

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.05.010

台风等效静风荷载作用下输电塔线体系 极限承载力分析*

刘石^{1,2}, 黄正¹, 杨毅^{1,2}, 张楚^{1,2}, 高庆水^{1,2}

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东广州 510080;

2. 广东电科院能源技术有限责任公司, 广东广州 510080)

摘要: 台风引起的输电线路破坏情况屡有发生, 为了研究台风作用下输电塔线体系的极限承载力, 以实际发生倒塔事故的广东省某 220 kV 输电线路的塔—线体系为研究对象, 结合台风风剖面和规范中的方法确定塔线体系的等效静力风荷载, 考虑输电塔结构的材料非线性和几何非线性特征, 通过有限元软件 ANSYS 在逐级加载条件下分析输电塔线体系的极限承载力, 研究风向角、相邻塔的变形、导地线张力的变化对极限承载力的影响。结果表明: (1) 通过逐级加载的方式可以较为方便的找到不同工况的极限荷载, 确定出结构的最不利风向角; (2) 塔线体系模型的选取会较大的影响计算结果, 应尽量接近真实情况的选取模型, 从而得到更为准确的分析结果; (3) 导地线初始张力可以一定程度上提高输电塔线体系的极限承载力, 在条件允许的情况下可以适当增加导地线的初始张力。

关键词: 输电塔线体系; 等效静力风荷载; 非线性特征; 极限承载力

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)05-0757-07

Ultimate Bearing Capacity Analysis of Transmission Tower-line System under Equivalent Static Typhoon Wind Load

LIU Shi^{1,2}, HUANG Zheng¹, YANG Yi^{1,2}, ZHANG Chu^{1,2}, GAO Qingshui^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd, Guangzhou 510080, China;

2. Guangdong Diankeyuan Energy Technology Co., Ltd, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The damage of transmission line caused by typhoon occurred frequently. In order to study the ultimate bearing capacity of transmission tower line system under typhoon load, the transmission tower-line system of a 220 kV transmission line in Guangdong Province is taken as the example in this article, that many towers was collapsed in a typhoon. The equivalent static wind load of the tower-line system is calculated by combining a recommended typhoon wind profile and the wind load calculation method of Chinese Load Code. The nonlinear of material and geometric characteristics of the tower is considered, and the ultimate bearing capacity of the transmission tower-line system is analyzed under step-loading by ANSYS. The influence on the ultimate bearing capacity caused by the wind directions, the deformation of adjacent towers, and the tension of the line is studied. The analysis results show that: 1) the ultimate bearing capacity of the transmission tower-line system and the most danger-

* 收稿日期: 2018-08-10; 修回日期: 2018-10-21

基金项目: 南方电网科技项目(GDKJQQ20153007)资助

作者简介: 刘石(1974-), 男, 教授级高工, 博士。主要从事电力设备防灾减振研究。Email: 13925041516@139.com

ous condition can be obtained by step-by-step upgrade analysis. 2) Finite element modal of tower-line system will influence the results the ultimate bearing capacity calculation. Taking more towers into the finite element modal will get more accurate result. 3) Choosing higher allowable initial force is benefit because the ultimate bearing capacity of the transmission tower-line system will increase with the initial tension of the line to some extent.

Keywords: transmission tower-line system; equivalent static wind load; nonlinear property; ultimate bearing capacity

引言

我国经济高速发展对电力供应需求不断增长, 已建和拟建的大量高压、超高压输电线路具有塔体高、柔性强和导地线跨度大等特点, 属于风荷载敏感结构, 我国东南沿海地区台风登陆比较频繁, 强台风袭击下往往会引起输电线路发生破坏。以2015年为例, 广东地区登陆的台风“彩虹”导致大量线路发生倒塌和断杆, 35 kV及以上输电线路受损共31条, 受损线路倒塔(断杆)共80基(根), 带来了严重的经济损失。因此研究风荷载作用下输电线路的极限承载力具有重要的意义。

