

基于等线长迭代的特高压直线塔地线不平衡张力计算

胡海洋¹, 张欢¹, 伍晓红², 张颖¹, 张恒¹, 张亮¹, 马金燕¹

(1. 北京电力经济技术研究院有限公司, 北京 100107;

2. 西安交通大学 航天航空学院, 陕西 西安 710049)

摘要:特高压直线塔地线金具多次因不均匀覆冰发生事故。首先采用不平衡张力的数值计算模型,并给出张力初始值的取值方法和收敛判断条件。然后计算分析了特高压输电线路不同档距、档数、高差、冰厚、串长、大小档等多种情况时直线塔地线的不平衡张力。结果表明减少耐张段档数、缩小档距、降低高差、路径选择中尽量避开冰区较重的地方、增加地线悬垂串长度、排位时尽量使档距均匀分布等均可降低直线塔地线的不平衡张力。对新建工程和已建工程,分别提出了降低地线不平衡张力差的对策,可为后续特高压输电线路的设计提供参考。

关键词:特高压输电线路;直线塔;地线不平衡张力;降低张力差

中图分类号:TM752 文献标志码:A 文章编号:2096-4145(2023)02-0118-06

Calculation of Unbalance Tension of Ground Wire for UHV Suspension Tower Based on Equilinear Length Iteration

HU Haiyang¹, ZHANG Huan¹, WU Xiaohong², ZHANG Ying¹, ZHANG Heng¹,
ZHANG Liang¹, MA Jinyan¹

(1. Beijing Electric Power Economic and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100107, China;

2. School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: There are many accidents associated with the fittings on ground wire for UHV suspension tower under uneven icing. Firstly, a numerical calculation model of unbalance tension is used, and the determining methods of initial tension value and convergence judgment conditions are given. Then the influence of different parameters on the unbalance tension of the ground wire is compared and analyzed, such as span length, span number, height difference, icing thickness, string length, and large and small span. The results show that the unbalance tension of the ground wire can be lowered by using the methods of reducing the span number of strain section, the span length and height difference, keeping away heavy ice area, increasing the string length, realizing the uniform distribution of the span length, and so on. The countermeasures to reduce the unbalance tension difference of the ground wire are put forward for new projects and built projects respectively.

Key words: UHV transmission line; suspension tower; ground wire unbalanced tension; reducing tension difference

0 引言

在我国西南和华中地区,每年的严冬和初春季节,北方的强冷气团与南海副热带暖湿气团交汇,形成“南岭准静止锋”及其延伸的“昆明准静止锋”^[1]。在这种情况下,输电线路导线和杆塔上容易覆冰,也最容易因为导线各档不均匀覆冰而产生不平衡张力影响线路的安全运行。2008年冰灾后设计人员对事故倒塔段进行计算分析,发现倒塔主要发生在大档距、大高差处,覆冰造成的杆塔纵向张力差

大于设计耐受值^[2-6],进一步分析发现倒塔事故多发生在直线塔上,主要是因为直线塔在规划阶段所要求承受的纵向张力较小,不均匀冰引起的纵向不平衡张力更容易超过限值。因导线的不平衡张力引起多处倒塔断线事故,输电线路设计时应应对重冰区的不平衡张力格外重视。

随着我国电力系统全国联网、西电东送、南北互供工程的实施,以及国家特高压骨干电网的建设,我国已建设多条特高压直流输电线路。特高压直流输电线路路径长度几千公里,所经地区气象条件复杂,存在多种冰区,输电线路经过重冰区时更易产生不平衡张力,容易造成各种事故。

特高压沿线各省检修公司通过对向上、锦苏、溪浙、哈郑、灵绍、酒湖等已建工程地线金具故障情况

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978570)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (51978570)

整体统计,共发生地线故障 57 次,其中 37 次为地线预绞式线夹故障,其余为地线支架变形、地线散股和防振锤等其他故障。地线线夹故障中,耐张串故障 5 次,悬垂串故障 32 次,悬垂串更容易出现故障,且事故大部分出现在重冰区,初步分析主要因地线不平衡张力超限导致。

