

Research on Ice-Covered Growth Model of Transmission Line Based on Multi-Parameter Fusion and Risk Warning

Shuangyong Zhou¹, Wenjun Wei², Wenjiang Li¹, Mingming Li³, Tie Chen¹, Jiali Dai¹, Jianhang Yi¹

¹State Grid Chongqing Electric Power Company Maintenance Branch, Chongqing

²Chongqing Nengji Technology Co. Ltd., Chongqing

³School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing

Email: cqulmm@foxmail.com

Received: Nov. 6th, 2019; accepted: Nov. 21st, 2019; published: Nov. 28th, 2019

Abstract

Chongqing Power Grid undertakes the important task of ultra-high voltage “West-to-East Power Transmission”. The area is divided into important transmission channels such as Fufeng, Jinsu DC and 500 kV Zhanglong and Zhangchang. It is located in the high altitude area of Chepan Mountain in Wulong. It is a region with extreme weather in winter and has always been a key area for winter. Due to the complex terrain surrounding Chongqing, the inspection work is very difficult. Therefore, it is necessary to accurately predict the thickness of the line ice and evaluate the failure probability by combining online monitoring devices and micro-meteorological technologies. According to the micro-meteorological monitoring device, the optimal combination automatic analysis and optimization is used to establish a multi-parameter fusion transmission line ice load calculation model. The transmission line risk assessment is carried out by calculating the load and clearance safety margins, and finally the inversion of an actual case in Chongqing is carried out to verify the feasibility and effectiveness of the method. The method described in this paper helps the operator to check the running status of the transmission line in time to prevent line faults caused by the wire icing and the clearance safety margin being too small.

Keywords

Transmission Line, Ice, Sag, Risk Warning

基于多参数融合的输电线路覆冰增长模型研究及风险预警

周双勇¹, 韦文军², 李汶江¹, 李明明³, 陈 铁¹, 戴佳利¹, 易建行¹

¹国网重庆市电力公司检修分公司, 重庆

文章引用: 周双勇, 韦文军, 李汶江, 李明明, 陈铁, 戴佳利, 易建行. 基于多参数融合的输电线路覆冰增长模型研究及风险预警[J]. 智能电网, 2019, 9(6): 236-243. DOI: 10.12677/sg.2019.96026

²重庆能吉科技有限公司, 重庆

³重庆大学电气工程学院, 重庆

Email: cqulmm@foxmail.com

收稿日期: 2019年11月6日; 录用日期: 2019年11月21日; 发布日期: 2019年11月28日

摘要

重庆电网承担着超特高压“西电东送”的重要任务, 辖区汇集了复奉、锦苏直流和500千伏张隆、张长等重要的输电通道, 地处武隆车盘山高海拔地区, 是冬季极端天气多发区域, 一向是度冬的重点区域。因重庆周边地形环境复杂, 巡检工作十分困难, 因此结合在线监测装置和微气象技术, 准确预测线路覆冰厚度和评估失效概率是十分必要的。本文根据微气象监测装置, 采用最优组合自动分析、优化, 建立了多参数融合的输电线路覆冰载荷计算模型, 通过对荷载和净空安全裕度计算进行输电线路风险评估, 最后通过重庆地区某实际案例进行反演, 验证所述方法的可行性和有效性。本文所述方法有助于运行人员及时校核输电线路运行状态, 防范因导线覆冰和净空安全裕度过小导致的线路故障。

关键词

架空线路, 覆冰, 弧垂, 风险预警

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 全球气候异常变化, 重庆电网承担着超特高压“西电东送”的重要任务, 辖区汇集了复奉、锦苏直流和500千伏张隆、张长等重要的输电通道, 地处武隆车盘山高海拔地区, 是冬季极端天气多发区域, 一向是度冬的重点区域。导线覆冰会导致输电线路机械和电气性能急剧下降, 从而导致覆冰事故的发生[1], 给电网安全和国民经济带来巨大影响, 因此建立多参数融合的输电线路覆冰计算模型, 通过对荷载和净空安全裕度计算进行输电线路风险评估具有重要的理论意义和工程价值。