目前国内外学者开展了大量关于输电塔非线性分析和破坏分析的研究。曾程^[1]分析了不同风向角下大跨越输电塔结构极限承载力, 研究风向角与破坏过程的关系; 李妍等^[2]通过分析输电塔线体系断线荷载作用下的动力响应, 研究不同断线位置对输电塔动力响应的影响; 付航^[3]进行了下击暴流作用下输电塔线体系的稳定性分析, 研究了下击暴流的不同参数对塔线体系的稳定性的影响; 温航^[4]研究了风向角、导/地线的初始预张力和档距等参数对双柱悬索拉线塔稳定性的影响; 葛绪章^[5]从能量的角度进行断线荷载作用下的非线性动力分析, 评估不同输电塔的抗破坏能力; 俞琪琦^[6]采用同时考虑二阶效应和失稳效应的杆件建立输电塔线体系有限元模型, 模拟得到体系在不同风攻角下的倒塌路径, 并总结了在三种攻角下的倒塌规律; 吉柏锋等^[7]通过失效曲面判定压弯构件的失稳, 分析了下击暴流作用下输电塔弹塑性失稳过程; 李庆伟等^[8]分别从静力和动力的角度研究了单个输电塔结构的稳定性, 指出实际情况中是塔一线耦合体系, 导线对于输电塔结构的稳定性有一定影响, 是输电塔稳定性深入研究的一个重要方向。

为了探讨台风作用下考虑输电线路中多塔与导地线之间的耦合效应时的塔线体系在设计风荷载模式作用下的抗风可靠性与极限承载力, 本文选择台风中发生倒塔事故的广东省某220 kV双回路交流线路为对象(倒塔时的气象记录显示风速约为42~45 m/s), 结合台风的风剖面与规范等效静风荷载计算方法, 对比分析了一塔两线、四塔五线等塔线耦合体系模型, 采用逐级加载的方式, 讨论了塔线模型选取方式、风向角以及导线张力等因素对输电塔极限承载力的影响, 为台风地区输电线路抗风分析及其边界条件的选取提供参考。

1 有限元模型

输电塔线体系为广东省某220 kV线路的5号和8号耐张塔之间的耐张段, 线路示意如图1所示, 包含两个耐张塔(N5和N8)和两个直线塔(N6和N7), 重点研究N6塔, 分别建立以N6塔为中心的一塔两线体系模型和N5~N8的四塔五线体系模型。工程参数概况见表1。

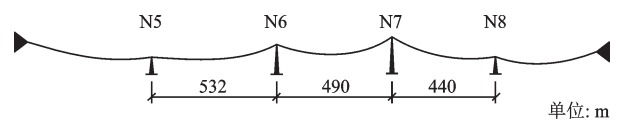


图1 输电线路耐张段示意

Fig.1 Schematic diagram of the tension resistance section of the transmission line

采用通用有限元软件ANSYS进行塔线体系的有限元分析, 输电塔构件采用BEAM188梁单元模拟。为分析结构的极限承载力, 考虑结构的材料非线性和几何非线性, 几何非线性考虑大变形、大应变和应力刚化。

对于材料非线性特征, 屈服准则采用Mises屈服准则, 其基本表达形式如下:

$$\sigma_e = \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]} \quad (1)$$

式中, σ_e 和 σ_y 分别为等效应力和屈服应力; σ_1 、 σ_2 和 σ_3 为主应力。在复杂应力作用下, 当 $\sigma_e = \sigma_y$ 时, 材料达到屈服临界状态。本文的分析不考虑应变率的影响, 故采用关联流动法则。钢材在进入塑性以后会产生塑性变形, 循环往复作用下有包辛格效应。根据石永久等^[9]对结构钢材在循环荷载下的实验结果, 考虑材料的包辛格效应, 采用双线性随动强化模型, 钢材的拉压弹性模量相同, 屈服后的切线模量与屈服前的弹性模量的关系为: $E_t = 0.001E$ 。则 Q235 钢和 Q345 钢的物理力学性能详见表 2。

表 1 输电塔工程概况

Table 1 Project overview of the power transmission tower

编号	类型	高度/m	材料	档距/m
N5	耐张塔	34	Q235 Q345	532
N6	直线塔	62.5	Q235 Q345	490
N7	直线塔	76.5	Q235 Q345	440
N8	耐张塔	34	Q235 Q345	

表 2 Q235 和 Q345 钢材料参数

Table 2 Q235 steel and Q345 steel material parameters

钢材型号	弹性模量/Pa	切线模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)	屈服强度/MPa	泊松比
Q235	2.06×10 ¹¹	2.06×10 ⁸	7 850	235	0.3
Q345	2.06×10 ¹¹	2.06×10 ⁸	7 850	345	0.3

