

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.02.027

大截面导线重覆冰区不均匀冰纵向荷载特性分析

李梦丽^{1,2}, 柏晓路³, 李清^{1,2}, 黄欲成³, 吕中宾^{1,2}, 李健³, 徐维毅³

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052; 2. 国网公司输电线路舞动防治技术实验室, 郑州 450052;

3. 中南电力设计院有限公司, 武汉 430071)

摘要: 现行规程给定的不平衡张力的设计值与实际工程取值差异较大, 为了研究大截面导线重覆冰区不均匀冰纵向荷载特性, 建立连续档不平衡张力计算模型, 编制VB计算程序, 参照典型的特高压直流输电线路工程设计条件, 计算了直线塔和耐张塔的不平衡张力, 对影响直线塔不平衡张力的档距、高差、悬垂串长、导线直径、覆冰率、档距不均匀性、覆冰厚度等因素进行敏感性分析。针对大截面导线重覆冰区, 建议增大耐张塔不平衡张力取值, 降低直线塔不平衡张力取值, 其中直线塔不平衡张力可根据使用条件进行分级取值。

关键词: 重覆冰区; 不均匀冰; 不平衡张力; 纵向荷载; 大截面导线

Analysis on Longitudinal Load of Uneven Ice-shed for Large Cross-section Conductor in Heavy Icing Area

LI Mengli^{1,2}, BAI Xiaolu³, LI Qing^{1,2}, HUANG Yucheng³, LYU Zhongbin^{1,2}, LI Jian³, XU Weiyi³

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 2. Power Transmission Line Galloping Prevention and Control Technology Laboratory of State Grid, Zhengzhou 450052, China; 3. Central Southern China Electric Power Design

Institute Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: The design values of the unbalanced tension given in existing specification are quite different from the values taken for actual engineering. To investigate the longitudinal load characteristics of large cross-section conductors in heavy icing area, a calculation model for unbalanced tension of continuous span is established. The calculation program is coded with VB language. According to the typical design conditions of UHVDC transmission lines, the unbalanced tensions of suspension tower and tension tower are calculated. The sensitivities of the influencing factors, such as span, height difference, suspension string length, conductor diameter, icing rate, span nonuniformity, and ice thickness, are calculated and analysed. It is suggested that for large cross-section conductor in heavy icing area, larger unbalanced tension of tension tower and smaller unbalanced tension of suspension tower should be taken, and particularly, graded values of the unbalanced tension could be taken according to different working conditions.

Key words: heavy icing area; uneven ice-shed; unbalanced tension; longitudinal load; large cross-section conductor

0 引言

不均匀冰工况是杆塔设计的荷载控制工况之一, 不均匀冰导致纵向荷载产生不平衡张力, 使得杆塔受到较大的扭矩和弯矩, 是输电线路发生事故的主要原因之一。一基杆塔倒塔或者一档发生断

线, 会导致两侧杆塔承受更大的不平衡张力, 从而可能引发多米诺骨牌效应形成串倒, 造成严重的损失, 给事故抢修和恢复重建造成更大的困难^[1-4]。

不均匀冰工况下, 杆塔的不平衡张力一直是专家和学者研究的热点^[5-13]。《重覆冰架空输电线路设计技术规程》(DL/T 5440—2009)给出了不平衡张力

收稿日期:2019-09-27; 修回日期:2019-11-16

基金项目:国家电网公司科技项目(52170217000U)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(52170217000U).

