

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.06.020

10 kV 配电线路抵御强台风能力的数值研究

邓惠华¹, 郭琳¹, 黄少辉², 戚杰², 王俊武³, 覃荣山³, 张文雅³

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

摘要:针对沿海地区配电线路抵御强台风能力不足的问题,对10kV配电线路抗台风的能力进行了数值研究,讨论了地基土与防风拉线对电杆防风能力的影响。采用ABAQUS/CAE建立了10kV单回路配电线路一个标准段的有限元模型,模型中包括导线、混凝土电杆、横担、拉线和地基土等;利用等效惯性加速度模拟线路所受风荷载,然后对模型在不同等级风速下进行了变形分析,通过数值解与理论解的对比,验证了数值模型的正确性。研究了3类线路的弯矩、挠度和应力等问题的变化规律,包括:考虑地基土作用、考虑拉线加固处理以及两者都没考虑的3类模型。研究结果表明,土体变形对电杆的挠度变化有叠加效应,安装拉线加固后电杆最大弯矩明显降低。

关键词:数值研究;配电线路;强台风;防风能力;ABAQUS

中图分类号:TM726;TU852

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)06-0653-06

Numerical simulation on the wind capability of 10 kV distribution lines

DENG Hui-hua¹, GUO Lin¹, HUANG Shao-hui², QI Jie², WANG Jun-wu³,
QIN Rong-shan³, ZHANG Ya-wen³

(1. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Huizhou 516001, China;
2. Huizhou Electric Power Design Institute, Huizhou 516001, China;
3. Guangzhou Power Electric Technology Co., Ltd., Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aiming at the problem that the distribution lines' insufficiency of capability to withstand violent typhoon, a numerical study on the anti wind capability of 10 kV distribution lines was presented, and the effect of foundation soil and stay wire on the pole were discussed too. Firstly, A finite element model of a standard line, including the line, pole, pole arm, stay wire and foundation soil were established by ABAQUS/CAE. Then it was used to discuss the deformation under different wind speeds after the wind loading was applied by equivalent inertial acceleration. Comparing the numerical solutions with theoretical ones, the finite element model could be verified. Finally, the bending moment, deflection and stress distribution of the pole of three kinds of lines were investigated, which covered the effect of foundation soil, strengthened with stay wire and none of both. The results indicate that the soil deformation has superimposed effect on the deflection of pole and stay wire can decrease the maximum bending moment of pole.

Key words: numerical study; distribution line; violent typhoon; anti wind capability; ABAQUS

0 引言

台风登陆时电网线路都会遭受不同程度破坏,其中最为严重的是配电架空线路^[1]。目前,国内外关于

电网抗灾的研究主要集中在输电线路^[2],对配电线路的理论研究较少,而且仅为定性的措施分析。为了加强输电系统的安全,电网公司每年都要投入巨大的人力和物力对配电线路进行加固改造^[3]。由于缺乏准

确的数值仿真和量化分析,配电线路的防风加固措施投资巨大成效少。对配电线路在台风作用下的力学响应进行准确分析,研究杆塔和导线抵御强台风的能力,是配电线路加固改造的理论基础。

严波等^[4]针对 500 kV 同塔双回输电线路,建立了塔线耦合有限元模型,对不同脱冰工况下塔线耦合体系的动力响应做了数值研究,其研究对象是铁塔和导线;楼文娟等^[5]运用有限元法和谐波叠加法,分析了以 500 kV 耐张段 8 跨线路的动态风偏响应。以上都是针对输电线路的研究,其研究方法完全可以适用于配电线路的受力分析。邵天晓^[6]研究了电线类型及力学性能、断线和安装情况时的电线应力,电线因风引起的振动、振荡等问题。而对于配电线路的抗风能力、钢筋混凝土电杆的内力和变形的详细研究,尚未见报道。