输电线路中直线塔在工作状态下主要承受导线传来的竖向荷载, 绝缘子串与输电塔之间铰接, 在输电线震荡时有一定的悬垂效应, 在建模时将绝缘子串简化为柔索^[5], 用 LINK10 单元模拟。不考虑绝缘子的破坏, 材料的本构模型选用理想弹性模型。

由于导/地线两相邻悬挂点的距离很大, 导/地线侧向刚度相对很小, 故忽略其侧向刚度, 在建模时将导/地线简化为只承受轴向张力的柔索, 采用 LINK10 单元模拟。不考虑导/地线的破坏, 本构模型选用理想弹性模型。

塔线体系中的导/地线为单柔索, 采用工程上常用的抛物线方程确立初始构型, 如图 2 所示。抛物线方程为:

$$y = \frac{4fx(l-x)}{l^2} + \frac{h}{l}x \quad (2)$$

跨中垂度与水平张力的关系为:

$$H = \frac{ql^2}{8f\cos\theta} \quad (3)$$

索长近似值为:

$$S = L \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{l} \right)^2 + \frac{8}{3} \left(\frac{f}{l} \right)^2 \right] \quad (4)$$

索最大张力近似值为:

$$T = H \sqrt{1 + 16 \frac{f^2}{l^2} + \frac{h^2}{l^2} + \frac{8fh}{l^2}} \quad (5)$$

式中, q 为沿弦长均匀分布的竖向荷载; l 为水平跨度; h 为两端悬挂点高差; H 为水平张力; f 为跨中垂度。

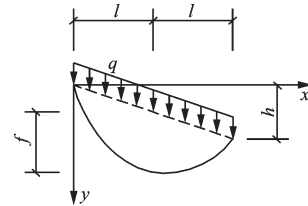


图 2 抛物线方程示意

Fig.2 Schematic diagram of parabolic equation

一塔两线体系有限元模型如图 3 所示, 四塔五线体系有限元模型如图 4 所示。

2 等效静力风荷载计算

国内外实测研究表明 200 m 以下台风边界层内的平均风速剖面可以近似采用对数率或幂指数率描述^[10]。结合本文研究对象的场地位置, 采用宋丽莉等^[11]基于近海岸观测的登陆我国的台风 10 m 高度处三维脉动风速数据对近地面处平均风进行研究得出的平均风剖面指数率关系:

$$V(z) = V_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (6)$$

式中, V_{10} 为 10 m 高度处 10 min 平均风速; α 为地面

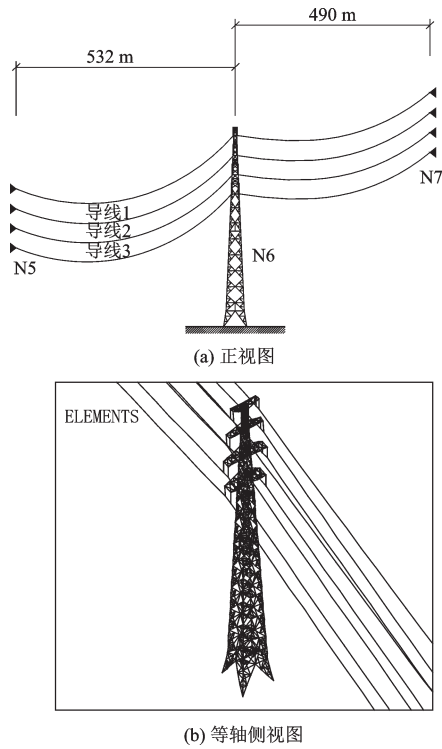


图3 一塔两线体系模型整体示意

Fig.3 Overall schematic diagram of one tower and two-spans system model

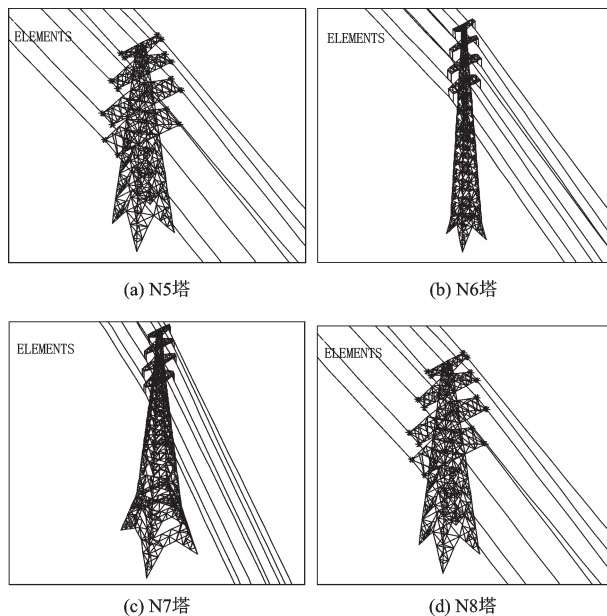


图4 输电塔线体系有限元模型

Fig.4 Finite element model of transmission tower line system

粗糙度系数,台风登陆地区A、B、C类地貌对应的地面粗糙度系数分别为0.1、0.14、0.22。本文工程所在地区属于B类地貌,取 $\alpha=0.14$ 。

将输电塔沿高度方向划分风速分区,取每一分区中间高度来确定风速,该分区内的所有点风速均

取中间高度点风速,风速分区如图5所示。

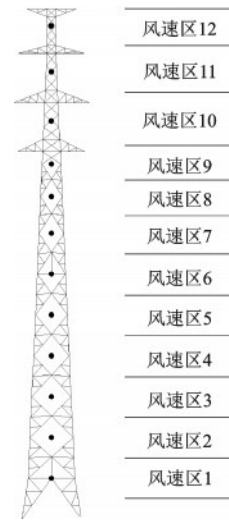


图5 输电塔风速分区

Fig.5 Wind blocks of transmission tower

将得到的输电塔线体系模拟点的平均风速转化为对应的等效静力风荷载,风荷载计算采用《建筑结构荷载规范》^[12]中规定的方法:

$$F_k = \beta_z \mu_z \mu_s w_0 A_s \quad (7)$$

式中, F_k 为 z 高度处的风荷载标准值; β_z 为 z 高度处的风振系数; μ_z 为 z 高度处的风压高度变化系数,按照公式(6)的风剖面指数计算; μ_s 为风荷载体型系数; w_0 为10 m高度基本风压, A_s 为作用风向角度方向塔段投影面积。

输电导/地线风荷载的计算采用《110 kV~750 kV架空输电线路设计规范》^[13]中规定的方法:

$$F_x = \alpha' \mu_z \mu_{sc} w_0 \beta_c d l_p \sin^2(\theta) \quad (8)$$

式中, F_x 为 z 高度处导/地线风荷载标准值; α' 为电线风压不均匀系数; β_c 为导线及地线风荷载调整系数; μ_z 同式(7); μ_{sc} 为导线及地线风荷载体型系数; w_0 同式(7); d 为导线或地线的外径; l_p 为杆塔的水平档距; θ 为风向与导线或地线方向之间的夹角。

绝缘子串风荷载的计算采用文献[13]中的方法:

$$F_j = \mu_z w_0 A_s \quad (9)$$

式中, F_j 为 z 高度处的绝缘子风荷载标准值; μ_z 同式(7); A_s 同式(7)。

由式(7)~式(9)计算出塔线体系各部分的风荷载后,按照输电塔风荷载施加在输电塔横担、塔头和每一层主材的构件节点处;导地线风荷载施加在导地线风速区的中点处;绝缘子串风荷载施加在绝缘子串的单元节点处的方法施加等效静风荷载,荷

载施加位置详见图6。

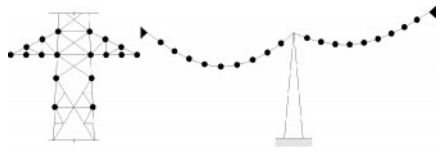


图6 风荷载施加位置示意

Fig.6 Schematic diagram of wind load position

3 分析工况

本文分别研究风向角变化、相邻塔的变形和导线张力变化对输电塔极限承载力的影响,风向角的分析工况如图7和表3所示;相邻塔的变形分析工况如图8和表4所示;导线张力分析工况见表5。

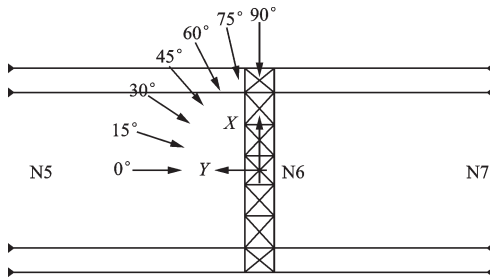


图7 一塔两线体系风向角示意

Fig.7 Schematic diagram of wind angle of one tower and two-spans system

表3 风向角分析工况

Table 3 Analysis cases of wind angle

风向角/(°)	风速/(m·s ⁻¹)
0	10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 63 65 66
15	10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 63 65 66
30	10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 63
45	10 15 20 25 30 35 40 45 50 52 55 60
60	10 15 20 25 30 35 40 45 50 52 54 55
75	10 15 20 25 30 35 40 45 50 52 54
90	10 15 20 25 30 35 40 45 50 52