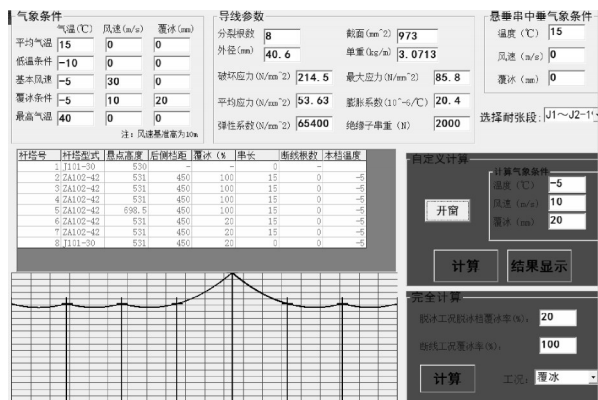


图2 不平衡张力计算程序界面

Fig. 2 The program interface of unbalanced tension calculation

中国电力科学研究院试验研究过连续3档输电线路电线断线的力学响应^[17-19],将试验值和该程序计算值进行对比,误差在5%左右。由此可知,该程序分析不平衡张力差具有较高的精确度。

2 规程对不均匀冰工况的取值要求

根据《重覆冰架空输电线路设计技术规程》(DL/T 5440—2009),不均匀冰荷载情况按未断线、-5℃、有不均匀冰、风速10 m/s计算,不平衡张力覆冰率计算条件和不平衡张力取值分别见表1、2。

表1 不平衡张力覆冰率计算条件

Table 1 The calculation condition of icing rate under unbalance tension				
线路等级	悬垂型杆塔覆冰率/%		耐张型杆塔覆冰率/%	
	一侧	另一侧	一侧	另一侧
一类	100	20	100	0
二类	100	30	100	15
三类	100	40	100	30

表2 不平衡张力取值

Table 2 The parameter selection of unbalance tension				
线路等级	不平衡张力(最大使用张力的百分数)/%			
	悬垂型杆塔		耐张型杆塔	
	导线	地线	导线	地线
III	25	46	42	54
IV	29	40	46	58
V	33	54	50	63
VI	38	58	54	67

3 典型工程实例计算

乌东德电站送电广东广西输电线路工程昆北~柳北段(简称乌东德工程)20 mm冰区采用8×JL/G2A-900/75钢芯铝绞线,30 mm冰区采用6×JLHA1/G2A-

900/75钢芯高强度铝合金绞线,导线参数见表3。

表3 导线参数一览表

Table 3 The conductor parameter list		
项目	JL/G2A-900/75	JLHA1/G2A-900/75
截面积/mm ²	973	973
直径/mm	40.6	40.6
单位重量/(kg·km ⁻¹)	3 071.3	3 071.3
额定拉断力/kN	219.7	352.0
弹性模量/MPa	65 400	65 400
热膨胀系数/(10 ⁻⁶ ·℃ ⁻¹)	20.4	20.4
20℃时直流电阻/(Ω·km ⁻¹)	0.032 2	0.037 4
安全系数	2.5	3.5

根据乌东德工程设计原则,重冰区悬垂串等效串长取15 m,高差系数取15%,杆塔两侧覆冰率取100%/20%,20 mm和30 mm冰区连续档档距分别取450、400 m。

选取计算模型为:7个等连续档的耐张段,仅中间一基杆塔前后有高差,其余塔前后档无高差。采用不平衡张力计算程序进行计算,得到20 mm和30 mm冰区直线塔的不平衡张力百分数分别为8.6%、11.3%。

耐张塔的不平衡张力计算较为简单,按规程规定的覆冰率进行导线状态方程求解,得到20 mm和30 mm冰区直线塔的不平衡张力百分数分别为50.3%、63.5%。

4 敏感性分析

前述计算均基于给出的基本条件进行。事实上,在实际工程中,档距、高差、悬垂串长、导线型号、覆冰率和档距分布等因素千变万化,都会对直线塔不平衡张力的计算造成影响。因此,下面将就以上敏感因素进行计算分析。

耐张塔的不平衡张力计算简单,主要与代表档距、覆冰率、导线型号等有关,不做详细敏感性分析。

4.1 档距

保持其他参数不变,计算每档档距在300~700 m之间变化时的直线塔不平衡张力,见图3。

由图3可知,档距越大,直线塔不平衡张力越大。20 mm冰区档距每增加100 m,不平衡张力增加约4.5%~5%;30 mm冰区档距每增加100 m,不平衡张力增加约6.5%~7.5%。控制重冰区档距有利于减小不平衡张力,建议20 mm冰区档距不应超过700 m,30 mm冰区档距不应超过500 m。