输电线路覆冰是一个全球化的问题, 以加拿大、美国和北欧四国为代表的发达国家, 其电网同样常遭受严重覆冰的影响[2]。1992年12月, 法国因冰雪导致输电线路停运38条, 造成350万户的家庭停电[3]; 1998年1月, 加拿大魁北克省和美国东北部部分地区发生了有史以来最严重的冻雨事故, 致使加拿大470余万人和美国50万人受到影响[4]。随着我国电压等级的提高及电网建设的快速发展, 线路覆冰带来的危害更加凸显[5], 2008年初, 将近一个月的冰冻雨雪灾害袭击, 造成湖南电网上百条不同电压等级的输电线路停运, 累计发生了上千次的跳闸[6]。

输电线路运行环境复杂多变, 采用单一参数往往不能真实准确的反映线路实际运行状态。研究运用微气象监测技术, 通过采集输电线路在线监测装置监测得到的应力数据、位移数据、加速度数据、温度数据等多种数据信息, 结合根据数学模型和方法换算得到的输电导线的风偏角、对地弧垂、舞动振幅和频率等参数, 以及各类微气象数据, 采用最优算法组合自动分析、优化, 建立多参数融合的输电线路覆冰载荷计算模型[7]。

由于输电线路长距离分布、穿越多个区域和多种地形,仅通过少量的在线监测装置完整反映输电线路的覆冰和弧垂状况不大现实[8]。而随着气象科学的发展,实况天气监测和数值天气预报的时空分辨率不断提升,1~10 km 空间分辨率、10 min~1 h 时间分辨率的气象数据已广泛普及[9],因此通过气象监测和输电线路实时电流,动态估计导线覆冰厚度和弧垂增量,校核导线净空距离,在技术上具有可行性。同时,通过输电线路负荷预测和数值天气预报,预测未来覆冰变化,进一步预测弧垂增长,进行输电线路运行风险预警,有助于电网运行和调度决策,预防导线对跨越物放电导致的故障[10]。

因此,本文基于重庆周边沿线安装的微气象监测装置采集的气象数据,通过建立覆冰厚度预测模型,进行覆冰预测,通过线路安全裕度和线路强度进行输电线路风险评估,最后通过重庆周边某实际案例反演和论证分析,对所提方法的可行性和有效性进行验证。结果表明,本文所述方法有助于运行人员及时校核输电线路运行状态,防范因导线覆冰和弧垂安全裕度过小导致的线路故障。

2. 基于微气象监测的冰荷载预测

输电线路导线覆冰是一个涉及多学科门类的科学问题,覆冰机理十分复杂。随着覆冰参数的变化,相同时间内导线覆冰形态也千差万别。因此,基于导线覆冰的物理过程,研究导线覆冰的数值计算方法,可以大量减少自然覆冰观测的人力、财力和物力。研究导线覆冰及其灾害防治具有重要的学术意义和工程应用价值[11]。

2.1. 输电线路冰厚计算

导线覆冰是一个复杂的物理过程,与热力学、流体力学和电流电场联系密切。输电线路覆冰是一个不稳定和复杂的过程,水滴在穿过冷气层时,自身温度会迅速降低,成为过冷却水滴,过冷却水滴在靠近物体表面时,在一定外界条件下会迅速冻结成冰,如果落在架空输电线路,就形成了导线覆冰。输电线路覆冰受很多因素影响,如环境温度、湿度、风速及其他因素[12]。

由于输电线路覆冰增长的物理机理复杂,在实际运行情况下,不同型号的导线、不同地理气象环境,导线覆冰增长情况更加多变[13]。本文作者所在课题组在之前的研究工作[14]中提出了计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测方法,本文不再累述。对于架空输电线路,导线舞动或脱冰跳跃可通过在线监测装置所测的拉力的突变加以剔除,对于仅需分析稳态的覆冰导线,可不考虑导线舞动、导线脱冰跳跃和风偏的情况。因如不考虑风偏作用在导线上的风荷载,导线覆冰荷载会比实际值较大,冰厚较实际测量值较厚,应采取修正系数对覆冰厚度进行修正。