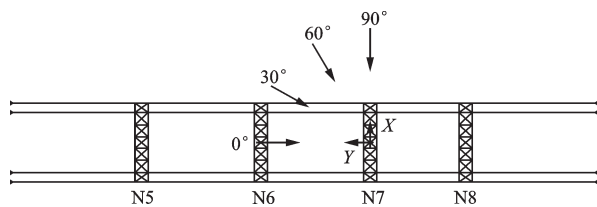


图8 四塔五线体系风向角示意

Fig.8 Schematic diagram of wind angle of four towers and five-spans system

表4 相邻塔的变形分析工况

Table 4 Analysis cases of deformation of adjacent towers

风向角/(°)	风速/(m·s ⁻¹)
0	10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 63
30	10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 58
60	10 15 20 25 30 35 40 45 50 53
90	10 15 20 25 30 35 40 45 48

表5 导线张力分析工况

Table 5 Analysis cases of tension of conducting and grounding wires

	ZL1		ZL2		ZL3		
	N5N6	N6N7	N5N6	N6N7	N5N6	N6N7	
导线张力/N	1	13 134.3	13 097.8	30 761.9	30 674.7	40 813.5	40 774.6
	2	13 132.1	13 099.2	30 752.1	30 677.1	40 804.0	40 778.7
	3	13 133.3	13 096.5	30 756.6	30 661.5	40 811.9	40 761.3
导线垂度/m	1	59.55	50.63	25.08	21.37	18.88	16.06
	2	59.38	50.57	25.01	21.34	18.82	16.04
	3	59.20	50.53	24.94	21.33	18.77	16.02
导线长度/m	1	548.17	502.95	533.68	491.54	532.54	490.64
	2	547.32	502.66	532.89	491.26	531.76	490.37
	3	546.45	502.38	532.09	491.00	530.96	490.11
地线张力/N	5 033.42	5 023.22	9 433.32	9 411.36	17 957.45	17 932.64	
地线垂度/m	49.11	41.69	25.99	22.09	13.61	11.56	
地线长度/m	543.14	498.59	534.43	491.76	532.02	489.88	
风速工况	10 15 20 25 30 35 40 45 50 10 15 20 25						
	30 35 40 45 50 52 10 15 20 25 30 35 40 45 50 52						

对于导线张力变化的工况,不改变导线悬挂点高差,通过改变初始垂度改变导线张力。

4 结果分析

4.1 风向角对极限承载力的影响

取塔头的中点X、Y、Z方向位移的矢量和作为塔顶位移代表值,如图9所示,首先对一塔两线模型分析等效静力风荷载作用下的工况(表3),0°~90°风向角下N6塔顶的风速—位移曲线如图10所示。

由图10中可以看出,相同风速作用下90°风向角对应的塔顶位移最大。且通过不同风向角下的逐级加载计算(极限风速结果见表6)得到90°风向角对应的极限风速最低,因此可以确定90°风向角工况为本工程算例的最不利工况,以该工况为例进行