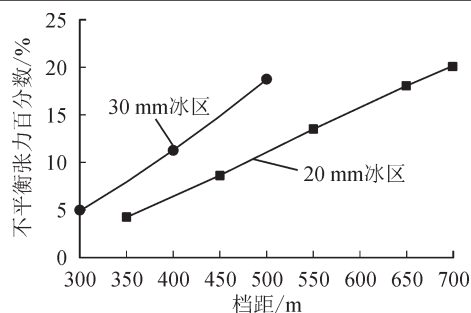


图3 不平衡张力与档距关系曲线

Fig. 3 Relationship between the unbalance tension and the span

4.2 高差

保持其他参数不变,计算高差系数在0~20%之间变化时的直线塔不平衡张力,见图4。

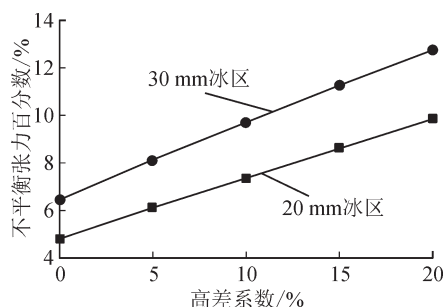


图4 不平衡张力与高差关系曲线

Fig. 4 Relationship between the unbalance tension and the height difference

由图4可知,高差越大,直线塔不平衡张力越大,且基本成线性关系。20 mm冰区高差系数每增加1%,不平衡张力增加0.25%;30 mm冰区高差系数每增加1%,不平衡张力增加0.3%。控制输电线路高差有利于减小不平衡张力。

4.3 悬垂串长

保持其他参数不变,计算悬垂串长在9~17 m之间变化时的直线塔不平衡张力,见图5。

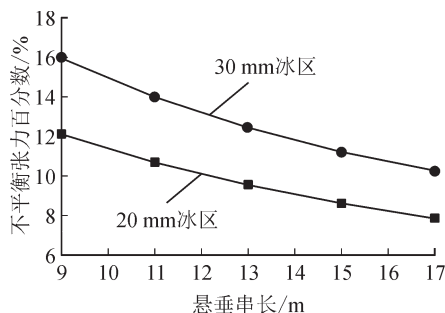


图5 不平衡张力与悬垂串长关系曲线

Fig. 5 Relationship between the unbalance tension and the suspension string length

由图5可知,悬垂串长越短,直线塔不平衡张力越大;随着悬垂串的减小,不平衡张力增加的幅度越来越大。20 mm冰区悬垂串长每减小1 m,不平衡张

力增加0.4%~0.7%;30 mm冰区悬垂串长每减小1 m,不平衡张力增加0.5%~1%。

由此可知,对于串长较长的±800 kV直流线路,直线塔不平衡张力问题不严重;而串长较短的220、500 kV或紧凑型输电线路,其不平衡张力问题更加突出,需要校验不平衡张力,必要时需加强杆塔设计。

4.4 导线直径

保持其他参数不变,计算导线铝截面在720~1 250 mm²之间变化时的直线塔不平衡张力,见图6。

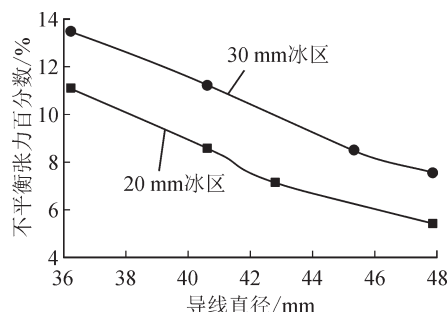


图6 不平衡张力与导线直径关系曲线

Fig. 6 Relationship between the unbalance tension and the conductor diameter

由图6可知,导线直径越小,直线塔不平衡张力越大。20 mm冰区导线直径每减小1 mm,不平衡张力增加0.34%~0.67%;30 mm冰区导线直径每减小1 mm,不平衡张力增加0.38%~0.58%。随着导线截面的增大,直线塔不平衡张力问题得到改善。