国内外学者采用有限元法对不均匀覆冰进行分析计算^[7-11],该方法能考虑到影响不均匀脱冰的多种因素,得出精确的结果,但针对具体工程存在计算量大、耗费时间长、不够简便等问题,不适用工程中的批量计算。目前在实际工程中一般采用传统等线长法计算不均匀冰的不平衡张力^[12-13],针对等线长法不平衡张力计算存在的收敛速度慢、收敛于非正确解等问题各位学者提出了不同的解决办法^[14-17]。本文对传统等线长计算法的初始取值和收敛判据进一步优化,提高收敛速度和结果的准确性。

目前,针对特高压重冰区直线塔不平衡张力的研究主要集中在导线部分^[18-24],对特高压重冰区直线塔地线不平衡张力的研究较少。本文采用数值计算法对±800 kV 特高压输电线路直线塔地线不平衡张力进行计算分析,并结合工程实际情况,提出降低新建工程和已建工程地线不平衡张力的措施。

1 不平衡张力计算模型

电线架设时,耐张段内各档导线水平应力相等,直线塔的悬垂绝缘子串垂直。当外界气象条件变化时(非架线工况),由于档距及高差不等或者外力(冰、风等)荷载在各档的不均匀分布,造成耐张段内各档应力有差别,使电线上出现纵向不平衡张力,致使悬垂绝缘子串出现偏移或导线在线夹内滑动现象^[12-13]。悬垂串偏移情况如图 1 所示。

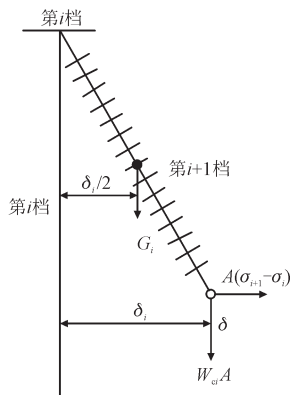


图 1 悬垂绝缘子串受力偏移

Fig. 1 Force deviation of suspension insulator string

图 1 中 σ_i, σ_{i+1} 为第 i 档、 $i+1$ 档不均匀冰时应力; G_i 为绝缘子串串重; δ_i 为绝缘子串偏移量; A 为电线的截面积; W_{ci} 为第 i 档电线垂直比载。

根据线长等长原理,不平衡张力计算模型^[12-13]为:

$$\Delta l_i = \frac{l_i}{\cos^2 \beta_i \left(1 + \frac{\gamma_i^2 l_i^2}{8\sigma_i^2}\right)} \left\{ \frac{(l_i \cos \beta_i)^2}{24} \times \left[\left(\frac{\gamma_m}{\sigma_m}\right)^2 - \left(\frac{\gamma_i}{\sigma_i}\right)^2 \right] + \left(\frac{\sigma_i - \sigma_m}{E \cos \beta_i}\right) + \alpha(t + \Delta t_m - t_m) \right\} \quad (1)$$

$$\sigma_{i+1} = \left[\left(\frac{G_i}{2A} + \frac{\gamma_i l_i}{2 \cos \beta_i} + \frac{\gamma_{i+1} l_{i+1}}{2 \cos \beta_{i+1}} + \frac{\sigma_i h_i}{l_i} \right) + \frac{\sigma_i}{\delta_i} \sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2} \right] \div \left(\frac{\sqrt{\lambda_i^2 - \delta_i^2}}{\delta_i} + \frac{h_{i+1}}{l_{i+1}} \right) \quad (2)$$

$$\delta_n = \sum_{i=1}^n \Delta l_i = \sum_{i=1}^n \Delta l_1 + \Delta l_2 + \dots + \Delta l_n \quad (3)$$

式中: l_i 为第 i 档档距; h_i 为第 i 档高差; β_i 为第 i 档高差角; α 为电线的热膨胀系数; E 为电线的弹性模量; t_m 为电线架线时气温; σ_m 为架线时应力; Δt_m 为初伸长降温值; γ_m 为架线时电线单位长度比载; t 为不均匀冰时气温; $\gamma_i, \Delta l_i$ 分别为第 i 档不均匀冰时比载、档距增量; n 为耐张段档数; λ_i 为绝缘子串串长; δ_i 为绝缘子串偏移量。