因导线最低点仅有水平方向的拉力,取最低点到在线监测装置挂点为研究对象,根据导线覆冰后竖直方向上的力学平衡,在竖直平面内建立平衡方程:

$$F \times \sin \theta = G + (q_{ice} + q_0) \times S_a \quad (1)$$

式中, F 为测点轴向拉力; θ 为轴向拉力与水平方向的夹角; G 为金具自重总和; q_{ice} 为导线均匀覆冰等值荷载; q_0 为导线自重荷载; S_a 为电力环悬挂点到导线最低点的长度。

式中, S_a 如下所示:

$$S_a = X_a + \frac{X_a^3 \times \gamma^2}{6 \times \sigma^2 \times \cos^2 \beta} \quad (2)$$

式中, X_a 为在线监测装置悬挂点距导线最低点水平档距; γ 为导线自重比载; σ 为垂直平面内导线水平应力; β 为高差角。

其中,在线监测装置悬挂点距导线最低点水平档距为:

$$X_a = \frac{X_0}{2} \times \left(1 - \frac{2 \times h \times \sigma \times \cos \beta}{X_0^2 \times \gamma} \right) \quad (3)$$

式中, h 为高差。

其中, 垂直面内导线水平应力为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\gamma^2 \times X_0^3 \times \cos \beta}{24 \times \left(S_t - \left(\frac{X_0}{\cos \beta} \right) \right)}} \quad (4)$$

同时, 垂直平面内整档导线实时长度 S_t 可表示为:

$$S_t = S - S \times \alpha \times \Delta t \quad (5)$$

因此, 计算出导线均匀覆冰等值荷载后, 由覆冰密度为 ρ (雨淞覆冰, 0.9 g/cm^3), 导线直径为 d , 按照线路设计标准覆冰形状为均匀圆柱体, 则导线等效覆冰厚度为:

$$b = \sqrt{\left(\frac{d}{2} \right)^2 + \frac{q_{ice}}{9.8\pi\rho_0}} - \frac{d}{2} \quad (6)$$

2.2. 输电线路弧垂安全裕度计算

对于钢芯铝绞线, 由在线监测装置可知导线温度, 在导线温度均已知的前提下, 通过对钢芯应力进行迭代, 可以得到导线温度与导线应力、钢芯和铝线总应变及弧垂之间的关系[15]。对于某一给定的钢芯应力, 可得出钢芯总应变 X_s 为:

$$X_s = D_s + E_s + C_s \quad (7)$$

式中, D_s 、 E_s 、 C_s 分别为钢芯受热应变、弹性应变和蠕变应变。

此时导线的平均张力为:

$$F = \frac{F_H}{1 - \frac{1}{6} \left(\frac{W l_h}{F_H} \right)^2} \quad (8)$$

式中, F_H 为张力的水平分量; l_h 为档距的一半; W 为导线单位长度质量。

在钢芯和铝线截面积分别已知的情况下, 通过式(9)可求出铝线应力:

$$F = A_s \sigma_s + A_A \sigma_A \quad (9)$$

式中, σ_s 、 σ_A 分别为钢芯和铝线的轴向应力; A_s 、 A_A 分别为钢芯和铝线的截面积。

求得铝线应力后, 相应可得出铝层应变 X_A 。由应力分别得出钢芯和铝层应变后, 通过对钢芯和铝层应变进行比较, 当钢芯应变和铝层应变相等时, 退出迭代; 当钢芯应变不等于铝层应变时, 改变钢芯应力初值, 直到应变相等为止[16]。此时线路弧垂可由下式得出:

$$L_s = \frac{F_H}{W} \left(\cosh \left(\frac{l_h W}{F_H} \right) - 1 \right) \quad (10)$$

对于运行十年以上线路, 导线会发生蠕变变形, 使得导线伸长, 弧垂增加。因影响蠕变变形的因素十分复杂, 无法直接进行计算, 目前通用的做法是通过试验得出经验公式或实际测量进行考虑。如图 1 所示, 导线的蠕变伸长率与时间的关系是按指数规律变化的, 在双对数坐标上绞线蠕变伸长率与时间是线性关系, 因此方程可表示为:

$$\log \varepsilon = \log \alpha_c + \beta_c \times \log t \quad (11)$$

式中, ε 为由于蠕变产生的伸长(应变); t 为时间, h ; α_c 和 β_c 为经验常数。

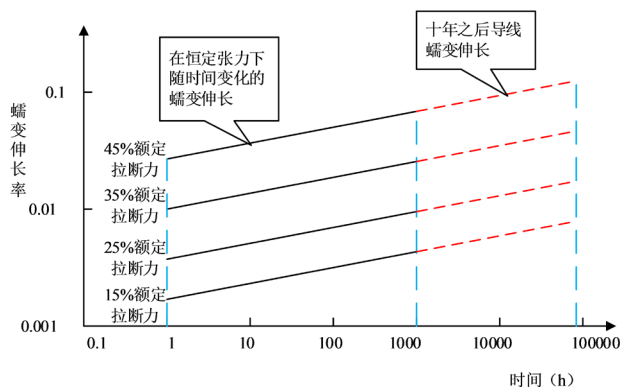


Figure 1. Diagram of conductor creep elongation rate changing with time
图 1. 导线蠕变伸长率随时间变化趋势图

3. 在线监测装置覆冰和弧垂裕度校核

随着在线监测技术的发展,电力系统逐步实现自动化运行,在线监测技术也得到了越来越多的应用,在线监测技术的应用提高了输电设备利用率和输电线路运行维护的水平。实时监测输电线路的各项运行参数,及时准确的掌握在线监测气象条件参数,从而分析输电线路的安全运行状态,可以达到全局掌握输电线路气象信息、实时监测预警以及气象历史资料的积累,继而能够有效的反映电力系统整体的运行情况,提高线路运行安全性。

线路覆冰是一个缓慢发展的过程,通过现场巡视,或通过人工视频监控不仅费时费力,且易受人员经验、责任心、技能水平等人为因素的影响,可能延误对重大冰情的发现和判断。利用图像监测装置采集到的图像和视频信息,通过分割获得的线路覆冰图像,然后提取出覆冰边缘,比较覆冰前后的边缘轮廓来判断导线的覆冰情况。随后通过覆冰载荷建模计算得到的各项结果进行实证校核,综合考虑计算得到的等效覆冰厚度、覆冰持续发展情况等因素,通过相关参数关联性方法进行分析。同时,采集输电导线在线监测装置监测得到的应力数据、位移数据、加速度数据、温度数据等信息,计及导线覆冰对弧垂的影响,综合考虑净空裕度,建立多参数融合的评估模型,可对输电线路覆冰趋势发展进行预测,为生产运行部门对融冰时机作出判断,提供有效的辅助决策依据。

当输电断面的部分线路处于覆冰或重度覆冰状态时,电网调度以及变电运维部门需要实时掌握输电线路的运行状态,分析输电断面的安全裕度,校核覆冰厚度和弧垂是否越限,提前进行预控,确保输电断面的安全与互联电网稳定运行。

通过在线监测装置监测得到的应力数据、加速度数据、温度数据等信息,和实际负荷预测曲线,由覆冰计算模型,得到单位导线覆冰重量、线路等值覆冰厚度以及导线不平衡张力差等参数,通过判断覆冰厚度是否大于最大允许冰厚 b_{max} ,确定架空输电线路是否处于危险或故障状态,同时由图像监测系统对覆冰厚度进行校核,如覆冰厚度超过已有阈值,及时发出预警,提醒运行人员应及时校核和巡检。

同时采用应变累加法同步计算弧垂增量,当净空距离大于绝缘安全裕度时,线路处于安全运行状态。当净空距离小于于绝缘安全裕度时,反推允许覆冰厚度,并发出预警,如图 2 所示。

$$\begin{cases} H_s > h_x, \text{安全} \\ H_s \leq h_x, \text{不安全} \end{cases} \quad (12)$$