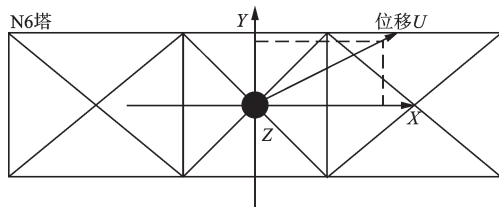


图9 塔顶位移代表点

Fig.9 Typical point of tower head displacement

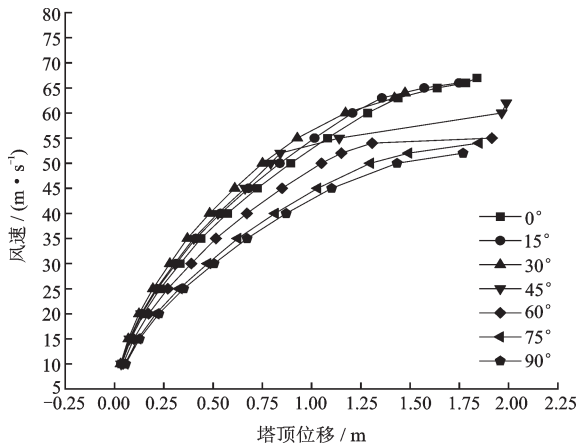


图10 不同风向角下输电塔风速一位移曲线

Fig.10 Wind speed and displacement curves of tower on different wind angles

表6 不同风向角下极限风速

Table 6 Ultimate wind velocity on different wind angle

工况序号	风向角/(°)	失稳临界风速/(m·s ⁻¹)
1	0	66.00
2	15	66.00
3	30	63.00
4	45	60.00
5	60	55.00
6	75	54.00
7	90	52.00

详细分析。该工况共计算了16个风速下的位移响应,风速由10 m/s逐渐增加到52 m/s,其中当风速大于52 m/s时计算发生不收敛,结构在52 m/s风速时发生整体失稳,该风速对应的风荷载也为90°风向角下结构的等效静力极限风荷载,90°风向角下输电塔在极限风荷载下的变形如图11所示。

4.2 相邻塔的变形对极限承载力的影响

与前面相同的方法分析表4中的工况,同样取塔头的中点X、Y、Z方向位移的矢量和作为塔顶位

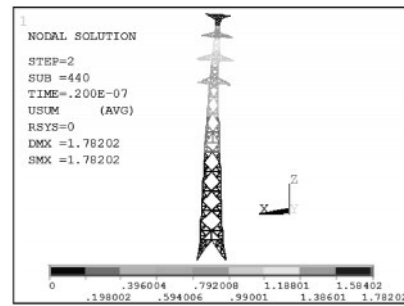


图11 52 m/s风速时的输电塔位移

Fig.11 Displacement of tower at 52m/s wind speed

移代表值。90°风向角下各输电塔的塔顶位移随风速的变化如图12所示。对于N6塔,一塔两线模型和四塔五线模型在0°、30°、60°、90°风向角工况下的风速一位移曲线,如图13所示,图中MA表示一塔两线体系,MB表示四塔五线体系。

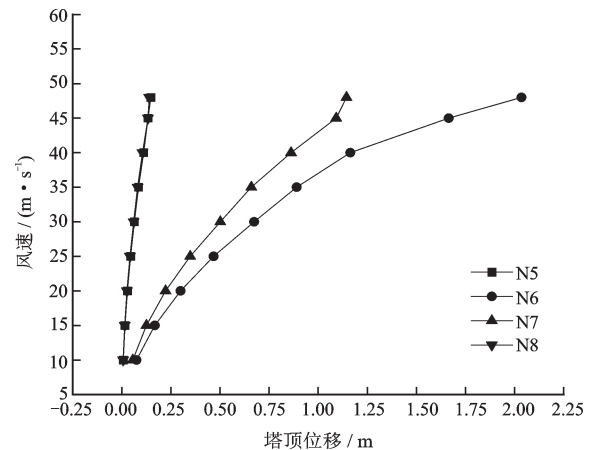


图12 90°风向角下输电线路输电塔风速一位移曲线

Fig.12 Wind speed and displacement curves of tower of transmission line on 90° wind angle

由图12可知N6塔为该段线路的最薄弱塔,90°风角下四塔五线体系模型中N6塔的极限风速为45 m/s。由图13可知,同样的风速下,四塔五线体系N6塔的塔顶位移较一塔两线体系N6塔的大,更容易发生破坏,即相邻塔的变形会相互影响。因为四塔五线体系的N5塔和N7塔也在发生变形,导致N5N6档和N6N7档导线对N6塔的约束较一塔两线体系的弱,故一塔两线体系模型的计算结果偏保守。

