

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.020

10 kV 双回路杆塔力学模型及其 安装拉线的加固效果研究

张胜强¹, 王俊武², 雷炳晖³, 周晓明¹,
卫才猛¹, 柯维新⁴, 刘燕秋⁴

(1. 广东电网有限责任公司 惠州供电局, 广东 惠州 516001; 2. 广州市奔流电力科技
有限公司, 广东 广州 510640; 3. 广东电网有限责任公司, 广东 广州 510000;
4. 惠州电力勘察设计院有限公司, 广东 惠州 516001)

摘要: 针对在强台风影响下, 沿海配电线路发生倒杆、断杆等问题, 对安装防风拉线加固方法进行了理论研究, 探讨了拉线安装方法对加固效果的影响。建立了 10 kV 双回路杆塔的力学模型, 对导线和电杆进行了受力分析, 考虑了风力、重力和拉线拉力的作用, 推导出了加固前后电杆的轴力、弯矩、挠度, 以及拉线拉力的解析表达式。通过一工程实例, 计算了在 45 m/s 风速下安装拉线前后杆塔的内力和挠度值, 并分析了风速和拉线安装位置对杆塔加固效果的影响。研究结果表明: 安装防风拉线能大大提高配电线路的抗风能力; 将拉线抱箍安装在最下层横担以下 0.5 m~0.8 m 处, 可以取得最佳加固效果。相关研究结果, 可为配电线路设计和加固提供理论参考。

关键词: 台风; 双回路; 拉线加固; 受力分析; 杆塔

中图分类号: TM753

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1192-04

Mechanics model of 10 kV two-circuit line pole and the reinforcing effectivity of installing stay wire

ZHANG Sheng-qiang¹, WANG Jun-wu², LEI Bing-hui³,
ZHOU Xiao-ming¹, WEI Cai-meng¹, KE Wei-xin⁴, LIU Yan-qiu⁴

(1. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Huizhou 516001, China;

2. Guangzhou Power Electric Technology Co., Ltd., Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;

4. Huizhou Electric Power Design Institute, Huizhou 516001, China)

Abstract: Aiming at the breaking or falling of the poles of distribution lines under violent typhoon, a theoretical research on the strengthening method by installing stay wire was presented. Firstly, a pole mechanics model of 10 kV two-circuit line pole was established. Via the mechanics analysis, considering the wind force, gravity and the stay wire tension, the internal forces and deflection of the pole, and the tensile of the stay wire were derived in analytical form. Then an engineering project was proposed to study the change of the internal forces and deflection of poles before and after being reinforced by stay wire under wind speed 45 m/s. Finally, the effect of wind speed and reinforcing location on the pole were discussed. The results indicate that installing stay wire can greatly enhance the wind capacity of the lines. The best enhancing location is at 0.5 m~0.8 m below the bottom pole arm. The research results can provide theoretical references on the design and strengthening of distribution lines.

Key words: typhoon; two-circuit line; stay wire reinforcing; mechanics analyze; pole

收稿日期: 2017-01-05

作者简介: 张胜强 (1985-), 男, 广东惠州人, 主要从事配电管理方面的研究。E-mail: zhangshengqiang_hz@163.com

0 引言

每次台风登陆时, 台风多发地架空线路都会遭受不同程度破坏^[1]。输电线路杆塔是支承架空输电线路导线和地线, 其安全可靠直接关系整个输电线路的安全运行。另外, 台风及以上灾害性天气给电力系统的安全运行带来了极大的威胁。输电线路杆塔结构研究面临新的挑战^[2]。

2006 年, 揭东电力局 10 kV 双回输电线路在台风“珍珠”的袭击下, 5 根直线电杆连续倒杆, 严重影响了电网的安全经济运行^[3]。潘彩容^[4]对这些单杆双回路电杆进行了受力分析, 计算了电杆的最大弯矩, 提出普通 J 级 15 m 电杆不能满足风速为 30 m/s 的使用工况的技术要求, 但其计算模型忽略了横担和绝缘子所受的风荷载, 也没有考虑自重对抗弯承载力的影响; 兰颖^[5]对单回路电杆和导线进行了受力分析, 计算了受风荷载作用下导线的截面应力和电杆的弯矩, 但没有分析其挠度和承载能力。2014 年“威尔逊”台风之后, 南方电网编制了《配电线路防风设计规范》和《配电设施防风加固技术措施》^[7], 提出可以通过安装拉线、加强杆基和选用复合材料杆等措施来提高电杆的防风能力。2015 年, 台风“彩虹”在湛江地区登陆, 湛江电网未加固的电杆有 7.40% 受损, 而已加固电杆的受损比例只有 1.12%, 说明加固后的线路防风效果明显提高。

