

DOI: 10.7667/PSPC151184

高压架空输电线路覆冰情况下风险评估研究

王燕, 杜志叶, 阮江军

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 对覆冰情况下的高压输电线路进行了风险评估研究, 建立了有限元计算模型。该模型考虑材料非线性以及塔-线系统耦合特性, 分析了不同覆冰厚度和风速情况下塔-线系统的失效情况。采用基于迭代修正的找形方法, 准确地对导线弧垂进行了初始化设置, 得到了导地线的初始形状和应力。提出杆塔受力安全裕度风险评估方法, 采用回归分析方法得到杆塔的安全裕度曲线, 该曲线直观地描述了杆塔力学失效度与覆冰厚度及风速的关系。计算得到某实际线路单塔失效安全裕度曲线, 获取各基杆塔薄弱点位置, 提出了杆塔的具体改进措施。通过安全裕度曲线对比证明所提出改进措施的正确性和有效性。

关键词: 高压输电线路; 覆冰; 塔-线系统; 安全裕度; 风险评估

Reliability risk evaluation for the high voltage overhead transmission line under icing condition

WANG Yan, DU Zhiye, RUAN Jiangjun

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper analyzes the reliability risk evaluation method for the high voltage overhead transmission line under heavy icing condition. The finite element calculation model which considers non-linear material and coupled character of the tower-line system is built. The stress distribution and deformation of the tower-line system are analyzed considering the ice thickness and wind speed parameters. Based on iterative correction method, a new form-finding method is applied to determine the initial state of the sag, and then both the initial strain range and the shape of the grounding line are determined. Furthermore, tower safety margin evaluation method is proposed. On the basis of finite element calculated results of tower-line system under various ice thickness and wind speed condition, regression analysis is adopted to obtain the safety margin curve of the tower. The safety margin curve intuitively describes the relationship between ice thickness, wind speed and the tower failure rate level. The safety margin curve of the tower of a 500 kV icing transmission line is calculated and the vulnerable area of the tower is obtained. Comparative curve of safety margin demonstrates the validity of the improved corrective recommendations.

Key words: high voltage overhead transmission line; icing condition; tower-line system; safety interval; risk evaluation

0 引言

覆冰是自然界常见的现象之一, 而输电线路的导线、地线和绝缘子覆冰都将不同程度对输电线路的安全稳定运行造成不利影响。2008年我国部分省份出现的罕见冰冻灾害, 对电网造成了大面积的损毁, 诸多科研工作者和科研机构开始对覆冰情况下的输电线路设计标准进行了修订, 电网运行单位也有针对性地开展了地区差异化的电网规划工作^[1-6]。

目前, 对输电塔-线系统覆冰受力分析计算及风险评估的文献相对较少。文献[7]建立了恶劣天气情况下的电网稳定性模型, 该模型主要用于研究在

暴风雪和大风等恶劣天气情况下, 瑞典部分区域输电线路和铁塔的失效特性; 文献[8]提出了在风荷载下的塔线系统解析数值模型, 应用该模型计算得到的数据用于分析塔线系统的动态特性和失效机理; 文献[9]建立了多跨塔-线系统的二维有限元数值计算模型, 分析了脱冰和断线等情况下, 输电线路的铁塔和导线动力响应方面的问题。国内方面, 文献[10]在总结中国输电线路典型覆冰事故的基础上, 对中国输电线路覆冰事故特点、事故原因及防治技术措施进行了总结分析; 文献[11]通过对一例架空地线因覆冰滑动事故, 分析了在微地形、微气象区导线覆冰后产生滑动的原因及危害, 同时提出

了解决方案;文献[12]采用梁单元模拟覆冰输电线,研究了风速、档距长度对舞动幅值及导线舞动过程中张力的影响,为导线舞动的预防及减小舞动的幅值提供了依据。

本文首先建立了输电线路塔-线系统力学分析模型,然后就覆冰塔-线系统安全裕度进行了分析,最后以实际线路为例计算了其杆塔在不同风速和覆冰厚度情况下的单元应力值,对杆塔安全裕度进行了分析并提出结构改进措施。

1 高压架空输电线路力学分析模型

按照有限元力学分析建模要求,高压架空输电线路数值计算模型的建立需要选取正确的杆塔、导、地线单元精确模拟各部件结构特性,设定贴近实际的材料特性,建立精细的塔-线耦合仿真模型,进而通过力学有限元计算来分析高压架空输电线路塔-线结构系统受力情况^[13-14]。

