제지역이 장시간 정전 되었는데 태풍으로 인하여 피해가 발생한 철탑은 현재의 풍속기준으로 설계되지 않고 풍속기준 변경(1987년 6월)전에 설계된 철탑이다.

2.2 송전철탑의 풍하중 적용방법

철탑설계에 있어서 풍하중은 중요한 요소로 작용한다. 풍하중을 철탑설계에 적용하는 방법은 지상 10m에서의 기준풍속을 바탕으로 기준 풍속압을 구하고 기준 풍속압을 바탕으로 높이 변화에 따른 상공체중계수 등 여러 요소를 고려하여 높이별 설계풍속압을 산출한다. 이때 설계풍속압은 각 높이별로 설계속도압과 수평면적을 고려하여 지표면에서 발생하는 모멘트를 실제의 풍압이 작용하는 경우와 동일하게 동가풍압치를 산출하여 철탑전체에 균일한 풍압을 적용시키고 있다.

2.2.1 기준 풍속

기준풍속은 지상 10m의 10분간 평균풍속에 돌풍률을 고려한 최대 순간풍속을 적용하고 있다.철탑설계에 적용하는 풍압하중 산출을 위한 각 지역별 기준풍속과 기준속도압은 태풍의 내습빈도 및 풍속크기를 감안하여 전국을 4개 지역으로 구분하여 표1 및 그림1과 같이 제주도 및 남해안의 도서지역에 해당하는 I 지역, 서해안과 동해안 등 해안 인접지역인 II지역 및 내륙지역인 III지역으로 구분하고 있으며 울릉도 지역을 포함하여 4개 지역으로 구분하여 속도압을 적용하고 있다. 기준속도압을 철탑설계에 반영할 때는 극한 하중인 최대 순간풍속으로 산출된 하중을 강재의 허용응력($\sigma_y/1.5$)에 대응시키기 위하여 기준속도압을 1.5로 나누어서 적용하고 있다.

표 1. 각 지역별 기준 풍속압
Table 1. Regional standad wind pressure

지역구분	기준속도압 (kg/m ²)	최대풍속(m/s)		돌풍율	
		10분 평균	순간		
고온계	I 지역	117	40.0	54.0	1.35
	II 지역	100	36.6	50.0	1.37
	III 지역	76	31.7	43.7	1.38
	울릉도	150	46.4	62.7	1.35
저온계	다설지역	30	-	26.3	-
	기타지역	38	20.2	29.5	1.46



그림 1. 풍속지역의 지역구분도
figure 1. Grouping map by wind velocity

2.2.2 설계 풍속압 산정

가공송전용 철탑에 적용하는 풍압력은 기준풍속을 이용하여 식1~식3과 같이 산정한다.

$$P = C \cdot q \cdot A \dots\dots\dots (1)$$

$$q = q_0 \cdot a \cdot \beta \cdot K_1 \cdot K_2 \text{ (kgf/m}^2\text{)} \dots\dots\dots (2)$$

$$q_0 = 1/2 \rho V_{g10}^2 \dots\dots\dots (3)$$

여기서 P : 풍압력

C : 풍력계수

q : 설계용 속도압

A : 수평면적

- q₀ : 기준속도압(kgf/m²)
- α : 상공체증계수
- β : 구조규모에 의한 저감계수
- K₁ : 구조물의 종류에 의한 계수
- K₂ : 차폐계수
- ρ : 공기밀도(kg · S²/m⁴)
- V_{z10} : 지상 10m에서의 기준풍속(m/s)

2.3 풍압산정에 적용하는 계수

식1~식3과 같이 풍속압계산시 적용되는 계수는 공기 밀도, 상공체증계수, 구조규모에 의한 저감계수, 구조물의 종류에 의한 계수, 차폐계수 등이 있는데 각종 계수에 대한 설명은 다음과 같다.