罗俊平^[8]提出, 10 kV 及以下配电线路防风拉线安装范围相隔不得大于 3 基杆; 陈永秋^[9]认为, 对于 0.4 kV 架空线路, 现场具备条件的水泥电杆均应安装防风拉线, 至少每连续 5 基直线杆应设置一组防风拉线; 李有铖等^[10]指出, 对于单回线路, 当耐张段内连续直线杆超过 5 基时, 应在中间位置的电杆加装四向拉线, 对于双回线路, 耐张段内应每隔一基直线杆装设一组防风拉线。因此, 对于安装拉线杆塔加固方法的理论研究亟待解决。

本研究将对 10 kV 双回路杆塔安装防风拉线的问题进行理论探讨, 分析加固后电杆的内力和挠度变化情况, 为安装拉线电杆给予理论指导。

1 配电线路的受力分析

1.1 力学模型

双回路杆塔的示意图如图 1 所示。

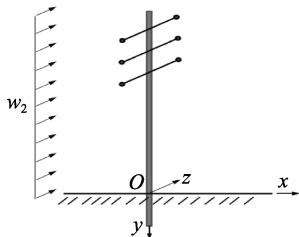


图 1 双回路杆塔示意图

以杆塔接地点为坐标原点 O , 导线的走向为 x 轴, 杆塔竖向下为 y 轴。当风荷载垂直于导线吹袭时, 杆塔的受力最大, 故以风载 w_2 的方向为 z 轴, 垂直于导线。

1.2 导线

导线受力分析如图 2 所示。

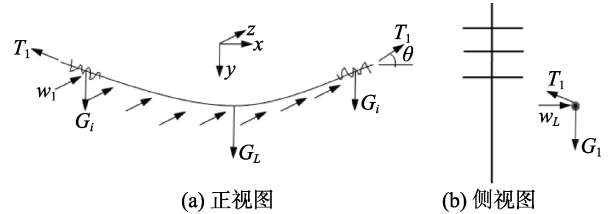


图 2 导线受力分析

取一个档距的导线为研究对象, 如图 2 (a) 所示。其受到的作用力包括: 导线自身重量 G_L , 绝缘子重量 G_i , 风载 w_1 (沿导线均匀分布), 杆塔拉力 T_1 (与水平方向夹角为 θ)。

在图 2 (b) 中,

$$G_1 = G_L + 2G_i \quad (1)$$

$$w_L = s \cdot w_1 + A_i \cdot n \cdot w_0 \quad (2)$$

式中: s —导线的线长; A_i —绝缘子的迎风面面积; n —单根导线上绝缘子的数量; w_1 —导线所受水平风荷载, $w_1 = \alpha \beta_c \mu_z \mu_{SC} d_L \sin^2 \varphi w_0$; α —风压不均匀系数, 由《配电线路防风设计技术规范》确定; β_c —导线的风荷载调整系数, 取 $\beta_c = 1.0$; μ_z —风压高度变化系数, 按《建筑结构荷载规范》取值^[11]; d_L —导线的直径^[12]; μ_{SC} —导线的体型系数, 若 $d_L < 17 \text{ mm}$, $\mu_{SC} = 1.2$, 否则 $\mu_{SC} = 1.1$; φ —风向与导线间的夹角, 计算最不利情形取 $\varphi = 90^\circ$; w_0 —基准风压标准值^[13], $w_0 = v^2 / 1740$; v —基准高度的风速, 由《热带气旋等级》中的划分等级来确定^[13]。

导线两端受到拉力 T_1 作用, 各分量为:

$$\begin{aligned} T_{1z} &= \frac{1}{2} W_L \\ T_{1y} &= \frac{1}{2} G_1 \\ T_{1x} &= T_{1y} \tan \theta \end{aligned} \quad (3)$$

