

DOI:10. 3969/j. issn. 1674 - 1951. 2019. 01. 001

220 kV 新型双回路倒“Y”串输电塔电气及结构特性研究

Research on electrical and structural characteristics of a new-type 220 kV inverted “Y” string transmission tower with double circuit lines

潘峰¹,姜文东²,宋刚¹,蔡勇²
PAN Feng¹,JIANG Wendong²,SONG Gang¹,CAI Yong²

(1. 中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司,杭州 310012; 2. 国网浙江省电力公司,杭州 310007)
(1. China Energy Engineering Group Zhejiang Electric Power Design Institute Company Limited, Hangzhou 310012, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China)

摘 要:山区输电线路杆塔排位时,垂直档距/水平档距(K_v)值是杆塔选择的重要限制因素之一。山区线路设计时,经常出现水平档距和垂直档距均不大, K_v 值很小的情况,只能升高塔高、采用 K_v 值更小的塔型或者采取耐张塔开断等措施,这几种方式均会导致铁塔工程量增加,为解决此问题,设计了一种新型的倒“Y”串铁塔,用于 K_v 较小的地区。在大风、覆冰、断线等工况下对绝缘子串受力进行了分析,并对绝缘子金具串提出了合理的设计方案;建立了有限元模型,获得了自振特性并与常规塔做了对比;基于时域法对风振系数的分布特点进行了研究,提出了倒“Y”串塔塔身和横担各部位的风振系数建议取值;最后对倒“Y”串塔的经济性进行了对比分析。通过研究,揭示了倒“Y”串塔电气和结构的特性,结果可作为输电铁塔设计的参考。

关键词:输电铁塔; K_v 值;双回路;倒“Y”串;绝缘子串受力;风振系数;经济性

中图分类号:TU 311 **文献标志码:**A **文章编号:**1674 - 1951(2019)01 - 0001 - 08

Abstract:To determine the pole and tower position for transmission line in mountainous areas, weight span/wind span (K_v) is one of the important limiting factors of pole and tower. While designing transmission line in mountainous areas, there are often cases where the weight span and wind span are not large enough, and the K_v value is small, which can be solved raising tower height, adopting a tower with a smaller K_v value, or adopting a tension support as breaking measure. The three methods above will increase the engineering quantity, and a new-type inverted “Y” string transmission tower is introduced to solve this problem. It can be used in the areas with small K_v . In the case of strong wind, ice coating, broken wire and other working conditions, the stress of the insulator is analyzed, and reasonable design of fitting strings is proposed. The finite element model is established, and the natural vibration coefficients are obtained and compared with that of conventional towers. Based on the time domain method, the distribution characteristics of wind vibration coefficients are studied, and the recommended values of the wind vibration coefficients for tower bodies and cross arms of inverted “Y” tower are put forward. Finally, the comparative analysis of the economic performance of the inverted “Y” string tower is carried out. Through the research, the electrical and structural characteristics of the inverted “Y” towers are revealed, and the results can be used as a reference for the design of transmission towers.

Keywords:transmission tower; K_v value; double circuit line; inverted “Y” string; stress of insulator strings; wind vibration coefficient; economy

0 引言

国内外同塔双回路杆塔一般采用 3 层导线横担垂直排列的伞形塔或鼓形塔,对于覆冰地区线路,考

虑相邻导地线间的水平位移要求,以及“1”串布置时大风间隙对导线横担长度的限制,推荐采用 3 层横担垂直排列的鼓形塔。国家电网公司 220 kV 输电线路通用设计中,双回路采用鼓形塔。220 kV 输电线路工程中,铁塔造价占输电线路总投资的 35% 以上,降低铁塔工程量将有效降低工程造价。铁塔工程量与塔头尺寸息息相关,减小塔头尺寸主要从减

小绝缘子串摇摆角,限制悬垂串风偏角度等方面考虑。以 220 kV 典型直线塔为例,大风工况下悬垂串最大风偏角减小 10°,可减小横担长度 0.4 m 左右。

采用“V”串可消除“I”串风偏问题,但“V”串夹角也受风偏角控制,按照 GB 50545—2010《110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范》^[1]的规定,输电线路悬垂“V”串两肢间夹角的一半可比最大风偏角小 5°~10°。如果“V”串夹角太小,容易造成“V”串背风肢受压,导致球碗处脱销、脱落等,严重时掉串。因此,一般采用“V”串塔型的横担较“I”串更长,单基塔质量较大,且“V”串绝缘子数量比“I”串多 1 倍,增加了本体投资。对于走廊宽度不受限制的山区,采用“I”串经济性较优。

“I”串风偏角与风速、导线荷载、 K_v (K_v = 垂直档距 L_v /水平档距 L_h) 值、悬垂串质量等多因素有关,在这些因素都无法改变的情况下,考虑采用外力来限制“I”串风偏摆动,220 kV 输电线路采用的防风偏固定式跳线串就是利用金具的固定作用来限制跳线串摆动。导线悬垂串无法采用防风偏固定式,主要是因为导线的水平荷载很大,如采用固定式,容易造成绝缘子串弯曲、折断。