2.3.1 공기밀도(ρ)

공기밀도 ρ는 다음과 같이 식4에 의하여 계산하며 고온계에서는 0.1195(kg · S²/m⁴)를 표준으로 하고 저온계에서는 0.131(kg · S²/m⁴)을 표준으로 하며 울릉도의 경우는 0.115(kg · S²/m⁴)를 표준으로 한다. 이때 공기 밀도를 결정하는 기온은 고온계에서는 10℃, 저온계에서는 -5℃ 기온을 적용하며 기압은 고온계는 10℃에서 715mmHg, 저온계는 -5℃에서 740mmHg를 표준으로 한다.

$$\rho = \frac{1.293 \times 273}{T + 273} \times \frac{H}{760} \times \frac{1}{9.8} \dots\dots\dots(4)$$

여기서 T:기온(℃), H:기압(mmHg)

2.3.2 상공체증계수(α)

일반적으로 풍속은 높이 증가와 함께 비례적으로 증가하므로 송전선 설계를 위한 풍속압도 지상고 증가와 함께 커져야 한다. 한편의 가공송전용 첩탑설계기준에 적용하는 풍속은 높이 10m를 기준으로 설정된 값으로서 각 높이별 설계풍속압을 산정하기 위해서는 높이에 해당하는 상공체증을 감안 하여야 하며 이를 위한 상공체증 계수는 식5와 같다.

$$\alpha = \frac{h}{h_0} \frac{1}{n} \dots\dots\dots(5)$$

여기서 h : 지상고(m)
h₀: 기준지상고(m)
n : 상공체증 정도를 나타내는 지수로서 n=4를 표준으로 한다.(높이 10m이하의 경우와 저온계 속도압 계산시는 α=1로 한다)

2.3.3 구조규모에 의한 저감계수(β)

구조규모에 의한 저감계수는 하중경간에 따라 전선의 수평면적을 저하시키는 계수이다. 즉, 바람은 공간적으로 변동하며 경간의 전체 가집선에 동시에 돌풍풍속이 작용하지 않으므로 이것을 고려하기 위한 것으로 전선에 작용하는 풍압력 계산시는 구조규모에 의한 저감계수(β)와 상공체증계수(α)를 동시에 고려하지 않는 것을 표준으로 한다. 그러나 첩탑간 경간의 길이가 짧고 지상고가 현저히 높게되는 특수지역 첩탑의 경우 저감계수(β)와 상공체증계수(α)를 동시에 고려하는 것이 지지물의 안정도를 증대시킬 수 있는 경우는 이를 고려할 수 있다. 구조물 규모에 의한 저감계수(β)는 다음과 같이 계산하며 다설지역 저온계 풍속압 계산시는 β=1로 한다.

$$\beta = 0.5 + \frac{40}{S} \dots\dots\dots(6)$$

여기서 β:저감계수로서 0.55 ≤ β ≤ 0.9
S:경간(m)

2.3.4 구조물의 종류에 의한 계수(K₁)

구조물의 종류에 의한 계수 K₁은 구조물의 규모, 해당 송전선로 사고시 제3자에 대한 영향 및 계통상의 중요도 등에 따라 결정되는 계수로서 전국에 일률적으로 K₁=1.15를 표준으로 한다.

2.3.5 차폐계수(K₂)

건물,수목 등에 의해 지지물 및 가집선에 가해지는 바람이 차폐되는 정도를 나타내는 계수로서 K₂=1.0을 기준으로 한다.

2.3.6 풍력계수(C)

풍력계수는 송전선로 지지물에 사용되는 대표적인 단면형상을 기준으로 적용되는 계수로서 송전선로에 적용할 경우 풍향에 의해 투영면적과 단면형상 등의 변화와 함께 풍압력이 변화하나 풍향에 따라 따로 따로 투영면적을 계산하는 것은 번거롭기 때문에 풍력계수는 대표적 수평면적을 사용하여 나타내는 것이 일반적이다. 한편 한편의 설계기준에서 적용하는 풍력계수는 산형강은 C_a:2.8, C_b:3.4, ℓ:50m, b:0.0120, 강관은 C_a:1.7, C_b:1.8, ℓ:60m, b:0.0017을 표준으로 하여 식7 및 식8과 같이 적용하고 있다.