等线长法中经常存在高次方程组不收敛情况,耐张段越方程组越多,越容易出现这种情况,经分析主要因为初始值给定不合理、收敛结果判断引起的。初始值设置过小,需要迭代较多次数,收敛时间长,且可能导致第一个收敛结果为非正确解;初始值设置过大,则无法得到解。

考虑到不均匀冰工况的初始工况为安装工况,安装工况下悬垂串垂直,耐张段内各档张力相同,之后因地线不均匀覆冰导致悬垂串偏移,因此在计算时选取初始 σ_0 为安装工况张力,采用“二分法”计算。张力计算迭代中 1N 的张力精度已完全满足使用要求,因此收敛判断条件为 $|\sigma_{n+1} - \sigma_n| \leq 1$ 。通过优化措施能保证所有情况均能求出正确解。

2 工程典型参数

根据已建和在建±800 kV 特高压直流输电线路,20 mm 覆冰厚度区典型导线为 6×JL1/G2A-1250/100 钢芯铝绞线,地线一根为 JLB20A-150 铝包钢绞线,另一根采用 OPGW-150; 30 mm, 40 mm

覆冰厚度区典型导线为6×JLHA4/G2A-1250/100 钢芯铝合金绞线,地线一根为JLB20A-240 铝包钢绞线,另一根地线推荐采用OPGW-240。同截面的铝包钢地线与光缆机械性能差异不大,因此仅对铝包钢绞线地线进行计算。

在满足导线配合情况下,20 mm 冰区地线安全系数取3.6,对应地线最大使用张力为49 603 N;30 mm;40 mm 冰区地线安全系数取4.0,对应地线最大使用张力为72 223 N。典型地线串串长0.5 m,串重20 kg。

参考《重覆冰架空输电线路设计技术规程》(DL/T 5440—2009)和《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(GB50790—2013),±800 kV 输电线路电压等级为一类,直线塔导线不平衡张力计算覆冰率一侧取100%,另一侧取20%^[25-28]。

3 地线不平衡张力计算

3.1 不同档数对不平衡张力的影响

地线覆冰20 mm,档距均取400 m,高差取0 m,比较不同档数对地线不平衡张力的影响。分别计算档数为2,3,4,5,6,7时的地线不平衡张力,结果如表1所示。

表1 不同档数地线不平衡张力
Table 1 Unbalance tension of ground wire with different span number

档数	最大不平衡张力/(N·根 ⁻¹)	不平衡张力比/%
2	9 391	18.93
3	11 153	22.49
4	12 079	24.35
5	12 348	24.89
6	12 428	25.06
7	12 470	25.14

由表1可以看出,档距一定时,随着档数的增加,直线塔的最大不平衡张力快速增加,当档数增加到一定程度后,档数对不平衡张力的影响逐步减小,最后达到一个极限值。因此重冰区降低不平衡张力的有效方法是减少耐张段的档数。

3.2 不同档距对不平衡张力的影响

地线覆冰20 mm,档数3档,高差取0 m,比较不同档距对地线不平衡张力的影响。分别计算档距为200 m,300 m,400 m,500 m,600 m和700 m时的地线不平衡张力,结果如表2所示。

由表2可以看出,档数一定时,随着档距的增加,直线塔的最大不平衡张力快速增加,当档距增

表2 不同档距地线不平衡张力
Table 2 Unbalance tension of ground wire with different span lengths

档距/m	最大不平衡张力/(N·根 ⁻¹)	不平衡张力比/%
200	798	1.61
300	4 307	8.68
400	11 153	22.49
500	16 213	32.69
600	19 076	38.46
700	20 746	41.82

加到一定程度后,直线塔的最大不平衡张力已超过DL/T 5440 规范允许值,在运行时会带来各种故障。因此重冰区可通过减少档距来降低直线塔的不平衡张力。根据DL/T 5440 规范,并结合表2计算结果,20 mm 重冰区档距尽量控制在500 m以下。