本文重点将对倒“Y”串铁塔的塔型规划、绝缘子串受力、金具设计、结构受力、工程造价等方面进行分析,为该塔在输电线路工程中的应用提供设计依据。

1 山区线路 K_v 值选择

在气象条件、导线型号等确定的情况下,直线塔悬垂串风偏摇摆角主要与 K_v 值有关; K_v 值越大风偏角越小, K_v 值越小风偏角越大。在塔型规划时会根据统计数据或工程经验规定各种直线塔的最小 K_v 值,实际使用时只要该塔的 K_v 值大于设计最小 K_v 值,即可认为满足摇摆角要求,各种工况下不会因悬垂串摇摆而导致带电导线与铁塔距离不足,进而发生闪络。

山区输电线路杆塔排位时, K_v 值是杆塔选择的重要限制因素之一。山区线路中经常出现导线对地距离满足要求,水平档距、垂直档距均不大, K_v 值很小的情况,此时设计人员只能增加塔高、采用设计 K_v 值更小的塔型或采取耐张塔开断措施,均会导致铁塔工程量增加。图 1 所示的典型山地断面 1 中, #50 塔由于受 K_v 值控制,开断为耐张塔,而实际使用条件在 I 型直线塔范围内,导致工程造价大大提高;图 2 所示的典型山地断面 2 中, #95 塔使用条件在 I 型直线塔范围内,受 K_v 值限制,选择设计 K_v 值更小的 III 型直线塔,且要增加塔高,导致塔重增大,

导线对地距离产生不必要的增加。

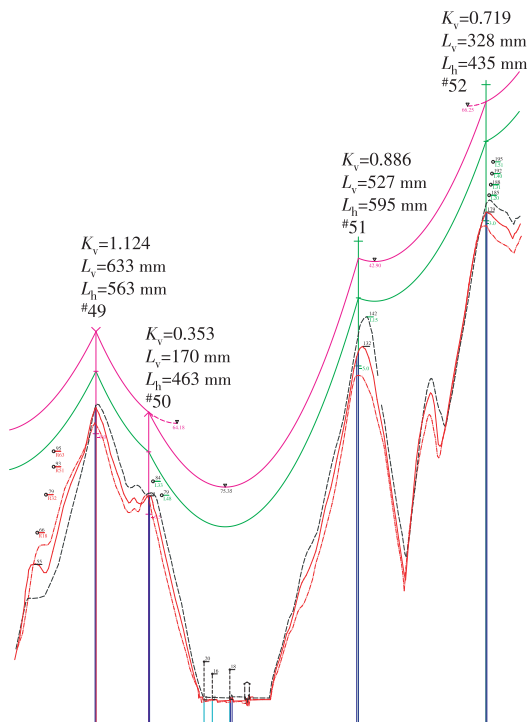


图 1 山地线路典型断面 1

Fig. 1 Typical section of mountainous transmission line 1

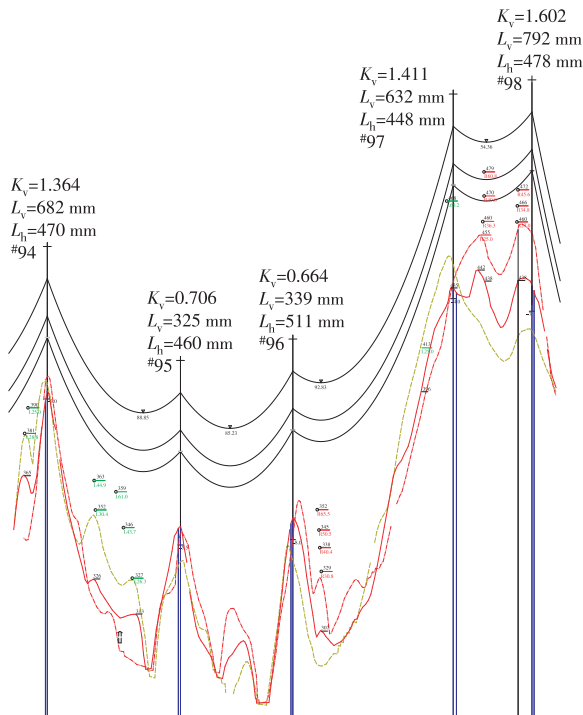


图 2 山地线路典型断面 2

Fig. 2 Typical section of mountainous transmission line 2

如能采取一种措施限制悬垂串摇摆角,将大大压缩塔头尺寸;同时,在山区线路塔型选择中不受 K_v 值控制,将大大降低工程造价。

2 倒“Y”串塔设计

220 kV 双回输电线路采用 3 层横担布置,可考

虑在横担上安装辅助绝缘子,限制“Ⅰ”串风偏摆动,相当于每相布置了一个倒“Y”串,最下层布置一个辅助横担,如图 3 所示。

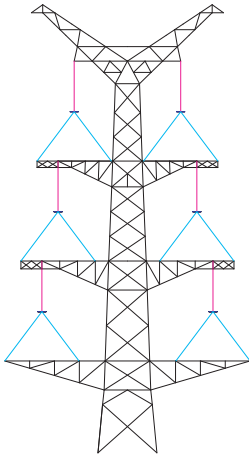


图 3 倒“Y”串布置示意

Fig. 3 Schematic layout of inverted “Y” string

采用此布置方式后,可基本限制“Ⅰ”串风偏摇摆,压缩横担长度。常规塔型横担长度受大风工况下工频电压间隙限制,采用倒“Y”串布置后,塔头尺寸由外过电压和带电作业间隙值控制。