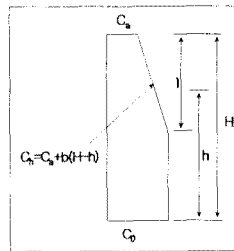


그림 2. 풍력계수 적용도
figure 2. Force coefficient

H-ℓ < h 일 때
C_n = C_a + b(H-h) ... (7)

H-ℓ ≥ h 일 때
C_n = C_o (8)

- C : 풍력계수
- ∅ : 총설폭
- C_n : 높이 h의 풍력계수
- C_a : 탑정(塔頂)의 풍력계수
- C_o : 지표면에서의 풍력계수
- b : 풍력계수 증가율
- h : 지표에서의 높이(m)
- H : 지표에서 탑정(塔頂)까지의 높이
- ℓ : 탑정에서부터 풍력계수가 증가하여 일정 (C_o)하게 되기까지의 높이(m)

2.4 송전첩탑의 풍압하중 비율

풍압이 첩탑설계에 미치는 영향을 파악하기 위하여 풍속지역별, 첩탑형별로 첩탑에 적용하는 설계하중에서 풍압하중이 차지하는 비중(410mm² 단도체 기준)을 산출한 결과 표2와 같다.

표 2. 하중성분별 주주재 응력비율
Table 2. Main post stress component ratio (단위:%)

첩탑형	각도 하중	상 시 불평형	전선 자중	첩탑 자중	풍압하중			
					탑체	전선	소계	
I 지역	A ₂	-	-	3.5	4.0	50.0	42.5	92.5
	B ₂	32.6	9.5	3.1	3.6	29.5	21.6	51.1
	C ₂	36.5	23.1	3.2	2.9	14.6	19.7	34.3
	D ₂	49.7	16.7	3.0	2.4	11.4	16.8	28.2
II 지역	A ₂	-	-	4.0	4.6	49.4	42.0	91.4
	B ₂	35.3	10.3	3.3	3.9	27.2	20.0	47.2
	C ₂	38.4	24.3	3.4	3.0	13.1	17.8	30.9
	D ₂	51.8	17.4	3.1	2.6	10.1	15.0	25.1
III 지역	A ₂	-	-	5.0	6.0	48.0	41.0	89.0
	B ₂	40.0	11.6	3.7	4.3	22.3	17.1	45.0
	C ₂	41.4	26.3	3.7	3.3	10.8	14.5	25.3
	D ₂	20.3	18.5	3.2	2.7	8.2	12.1	20.3

표2에서 보면 각도하중과 상시불평균 장력을 고려하지 않는 현수형에서는 풍압하중의 비중이 90% 정도로 차지하고 있으나 수평각도 하중과 상시불평균 장력을 적용하고 있는 B₂,C₂,D₂형에서는 풍압의 비중이 작게 미치고 있으며 각도하중이 가장 큰 D₂형의 경우 III지역에서 약20%로 다른 첩탑형에 비하여 풍압의 비중이 작아지고 있다. 또한 기준 속도압이 가장 큰 I지역이 II,III지역에 비하여 풍속의 비중이 크게 작용함을 알 수 있다.

2.5 풍속의 재현기간 산정

송전선로는 장기간에 걸쳐 높은 신뢰성을 가지고 운전하여야 하므로 충분한 하중을 상정하여 설계하여야 한다. 그러나 과대한 하중을 상정하면 건설비가 많이 소요되어 경제성이 없게 되므로 설계에 적용하는 적절한 풍속의 선정은 매우 중요하다. 우리나라는 기후 특성에 의해 매년 수회의 태풍이 내습하고 있으며 몇 십년에 1회 정도는 초특급 태풍이 내습하고 있으나 이러한 강풍은 어느 정도 크기로 내습될지는 정확히 예측할 수 없는 상태이다.