4.5 覆冰率

保持其他参数不变,计算一侧覆冰率为100%,另一侧覆冰率在20%~50%之间变化时的直线塔不平衡张力,见图7。

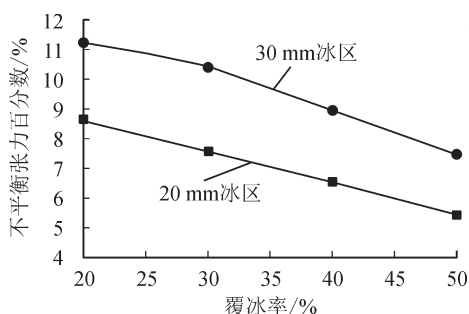


图7 不平衡张力与覆冰率关系曲线

Fig. 7 Relationship between the unbalance tension and the icing rate

由图7可知,另一侧覆冰率越小,直线塔不平衡张力越大,即杆塔两侧覆冰情况差异越大,不平衡张力就越大。20 mm冰区覆冰率每减小10%,不平衡张力增加约1%;30 mm冰区覆冰率每减小10%,不平衡张力增加约0.86%~1.46%。

4.6 档距不均匀性

保持直线塔两侧档距之和以及其他参数不变, 计算直线塔两侧档距比在1~4之间变化时的直线塔不平衡张力, 见图8。

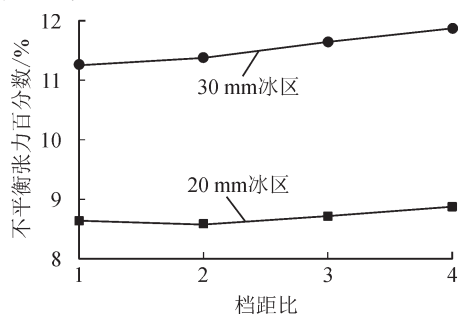


图8 不平衡张力与档距比关系曲线

Fig. 8 Relationship between the unbalance tension and the span ratio

由图8可知, 直线塔两侧档距之和不变, 而档距比改变时, 不平衡张力值变化较小。

4.7 覆冰厚度

导线采用JLHA1/G2A-900/75, 安全系数统一取3.5, 保持其他参数不变, 计算覆冰厚度在20~60 mm之间变化时的直线塔不平衡张力, 见图9。

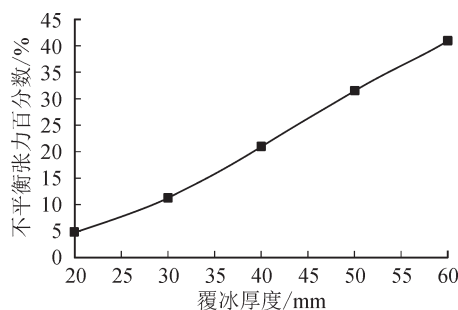


图9 不平衡张力与覆冰厚度关系曲线

Fig. 9 Relationship between the unbalance tension and the icing thickness

由图9可知, 覆冰厚度越大, 直线塔不平衡张力越大, 覆冰厚度大于30 mm时, 覆冰厚度每增加10 mm, 不平衡张力增加约10%。

5 不平衡张力取值建议

通过对乌东德工程JL/G2A-900/75钢芯铝绞线和JLHA1/G2A-900/75钢芯高强度铝合金绞线的不平衡张力计算可知, 与规程推荐的不平衡张力取值相比, 900 mm²截面导线直线塔的不平衡张力较小, 可根据实际计算情况适当放宽, 从而降低杆塔重量; 而耐张塔的不平衡张力较大, 杆塔应进行加强设计。