3.3 不同高差对不平衡张力的影响

地线覆冰20 mm,档数取2档,档距取400 m,比较不同高差对地线不平衡张力的影响。分别计算高差为0 m,100 m,200 m,300 m,400 m和500 m时的地线不平衡张力,结果如表3所示。

表3 不同高差地线不平衡张力
Table 3 Unbalance tension of ground wire with different height differences

高差/m	最大不平衡张力/(N·根 ⁻¹)	不平衡张力比/%
0	9 391	18.93
100	13 331	26.88
200	14 330	28.89
300	13 945	28.11
400	12 865	25.94
500	11 542	23.27

由表3可以看出,档距、档数一定时,随着高差的增加,直线塔的最大不平衡张力先增加后减小。因此重冰区可通过减少高差来降低直线塔的不平衡张力。

3.4 不同冰厚对不平衡张力的影响

档距400 m,档数3档,高差取0 m,比较不同冰厚对地线不平衡张力的影响。分别计算冰厚为20 mm,30 mm,40 mm,50 mm,60 mm和80 mm时的地线不平衡张力,结果如表4所示。

表4 不同冰厚地线不平衡张力
Table 4 Unbalance tension of ground wire with different icing thickness

冰厚/m	最大不平衡张力/(N·根 ⁻¹)	不平衡张力比/%
20	11 153	22.49
30	23 320	47.01
40	29 761	60.00
50	33 137	66.80
60	35 088	70.74
80	37 103	74.80%

由表4可以看出,档数、档距一定时,随着冰厚的增加,直线塔的最大不平衡张力快速增加,40mm冰区时直线塔的最大不平衡张力已超过DL/T 5440规范允许值,在运行时会带来各种故障。因此重冰区可通过优化路径来降低地线冰厚,降低直线塔的不平衡张力。除此之外还可通过增大地线的安全系数,降低地线的最大使用张力来降低不平衡张力。

3.5 不同串长对不平衡张力的影响

地线覆冰20 mm,档数3档,高差取0 m,比较不同串长对地线不平衡张力的影响。分别计算串长为0.3 m,0.4 m,0.5 m,0.6 m,0.7 m,0.8 m时的地线不平衡张力,结果如表2所示。

表5 不同串长地线不平衡张力

Table 5 Unbalance tension of ground wire with different string lengths

串长/m	最大不平衡张力/(N·根 ⁻¹)	不平衡张力比/%
0.3	13 938	28.10
0.4	12 454	25.11
0.5	11 153	22.49
0.6	10 031	20.22
0.7	9 063	18.27
0.8	8 243	16.62

由表5可以看出,档距、高差一定时,随着串长的增加,直线塔的最大不平衡张力快速降低,地线串长0.8 m时直线塔的最大不平衡张力仅有16.62%。因此重冰区可通过增加地线悬垂串长度来降低直线塔的不平衡张力。

3.6 大小档距对不平衡张力的影响

地线覆冰20 mm,耐张段总长度1 200 m,档数取3档,高差取0 m,比较不同档距对地线不平衡张力的影响。分别计算档距为100 m/400 m/700 m,200 m/400 m/600 m,300 m/400 m/500 m,400 m/400 m/400 m时的地线不平衡张力,结果如表6所示。

表6 大小档地线不平衡张力

Table 6 Unbalance tension of ground wire with large and small span

档距/m	最大不平衡张力/(N·根 ⁻¹)	不平衡张力比/%
100/400/700	19 864	40.05
200/400/600	18 681	37.66
300/400/500	15 804	31.86
400/400/400	11 152	22.48

由表6可以看出,相同耐张段长度、相同档数,档距的不同分布对直线塔不平衡张力影响较大。档距均匀分布时不平衡度22.48%,档距分布为100/400/700时不平衡度40.05%,两者相差18%。因此重冰区可通过优化排位来降低直线塔的不平衡张