1.1 塔-线结构系统计算模型

有限元模型建模所应用的力学单元如图 1 所示,其中:LINK10 截面为四边形,用以模拟导地线的悬链线模型^[15];铁塔使用 Q345 和 Q235 两种型号角钢,钢截面为“L”形,采用 BEAM188 模拟^[16];覆冰时,利用梁单元 BEAM188 的 ctube 模型在导(地)线外包围一层厚度为 15 mm 的冰。

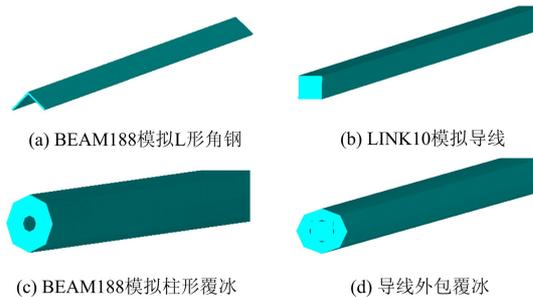


图 1 力学单元应用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical element

根据构建塔-线系统的材料型号和特性选定相应单元,建立用于数值计算的塔-线耦合系统有限元计算模型。在塔建模过程中,为提高工作效率,考虑塔的平面对称特性,首先建立 1/4 塔模型,随即通过两次复制得到塔的整体模型^[13]。

1.2 荷载的施加与计算

将导线离散成单元形式进行数值计算,对导线风荷载采用单位荷载进行施加。导地线水平档距为 l_H 时,其风荷载为

$$W_x = 0.625\alpha\mu_{sc}\beta_c(d+2\delta)l_H(K_h v)^2 \times \sin^2\theta \times 10^{-3} = g_H l_H \beta_c \sin^2\theta \quad (1)$$

对导线风荷载采用单位荷载进行施加,覆冰时,单位风荷载为

$$g = 0.625\alpha\mu_{sc}(d+2\delta)(K_h v)^2 \sin^2\theta \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中: α 为风压不均匀系数; μ_{sc} 为体型系数; β_c 为风载调整系数; v 为设计风速; d 为导地线外径; δ 为覆冰厚度; θ 为风向与导地线轴向间夹角; l_H 为杆塔水平档距; K_h 为导地线平均高为 h 处的风速高度变化系数。

绝缘子的风荷载 F_J 为

$$F_J = n_1 n_2 A_p k_z \frac{v^2}{1.6} \quad (3)$$

式中: n_1 为绝缘子串数; n_2 为每串绝缘子的片数; A_p 为绝缘子受风面积; k_z 为风压高度变化系数。

铁塔风荷载 F_t 为

$$F_t = k k_z k_E A_c \frac{v^2}{1.6} \quad (4)$$

式中: k 为风载体形系数,取 1.3; k_z 为风压高度变化系数; k_E 为风荷载调整系数; A_c 为铁塔杆件挡风面积。

导地线覆冰重力单位荷载为

$$g = 9.8 \times 0.9\pi\delta(d+\delta) \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中: d 为导、地线外径; δ 为覆冰厚度。

输电杆塔节点 i 上的覆冰荷载为

$$F_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \rho g \left(\frac{\pi}{4} h_z D^2 \right) l_j \quad (6)$$

式中: n 为构件数目; ρ 为覆冰密度; h_z 为覆冰直径随高度变化系数; l_j 为单个构件长度。

1.3 塔-线系统初始形态确定

为在重力求解后能够真实模拟线路实际运行状态,同时要考虑塔线间的耦合作用,减小其它工况下(覆冰荷载、风荷载等)有限元计算的误差,必须对塔-线系统的初始形态进行确定^[17]。

塔-线结构系统找形采用如图 2 所示迭代修正法,该方法以重力求解后的导地线应力与其年平均运行应力之差、初始弧垂加上位移之和与设计弧垂之差为判据,通过迭代法来修正导地线的初始应力和初始应变,从而使塔-线系统在重力求解后的状态与线路正常运行状态一致。