4.3 导地线张力对极限承载力的影响

采用前节相同的方法计算表6中的导地线张力变化工况下一塔两线体系的极限承载力,如图14所示。

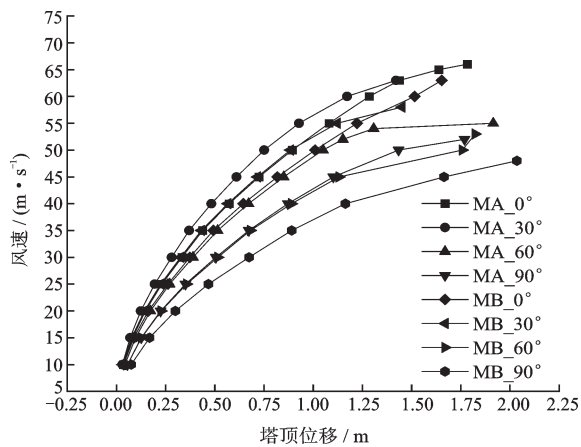


图 13 不同风向角下四塔五线体系和一塔两线体系的 N6 塔风速-位移曲线对比

Fig.13 Comparison of wind speed and displacement curves of N6 tower of four towers and five-spans system and one tower and two-spans system on different wind angles

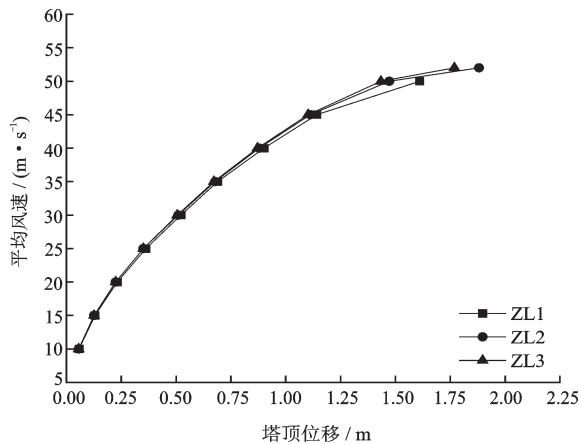


图 14 N6塔在不同导地线张力下的风速-位移曲线

Fig.14 Wind speed and displacement curves of N6 tower with different tension of conducting wires and earth wires

由图 14 可知,ZL1 工况下输电塔结构极限风速为 50 m/s,ZL2 工况和 ZL3 工况下输电塔结构极限风速均为 52 m/s,同样的平均风速 ZL1 工况下输电塔结构的塔顶位移最大,ZL2 工况次之,ZL3 工况最小。即当导地线张力越大则输电塔结构极限承载力越大,因为导地线张力越大对输电塔结构的张拉约束作用越强,则结构越稳定。

5 结 论

根据对输电塔线体系进行的台风风场中的等效静风荷载作用下的承载力极限分析,研究风向角、相邻塔的变形和导地线张力对输电线路极限风

荷载的影响,所得结论如下:

(1)采用逐级加载的方式可以较为方便的得到结构在不同工况下的极限荷载,也可以通过这种方式找到最不利的风向角。本文输电塔线体系算例的最不利风向角为 90°,该风向角下线路最容易发生破坏。

(2)输电塔一线体系的有限元模型选取会影响结构的抗风分析结果。相同的风荷载作用下,四塔五线体系的结果较一塔两线体系的结果更不利,相邻塔的变形会加速输电塔的破坏。因此在实际分析过程中可以根据实际情况在研究对象两端选取更多的输电塔进行建模计算,从而得到更加接近真实的计算结果。

(3)导地线在一定程度上增加了输电塔的刚度。实际工程中,在导地线其它设计条件允许的情况下,可以适当提高导地线初始张力,从而提高输电塔的极限承载力。

参考文献:

- [1] 曾程.大跨越输电塔结构极限承载力分析[D].上海:同济大学,2006.
Zeng Ch. Analysis on the ultimate load capacity of large-span transmission towers [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [2] 李妍,刘红军,李正良,等.输电塔线体系断线非线性动力分析[J].振动与冲击,2017,36(7): 70-79.
Li Y, Liu H J, Li Zh L, et al. Nonlinear dynamic analysis for a transmission tower-line system subjected to wire breakage [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017,36(7): 70-79. (in Chinese)
- [3] 付航.下击暴流作用下输电塔线体系的稳定性分析[D].重庆:重庆大学,2016.
Fu H. Dynamic instability analysis of transmission tower-line system under downburst[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [4] 温航.双柱悬索拉线塔稳定性研究[D].重庆:重庆大学,2017.
Wen H. Research on stability of double column suspension cable guyed tower [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [5] 葛绪章.基于断线作用的输电塔-线体系连续倒塌动力效应研究[D].重庆:重庆大学,2015.
Ge X Zh. Study on progressive collapse and dynamic effect of transmission tower-line system that based on the effect of ruptured lines' load [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)

(下转第 778 页)