

输电线路分支塔风荷载计算方法研究

李广生, 刘治中, 王远

湖北省电力规划设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430040

摘 要 : 研究基于向量分解的输电线路分支塔风荷载计算方法。推导常规方法下的转角塔风荷载计算公式, 分析90度风荷载和45度风荷载的简化处理方式。综合考虑风向角和线条角, 基于风向与线条的实际夹角, 推导分支塔风荷载的计算公式。通过风荷载向量的分解, 将局部坐标系的风荷载转化到整体坐标系, 得到风荷载在垂直于横担方向与平行横担方向的分力。通过算例, 分析常规方法与本文计算方法风荷载计算结果的差异, 验证了45度风荷载对分支塔有更不利的影响。最后, 给出工程中分支塔风荷载计算的建议。

关 键 词 : 分支塔; 风荷载; 风向角; 线条角

Research on Wind Load Calculation Method of Transmission Line Branch Tower

Li Guangsheng, Liu Zhizhong, Wang Yuan

Hubei Electric Power Planning and Design Institute Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430040

Abstract : The wind load calculation method of transmission line branch tower based on vector decomposition is studied. The conventional wind load calculation formula of Angle tower is derived, and the simplified treatment methods of 90 degree wind load and 45 degree wind load are analyzed. Based on the actual Angle between wind direction and line Angle, the calculation formula of the wind load of the branch tower is derived. Through the decomposition of the wind load vector, the wind load in the local coordinate system is transformed into the global coordinate system, and the component force of the wind load in the direction perpendicular to the crossarm and the direction parallel to the crossarm is obtained. The difference between the conventional method and the method in this paper is analyzed, and it is proved that the 45 degree wind load has a more adverse effect on the branch tower. Finally, some suggestions for calculating the wind load of the branch tower in the project are given.

Keywords : branch tower; wind load; angle-wind; angle-line

引言

输电线路设计过程中需要对杆塔荷载进行计算, 杆塔荷载分析及计算是否合理, 直接影响输电线路的安全性和耐久性。风荷载的计算是输电杆塔设计中重要环节。作用在塔身上的风荷载有线条风荷载和塔身风荷载。杆塔设计时, 当风向与导线方向或塔面成0、45、60和90度夹角时, 线条风荷载在垂直和顺线条方向的分量以及塔身风荷载在塔面两垂直方向的分量, 可以参照杆塔设计规定^[1]中的角度风荷载分配表进行计算。在计算某角度风工况时, 风向角实际是风向与塔面之间的夹角。对于转角塔, 当线路发生转角时, 实际风向与线条方向和塔面方向的夹角并不相同, 在应用角度风荷载分配表计算线条风荷载时, 风向与线条的夹角存在不同的取法, 有的认为和风向与塔面的夹角相同, 有的取风向与线条的实际夹角。近年来, 对于角度风吹时线条风荷载的取值和分配模式有很多研究^[2-6], 都没有解决这个争议, 并且国外规范都没有对此给出明确的规定^[7-9]。目前的常规做法是不考虑转角的影响, 计算线条风荷载时, θ 为风向与线条之间的夹角; 计算塔身风荷载时, θ 为风向与横担方向的夹角。

对于一般耐张塔, 在90° 风荷载作用下, 线条风荷载、塔身风荷载与线条张力的横向力叠加, 形成了耐张塔的主要荷载, 因此是最不利风向。因此设计规范中规定了一般耐张塔可只计算90° 基本风速风向。对于90° 以外的风向, 目前, 仅特高压线路耐张塔设计需要考虑45° 风荷载, 而其他线路不考虑。文献[10]通过折算风速对线路风压进行换算, 研究45° 风荷载对超高压线路耐张塔的影响。对于分支塔, 其前后左右线条走向各不相同, 其荷载分配模式以及不同角度风荷载对分支塔的影响, 目前有待研究。因此, 本文将研究分支塔的线条风荷载计算方法, 并探究不同角度风荷载对分支塔的影响。