本研究针对 10 kV 配电线路抵御台风能力进行数值研究。

1 理论分析

1.1 水平风荷载计算

10 kV 配网线路在设计时主要考虑导线和混凝土电杆本身所受的荷载,包括自重和风荷载,其中水平风荷载对杆塔的强度起决定性因素。根据设计规程^[7],作用于导线上的水平风荷载为:

$$w_x = \alpha \mu_s d_L \sin^2 \theta w_0 \quad (1)$$

式中: α —风荷载档距系数,根据设计风速确定; d_L —导线或者地线的外径; μ_s —风荷载体型系数; θ —风向与导线方向的夹角, $\theta = 90^\circ$; w_0 —基准风压标准值,根据基准高度的风速计算^[8]。

作用于混凝土电杆上的水平风荷载为:

$$w_s = \beta \mu_s \mu_z A w_0 \quad (2)$$

式中: β —风振系数,与杆塔高度有关; μ_s —风荷载体型系数,按 GB50009-2001 确定; μ_z —风压高度变化系数,按照《建筑结构荷载规范》取值; A —混凝土电杆迎风面的投影面积。

1.2 单回路杆塔力学建模

本研究对 10 kV 配电线路进行受力分析,假设整个耐张段线路的杆塔差异化不明显,取一个代表性的标准段进行分析,该单元包括一根杆塔和两边各一半平均档距长度的导线。所建立的简化的单回路杆塔力学模型,如图 1 所示。

图 1 中: O 点代表混凝土电杆与地面接触点,沿水平向右(即风荷载方向)为 z 轴,沿电杆向下为 y 轴,线

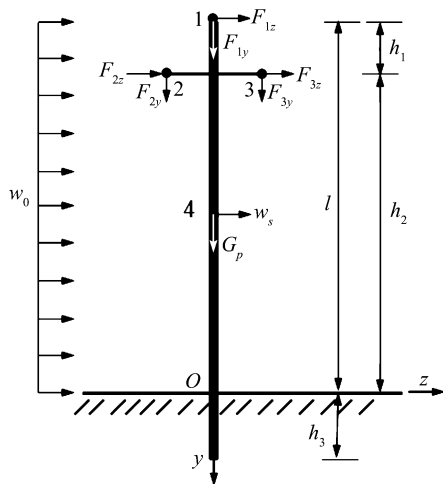


图 1 杆塔力学模型

1,2,3 点—架空导线通过绝缘子与电杆连接的点;
 l —电杆地面以上长度; h_1 —1 点与 2,3 点的竖向距离;
 h_2 —2,3 点离地面的距离; h_3 —电杆埋深长度;4 点—电杆受风荷载的等效作用点; w_0 —简化的水平风荷载; F_{1x} ,
 F_{2x}, F_{3x} —导线的水平风荷载; F_{1y}, F_{2y}, F_{3y} —导线的自重荷载; w_s —电杆所受水平风荷载; G_p —电杆自重

路方向为 x 轴,建立坐标系。

笔者对杆塔进行受力分析,其内力包括轴力、剪力和弯矩,设计规程中常用弯矩值作为选取电杆的代表值,混凝土电杆产品的生产以开裂弯矩为控制指标^[9],以开裂弯矩的大小标定电杆的等级,因此本研究着重对电杆的弯矩进行分析。本研究主要考虑杆塔的抗风承载力,故在此不考虑基础倾覆,可假设 O 截面以下为固结,杆塔最大弯矩在 O 截面处,因此 O 截面认定为最危险截面。

O 截面处的弯矩为:

$$M_o = k(M_L + M_p) \quad (3)$$

式中: k —荷载增大系数,式中考虑金具受风荷载作用对杆塔的影响,一般取 $k = 1.15$; M_L —导线对杆塔引起的弯矩; M_p —杆身所受风荷载引起的弯矩。

1.3 杆塔的抗风承载力

根据线路所在区域历年台风灾害统计,预测线路将遭受的强台风风速,以最大风速为基准风速,通过公式(3)计算出控制截面的弯矩,对比混凝土电杆承载能力极限荷载 M_u ,当满足 $\gamma_Q k M_o < M_u$ 时,该配电线路杆塔能承受预测强台风的作用,否则需要对线路杆塔进行加固处理(其中: γ_Q —活载作用分项系数,取 $\gamma_Q = 1.4$)。