力,档距分布越均匀,直线塔不平衡张力差越小。

4 降低地线不平衡张力措施

4.1 优化方案可行性分析

根据第3节的分析,对于新建工程可以从减少耐张段档数、缩小档距、降低高差、路径选择中尽量避开冰区较重的地方、增加地线悬垂串长度、排位时尽量使档距均匀分布等6个方面优化以降低直线塔的不平衡张力。

对于改造工程,杆塔位置、杆塔型式均已确定,如果改造铁塔,则费用很高,一般单公里将达到百万,且停电周期长,停电损失费高。为降低改造费用,根据第3节分析,推荐采用调整地线悬垂串长度来降低地线不平衡张力。

4.2 调整悬垂串长度

加长地线悬垂串可以降低地线不平衡张力。针对不同气象区,具体工程情况,选择如表7所列典型耐张段,对普通地线悬垂串和加长地线悬垂串分别进行不平衡张力计算,悬垂串加长长度分别按400,600,800,1 000 mm。计算结果如表8所示。

表7 典型耐张段

Table 7 Typical tension section

气象区	耐张段档数	档号	档距/m	地线挂点高差/m
风速 27 m/s 覆冰 20 mm	4	1	417	45
		2	615	90
		3	316	-2
		4	412	20

表8 不同串长地线不平衡张力

Table 8 Unbalance tension of ground wire with different string lengths

串长/m	最大不平衡张力/(N·根 ⁻¹)	不平衡张力比/%
0.516	17 866	10.00
0.916	14 356	8.04
1.116	13 038	7.30
1.316	11 937	6.68
1.516	10 993	6.16

由表8可见,地线悬垂串加长400 mm,纵向不平衡张力显著降低,可有效抑制重覆冰后地线滑移或脱落,而地线悬垂串分别加长600,800,1 000 mm后,虽然可以进一步降低纵向不平衡张力,但相对降幅较小,效果不明显,同时考虑地线悬垂串长对导线间距的影响,推荐地线悬垂串按加长400 mm考虑。采用加长地线悬垂串的方式改造费用低,一般单公里仅有几万,且停电时间短。

5 结论

采用数值算法对 ± 800 kV 特高压输电线路直线塔地线不平衡张力进行计算分析,得出如下结论:

1) 重冰区耐张段不同的档数、档距、高差、冰厚、串长和同一耐张段的大小档均会对地线不平衡张力造成影响。

2) 对于新建线路,可以从减少耐张段档数、缩小档距、降低高差、路径选择中尽量避开冰区较重的地方、增加地线悬垂串长度、排位时尽量使档距均匀分布等6个方面优化以降低直线塔的不平衡张力。

3) 对于已建线路,工程的杆塔位置、杆塔型式均已确定,为降低改造费用,推荐采用调整地线悬垂串长度来降低地线不平衡张力,对于20 mm冰区,推荐地线悬垂串按加长400 mm考虑。