迭代修正法采用线性静力求解,不仅避免了刚度矩阵的奇异性,还具有适用于曲线单元和直线杆单元、求解控制简单、实现容易等特点。

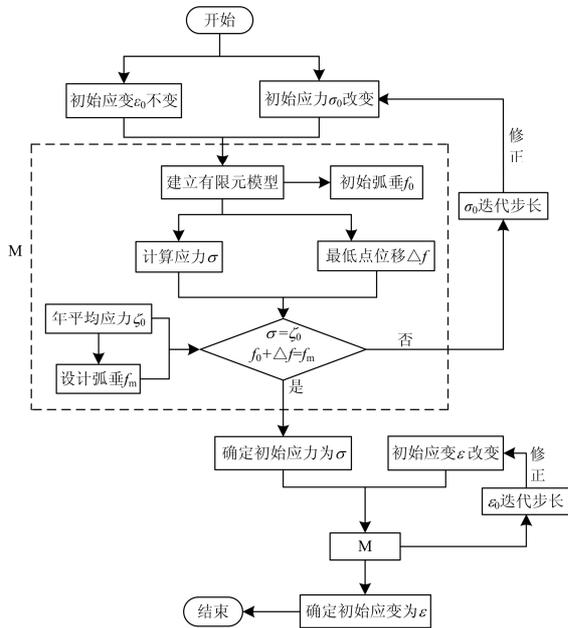


图 2 迭代修正法计算流程图

Fig. 2 Flow diagram of iterative-correction method

2 案例研究

2.1 塔-线系统建模

针对我国西南地区某实际线路 10 mm 冰区(易发生覆冰事故微气候段)的两个耐张段内 41 基杆塔, 建立 1:1 三维有限元模型。按前文所述方法对逐基杆塔进行循环加载计算, 对导、地线及杆塔进行加载, 并对导、地线端部及杆塔脚部施加约束, 得到杆塔在不同风速和覆冰情况下的单元应力值。

图 3 所示为冰厚 10 mm、风速 12 m/s 时一塔两线系统应力分布计算结果示意图。

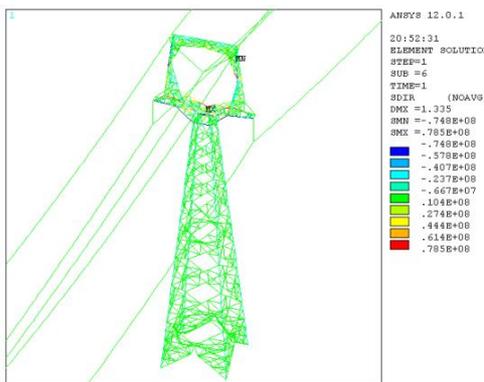


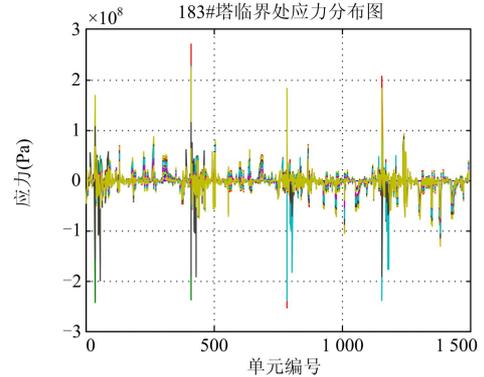
图 3 塔-线系统有限元计算结果

Fig. 3 Finite element calculated results of tower-line system

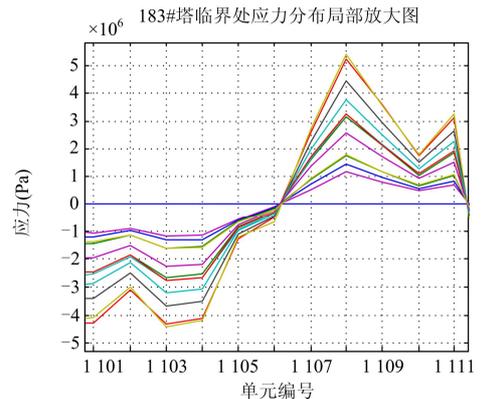
2.2 应力计算分析

以某杆塔为例分析其在不同风速冰厚临界情况

下的应力分布情况, 如图 4 所示, 随着荷载的增大应力值逐步增大且在 20-60、380-510、750-870 及 1150-1250 四个塔头位置的单元应力均出现较大值, 这四个位置对应于杆塔的塔头部分, 说明钢构应力较大值不是单独出现, 在一定范围内钢构的应力值均较大。