混凝土电杆的承载能力极限荷载 M_u 为:

$$M_u = \beta_u M_k \quad (4)$$

式中: M_k —混凝土电杆开裂弯矩; β_u —承载力综合检

验系数,取 $\beta_a = 2.0$ 。

2 数值模拟

本研究将利用 ABAQUS 对杆塔在台风作用下的力学响应进行数值模拟^[10]。

2.1 有限元模型

本研究以广东某沿海 10 kV 单回路架空线路的一标准段为研究对象,利用 ABAQUS/CAE 软件建立杆线耦合体系有限元模型。电杆中的混凝土划分为 5 760 个实体单元(C3D8R),高强钢丝划分为 382 个桁架单元(T3D2),横担划分为 200 个梁单元(B32)。导线通过索单元模拟,但是在 ABAQUS 没有可以直接使用的索单元,可以通过不可压缩的桁架单元模拟,每根导线划分为 1 202 个桁架单元(T3D2)。绝缘子与导线的连接采用“Coupling”连接关系,即绝缘子仅约束导线的平动自由度,绝缘子与横担采用固定约束,横担抱箍、高强钢丝采用“Embedded region”约束关系嵌入混凝土内。

有限元模型中主要包括 3 类材料本构:混凝土采用损伤塑性模型、钢材采用理想弹塑性模型、土体采用摩尔库伦模型。导线通过文献[11]提供的数值方法确定导线在自重下的初始形状。本研究建立一个标准段且未考虑地基土和防风拉线的有限元模型,如图 2 所示。

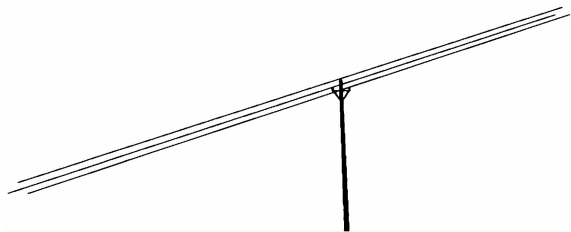


图2 有限元模型

2.2 荷载模拟

配网线路模型的荷载包括重力和风荷载,重力荷载通过施加重力加速度建立,包括导线、横担以及混凝土电杆 3 部分的重力荷载;风荷载主要考虑导线和混凝土电杆所受风载。

在模型中,导线上的风荷载通过转化为等效重力加速度施加^[12]。首先,将导线水平方向的风荷载转化为等效惯性力 P_1 :

$$P_1 = \rho_e V_1 G_{w1} \quad (5)$$

式中: ρ_e —导线的等效密度, V_1 —导线的体积, G_{w1} —导线的风荷载等效惯性加速度。

由风荷载转化的导线惯性加速度 G_{w1} 为:

$$G_{w1} = \frac{P_1}{\rho_e V_1} \quad (6)$$

同理,作用在混凝土电杆上的风荷载也以等效惯性加速度 G_{w2} 施加:

$$G_{w2} = \frac{P_2}{\rho_c V_2} \quad (7)$$

式中: P_2 —等效惯性力, $P_2 = w_s; \rho_c$ —电杆所用混凝土的密度; V_2 —地面以上混凝土电杆的体积。

2.3 结构和材料参数

该线路为 10 kV 架空线路,模型中包含的主要构件有:混凝土电杆、横担、导线以及拉线等。混凝土电杆为 M 级高强度电杆,杆高 12 m,电杆埋深 2 m。根径 350 mm,梢径 190 mm,壁厚 60 mm,混凝土等级为 C60,配置的高强钢丝,强度标准值为 1 470 MPa,抗拉强度设计值为 1 040 MPa,抗压强度设计值为 410 MPa,弹性模量为 205 GPa。导线型号为 JL/GIA-150/20,直径 16.67 mm,导线截面积 164.5 mm²,等效密度为 3 339.8 kg/m³,综合弹性系数为 73 GPa,换算抗拉强度为 283.5 MPa。线路平均档距为 60 m。横担材料为 Q345 钢,型号为 $\angle 75 \times 6$,斜撑材料为 Q235 钢,型号为 $\angle 50 \times 5$,弹性模量为 201 GPa。绝缘子采用 PSQ-15T,高度 0.28 m,绝缘臂腕材料为 Q235 钢。