图 3 中,上相横担长度由间隙和线间距离两个因素控制,按间隙控制布置时可以使用档距在 800 m 左右,如果档距超过该值,需增大线间距离;中、下相导线考虑了水平偏移,线间距离更大,整个塔型采用了伞形布置方式。

由于限制了“Ⅰ”串风偏摇摆,该塔不受实际 K_v 值限制,只要导线对地距离满足规程要求,铁塔荷载和张力满足设计要求,绝缘子串和金具不超使用条件即可使用。因此,该塔型主要应用于 K_v 值较小(0.1 ~ 0.6)的山区,可以节约工程量。在无风静止、无纵向张力差情况下,两支辅助固定绝缘子串处于不受力的“松弛”状态;当出现大风或有纵向张力差时,允许“Ⅰ”串绝缘子串和辅助固定绝缘子串有小幅度摆动。在两支辅助固定绝缘子串上,通过金具设置,能有一定的可调节长度,随受力方向在一定范围内摆动,可改善绝缘子串受力。下面将具体分析不同工况下各绝缘子串的受力情况。

表 1 大风工况下各绝缘子串受力

Tab. 1 Stress of insulator strings under strong wind condition							kN
受力	$L_h = 380\text{ m}, L_v = 550\text{ m}$			$L_h = 600\text{ m}, L_v = 1\,000\text{ m}$			
	$\alpha = 80^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	合成绝缘子强度	$\alpha = 80^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	合成绝缘子强度	
F_1	31.3	36.3	120	54.2	62.2	210	
F_2	14.6	18.7	70	23.0	29.6	120	
F_3	14.6	18.7	70	23.0	29.6	120	

2.1 绝缘子串受力分析

大风工况下,“Ⅰ”串和其中一支辅助固定绝缘子串受力,另一支辅助固定绝缘子串不受力。首先计算绝缘子串长度不可调节,“Ⅰ”串零风偏情况下的绝缘子串受力,基本计算条件如下。

- (1)导线采用 2 × JLHA3 - 675 中强度铝合金绞线,双分裂水平布置,分裂间距为 500 mm。
- (2)设计气象条件为:基本风速 25 m/s,覆冰 10 mm。
- (3)采用合成绝缘子,结构高度为 2 350 mm,可通过金具调节长度。受导线荷载控制,常规塔型“Ⅰ”串合成绝缘子采用单联 120 kN 合成绝缘子。
- (4)每支绝缘子金具串质量按 50 kg 考虑。

3 支绝缘子受力分别为 F_1, F_2, F_3 , 两支辅助固定绝缘子夹角 α 为 60° 或 80° ,如图 4 所示。在大风工况下,各绝缘子串的受力见表 1。

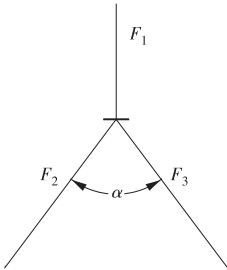


图 4 倒“Y”串受力示意

Fig. 4 Schematic of stress characteristic for inverted “Y” string

从表 1 可知,随着 α 的减小和 L_h, L_v 的增大,绝缘子串受力增大,当 $L_h = 380\text{ m}, L_v = 550\text{ m}, \alpha = 80^\circ$ 时,“Ⅰ”串绝缘子受力为 31.3 kN,常规塔型使用时受力为 22.2 kN,受力增大 41%,可使用 120 kN 合成绝缘子;当 $L_h = 600\text{ m}, L_v = 1\,000\text{ m}, \alpha = 60^\circ$ 时,“Ⅰ”串绝缘子受力为 62.20 kN,常规塔型使用时受力为 39.44 kN,受力增大 58%,需使用 210 kN 绝缘子。

大风工况下,“Ⅰ”串悬垂串受力增大,可增大绝缘子串强度;辅助固定绝缘子串受力随着夹角 α 而变化,夹角越大,受力越小,选用常规绝缘子串即可满足强度要求。

假设辅助固定绝缘子串可伸缩范围 $\Delta d = 200\text{ mm}$ (通过金具设置),当“Ⅰ”串摆动一定角度后,其

中一支辅助固定绝缘子串伸长达 200 mm,限制了“Ⅰ”串继续摆动,另一支辅助固定绝缘子串长度缩短至 200 mm 以下,处于不受力状态。计算此情况下各绝缘子串受力,计算结果见表 2。

表 2 大风工况下各绝缘子串受力(可调节)

Tab.2 Stress of insulator strings under strong wind condition(adjustable)			kN
$L_h = 600\text{ m}, L_v = 1\,000\text{ m}$			
受力	$\alpha = 80^\circ$	合成绝缘子强度	
F_1	47.9	160	
F_2	15.5	70	
F_3	15.5	70	