一、转角塔线条风荷载计算

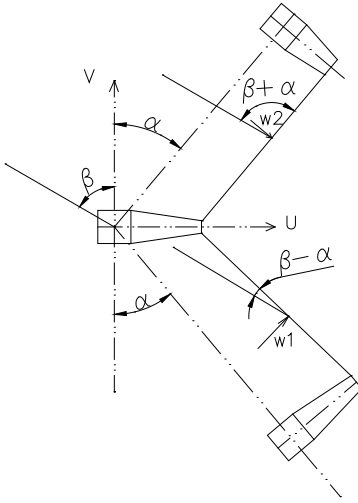
根据文献 [7], 导线风荷载标准值的计算公式如下:

$$W_x = \beta_c \alpha_L W_0 \mu_z \mu_{sc} d L_p B_1 \sin^2 \theta \quad (1)$$

式中: W_x 为垂直于导线及地线方向的风荷载标准值; β_c 为导线阵风系数; α_L 为档距折减系数; W_0 为基准风压; μ_z 为风压高度变化系数; μ_{sc} 为导线或地线的体型系数; d 为导线或地线的外径; L_p 为杆塔规划水平档距; B_1 为导线覆冰风荷载增大系数; θ 为风向角;

设风垂直于线条方向吹时, 垂直于线条方向的风荷载标准值为 W_{x90} , 则

$$W_{x90} = \beta_c \alpha_L W_0 \mu_z \mu_{sc} d L_p B_1 \quad (2)$$



> 图1 转角塔风荷载示意图

按图1中的坐标系定义风向角 β 和以及导地线的线条角 α , 风向角是风向与垂直于横担方向的夹角, 线条角是导线与垂直于横担方向的夹角。一般转角塔的基础分坑会使前后的线条角相等, 因此图中前后侧的线条角均为 α 。

在局部坐标系中, 垂直于线条方向的风荷载标准值为:

$$W_1 = W_{x90} \sin^2 (\beta - \alpha) \quad (3)$$

$$W_2 = W_{x90} \sin^2 (\beta + \alpha) \quad (4)$$

上式中的 W_1 和 W_2 为矢量, 假设前后侧的档距相等, 将线条风荷载按塔身方向进行十字分解, 可将上述风荷载转化为整体坐标系下的合力值:

$$W_u = W_{x90} [\sin^2 (\beta - \alpha) \cos \alpha + \sin^2 (\beta + \alpha) \cos \alpha] \quad (5)$$

$$W_v = W_{x90} [\sin^2 (\beta - \alpha) \sin \alpha - \sin^2 (\beta + \alpha) \sin \alpha] \quad (6)$$

工程中, 计算常规转角塔的 90° 风荷载时, 认为风向与线条和塔身的角度都是 90° 度, 将吹线条的 90° 度风荷载全部作用在平行于横担方向, 不进行分解, 即当 $\beta = 90^\circ$ 时

$$W_{u90} = 2W_{x90} \quad (7)$$

$$W_{v90} = 0 \quad (8)$$

特高压工程计算 45° 风荷载时, 此时的 45° 是风与垂直于横担方向的夹角, 并考虑风向与线条的实际角度, 但亦将风荷载全部作用在平行于横担方向, 此时

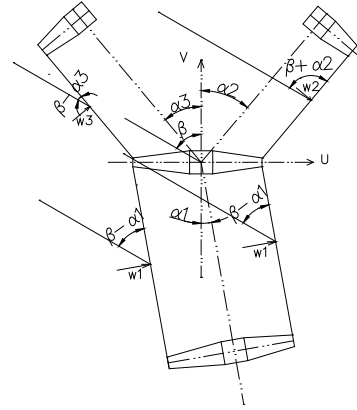
$$W_{u45} = W_{x90} [\sin^2 (45 - \alpha) + \sin^2 (45 + \alpha)] \quad (9)$$

$$W_{v45} = 0 \quad (10)$$

上述计算方法, 混淆了风向与垂直于横担方向的夹角以及风向与线条之间的夹角, 但从数值角度来说, 式 (7) 和式 (8) 取到了 W_u 的最大值, 这种保守取法在工程中是可以接受的。按照上述计算方法, 对比式 (7) 和 (9) 可知, 45° 风荷载的值是小于 90° 风荷载的, 因此计算 45° 风荷载意义是不大的, 这也是为什么一般耐张塔只计算 90° 风向风荷载的原因。