3 计算结果

本研究将对这 3 种模型分别进行分析。

3.1 第一类模型

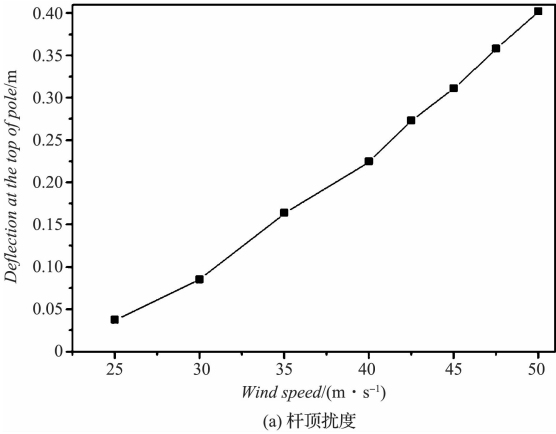
第一类模型指未考虑地基土与防风拉线的简化模型,电杆在截面 O 处考虑为固定约束,以风速为 25 m/s ~ 50 m/s 的 8 个等级模拟杆线模型的力学响应。

对比由有限元模型计算的数值解与公式(4)计算的理论解发现,最大相对误差 13.94%,最小相对误差为 -0.8%。在风速小于 40 m/s 时,数值解基本大于理论解,风速在强台风等级的 41.5 m/s ~ 50.9 m/s 范围内时,数值解小于理论解,主要原因在于风速等级越高线路变形越大,线路与杆塔变形对风荷载作用有一定减弱效应,然而理论计算并没有考虑线路的变形对风荷载作用的影响。在没有考虑增大系数 k 之前,即没有考虑金具对电杆受力的影响时,理论解偏小。由此可见,考虑增大系数对工程设计有利,且线路更加安全。

电杆截面 O 处在不同风速等级下的弯矩值如表 1 所示。

表 1 截面 O 处的弯矩值

风速 $v/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	理论解 $M_o/(\text{kN} \cdot \text{m})$	考虑增大系数的理 论解 $kM_o/(\text{kN} \cdot \text{m})$	数值解 $M_1/(\text{kN} \cdot \text{m})$	相对 误差/(%)
5	22.73	26.14	25.42	-2.75
30	29.43	33.84	36.60	8.16
35	37.85	43.53	49.6	13.94
40	49.38	56.79	59.94	5.55
42.5	55.75	64.11	63.60	-0.8
45	62.5	71.87	70.07	-2.5
47.5	69.63	80.08	76.53	-4.43
50	77.15	88.73	83.73	-5.64



当风速为 50 m/s 时,弯矩理论解为 77.15 kN · m,根据测算杆塔抵御强台风能力的条件,当满足 $\gamma_Q k M_o < M_u$ 时,该配电线路杆塔能承受预测强台风的作用。计算 $\gamma_Q k M_o = 124.21 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $M_u = 117 \text{ kN} \cdot \text{m}$,可知 $\gamma_Q k M_o > M_u$,表明电杆已接近破坏。但是根据有限元模拟结果发现,钢丝的最大 Mises 等效应力为 388.3 MPa,钢筋还未达到抗拉强度设计值 1 040 MPa,且最大应力位于截面 O 处。由此可见,电杆的承载能力极限荷载 M_u 存在一定的安全储备。

第一类模型电杆的扰度变化曲线图如图 3 所示。

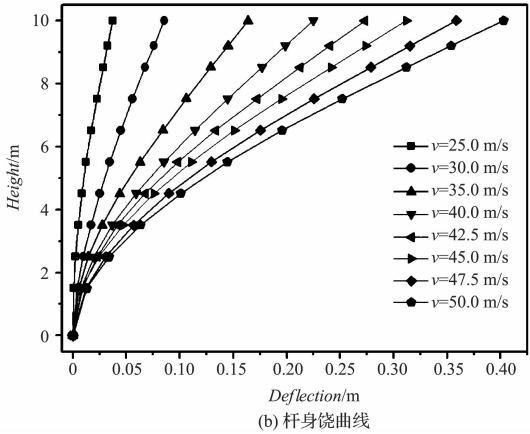


图 3 第一类模型的电杆扰度值

电杆顶部扰度随风速的变化如图 3(a)所示,从图中可知电杆顶部的扰度随风速增大接近线性增长,且随着风速增强斜率有增大的趋势。在不同风速下电杆的扰曲线变化情况如图 3(b)所示,可以看出,当风速大于等于 35 m/s 时,即风速在台风等级范围内时,杆身扰度急剧增大。