对比表 1 和表 2 可知,由于辅助固定绝缘子的可伸缩性,使得绝缘子串受力明显减小, F_1 减小 11.6%, F_2 和 F_3 减小 32.6%。

随着可调节范围增大,绝缘子串受力进一步减小,但调节范围增大将导致“Ⅰ”串摇摆范围增加,间隙增大,横担增长。经计算,“Ⅰ”串大风工况摆动 15°以内,受外过电压间隙控制,整体间隙圆大小不发生变化。考虑到辅助固定绝缘子串可调节范围太大,较难实现,推荐调节范围在 200 ~ 300 mm,大风工况下“Ⅰ”串最大可摆 5°左右,可实现绝缘子串受力减小,塔窗尺寸不变。

覆冰工况下导线承受覆冰垂直荷载,同时也有覆冰风荷载。取导线覆冰 10 mm, $\Delta d = 200\text{ mm}$, $\alpha = 80^\circ$,各绝缘子串受力见表 3。

从表 2、表 3 可见,当覆冰垂直荷载较大时,辅助固定绝缘子串处于不受力的“松弛”状态,“Ⅰ”串承受全部荷载。

导线架设完成后,悬垂“Ⅰ”串处于铅垂状态,当气温、荷载等条件变化时,悬垂串两侧出现纵向不平

衡张力,“Ⅰ”串偏移直至两侧受力平衡。采用倒“Y”串设置时由于 3 支绝缘子串基本将悬垂线夹固定,如果不发生任何偏移,出现纵向张力时,绝缘子串张力将无穷大,因此实际使用时也需在两支辅助固定绝缘子串上设置可伸长调节范围。此时,各绝缘子串受力如图 5 所示。

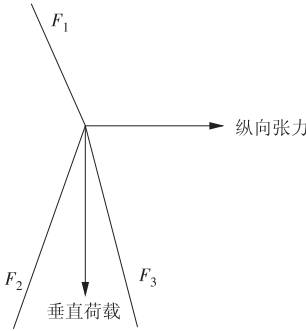


图 5 倒“Y”串受力示意(存在纵向张力差)

Fig.5 Schematic of stress characteristic for inverted “Y” string (longitudinal tension difference)

计算时垂直荷载按覆冰 10 mm 考虑,无风,导线最大使用张力为 61.446 kN,不平衡张力取相导线最大使用张力的 10%, $\Delta d = 100\text{ mm}$ 或 200 mm ,由此得到各绝缘子串的受力,见表 4。

从表 4 中可知:当承受纵向不平衡张力时,“Ⅰ”串受力较大,辅助固定绝缘子串受力不大;当同时承受垂直荷载时,辅助固定绝缘子可能失去作用,处于不受力的“松弛”状态,能调节长度越大,垂直荷载越大,越容易出现松弛状态,此时全部张力和荷载全部由“Ⅰ”串承担。

如果考虑断线工况,断线张力按规程取最大使用张力的 30%,垂直荷载按 $L_v = 300\text{ m}$ 的覆冰工况计算,辅助固定绝缘子最大可伸缩长度 $\Delta d = 200\text{ mm}$,各绝缘子串受力见表 5。

表 3 覆冰工况下各绝缘子串受力

Tab.3 Stress of insulator strings under ice coating condition					kN
受力	$L_h = 380\text{ m}, L_v = 550\text{ m}$			$L_h = 600\text{ m}, L_v = 1\,000\text{ m}$	
	$\alpha = 80^\circ$	合成绝缘子强度		$\alpha = 80^\circ$	合成绝缘子强度
F_1	30.40	120		60.30	210
F_2	0.18	70		0.00	120
F_3	0.18	70		0.00	120

表 4 存在纵向张力差时各绝缘子串受力

Tab.4 Stress of insulator strings under longitudinal tension difference								kN
受力	$\Delta d = 200\text{ mm}$							
	$L_v = 200\text{ m}$	合成绝缘子强度	$L_v = 400\text{ m}$	合成绝缘子强度	$L_v = 600\text{ m}$	合成绝缘子强度	$L_v = 800\text{ m}$	合成绝缘子强度
F_1	28.24	70	34.72	120	41.20	160	47.67	160
F_2	9.87	70	5.96	70	2.05	70	0.00	—
F_3	9.87	70	5.96	70	2.05	70	0.00	—

表 5 断线工况下各绝缘子串受力

Tab.5 Stress of insulator strings under break condition kN

受力	$L_v = 300\text{ m}, \Delta d = 200\text{ mm}$	
	绝缘子金具串受力	合成绝缘子强度
F_1	66	120
F_2	35	120
F_3	35	120

可见,断线工况下,当覆冰垂直档距 L_v 小于300 m时,采用120 kN合成绝缘子可满足强度要求。

2.2 绝缘子金具串设计

采用倒“Y”串布置时,给辅助固定绝缘子串提供200 mm左右的可伸缩长度,对绝缘子串受力有较大好处,因此金具串组装时在兼顾转动灵活、受力均匀的情况下还需设置成长度可调。3支绝缘子串连接处的联板也需单独设计。为保证3支绝缘子串连接,同时悬垂线夹风偏时不与联板相碰,单独设计的联板如图6所示。