(a) 杆塔临界处应力分布图



(b) 杆塔临界处应力分布局部放大图

图 4 杆塔应力分布计算结果

Fig. 4 Stress distribution of the tower

杆塔失效并非一两个钢材超过其屈服强度就失效, 而是大范围的钢材均超过屈服强度时杆塔才会失效。通过图 5 所示临界冰厚风速情况下部分单元应力变化可知, 35 和 409 号单元在冰厚为 28 mm, 风速为 14 m/s 时, 其应力值最大, 此部分最为薄弱; 1239-1241 号单元在冰厚为 12 mm, 风速为 22 m/s 时应力值最大, 此部分最为薄弱。

杆塔最大屈服强度随覆冰和风速变化情况如图 6 所示, 覆冰厚度在 0~12 mm 之间杆塔的轴向应力基本保持不变即此时杆塔的稳定较好; 12~16 mm 之间随着覆冰厚度的增加轴向应力上升较快且上升的曲率较大, 在覆冰厚度为 16 mm 时杆塔的轴向应力达到最大。虽然风速在 20 m/s 和 22 m/s 时最大轴向应力超过了钢材的屈服强度, 但绝大部分钢材还

在屈服强度内, 因此塔-线系统还没有失效; 16~18 mm 时随着覆冰厚度的增加杆塔的轴向应力有所下降, 即覆冰的影响对塔线系统的稳定有促进作用; 随着覆冰厚度的增加, 轴向应力继续增大。覆冰厚度相同时, 随着风速的增大杆塔最大应力增大, 且风速越大效果越明显。

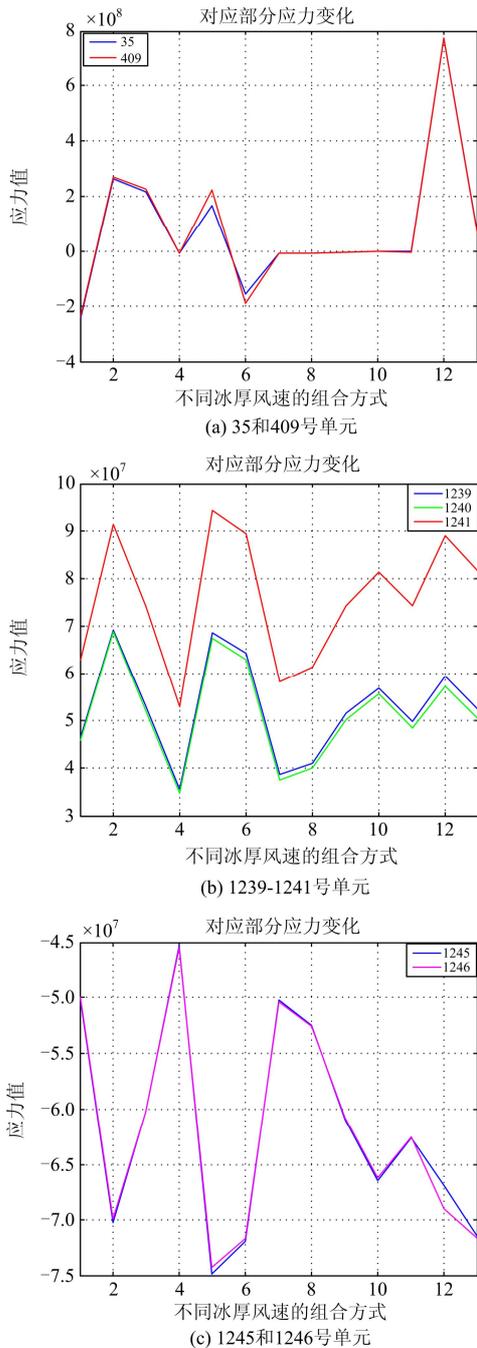


图5 临界冰厚风速情况下部分单元应力变化图
Fig. 5 Partial units stress distribution under critical wind speed and thickness of the ice