二、分支塔线条风荷载计算

对于分支塔, 其左右两个回路在线路方向前后侧共有 3 个方向的线条, 可按图2中的坐标系定义分支塔的风向角 β 和以及导地线的线条角 α_1 、 α_2 和 α_3 , 风向角和线条角的定义方式与普通转角塔一致。



> 图2 分支塔风荷载示意图

在局部坐标系中, 垂直于线条方向的风荷载标准值为:

$$W_1 = W_{x90} \sin^2 (\beta - \alpha_1) \quad (11)$$

$$W_2 = W_{x90} \sin^2 (\beta + \alpha_2) \quad (12)$$

$$W_3 = W_{x90} \sin^2 (\beta - \alpha_3) \quad (13)$$

式 (3)~式 (5) 中, $W_1 \sim W_3$ 均为矢量。

将线条风荷载按塔身方向进行十字分解, 可将上述风荷载转化为整体坐标系下的合力值:

$$W_u = W_{x90} \left[2 \sin^2 (\beta - \alpha_1) \cos \alpha_1 + \sin^2 (\beta + \alpha_2) \cos \alpha_2 + \sin^2 (\beta - \alpha_3) \cos \alpha_3 \right] \quad (14)$$

$$W_v = W_{x90} [2 \sin^2 (\beta - \alpha_1) \sin \alpha_1 - \sin^2 (\beta + \alpha_2) \sin \alpha_2 + \sin^2 (\beta - \alpha_3) \sin \alpha_3] \quad (15)$$

当 $\beta = 90^\circ$ 时, 可得

$$W_{u90} = W_{x90} (2 \cos^3 \alpha_1 + \cos^3 \alpha_2 + \cos^3 \alpha_3) \quad (16)$$

$$W_{v90} = W_{x90} [2 \cos^2 \alpha_1 \sin \alpha_1 - \cos^2 \alpha_2 \sin \alpha_2 + \cos^2 \alpha_3 \sin \alpha_3] \quad (17)$$

当 $\beta = 45^\circ$ 时, 可得

$$W_{u45} = W_{x90} \left[2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - \alpha_1 \right) \cos \alpha_1 + \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \alpha_2 \right) \cos \alpha_2 + \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - \alpha_3 \right) \cos \alpha_3 \right] \quad (18)$$

$$W_{v45} = W_{x90} [2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - \alpha_1 \right) \sin \alpha_1 - \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} + \alpha_2 \right) \sin \alpha_2 + \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - \alpha_3 \right) \sin \alpha_3] \quad (19)$$

可见，对于分支塔，由于前后侧不同方向的线条角度差异较大，不能直接将 W_v 视为 0，也不宜按式 (9) 方式去简化 W_{u45} ，因而忽略 45 度风工况。因此，本文将按式 (16)~(19) 对风荷载进行十字分解计算，并比较 90 度风和 45 度风对分支塔杆塔受力的影响。

三、算例分析

某 220kV 输电线路工程中的 N38 分支塔设计条件为：导线型号为 2×JL3/G1A-400/35；地线型号为 JLB20A-150；基本风速 25.0m/s；覆冰 10mm。该塔的基础分坑图 3 所示。

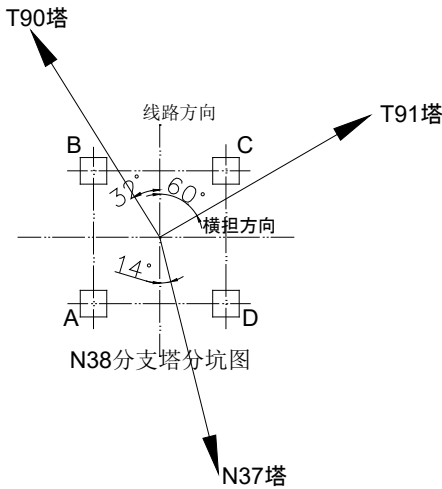


图3 分支塔分坑示意图

首先，对比了常规计算方法与本文计算方法的结果差异，在大风工况下，作用在单个挂点处的点荷载设计值如表 1 所示，表中数值包含了线条张力在横担方向和线路方向的分力。相比本文计算方法，常规方法的计算结果中，地线在横担方向的合力增大了 2.06kN，每层导线在横担方向的合力增大了 9.31kN，地线在线路方向的合力增大了 1.46kN，每层导线在线路方向的合力增大了 5.8kN。经过铁塔内力计算，主材应力比增加 9.3%，斜材应力比增大 0.3%，基础上拔力增加 12.7%，基础下压力增加 7.8%。可见，常规方法计算的荷载要大于本文计算方法，较为保守。