3.2 第二类模型

第二类模型为考虑地基土作用的模型,且考虑电杆在半径 1 m 范围内土体的影响。材料本构采用摩尔库仑模型,假设土质为普通黏土,土体划分为 1 440 个实体单元(C3D8R),具体参数如表 2 所示。

表 2 土体参数

土质类别	压缩模量 E_s/MPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	内聚力 C/kPa	内摩擦角 $\beta/(^{\circ})$	剪胀角 $\varphi/(^{\circ})$
黏土	18	0.3	1 880	107	35	17.5

第二类模型电杆扰度的变化曲线如图 4 所示。

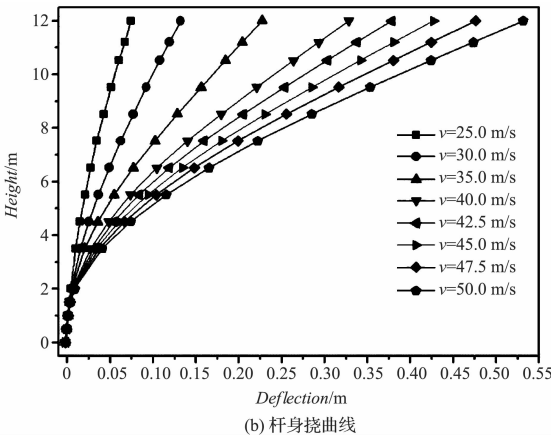
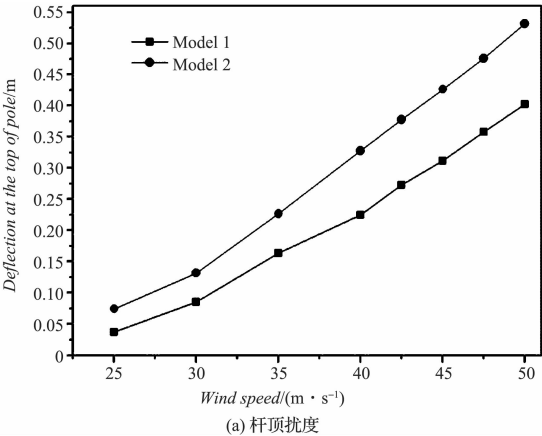


图 4 第二类模型的电杆扰度值

从图4(a)可以发现,在同一风速下第二类模型中电杆顶部扰度大于第一类模型对应的电杆扰度,增大约6 cm~13 cm,原因在于第二类模型中考虑了土体变形对电杆受力的影响,土体的变形对电杆扰度变化有叠加效应。对比图3(b)发现,图4(b)所示杆身扰度在考虑土体影响之后增大明显,且电杆扰度为零的点位于地面以下约1.2 m的位置,而理论计算假设截面O处电杆扰度为零。由于第二类模型中采用的地基土参数为强度较高的黏土,若换为强度较低的软塑土,土体压缩变形将加剧,导致电杆扰度进一步增大。根据图4(a)和4(b)对比发现,线路与杆塔变形对风荷载作用有一定减弱效应,由此可知电杆所在的地基土土质越差,电杆发生倒杆破坏的风险大于断杆破坏的风险。

3.3 第三类模型

第三类模型为考虑电杆加固后的模型,加固方式

为安装拉线加固,模型中拉线和横担斜撑共用一个抱箍,拉线与电杆成30°角,拉线型号采用GJ50型钢绞线。

与第一类模型O截面处的弯矩进行对比,可以发现,安装拉线之后电杆在O截面处的弯矩急剧减小,降低率 γ_1 约为94%,原因在于加固之后的电杆受力体系发生改变,悬臂部分电杆长度缩短,而且加固之后随着风速的变化,O截面处的弯矩值变化不大。此时最大弯矩发生在拉线抱箍截面,电杆会首先在此截面发生破坏,受灾现场的情况也验证了这一点。与加固前模型中最大弯矩对比发现,最大弯矩同样降低较大,降低率 γ_2 约为87%。即使风速在强台风等级的41.5 m/s~50.9 m/s范围内,拉线加固效果同样明显。安装拉线加固后电杆的弯矩值如表3所示。