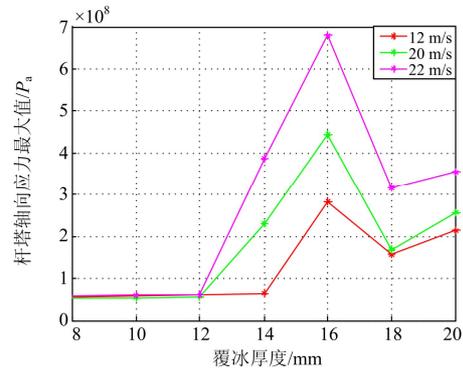


图6 杆塔轴向应力最大值随覆冰增长变化曲线图
Fig. 6 Curve diagram of the tower maximum axial stress variation with increasing thickness of the ice

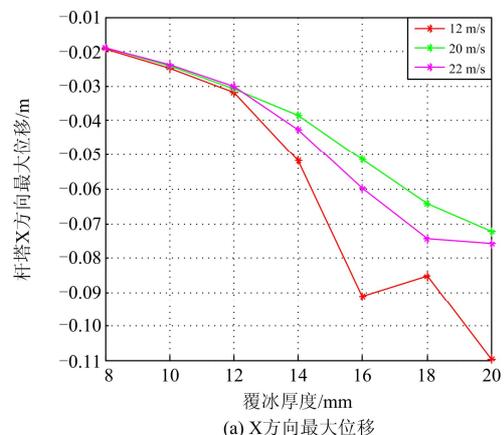
2.3 位移计算分析

杆塔合位移随覆冰和风速变化情况如图 7 所示, 在风速一定时, 覆冰厚度为 0~14 mm 时杆塔上的节点 X 向、Y 向、Z 向和合位移增加的较缓慢即节点位移却会改变较大, 在覆冰厚度为 16 mm 时杆塔上的节点 X 向、Y 向、Z 向和合位移达到最大, 覆冰厚度为 16~18 mm 时杆塔上的节点 X 向、Y 向和合位移有减小的趋势, 即此时覆冰对整个系统的稳定性起到促进的作用, 最后再增加覆冰厚度杆塔上的节点 X 向、Y 向、Z 向和合位移均增加。此规律与应力的变化规律类似, 且风速越大杆塔 X 向、Y 向、Z 向和合位移增大的趋势越明显。

2.4 安全裕度计算

根据杆塔的临界情况下的风速与覆冰厚度, 将获得的数据作为函数关系的因变量, 通过回归分析, 对仿真结果数据进行拟合, 绘出失效评定曲线, 得到精确的安全裕度表达式, 为单塔裕度计算提供基础^[18]。

经过对多项式、指数形式等多种表达式反复计算验证, 对杆塔失效评定曲线对比得到最精确的单塔裕度表达式为



(a) X方向最大位移

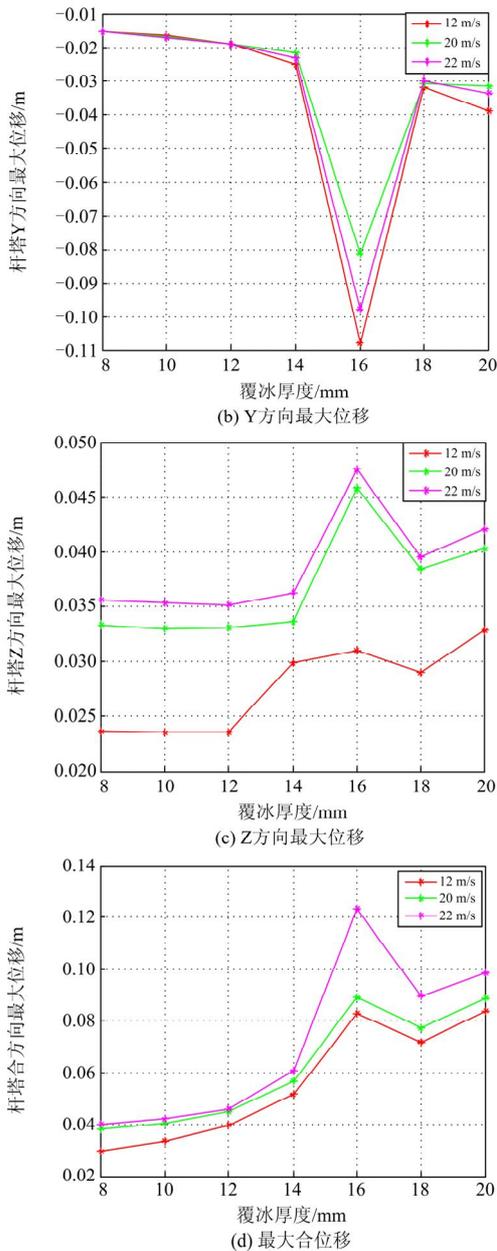


图7 杆塔合位移随覆冰增长变化曲线图

Fig. 7 Tower composition of displacement variation with increasing thickness of the ice