1.3 无拉线杆塔

无拉线的杆塔如图 3 所示。各段的长度在图中标示。

双回路杆塔接线位置分别在 1、2、3、4、5、6, 共 6 个点, 受到导线的作用力, 杆自身重量 G_P , 杆塔所受的水平风荷载 w_2 。

导线的作用力:

$$\begin{aligned} F_{1z} &= 2T_{1z} = w_L \\ F_{1y} &= 2T_{1y} = G_1 \\ F_{1x} &= 2T_{1x} \end{aligned} \quad (4)$$

每个连线点的 F_{iz} 都相同, F_{iy} 也相同。不考虑杆塔两端的不平衡张力, 即 F_{ix} 自平衡。

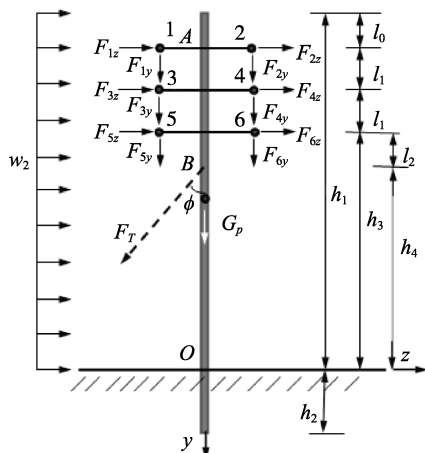


图 3 杆塔受力分析

杆塔所受的水平风荷载:

$$w_2 = \beta_z \mu_s \mu_z D_0 w_0 \quad (5)$$

式中: w_2 —杆塔所受的水平风荷载; β_z —杆塔风荷载调整系数, 杆塔全高不超过 20 m 时, 取 $\beta_z = 1.0$; D_0 —杆的平均外径^[15]; μ_s —杆塔的体型系数, 由《建筑结构荷载规范》确定, 环形截面钢筋混凝土杆取 $\mu_s = 0.7$ 。

1.4 拉线加固杆塔析

笔者在图 3 所示模型的 B 截面加装两根拉线, 在风荷载作用下其中一个产生拉力。与无拉线的杆塔相比, 受力多了一个拉线的 F_T 作用, 其与杆塔的夹角为 ϕ 。

2 内力和挠度计算

2.1 无拉线的杆塔

(1) 轴力

2014 和 2015 年, 超强台风“威尔逊”与“彩虹”在广东湛江登陆, 对配电线路造成了严重破坏, 其中未加固而断裂的杆塔都是在根部折断。只要基础按照设计标准进行设计和施工, 一般不会在地面以下发生破坏。因此只要对杆塔在地面处的截面进行静力分析即可。

由图 3 可知, 截面 O 处的轴力等于 6 个接点点的 y 方向作用力与杆自身重力之和:

$$F_{N1} = 6F_{iy} + G_P \quad (6)$$

(2) 弯矩

导线拉力对电杆 O 截面引起的弯矩为:

$$M_L = 2F_{1z}(h_3 + 2l_1) + 2F_{3z}(h_3 + l_1) + 2F_{5z}h_3 \quad (7)$$

风荷载引起的弯矩为:

$$M_P = \frac{1}{2} w_2 D_0 h_1^2 \quad (8)$$

于是, O 截面的弯矩可表示为:

$$M_{O1} = M_L + M_P \quad (9)$$

(3) 挠度

为简化计算, 将杆塔看成等截面的悬臂梁。考察杆塔最上层横担处 A 截面的挠度:

$$w_{A1} = w_{1,w} + 2w_{1,F_{1z}} + 2w_{1,F_{3z}} + 2w_{1,F_{5z}} \quad (10)$$

$$w_{1,w} = \frac{w_2}{24B_s} (h_1 - l_0)^2 \left[(h_1 - l_0)^2 + 6h_1^2 - 4h_1(h_1 - l_0) \right]$$

$$w_{1,F_{1z}} = \frac{F_{1z}}{3B_s} (h_1 - l_0)^3 \quad (11)$$

$$w_{1,F_{3z}} = \frac{F_{3z}}{3B_s} (h_1 - l_0 - l_1)^3 + \frac{F_{3z}}{2B_s} (h_1 - l_0 - l_1)^2 \times l_1$$

$$w_{1,F_{5z}} = \frac{F_{5z}}{3B_s} (h_1 - l_0 - 2l_1)^3 + \frac{F_{5z}}{2B_s} (h_1 - l_0 - 2l_1)^2 \times 2l_1$$