表3 弯矩值的对比

风速 $V/(m \cdot s^{-1})$	电杆O截面处弯矩数值解 $M_1/(kN \cdot m)$			拉线抱箍截面弯矩	最大弯矩降低率
	第一类模型	第三类模型	弯矩降低率	$M_2/(kN \cdot m)$	$\gamma_2/(%)$
25	25.42	2.19	91.38	2.27	91.07
30	36.60	2.71	92.60	3.46	90.55
35	49.6	3.07	93.81	5.11	89.70
40	59.94	3.34	94.43	7.23	87.94
42.5	63.60	3.47	94.54	8.36	86.86
45	70.07	3.73	94.68	9.53	86.40
47.5	76.53	4.2	94.51	10.54	86.23
50	83.73	4.73	94.35	11.60	86.15

第三类模型的扰度变化曲线如图5所示。

从图5(a)可以发现,拉线加固之后的杆顶扰度减小明显,随着风荷载增大杆顶扰度也并没有较大增长,较之第一类模型和第二类模型,杆身扰度一直保持在

一个较低的水平。图5(b)显示,杆身扰曲线在拉线抱箍截面有一个转折。由此可见,安装拉线加固后的电杆,即使在强台风作用下电杆的扰度亦非常小,加固效果很明显。

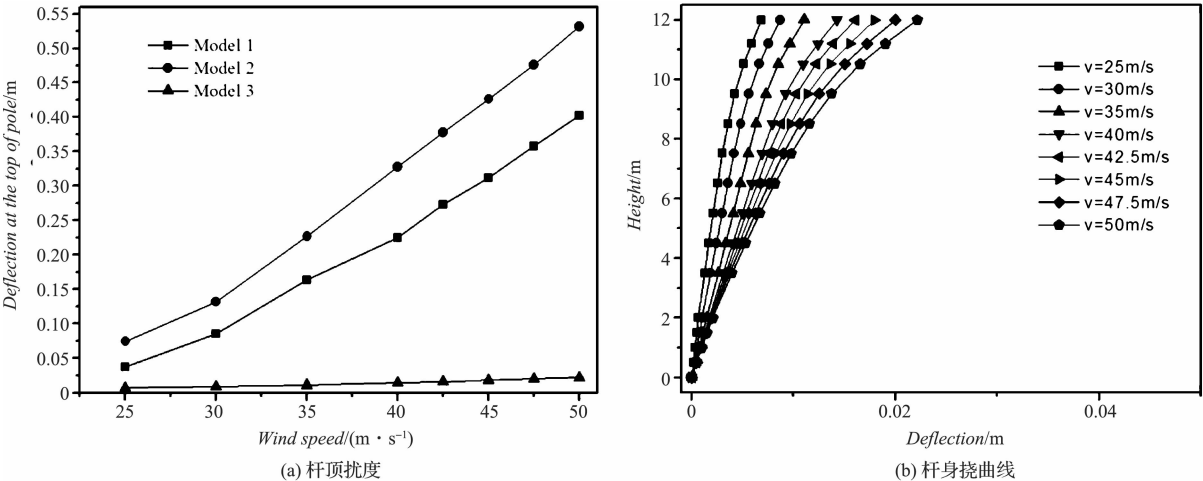


图5 第三类模型的电杆扰度值

观察模型的应力云图发现,电杆在安装拉线抱箍位置的混凝土和钢丝的应力明显大于电杆其他截面,

增大了电杆杆头断裂的风险。笔者建议在加固设计时对拉线抱箍的尺寸进行详细计算。

4 结束语

本研究通过 ABAQUS 软件建立了 10 kV 配网线路的一个标准段空间耦合有限元模型,以设计规程为基础分析电杆内力,对比理论解和数值解验证了模型的正确性,并对不同风速下线路的力学响应进行研究。