한전의 철탑 설계기준은 이러한 불확실성을 가진 풍속 산정시 초과확률분포를 이용하여 풍속치를 추정하였으며 추정정에 사용된 분포식은 식9와 같이 Gumbell 분포를 적용하고 있다.

$$P(V) = 1 - \exp\left[-\exp\left\{-\frac{\pi}{\sqrt{6}\sigma v} (V - \bar{V} + 0.45\sigma v)\right\}\right] \dots (9)$$

단, P(V): 풍속이 V를 초과할 확률(1/T, T: 재현기간)

\bar{V} : 연간 최대풍속의 평균치

σv : 연간 최대풍속의 표준편차

식9는 식10과 같이 변환할 수 있으므로 \bar{V} 와 σv 를 알면 임의의 재현기간에 해당하는 풍속을 계산할 수 있다.

$$V = \frac{\sqrt{6}\sigma v}{\pi} \left[-\ln\left\{-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right\}\right] + \bar{V} - 0.45\sigma v \dots (10)$$

한전의 설계기준은 50년 사고재현기간에 해당하는 풍속을 기본으로 지역별로 풍속을 설정하고 있어 $K_1=1.0$ 을 적용할 경우 50년 재현기간에 해당되지만 일률적으로 $K_1=1.15$ 를 적용토록 하고 있으므로 실제로는 100년 재현기간에 해당하는 풍속압을 적용하고 있다. 그러나 대만의 경우 보통선로는 100년, 중요선로에서는 200년 재현기간에 해당하는 풍속압을 기본적으로 사용하고 있고 미국 일본의 경우 대부분지역에서 50년 재현기간에 해당하는 풍속압을 기본적으로 사용하고 있으며 중요성이 인정되는 일부지역에 대해 K_1 을 1.15를 적용하여 100년 재현기간에 해당하는 풍속압을 적용하고 있다.

한편 식9와 식10에 의해 계산되는 재현기간 50년 풍속은 그 풍속이 초과되는 확률의 역수로 매년 평균 발생 확률이 0.02가 되는 풍속이다. 그러나 철탑설계기준에서 적용되는 재현기간 50년 풍속은 초과확률이 0.02보다 훨씬 작다고 할 수 있다. 이는 선로의 최대풍향각 상태의 최대풍속치를 가지고 돌풍률, 상공제충 등을 감안하여 풍속 기준을 정하고 있으므로 50년 풍압이 선로에 최대의 하중을 주는 풍향과 돌풍률 및 상공제충 등을 동시에 만족하는 조건으로 선로에 영향을 미칠 확률은 매우 작기 때문이다. 특히 철탑의 높이, 방향에 의한 풍압의 부동성, 가설선의 응답특성 등을 고려하고, 강풍 영역에서는 풍속이 약간 증가하면 발생확률은 급속히 감소하는 것을 감안하면 설계풍압으로 설계된 철탑에 그 이상 하중이 가해질 확률은 극히 적게 된다.

2.6 송전철탑의 신뢰도 향상방안

일반적으로 송전선로는 고장발생시 피해가 확산될 수 있으므로 고장시 정전에 의한 피해를 최소화 하기 위하여 선로를 환상망으로 구성하여 재난재해 등에 대비하고 있으나, Radial 선로로 운영하고 있는 경우가 있으며 4회선 철탑과 발전소 연계선로 등에서 일반 철탑과 동일한 신뢰도로서 재현기간 100년에 해당하는 풍속압을 적용하고 있어 재해 발생시 계통에 미치는 파급 등을 감안하여 중요선로와 일반선로의 철탑신뢰도를 차별화 하여 운영할 필요가 있다.