结合敏感性分析, 并考虑留有一定安全裕度, 建议减小乌东德工程重冰区直线塔不平衡张力取值, 增大耐张塔不平衡张力取值, 详细取值建议列

于表4。

表4 不平衡张力百分比取值表

Table 4 The parameter selection of unbalance

		tension percentage				%
冰区		20 mm	30 mm	40 mm	50 mm	
直线塔	计算值	8.6	11.3	21.0	31.5	
	规程要求值	25	29	33	38	
	建议取值	12~20	12~21	15~23	20~32	
耐张塔	计算值	50.3	63.5	73.7	80.1	
	规程要求值	42	46	50	54	
	建议取值	51	64	74	80	

其中, 直线塔系列设计时, 由于杆塔档距条件的差异, 不平衡张力可根据使用条件进行分级取值, 例如20 mm冰区1型直线塔取12%, 2型直线塔取14%, 2型直线塔取18%, 2型直线塔取20%。

另外, 在输电线路终勘定位完成后, 还应按实际排位情况进行不平衡张力校验, 以防止大档距、大高差地形导致不平衡张力超过设计值。

6 结论

1) 随着档距、高差和覆冰厚度增大, 直线塔不平衡张力逐渐增大; 随着悬垂串长、导线直径、覆冰率减小, 直线塔不平衡张力逐渐增大; 直线塔两侧档距之和不变, 档距比改变时, 不平衡张力值变化较小。

2) 重冰区塔位选择时, 应注意控制地形高差和档距, 尽量减少在微地形、微气象地区立塔, 对无法避免的重冰区、大档距、大高差的杆塔, 应根据实际情况, 计算杆塔实际承受的不平衡张力进行杆塔负荷校验, 以提高线路安全性。

3) 随着特高压输电技术的应用, 悬垂串长越来越长、导线截面越来越大, 直线塔不平衡张力问题得到改善, 已经远比规程规定值小。

4) 结合敏感性分析, 并考虑留有一定安全裕度, 建议增大乌东德工程900 mm²截面导线重冰区耐张塔不平衡张力取值, 降低直线塔不平衡张力取值, 其中不平衡张力可根据使用条件进行分级取值。

参考文献:

- [1] 姚陈果, 张蕾方, 张磊, 等. 架空输电塔-线体系导线风振对脱冰的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 381-387.
YAO Chenguo, ZHANG Rufang, ZHANG Lei, et al. Influence of wind vibration of overhead transmission tower-line system on ice shedding[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 381-387.
- [2] 黄新波, 徐冠华, 肖渊, 等. 输电线路档距组合对覆冰导线脱冰跳跃的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2356-2361.