研究表明:(1)土体变形对电杆的扰度变化有叠加效应,电杆所在的地基土土质越差,相同风荷载作用下电杆扰度越大,电杆发生倒杆破坏的风险大于断杆破坏的风险;(2)安装拉线加固后电杆最大弯矩明显降低,降低率 γ_2 约为 87%;电杆扰度同样降低较大,在风速 $v = 50$ m/s 时,最大杆顶扰度为 0.022 m,远远小于加固前的杆顶扰度。

参考文献(References):

- [1] WANG Feng, LI Li-juan, LI Can-bing, et al. Procedure and model of anti-disaster differentiated planning for a power distribution system[J]. **ASCE, Journal of Energy Engineering**, 2016, 142(1): 1-8.
- [2] GANGULY S, SAHOO N C, DAS D. Recent advances on power distribution system planning: a state-of-the-art survey [J]. **Energy System**, 2013, 4(2): 165-193.

- [3] 陈永秋,农少安,杨 玺,等.沿海地区低压架空线路防风加固技术措施探讨[J]. **电网与清洁能源**, 2014, 30(5): 61-65.
- [4] 严 波,陈科全,肖洪伟,等.风荷载作用下覆冰导线脱冰后的最大横向摆幅[J]. **应用力学学报**, 2013, 30(6): 913-919.
- [5] 楼文娟,杨 悦,卢 明,等.连续多跨输电线路动态风偏特征及计算模型[J]. **电力建设**, 2015, 36(2): 1-8.
- [6] 邵天晓.架空送电线路的电力学计算[M]. 2 版.北京:中国电力出版社, 2003.
- [7] GB50061-2010. 66 kV 及以下架空电力线路设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2010.
- [8] 白国良,刘 明.荷载与结构设计方法[M]. 2 版.北京:高等教育出版社, 2010.
- [9] GB/T 4623-2006. 环形混凝土电杆[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.
- [10] CAX 技术联盟,陈海燕. ABAQUS 有限元分析从入门到精通[M]. 2 版.北京:电子工业出版社, 2015.
- [11] YAN B, LIN X, LUO W, et al. Numerical study on dynamic swing of suspension insulator string in overhead transmission line under wind load[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2010, 25(1): 248-259.
- [12] YAN B, CHEN K, GUO Y, et al. Numerical simulation study on jump height of iced transmission lines after ice shedding[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2013, 28(1): 216-225.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

邓惠华,郭 琳,黄少辉,等. 10 kV 配电线路抵御强台风能力的数值研究[J]. **机电工程**, 2017, 34(6): 653 - 658.

DENG Hui-hua, GUO Lin, HUANG Shao-hui, et al. Numerical simulation on the wind capability of 10 kV distribution lines[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(6): 653 - 658.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 642 页)

- [7] 周 丹. 大功率风力机叶片模态及气动特性分析[J]. **流体机械**, 2015, 43(12): 33-36.
- [8] 林勇刚,李 伟,崔宝玲. 基于 SVR 增量学习算法的变桨距风力机系统在线辨识[J]. **太阳能学报**, 2006, 27(3): 223-229.
- [9] MAUREEN HAND M, BALASMARK J. Non-linear and linear model based controller design for variable-speed wind turbines[J]. **3rd ASME JSME joint fluids engineering conference**, 2005(7): 18-23.
- [10] 陈 彦,李月明. 基于动态模糊神经网络的变桨距系统辨识[J]. **电气技术**, 2011(1): 18-20.
- [11] 曹力仁. 基于 LPV 方法的风力发电机辨识研究[J]. **科技致富向导**, 2015(14): 246-248.

- [12] LAURAIN V, GILSON M, T TH R, et al. Refined instrumental variable methods for identification of LPV Box - Jenkins models[J]. **Automatica**, 2010, 46(6): 959-67.
- [13] ZHAO Y, HUANG B, SU H, et al. Prediction error method for identification of LPV models [J]. **Journal of process control**, 2012, 22(1): 180-93.
- [14] HUANG J, JI G, ZHU Y, et al. Identification of multi-model LPV models with two scheduling variables [J]. **Journal of Process Control**, 2012, 22(7): 1198-208.
- [15] 庞中华,崔红. 系统辨识与自适应控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2009.

[编辑:李 辉]