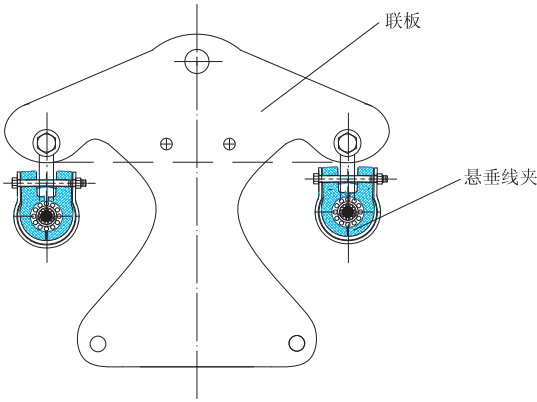


图 6 倒“Y”串金具联板

Fig.6 Fitting plate for inverted “Y” string

辅助固定绝缘子串在正常工况下不受力,受力后最长能伸出200 mm,受力消失后绝缘子串又能恢复原长。本文考虑了两种方案,如图7、图8所示,设计了如图9所示的新型金具串。

3 倒“Y”串塔结构特性分析

设计的倒“Y”串塔 $L_h = 380\text{ m}$, $L_v = 550\text{ m}$,倒“Y”串塔和常规塔的尺寸和间隙圆如图10所示。

利用ANSYS对铁塔进行建模,钢材的弹性模量 $E = 2.06 \times 10^{11}\text{ N/m}^2$,密度 $\rho = 7\,850\text{ kg/m}^3$,泊松比 $\mu = 0.3$ 。选用分块Lanczos法,并分别采用梁系模型和杆系模型计算输电塔的模态和频率,倒“Y”串塔的前6阶模态如图11所示,前6阶频率计算结果见表6。从表中数据可知:倒“Y”串塔的前6阶频率采用杆系模型与梁系模型的计算值基本一致,一般采用杆系模型可以满足工程要求;第1、第2阶频率 $> 1.5\text{ Hz}$,说明塔整体刚度较好;由于输电塔受力分析主要研究输电塔水平方向的振动,因此重点考虑塔

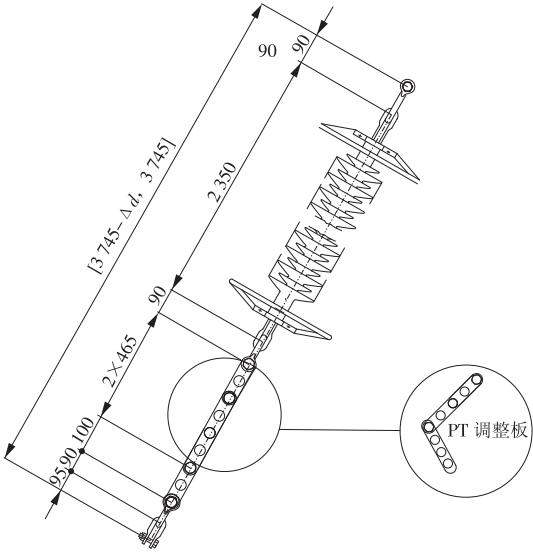


图 7 辅助固定绝缘子串(带 PT 调整板)

Fig.7 Schematic of auxiliary fixed insulator strings(with PT adjustment plate)

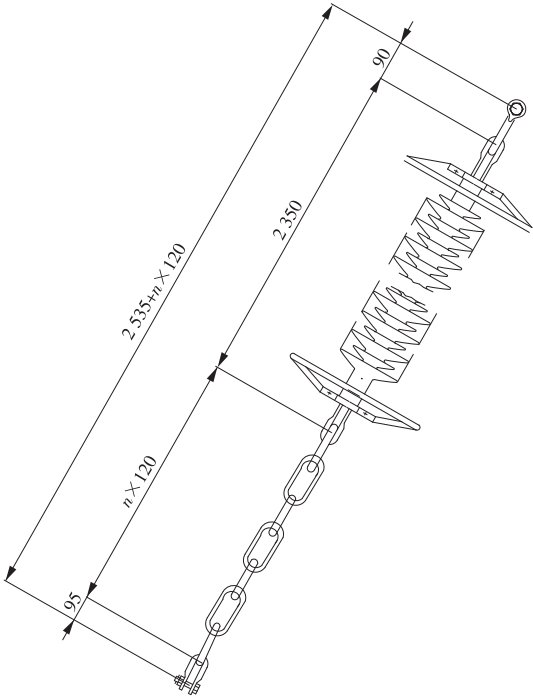


图 8 辅助固定绝缘子串(带延长环)

Fig.8 Schematic of auxiliary fixed insulator strings (with extension ring)

的前两阶弯曲振型。

根据我国规范,风振系数 β 的定义为:一定时间内风对结构的总效应与平均风产生的效应之比。 β 可表示为以下形式

$$\beta = \frac{P_e(z)}{P(z)} = \frac{\bar{P}(z) + P_d(z)}{P(z)} = 1 + \frac{P_d(z)}{P(z)}, \quad (1)$$