式中: B_s —杆塔的等效弯曲刚度, 取 $B_s = 0.85E_c I_0$; E_c —混凝土的弹性模量; I_0 —杆塔的等效惯性矩^[15]。

2.2 拉线加固杆塔

(1) 拉线的拉力

因为增加了拉线, 杆塔变成一次超静定结构, 需要首先将拉线的拉力计算出来。杆塔安装拉线的抱箍处 B 的挠度:

$$w_{B2} = w_{2,w} + 2w_{2,F_{1z}} + 2w_{2,F_{3z}} + 2w_{2,F_{5z}} - w_{F_T} \quad (12)$$

$$w_{2,w} = \frac{w_2}{24B_s} h_4^2 (h_4^2 + 6h_1^2 - 4h_1 h_4)$$

$$w_{2,F_{1z}} = \frac{F_{1z}}{6B_s} h_4^2 [3(h_1 - l_0) - h_4]$$

$$w_{2,F_{3z}} = \frac{F_{3z}}{6B_s} h_4^2 [3(h_1 - l_0 - l_1) - h_4] \quad (13)$$

$$w_{2,F_{5z}} = \frac{F_{5z}}{6B_s} h_4^2 [3(h_1 - l_0 - 2l_1) - h_4]$$

$$w_{F_T} = \frac{F_T \sin \phi}{3B_s} h_4^3$$

拉线的拉伸长度为:

$$w_{2B} = \frac{\Delta l}{\sin \phi} = \frac{F_T h_4}{EA \sin \phi \cos \phi} \quad (14)$$

式中: EA —拉线的拉伸刚度。

变形协调条件为杆塔 B 截面的挠度与拉线的伸长量之比等于夹角的正弦函数, 由式 (12, 14), 即可以解出拉线的拉力 F_T :

$$F_T = \frac{w_{2,w} + 2w_{2,F_{1z}} + 2w_{2,F_{3z}} + 2w_{2,F_{5z}}}{\frac{h_4}{EA \sin \phi \cos \phi} + \frac{\sin \phi}{3B_s} h_4^3} \quad (15)$$

(2) 轴力

截面 O 处的轴力, 比式 (9) 多了一个拉线拉力 F_T 在 y 方向的投影, 如下式所示:

$$F_{N2} = 6F_{iy} + G_P + F_T \cos \phi \quad (16)$$

(3) 弯矩

拉线抱箍处 B 截面的弯矩, 如下式所示:

$$M_{B2} = \frac{1}{2} w_2 (h_1 - h_4)^2 + 2F_{1z}(2l_1 + l_2) + 2F_{3z}(l_1 + l_2) + 2F_{5z}l_2 \quad (17)$$

此时截面 O 处的弯矩比式 (9) 要小, 如下式所示:

$$M_{O2} = M_{O1} - F_T \sin \phi \cdot h_4 \quad (18)$$

从现场破坏情况看, B 截面是杆塔弯矩最大的截面。

(4) 挠度

杆塔最上层横担处 A 截面的挠度, 可以由式 (10) 进行修正来表示:

$$w_{A2} = w_{A1} - \frac{F_T \sin \phi}{3B_s} h_4^3 - \frac{F_T \sin \phi}{2B_s} h_4^2 (2l_1 + l_2) \quad (19)$$