$$y = p_1 e^{p_2 * x} + p_3 e^{p_4 * x} + p_5 e^{p_6 * x} + p_7 + p_8 x \quad (7)$$

经过计算收敛判断标准，此次迭代得到的公式和离散点的拟合相关系数(R)为0.891时满足收敛条件。最终的单塔裕度表达式为

$$y = -7566.9e^{-0.12x} + 3785.9e^{-0.11x} + 3794.6e^{-0.12x} + 12.41 - 0.14x \quad (8)$$

杆塔安全裕度曲线如图8所示，由于该塔在线路中的档距较大，因此曲线在起始位置的值不大，随着冰厚的增加，曲线呈下降趋势，由于力矩的作

用冰厚逐渐达到20mm时呈上升的趋势，当冰厚继续增大时曲线迅速下降。

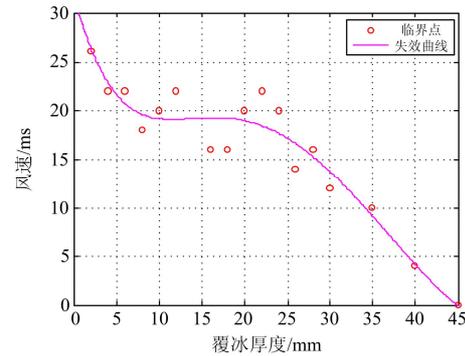


图8 安全裕度曲线图

Fig. 8 Curve diagram of safety margin

对于杆塔受力来说各变量是独立变量，以风速与覆冰厚度两个独立变量求解安全裕度，将拟合的失效函数作为反映各变量分布的失效临界函数 $F=f(v,T)$ ，假定 $[V_i, T_i]$ 取某一组值为 $[10, 10]$ ，则可得杆塔安全裕度范围 P 如图9所示。

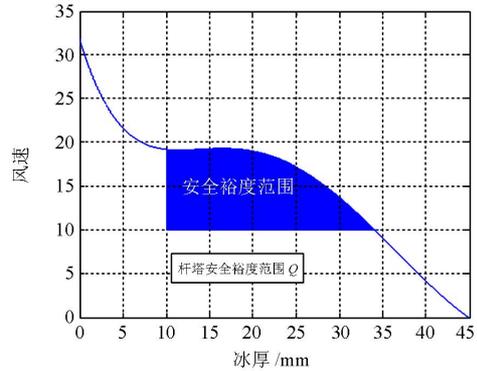


图9 杆塔安全裕度范围

Fig. 9 Safety interval of tower

2.5 杆塔结构改进

通过有限元数值计算结果表明，杆塔薄弱处的位置大部分位于塔头部分，其原因在于相邻的杆塔高差档距较大，承受着两端线路水平档距和高差不同产生的不平衡张力，由此导致塔头部分受到较大的拉力，当应力较大时产生大的变形。

位于塔头之上薄弱钢材的屈服强度为Q235，通过提高钢材屈服强度，采用Q345钢材进行结构改进。如图10所示标红的钢材为采用高强度钢材的部位，采用与之前相同的加载求解方式，得出此种情况下耐张段薄弱位置受力情况，将其进行改进后，该塔的临界条件有了明显的优化。