参考文献

[1] 电力规划设计总院，国家能源局. 架空输电线路杆塔结构设计技术规定：DL/T 5154-2012 [S]. 北京：中国计划出版社，2012.
[2] 张珊，李健，徐维毅，等. 角度风对转角塔水平荷载的影响 [J]. 电网与清洁能源，2013，29(7):4.
[3] 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): 64-65.
[4] 朱晓东，张超，易青. 角度风时线条风荷载及其张力的计算方法 [J]. 山西电力，2016(3):4.
[5] 廖邢军，黄兴，韩大刚，等. 耐张塔导线角度风荷载取值探讨 [J]. 特种结构，2018,35(3):61-67.
[6] 沈国辉，包玉南，郭勇，等. 输电线路顺线路方向风荷载及分配模式 [J]. 2020.DOI:10.3785/j.issn.1008-973X.2020.09.001..
[7] 电力规划设计总院，国家能源局. 架空输电线路荷载规范：DL/T 5551-2018 [S]. 北京：中国计划出版社，2018.
[8] IEC 60826-2003. Design criteria of overhead transmission lines [S]. Geneva: International Electro-technical Commission, 2003.
[9] ASCE 74-2009. Guidelines for electrical transmission line structure loading [S]. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2009.
[10] 王新宇，施菁华，曹玉杰，等. 超高压输电线路耐张塔 45° 风荷载的计算与分析 [J]. 电力建设，2012，33(12):4.

表 1 分支塔点荷载设计值 (kN)

计算方法	分力方向	N37 侧		T90 侧		T91 侧	
		地线	导线	地线	导线	地线	导线
常规方法	横担方向	9.73	29.33	-14.99	-38.69	29.62	76.10
	线路方向	-30.96	-85.77	26.62	74.71	15.94	39.67
本文方法	横担方向	9.56	28.64	-15.30	-41.47	28.21	70.95
	线路方向	-30.50	-83.97	27.39	77.75	15.71	38.83

其次，对比本文计算方法下，90 度风荷载与 45 度风荷载的结果差异。在大风工况下，作用在单个挂点处的点荷载设计值如表 2 所示，表中数值包含了线条张力在横担方向和线路方向的分力。相比于 90 度风，在 45 度风荷载作用下，地线在横担方向的合力减小了 3.08kN，每层导线在横担方向的合力减小了 12.21kN，地线在线路方向的合力增大了 4.00kN，每层导线在线路方向的合力增大了 15.33kN。经过铁塔内力计算，主材应力比增加 16.0%，斜材应力比减小 8.9%，基础上拔力增加 23.3%，基础下压力增加 14.7%。可见，相比于 90 度风，45 度风对分支塔有更不利的影响。同时，对比可知，本文计算方法的 45 度风荷载也比常规方法的 90 度风荷载对主材更不利、基础作用力更大。因此，本文建议在进行分支塔的铁塔设计时应考虑 45 度风的工况。

表 2 分支塔点荷载设计值 (kN)

风向	分力方向	N37 侧		T90 侧		T91 侧	
		地线	导线	地线	导线	地线	导线
90 度风	横担方向	9.56	28.64	-15.30	-41.47	28.21	70.95
	线路方向	-30.50	-83.97	27.39	77.75	15.71	38.83
45 度风	横担方向	8.34	23.82	-16.27	-45.25	28.54	72.16
	线路方向	-31.22	-86.81	26.23	73.22	14.31	33.71

四、结束语

通过对分支塔线条风荷载计算公式的推导，并基于算例结果，给出工程中分支塔风荷载计算的如下建议：

- (1) 对于分支型耐张塔，建议铁塔设计时，基于风荷载的分解计算，考虑 45 度大风工况；
- (2) 分支塔可考虑多角度风荷载，在铁塔计算软件支持的基础上，同时计算 90°、60°、45° 等风荷载，增加铁塔设计的安全冗余度。