式中: $P_e(z)$ 为等效静风荷载; $\bar{P}(z)$ 为静力风荷载; $P_d(z)$ 为动力风荷载。

具体到输电塔结构,各高度处的风振系数 $\beta_L(z)$ 的定义为

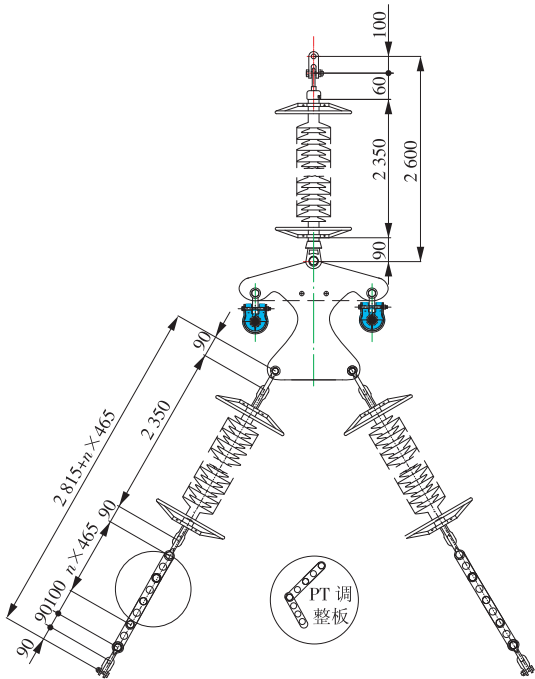


图 9 倒“Y”型绝缘子金具串

Fig. 9 Fitting string for inverted “Y” insulator

$$\beta_L(z) = 1 + g \frac{m(z)(2\pi n_1)^2 \sigma_{y1}(z)}{\mu_s(z)\mu_z(z)p_0 A(z)}, \quad (2)$$

式中： g 为峰值因子，本文取2.2； $m(z)$ 为 z 高度处的质量； $\sigma_{y1}(z)$ 为 z 高度处的位移均方根； $\mu_s(z)$ 为 z 高度处的体型系数； $\mu_z(z)$ 为 z 高度处的风压高度变化系数， p_0 为基本风压； $p_0 = v_{10}^2/1600$ ； v_{10} 为10 m高10 min 平均风速； $A(z)$ 为 z 高度的迎风面积。

按照 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[2]的定义，结构在 z 高度的风振系数为

$$\beta_z = 1 + \frac{\xi v \varphi_z}{\mu_z}, \quad (3)$$

式中： ξ 为脉动增大系数； v 为脉动影响系数； φ_z 为振型系数； μ_z 为风压高度变化系数。

按照 GB 50135—2006《高耸结构设计规范》^[3]中的规定

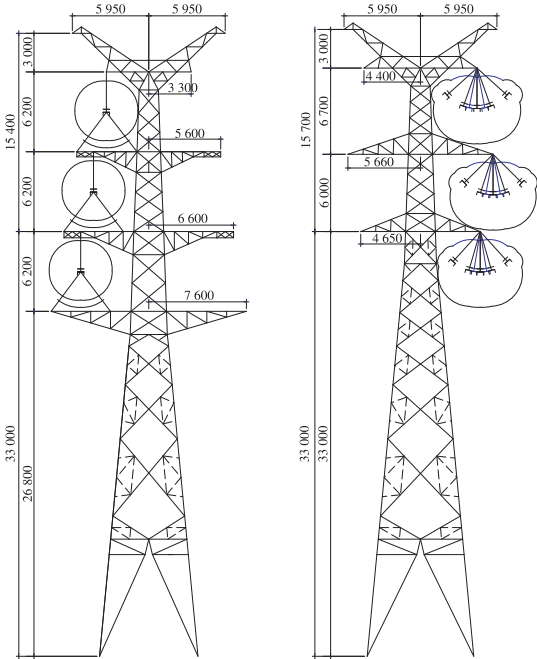
$$\beta_z = 1 + \xi \varepsilon_1 \varepsilon_2, \quad (4)$$

表 6 倒“Y”串塔前 6 阶频率

Tab. 6 The first six frequencies of inverted “Y” string towers

模态	杆系模型		梁系模型		备注
	频率/Hz	周期/s	频率/Hz	周期/s	
1	1.877	0.533	1.896	0.527	x 向 1 阶弯
2	1.904	0.525	1.910	0.524	y 向 1 阶弯
3	5.358	0.187	5.439	0.184	1 阶扭转
4	6.040	0.166	6.123	0.163	x 向 2 阶弯
5	6.374	0.157	6.417	0.156	y 向 2 阶弯
6	10.774	0.093	10.863	0.092	2 阶扭转