图11所示为杆塔应力比值最大的十个单元改进前后应力比值对比，证明提高局部钢材强度能够

改变杆塔薄弱位置分布, 使得较高强度的钢材承受更大应力, 从而更充分发挥高强度材料的作用。

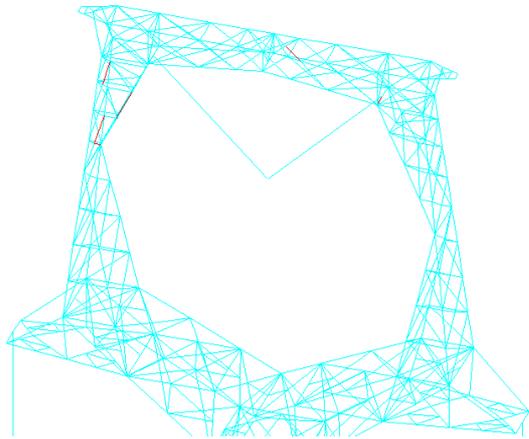


图 10 塔头薄弱处钢材示意图

Fig. 10 Schematic diagram of tower head vulnerable area

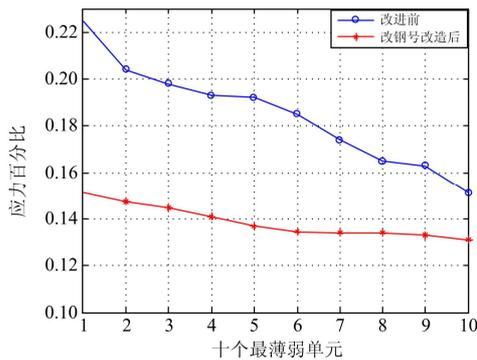


图 11 改进前后杆塔薄弱单元应力比值对比

Fig. 11 Comparative curve diagram of tower vulnerable area unit stress ratio

由图 12 可知, 将薄弱处的钢材换成高强度的钢材后, 在相同风速条件下, 杆塔所能承受的极限冰厚值都有所提高, 提高的范围在 2~6 mm 不等, 改善效果较为明显。

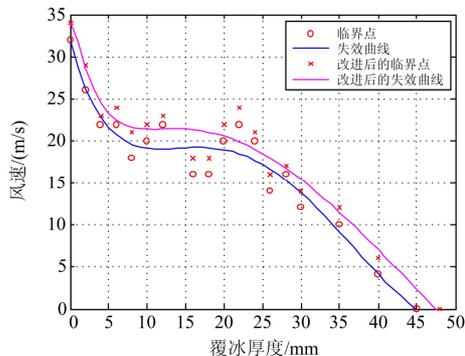


图 12 安全裕度曲线对比图

Fig. 12 Comparative curve diagram of safety margin

3 结论

(1) 高压架空输电线路塔-线系统有限元计算模型结合基于迭代方法的塔-线系统找形分析方法, 实现了多档距线路在冰载荷及风载荷作用下杆塔及线路的受力分布计算。

(2) 将安全预度概念引入杆塔风险分析中, 通过安全预度函数以及安全预度曲线直观给出了杆塔在给定条件下的风险等级。

(3) 以我国西南地区某 500 kV 输电线路为研究对象, 计算不同冰厚及风速情况下的杆塔应力值, 通过回归分析方法, 得出单塔失效安全裕度曲线数据。通过分析杆塔薄弱点位置受力情况, 提出的杆塔改进措施切实可行, 具有实际工程指导意义。

参考文献

- [1] 蒋兴良, 常恒, 胡琴, 等. 输电线路综合荷载等值覆冰厚度预测与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 177-183.
JIANG Xingliang, CHANG Heng, HU Qin, et al. Prediction and experimental study on combined load equivalent ice thickness of overhead transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 177-183.
- [2] 张勇, 严承涌, 谢强. 覆冰特高压输电塔线耦联体系风致动力响应风洞试验[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 94-99.
ZHANG Yong, YAN Chengyong, XIE Qiang. Wind tunnel test on wind-induced dynamic responses of icing ultra high voltage transmission tower-line coupling system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 94-99.
- [3] 赵大乐, 姚秀平, 纪冬梅, 等. 高压输电线路覆冰问题研究[J]. 上海电力学院学报, 2011, 27(1): 19-24.
ZHAO Dale, YAO Xiuping, JI Dongmei, et al. Analysis of the status quo of study on icing on high voltage transmission line[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(1): 19-24.
- [4] 刘赞, 俞集辉, 程鹏. 基于电磁-热耦合场的架空输电线路载流量分析与计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 28-34.
LIU Yun, YU Jihui, CHENG Peng. Analysis and calculation on the ampacity of overhead transmission lines based on electromagnetic-thermal coupling fields[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 28-34.
- [5] 朱斌, 潘玲玲, 邹扬, 等. 考虑融冰因素的输电线路覆冰故障概率计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 79-84.