3 案例分析

3.1 工程案例数据

南方电网湛江坡头局梧村某段 10 kV 线路如图 4 所示。

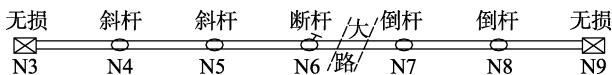


图 4 广东某 10 kV 线路

N3, N9—铁塔; N4~N8—电杆, 共一个耐张段

该耐张段的基础数据如表 1 所示。

表 1 耐张段基础数据

等效刚度/N·mm ²	导线型号	绝缘子型号	档距/m	风速/m/s
8.09×10^6	JL/GIA-150/20	PSQ-15T	60	45

将表 1 的数据代入方程 (6, 9, 11), 可以计算得到未安装拉线时线杆塔的内力及挠度, 如表 2 所示。

表 2 杆塔的内力及挠度

	轴力/N	弯矩/N·m	挠度/m	拉线拉力/N
未安装拉线	22 006.3	78 330.4	0.364	
安装拉线	31 432.3	-9 331.7	0.031	13 330.4

3.2 安装拉线加固

在该工程案例中, 若对杆塔进行安装拉线加固, 即在最下层横担下方 0.8 m 处安装 GJ50 型钢绞线进行加固, 代入方程 (15, 16, 18, 19) 进行计算, 可以得到杆塔的内力、挠度及拉线的拉力。

由表 2 可知, 安装拉线之后, 杆塔的轴力增大了 42.8%, 杆塔自由端的挠度从 0.364 m 减小为 0.031 m,

而根部的弯矩绝对值降为原来的 12%。由此可见, 安装拉线可以大大提高电杆的抗风能力, 加固效果非常明显。

3.3 风速对加固效果的影响

为讨论不同风速下拉线加固杆塔的效果, 笔者在 3.2 节所述案例的基础上, 计算风速在 35 m/s~55 m/s 范围内杆塔的内力、挠度和拉线的拉力, 结果如表 3 所示。

表 3 风速对加固效果的影响

风速/m/s	拉线拉力/N	轴力/N	弯矩/N·m	挠度/m
35	8 064.1	27 708.4	-5 645.1	0.019
40	10 532.7	29 454.0	-7 373.2	0.024
45	13 330.4	31 432.3	-9 331.7	0.031
50	16 457.3	33 643.3	-11 520.6	0.038
55	19 913.3	36 087.1	-13 939.9	0.046

由结果可知, 随着风速的提高, 电杆的内力和挠度也随着增大, 在超强台风(中心附近最大风速达到 55 m/s 以上)情况下, 电杆的挠度也仅是 0.046 m, 根部弯矩也远小于 45 m/s 风速下未加固时的弯矩(此时杆塔最危险截面在拉线抱箍处)。

3.4 安装位置对加固效果的影响

将拉线安装在电杆的不同位置, 会产生不同的加固效果。由于双回线路有 3 条横担, 牵挂导线较多, 不适宜在横担以上位置安装拉线抱箍。横担的竖向间距为 0.8 m, 因此工程中通常以 0.8 m 为电杆的考察间距。改变拉线的位置(B 截面到第 3 层横担的距离), 其他参数同 3.2 节, 得到的结果如表 4 所示。

表 4 拉线安装位置对加固效果的影响

拉线位置/m	拉线拉力/N	轴力/N	弯矩/N·m	挠度/m
0	11 956.9	30 461.1	-7 063.1	0.023
0.8	13 330.4	31 432.3	-9 331.7	0.031
1.6	14 916.1	32 553.5	-11 321.5	0.043
2.4	16 757.6	33 855.7	-12 910.3	0.059
3.2	18 906.3	35 375.0	-13 914.1	0.08

由表 4 可知, 随着拉线安装截面到最下层横担的距离增大, 拉线拉力和杆塔内力也随之增大。理论上安装拉线的最合适位置为最下面横担处, 此时, 拉线拉力、杆塔根部弯矩、杆塔轴力以及 A 截面处挠度均为最小。为了保证绝缘和电气操作的安全性, 拉线位置应取最下面横担以下 0.5 m~0.8 m 之间为佳。

(下转第 1204 页)

本文引用格式:

张胜强, 王俊武, 雷炳晖, 等. 10 kV 双回线路杆塔力学模型及其安装拉线的加固效果研究[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1192-1195, 1204.

ZHANG Sheng-qiang, WANG Jun-wu, LEI Bing-hui, et al. Mechanics model of 10 kV two-circuit line pole and the reinforcing effectivity of installing stay wire[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(10): 1192-1195, 1204.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>