注： x 向为垂直线路方向， y 向为顺线路方向。



a 倒“Y”串塔
a Inverted “Y” string tower

b 常规塔
b Regular tower

图 10 倒“Y”串塔和常规塔单线图

Fig. 10 Schematic of inverted “Y” string towers and conventional towers

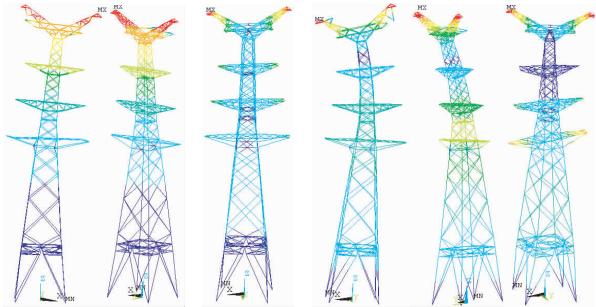


图 11 倒“Y”串塔前 6 阶模态

Fig. 11 The first six-order modes of inverted “Y” string towers

式中： ε_1 为考虑风压脉动和风压高度变化等的修正系数； ε_2 为考虑振型、结构外形的影响系数。

结合文献[4-7]的方法，表 7 为塔身主要节点的风振系数，表 8 为地线架及横担主要节点的风振

系数。从表 7、表 8 可知:倒“Y”串塔的塔身风振系数与常规塔分布一致,具体表现为下小上大;地线支架及横担的风振系数的推荐取值 2.50 偏大,建议地线支架及上中下横担风振系数取值为 2.40、2.30、2.20、2.00。

表 7 塔身部位的风振系数取值对比

Tab.7 Wind vibration coefficient of tower bodies				
高度/m	时域法取值	荷载规范值	高耸规范值	设计建议值
43.50	2.11	1.54	1.66	2.00
38.90	2.00	1.52	1.80	1.85
37.50	1.89	1.51	1.81	1.80
32.90	1.69	1.44	1.82	1.80
31.50	1.60	1.42	1.80	1.80
30.00	1.60	1.39	1.78	1.75
24.10	1.42	1.38	1.63	1.70
21.10	1.38	1.34	1.54	1.60
16.90	1.26	1.23	1.40	1.50
10.90	1.14	1.08	1.21	1.40
9.10	1.11	1.04	1.16	1.30
7.90	1.09	1.01	1.13	1.20

表 8 地线架及横担风振系数

Tab.8 Wind vibration coefficient of ground frame and cross-arm			
位置	高度/m	公式计算值	设计建议值
地线架及上横担	46.3	2.43	2.40
中横担	39.2	2.26	2.30
下横担	33.0	2.15	2.20
下横担托架	26.8	1.96	2.00

4 倒“Y”串塔技术经济分析

两种塔型的塔质量对比见表 9。由表 9 可见,倒“Y”串塔比常规塔质量大 10% ~ 15%,平均大 13%。

倒“Y”串塔主要用在 K_v 值较小的地区,如图 12 中的断面, #4 塔在满足最小对地距离的情况下,呼高需 27 m,此时 $L_h = 350$ mm, $L_v = 117$ mm, $K_v = 0.334$,该塔型选择可以有几种方案,在满足各种塔

表 9 倒“Y”串塔与常规塔质量对比
Tab.9 Weight comparison of inverted “Y” string towers and conventional towers

呼高/m	常规塔质量/kg	倒“Y”串塔质量/kg	比值
18	6 320	7 269	1.15
21	6 718	7 716	1.15
24	7 369	8 249	1.12
27	7 746	8 726	1.13
30	8 084	8 974	1.11
33	8 868	9 757	1.10

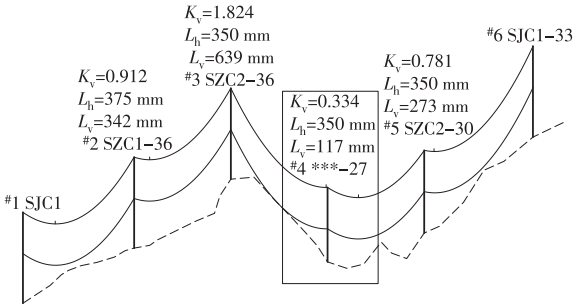


图 12 山区输电线路塔型选择示意
Fig.12 Schematic of tower type selection for transmission lines in mountainous areas

型最小规划 K_v 值情况下的塔高、塔质量等信息见表 10。

从表 10 可知,由于 #4 塔 K_v 值较小,采用常规塔型时,如果要满足 K_v 值要求,需要塔高或者采用耐张塔,此时使用倒“Y”串塔具有优势,最少比采用 46 m 呼高的 I 型直线塔节省 3.1 万元,最多比采用 I 型耐张塔节约 19.1 万元。

如果 #4 塔在满足对地距离情况下 K_v 值更小,常规塔型还需要继续升高才能满足要求,甚至最高设计塔高也不满足要求,此时设计人员一般只能采取耐张开断措施,应用倒“Y”串塔的经济优势将会更加明显。表 11 为常规塔型与倒“Y”串塔型综合投资基本相当时的呼高对比。

倒“Y”串塔由于使用时不受 K_v 值控制 (K_v 需大于 0),可选择满足导线对地距离要求的最小呼

表 10 #4 塔方案对比
Tab.10 Scheme comparison for No.4 tower

方案	K_v	塔型	塔质量/kg	混凝土量/m ³	绝缘子串	单基费用/万元
1	0.600	Ⅲ型直线塔(37 m)	17 978	4.77	120 kN 合成绝缘子 6 支	4.0
2	0.700	Ⅱ型直线塔(41 m)	17 457	4.37	120 kN 合成绝缘子 6 支	3.3
3	0.800	I 型直线塔(46 m)	17 419	4.15	120 kN 合成绝缘子 6 支	3.1
4	0.334	I 型转角塔(24 m)	25 893	6.6	210 kN 双联盘式绝缘子耐张串 12 串	19.1
5	0.334	倒“Y”串塔(27 m)	14 223	4.07	120 kN 合成绝缘子 18 支	0