이에 대한 대책으로 4회선이상 지지물과 고장시 장시간 정전이 수반되는 Radial선로 및 발전소연계선로 등 중요선로와 장경간 및 계곡횡단개소 등 특수지역은 풍속 재현기간을 100년에서 765kV 송전철탑 수준인 200년으로 상향시켜 신뢰도를 높이도록 구조물에 의한 계수(K_1)를 1.3으로 적용하여 풍속기준을 강화하는 방안을

제시할 수 있다. 표3은 구조물 종류에 의한 계수를 1.15 및 1.3으로 적용시 각 지역별 풍속의 증가량을 나타내고 있다.

표 3. 구조물 종류에 의한 계수 개선효과
Table 3. Change effects of load factor

계수 (K1)	재현기간	최대 순간풍속		
		I 지역	II 지역	III 지역
1.0	50년	54m/s	50m/s	43.7m/s
1.15	100년	58.2m/s	53.8m/s	46.9m/s
1.3	200년	61.8m/s	57.2m/s	49.9m/s

2.6.1 기설철탑의 신뢰도 향상방안

위에서 제안한 주요지역 및 특수지역의 풍속기준 강화 대책으로 구조물 종류에 의한 계수(K_1)를 1.3으로 적용하여 철탑강도 상세 설계후 보강을 시행하여야 하며 선로 보강시는 우선적으로 I, II지역을 위주로 풍압에 영향을 많이 받는 현수철탑 부터 시행하여야 한다. 제안된 풍속기준 강화 방안($K_1=1.3$)을 적용하여 분석한 결과 풍속 II지역의 경우 현수형에서는 주주재 4개소와 복재 8개소의 보강이 필요한 것으로 나타났으며, 내장형의 경우 주주재는 보강이 없으며 복재는 4개소에서 보강이 필요한 것으로 나타났다. 그러나 휴전 등을 감안하여 기설선로의 보강이 곤란한 경우는 후회선로를 추가건설하여 계통을 보강하는 방안도 수립할 수 있다. 표4는 I, II 지역의 중요선로에 대한 기설 송전선로 현황이다.

표 4. I, II지역내 중요선로 현황
Table 4. Status of important T/L in I, II region

구 분	선로수	총철탑수
발전소연계선로	30	1,641
Radial 선로	20	522
4회선 철탑	33	344
합 계	83	2,507

3. 결 론

송전선로 철탑 설계에 적용하는 풍속기준을 중요선로 및 특수지역의 선로는 풍속재현기간을 100년에서 200년으로 향상 시킴으로써 신뢰도를 향상시키는 방안을 제안하였으나, 현재 한전에서 적용하고 있는 풍속기준은 1987년 개정 당시는 20년 이상 풍속기록치 자료가 15개소 밖에 없는 상태에서 개정된 기준으로서 현재 15년이 지났으며 측정기기의 발달에 의한 자료의 정확성과 풍부한 기록자료 등을 바탕으로 풍하중설계에 관한연구를 추진하여 송전선로에 적용하는 풍속지역 및 기준속도 압을 재 정비하고 1987년 풍속기준 개정 전의 설계기준으로 설계된 기설철탑의 보강을 조속히 완료하므로써 경제적이고 신뢰도가 높은 송전선로를 운영할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력, "가공송전선용 철탑설계기준-1111" pp:5~16, 2003.2월
- [2] 한국전력, 송전철탑 설계풍속에 관한 연구 pp:33-44 1986.1월
- [3] 한국전력 송전설계기준 제·개정 및 보완연구 최종보고서 pp:155-188 2001.5월
- [4] 日本電氣學會 "送電用支持物設計標準" pp:25~64 1979.
- [5] ASCE, Guide for Electrical Transmission Line Structural Loading pp:1~32, 1991.
- [6] CEI 826, Technical report 'Loading and Strength of Overhead Transmission Lines pp:17~45, 67~135, 1991.4월