- ZHU Bin, PAN Lingling, ZOU Yang, et al. Fault probability calculation of transmission line considering ice melting factors[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 79-84.
- [6] 黄文焘, 邵能灵, 范春菊. 基于杆塔结构力学测量的线路覆冰在线监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 71-83.
- HUANG Wentao, TAI Nengling, FAN Chunju. Study on icing monitoring system of different tower overhead transmission lines based on mechanics measurements[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 71-83.
- [7] BROSTRÖM E, AHLBERG J, SÖDER L. Modelling of ice storms and their impact applied to a part of the Swedish transmission network[C] // IEEE PowerTech, Lausanne, 2007: 1593-1598.
- [8] BATTISTA R C, RODRIGUES R S, PFEIL M S. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003(91): 1051-1067.
- [9] MCCLURE G, LAPOINTE M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines[J]. Computers & Structures, 2003(81): 825-834.
- [10] 王少华. 输电线路典型覆冰事故及防治技术分析[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 85-89.
- WANG Shaohua. Analysis of typical ice accidents of transmission lines and presenting techniques[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 85-89.
- [11] 杜涛, 李志东. 500 kV 输电线路重冰区地线覆冰滑动分析及治理对策[J]. 湖北电力, 2010, 34(5): 17-19.
- DU Tao, LI Zhidong. Analysis and counter measures of ice accreted ground wire sliding on 500 kV transmission line in heavy ice areas[J]. Hubei Electric Power, 2010, 34(5): 17-19.
- [12] 郝淑英, 周坤涛, 刘君, 等. 考虑多种因素的覆冰输电线路舞动的有限元分析[J]. 天津理工大学学报, 2010, 26(6): 7-11.
- HAO Shuying, ZHOU Kuntao, LIU Jun, et al. Finite element analysis of iced conductor galloping involving multi-factors[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2010, 26(6): 7-11.
- [13] 杜志叶, 张宇, 阮江军, 等. 500 kV 架空输电线路覆冰失效有限元仿真分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2430-2436.
- DU Zhiye, ZHANG Yu, RUAN Jiangjun, et al. Failure analysis of 500 kV iced overhead transmission line by finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2430-2436.
- [14] 刘纯, 陆佳政, 周卫华, 等. 倒 V 型绝缘子串载荷的有限元分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 569-572.
- LIU Chun, LU Jiazheng, ZHOU Weihua, et al. Load analysis of backward V-type insulators by FEM[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 569-572.
- [15] 彭迎, 阮江军. 模拟电荷法计算特高压架空线路 3 维工频电场[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 69-74.
- PENG Ying, RUAN Jiangjun. Calculation of three-dimensional harmonic electric field around ultra high voltage overhead line based on the charge simulation method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 69-74.
- [16] 曹枚根, 徐忠根. 钢管组合大跨越输电塔导线耦合效应研究[J]. 中国电力, 2006, 39(12): 36-39.
- CAO Meigen, XU Zhonggen. Research on cables coupled effect of combo steel tube tower for large crossing transmission lines[J]. Electric Power, 2006, 39(12): 36-39.
- [17] 刘云, 钱振东, 夏开全, 等. 鼓型塔输电线路绝缘子破坏非线性动响应分析[J]. 振动工程学报, 2009, 22(1): 6-13.
- LIU Yun, QIAN Zhendong, XIA Kaiquan, et al. Transient response of high voltage transmission lines with drum type towers based on insulator rupture[J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(1): 6-13.
- [18] 杜志明, 范军政. 安全裕度研究与应用进展[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(6): 6-10.
- DU Zhiming, FAN Junzheng. Progress in study and application of safety margin[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(6): 6-10.

收稿日期: 2015-07-10; 修回日期: 2015-08-17

作者简介:

王燕(1981-), 女, 高级工程师, 从事电磁场数值计算、高电压与绝缘技术等方面的研究工作; E-mail: chenghuangfu@163.com

杜志叶(1974-), 男, 博士, 副教授, 从事电磁场数值计算、高电压与绝缘技术、电磁无损检测等方面的研究工作;

阮江军(1968-), 男, 博士, 教授, 博导, 从事电磁场数值计算、高电压与绝缘技术、电磁兼容等方面的研究工作。

(编辑 张爱琴)