注:合成绝缘子按 500 元/支计,盘式绝缘子按 160 元/片计,塔材按 11 000 元/t 计。

高,而选择常规塔型也必须大于此呼高,否则对地距离将不足。

表 11 倒“Y”串塔与其他塔型投资相当时的呼高对比
Tab. 11 Contrast of nominal height between inverted “Y” string towers and other type of towers

塔型	呼高/m	塔型	呼高/m	塔型	呼高/m
倒“Y”串塔	27	倒“Y”串塔	30	倒“Y”串塔	33
I 型直线塔	34	I 型直线塔	36	I 型直线塔	37
II 型直线塔	31	II 型直线塔	32	II 型直线塔	35
III 型直线塔	24	III 型直线塔	26	III 型直线塔	30
I 型转角塔	18	I 型转角塔	18	I 型转角塔	18

从上表总结可知,如果山区输电线路铁塔选型时因 K_v 值选择 III 型直线塔或者开耐张,或选择比倒“Y”串塔呼高大 3 m 的 II 型直线塔、呼高大 6 m 的 I 型直线塔,经济性均不如倒“Y”串塔。

若某一基塔采用倒“Y”串塔最小呼高为 30 m, K_v 值为 0.4,如果采用 46 m 的 I 型直线塔、39 m 的 II 型直线塔、35 m 的 III 型直线塔或 27 m 的耐张塔可以满足使用要求,则采用倒“Y”串塔具有优势。

5 结论

本文重点对倒“Y”串铁塔的塔型规划、绝缘子串受力、金具设计、结构受力、工程造价等方面进行对比分析,可以得出以下结论。

(1)倒“Y”串塔基本限制了“ I ”串风偏摇摆,可缩小横担长度,设计排杆时不受 K_v 值限制。

(2)辅助固定绝缘子串通过金具设置成可伸缩长度为 200 mm,夹角为 80°,正常状态下不受力;倒“Y”串塔大风时“ I ”串绝缘子受力为 31.3 kN,较常规 I 型直线塔“ I ”串受力增大 41%,选用 120 kN 合成绝缘子满足强度要求。

(3)当存在纵向不平衡张力时,“ I ”串绝缘子受力增加较大,辅助固定绝缘子受力不大,在不平衡张力为最大使用张力的 10%、垂直档距 L_v 小于 400 m 的覆冰工况下,悬垂“ I ”串可采用 120 kN 绝缘子。

(4)断线工况下,当覆冰垂直档距 L_v 小于 300 m 时,采用 120 kN 合成绝缘子可满足强度要求。

(5)得出了倒“Y”串塔的自振频率和自振周期,塔整体刚度较好,与常规塔一致,主要考虑 1 阶、2 阶模态的作用。

(6)利用时程分析法对倒“Y”串的风振系数进

行了分析,结合我国设计规范,得出了不同部位的风振系数的建议取值,建议倒“Y”串塔塔身加权风振系数取值 1.60,地线架与上横担、中横担、下横担和托架分别取 2.40、2.30、2.20、2.00。

(7)倒“Y”串塔与常规的 I 型直线塔相比,塔质量平均增加 13% 左右。在满足导线对地距离的情况下,如因 K_v 值原因,选择呼高大于 6 m 的 I 型塔、呼高大于 3 m 的 II 型塔或 III 型直线塔,经济性均不如倒“Y”串塔。

(8)一些 K_v 值特别小的塔,采用最高设计的常规直线塔也可能不满足 K_v 值要求,必须通过开耐张解决,此时采用倒“Y”串塔,塔质量能减小 45%,单基节约投资 19 万元左右。

参考文献:

[1]110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范:GB 50545—2010[S].
[2]建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].
[3]高耸结构设计规范:GB 50135—2006[S].
[4]架空送电线路杆塔结构设计技术规定:DL/T 5154—2012[S].
[5]张相庭.结构风压和风振计算[M].上海:同济大学出版社,1985.
[6]潘峰,高志林,王轶文,等.360°风作用下线条风荷载分配系数特性[J].中国电力,2014,47(10):64–70.
[7]陈成,潘峰,王灿灿,等.“D”字型复合材料塔头输电塔结构特性研究[J].中国电力,2015,48(3):99–102.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

潘峰(1980—),男,浙江绍兴人,高级工程师,工学博士,从事输电塔设计、分析等方面的研究(E-mail:qiushif@163.com)。
姜文东(1978—),男,吉林长岭人,高级工程师,工学硕士,从事线路运检管理等方面的研究(E-mail:11701885@qq.com)。
宋刚(1983—),男,浙江富阳人,高级工程师,工学硕士,从事高压线路电气设计等方面的研究(E-mail:song-gang130@sina.com)。
蔡勇(1977—),男,浙江江山人,工程师,工程硕士,从事输电线路管理等方面的研究(E-mail:76728944@qq.com)。