参考文献

- [1] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 李庆峰, 范峥, 吴穹, 等. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 电网技术, 2008, 09:33-36.
LI Qingfeng, FAN Zheng, WU Qiong, et al. Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 33-36.
- [3] 李正, 杨靖波, 黄璜, 等. 2008年输电线路冰灾倒塌原因分析[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 31-35.
LI Zheng, YANG Jingbo, HUANG Huang, et al. Analysis on transmission tower toppling caused by icing disaster in 2008[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 31-35.
- [4] 蒋吉河, 蒋兴良, 易辉, 等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 6-9.
JIANG Jihe, JIANG Xingliang, YI Hui, et al. The present study on conductor icing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(1): 6-9.
- [5] 胡毅. 输电线路大范围冰害事故分析及对策[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 14-15.
HU Yi. The analysis and the strategy of the large range icing accident of the transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 14-15.
- [6] 谢云云, 薛禹胜, 文福拴, 等. 冰灾对输电线故障率影响的时空评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 32-41.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WEN Fushuang, et al. Space-time evaluation for impact of ice disaster on transmission line fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 32-41.
- [7] 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, 2007, 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, 2007, 28(6): 1-6.
- [8] JAMALEDDINE A, MCCLURE G, ROUSSELET J, et al. Simulation of iceshedding on electrical transmission lines using ADINA[J]. Computers and Structures, 1993, 47(4-5): 523-536.
- [9] FEKR M R, MCCLURE G. Numerical modelling of the dynamic response of ice-shedding on electrical transmission lines[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1-2): 1-11.
- [10] KALMAN T, FARZANEH M, MCCLURE G. Numerical analysis of the dynamic effects of shock-load-induced ice shedding on overhead ground wires[J]. Computers and Structures, 2007, 85(7-8): 375-384.
- [11] 宴致涛, 李正良. 重冰区输电塔—线体系导线断线分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 92-97.
YAN Zhitao, LI Zhengliang. Analysis of the transmission tower-line system in heavy ice regions subjected to cable rupture[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 92-97.
- [12] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册(第2版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [13] 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.
- [14] 刘庆丰. 输电线路不平衡张力分析与计算[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 93-95.
LIU Qingfeng. Analysis and calculation of transmission line unbalanced tensile force[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(1): 93-95.
- [15] 苏佳伟, 陈恳. 直流电阻和绝缘电阻对变压器运行状态的影响及故障判断研究[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2022, 42(6):48-51.
SU Jiawei, CHEN Ken. Study on the influence of DC resistance and insulation resistance on transformer running state and fault judgment[J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Science Edition), 2022, 42(6):48-51.
- [16] 周文武, 张小力, 江岳, 等. 单档不均匀覆冰下架空线路不平衡张力及形变特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9):45-50.
ZHOU Wenwu, ZHANG Xiaoli, JIANG Yue, et al. Characteristics of unbalanced tension and relative displacement in overhead power lines under non-uniform accreted ice[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9):45-50.
- [17] 樊贝, 杜龙, 王大江. 基于有限元模型的500 kV变压器直流偏磁特性分析[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(12):55-60.
FAN Bei, DU Long, WANG Dajiang. Analysis of DC magnetic bias characteristics of 500 kv transformer based on finite element model [J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(12): 55-60.
- [18] 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.
- [19] 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, 2012, 2014, 34(7): 119-123.

- [20] 王斌,李立涅,魏发生,等.不均匀覆冰下的架空地线覆冰在线监测力学计算模型改进[J].高电压技术,2022,48(11):4538-4545.
WANG Bin, LI Liying, WEI Fasheng, et al. Research on Improvements in the mechanical calculation model of on-line icing monitoring of overhead ground wires under uneven icing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11):4538-4545.
- [21] 鲁修学,朱本玉,张建平.重覆冰地区输电线路不平衡张力研究及应对措施[J].江西电力,2020,44(10):38-40.
LU Xuexiu, ZHU Benyu, ZHANG Jianping. Unbalanced tension calculation of UHVDC transmission lines and Countermeasures[J]. Jiangxi Electric Power, 2020, 44(10):38-40.
- [22] 吴俊俊,宋刚,卢彬芳.基于粒子群优化算法的特高压输电线路覆冰不平衡张力计算[J].浙江电力,2019,38(3):59-64.
WU Junjun, SONG Gang, LU Binfang. Unbalanced tension calculation of UHVDC transmission lines and suspension towers with heavy ice-coating[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(3): 59-64.
- [23] 杨世强,翁永春,李小来,等.特高压直流金具不均匀覆冰受损伤患分析与研究[J].湖北电力,2018,42(3):5-8,25.
YANG Shiqiang, WENG Yongchun, LI Xiaolai, et al. Analysis and research on potential damage caused by uneven icing on UHVDC metalware[J]. Hubei Electric Power, 2018, 42(3):5-8,25.
- [24] 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 of the influencing factors of the Ice-shedding unbalanced tension tower-line system[J]. Electric Power, 2017, 50(11):96-102.
- [25] 国家能源局.重覆冰架空输电线路设计技术规程:DL/T 5440—2009[S].北京:中国电力出版社,2009.
- [26] 中国企业联合会.±800kV直流架空输电线路设计规范:GB50790-2013[S].北京:中国计划出版社,2012.
- [27] 梁振锋,李天婷,张怿宁.高压架空-电缆混合线路电容电流补偿方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(6):16-21.
LIANG Zhenfeng, LI Tianting, ZHANG Yining. Research on capacitor current compensation method of high voltage overhead and cable hybrid line [J]. Power Capacitors and Reactive Compensation, 2022, 43(6):16-21.
- [28] 庄一豪,毛宝俊,谢强.特高压换流变压器套管电连接结构地震累积效应评估方法研究[J].四川电力技术,2022,45(6):7-15.
ZHUANG Yihao, MAOBaojun, XIE Qiang. Study on seismic cumulative effect evaluation method of casing electrical connection structure of UHV converter transformer[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2022, 45(6):7-15.