- HUANG Xinbo, XU Guanhua, XIAO Yuan, et al. Impact of transmission line span combination on ice-shedding of iced conductor[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2356-2361.
- [3] 杨风利, 杨靖波, 张子富. 重覆冰区特高压悬垂型杆塔不平衡张力分析[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 234-240.
YANG Fengli, YANG Jingbo, ZHANG Zifu. Unbalanced tension analysis of tangent towers for UHV transmission lines located at heavy icing area[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 234-240.
- [4] 宋刚, 张彤. 特高压直流输电线路直线塔重覆冰不平衡张力计算[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 119-123.
SONG Gang, ZHANG Tong. Unbalanced tension calculation of UHVDC transmission lines and suspension towers with heavy ice-coating[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 119-123.
- [5] 杨博, 郎需军, 杨茂亭, 等. 重覆冰区线路不均匀脱冰的不平衡张力计算[J]. 电力建设, 2014, 35(10): 52-57.
YANG Bo, LANG Xujun, YANG Maoting, et al. Unbalanced tension calculation of uneven ice-shedding for transmission line in heavy icing areas[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(10): 52-57.
- [6] 刘和云. 架空导线覆冰与脱冰机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2001: 1-60.
LIU Heyun. Study on the mechanism of icing and ice-shedding of overhead conductors[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2001: 1-60.
- [7] 刘锐鹏, 颜天佑, 张耿斌, 等. 超高压输电塔在覆冰断线作用下的动力响应[J]. 云南电力技术, 2014, 42(1): 59-62.
LIU Ruipeng, YAN Tianyou, ZHANG Gengbin, et al. Research on the dynamic response of EHV transmission tower under ruptured icing conduction[J]. Yunnan Electric Power, 2014, 42(1): 59-62.
- [8] 侯镭, 王黎明, 朱普轩, 等. 特高压线路覆冰脱落跳跃的动力计算[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 1-6.
HOU Lei, WANG Liming, ZHU Puxuan, et al. Dynamic behavior computation of ice shedding of UHV overhead transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 1-6.
- [9] 黄新波, 徐冠华, 肖渊, 等. 塔线体系脱冰不平衡张力影响因素分析[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 96-102.
HUANG Xinbo, XU Guanhua, XIAO Yuan, et al. Analysis on influence factors of ice-shedding unbalanced tension of transmission tower-line system[J]. Electric Power, 2017, 50(11): 96-102.
- [10] 王璋奇, 齐立忠, 王孟, 等. 架空输电导线脱冰跳跃实验系统[J]. 电力建设, 2016, 37(6): 109-115.
WANG Zhangqi, QI Lizhong, WANG Meng, et al. Ice shedding experimental system for overhead transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(6): 109-115.
- [11] 陈科全, 严波, 张宏雁, 等. 冲击载荷下导线覆冰脱落过程的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2010, 27(4): 761-766.
CHEN Kequan, YAN Bo, ZHANG Hongyan, et al. Numerical simulation of de-icing on transmission lines under shock load[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(4): 761-766.
- [12] 李嘉祥, 李宏男, 付兴. 输电线路覆冰脱落参数影响研究[J]. 电力建设, 2016, 37(4): 76-83.
LI Jiaxiang, LI Hongnan, FU Xing. Ice-shedding factors of transmission line[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(4): 76-83.
- [13] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
JIANG Xingliang, YI Hui. Icing and protection of transmission lines[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [14] 吕健双, 李健. 不均匀冰对重冰区特高压输电线路导线间隙设计的影响[J]. 智能电网, 2017, 5(3): 297-300.
LYU Jianshuang, LI Jian. Influence of uneven ice on the clearance between the conductor and ground wire of UHV transmission lines in heavy icing area[J]. Smart Grid, 2017, 5(3): 297-300.
- [15] 邵天晓. 架空送电线路的电力学计算[M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2003.
SHAO Tianxiao. Mechanical calculation of overhead transmission lines[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [16] 国家电力公司东北电力设计院, 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2003.
Northeast Electric Power Design Institute Co., Ltd., ZHANG Diansheng. Design manual of high voltage transmission line in power system engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [17] 杨风利, 杨靖波, 张子富, 等. 输电线路导线断线试验及数值模拟分析[J]. 振动工程学报, 2012, 25(2): 154-160.
YANG Fengli, YANG Jingbo, ZHANG Zifu, et al. Experiments and numerical simulation on the broken conductors in transmission lines[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(2): 154-160.
- [18] 默增禄, 张子富, 胡光亚. ± 800 kV 直流特高压直线塔模型的导线断线试验分析[J]. 电力建设, 2010, 31(1): 30-33.
MO Zenglu, ZHANG Zifu, HU Guangya. Experimental research for broken conductor wire of ± 800 kV DC EHV suspension tower model[J]. Electric Power Construction, 2010, 31(1): 30-33.
- [19] 王璋奇, 齐立忠, 王剑, 等. 架空输电导线非同期脱冰跳跃张力实验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(22): 61-65.
WANG Zhangqi, QI Lizhong, WANG Jian, et al. Experiments on the dynamic tension of an overhead conductor under the asynchronous ice shedding[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(22): 61-65.

李梦丽(1986—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事输电线路防灾减灾技术研究。

柏晓路(1984—), 男, 硕士, 高工, 主要从事送电线路电气设计。