(责任编辑 张健)

收稿日期:2022-08-31; 修改日期:2023-01-10

作者简介:胡海洋(1993),男,北京人,硕士,从事架空输电线路设计方面的工作。

(上接第97页)

- Edition):2022,24(9):1-10.
- [19] 刘钊,刘邦银,段善旭,等.系统电压不平衡下链式静止同步补偿器控制研究[J].中国电机工程学报,2011,31(9):1-7.
LIU Zhao, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Research on cascade multilevel STATCOM under unbalanced system voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9):1-7.
- [20] 周长春,徐政.联于弱交流系统的HVDC故障恢复特性仿真分析[J].电网技术,2003,27(11):18-21.
ZHOU Changchun, XU Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength[J]. Power System Technology, 2003, 27(11):18-21.
- [21] 罗天,汪可友,李国杰,等.基于改进多馈入有效短路比的受端交直流混联电网STATCOM定容方法[J].电测与仪表,2022,59(2):133-140.
LUO Tian, WANG Keyou, LI Guojie, et al. STATCOM capacity-determine method based on modified multi-feed effective short-circuit ratio in receiving-end AC/DC hybrid grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2):133-140.
- [22] 高凯,屈海涛,任茂鑫,等.基于可控电压源的高压直流输电换相失败抑制技术[J/OL].高压电器:1-9.[2023-01-11].
GAO Kai, QU Haitao, REN Maoxin, et al. Commutation failure suppression technology for HVDC transmission based on controlled voltage source[J/OL]. High Voltage Apparatus: 1-9.[2023-01-11].
- [23] XIAO H, LI Y, LAN T. Sending end AC faults can cause commutation failure in LCC-HVDC inverters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5):2554-2557.
- [24] 蒋泽虔,陈卓,郝正航,等.用于分布式风电的LCL型STATCOM控制策略研究[J].电网与清洁能源,2022,38(2):102-109.
JIANG Zeqian, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, et al. A study on LCL-Type STATCOM control strategy for distributed wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(2):102-109.
- [25] 郑凯凯,陈洁,王小军,等.基于无功功率分解的DFIG与STATCOM的功率协调控制[J].电网与清洁能源,2021,37(6):1-8,17.
ZHENG Kaikai, CHEN Jie, WANG Xiaojun, et al. Power coordinated control of DFIG and STATCOM based on reactive power decomposition[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(6):1-8,17.
- [26] 李峰,张英敏,刘天琪,等.混合级联型多落点直流输电系统交流系统故障协调控制策略[J].智慧电力,2021,49(7):102-108.
LI Feng, ZHANG Yingmin, LIU Tianqi, et al. Fault Coordination Control Strategy of AC System in Hybrid Cascaded Multi-terminal HVDC System[J]. Smart Power, 2021, 49(7):102-108.
- [27] 郝露茜,吴军,王智冬,等.电力系统源-网-荷-储协调水平综合评价方法研究[J].智慧电力,2021,49(3):12-18.
HAO Luxi, WU Jun, WANG Zhidong, et al. Research on comprehensive evaluation method of source-grid load-storage coordination level in power system[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 12-18.

(责任编辑 徐秋芳)

收稿日期:2022-09-27; 修改日期:2023-02-01

作者简介:李宁(1999),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电分析与控制。