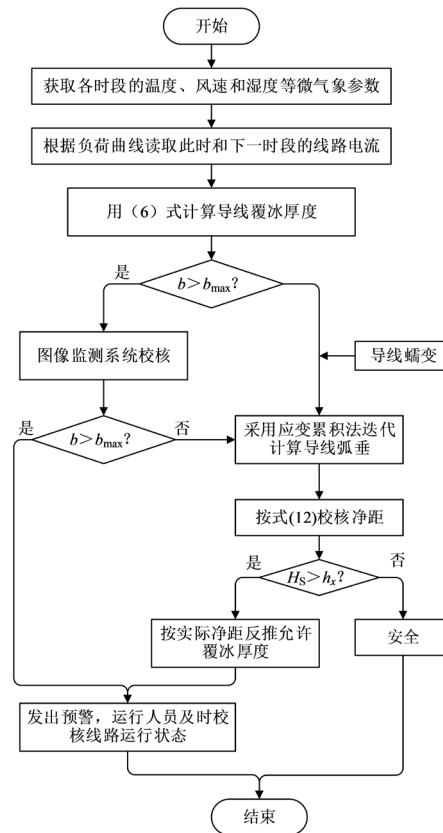


Figure 2. Evaluation process
图 2. 评估流程

4. 算例分析

以重庆地区某输电线路发生故障前后实测数据为例, 该输电线路在 2017 年 12 月 1 日因线路弧垂裕度较小连续发生数次跳闸, 为此, 采用该线路在 2017 年 12 月 1 日 0:00 至 2 日 0:00 分的每分钟微气象监测数据进行计算, 其环境温度和风速如图 3 所示。

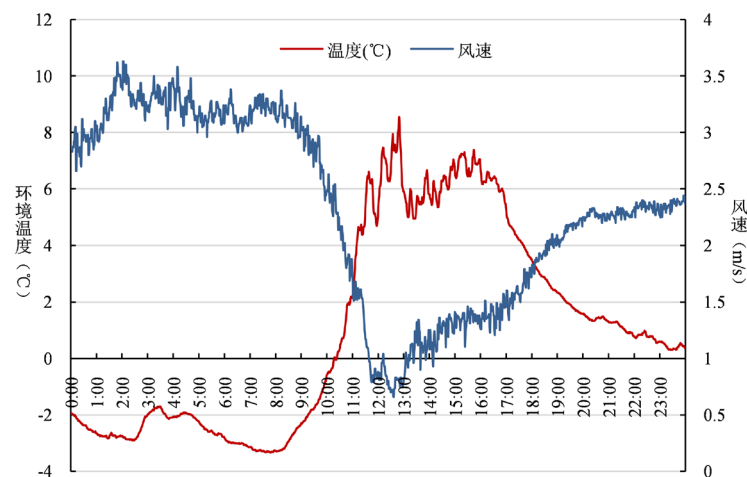


Figure 3. Ambient temperature and wind speed data acquired by a micrometeorological monitoring equipment
图 3. 某微气象监测装置采集的气温和风速数据

该输电通道所用导线型号为 LGJ 400/35，其参数如表 1 所示。

Table 1. Conductor parameters of LGJ 400/35

表 1. LGJ 400/35 导线参数

导线参数	值
导线外径/mm	26.82
钢芯直径/mm	7.5
导线截面积/mm ²	425.24
计算拉断力/N	103,900
安全系数	2.5

该输电通道取代表档距 200 m，按照国家设计规程，在设计导线弧垂时按导线温度 40℃ 情况或覆冰无风情况求得的最大弧垂计算垂直距离为 4 m，净空安全裕度为 0.5 m。

则根据所提覆冰预测模型及弧垂安全裕度计算方法，该条线路覆冰厚度、弧垂和弧垂安全裕度如图 4 和图 5 所示：

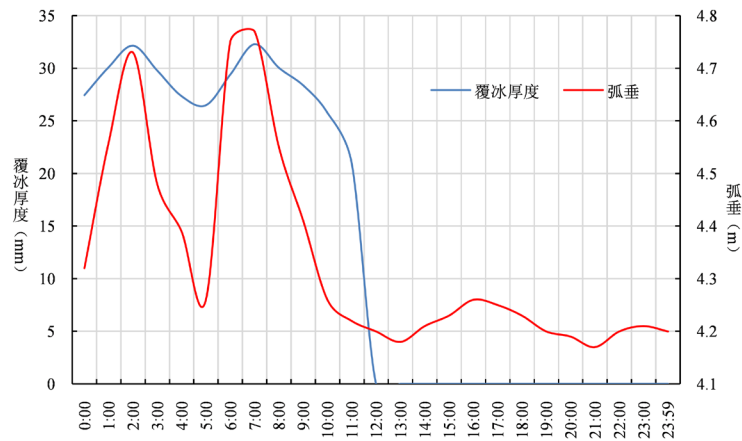


Figure 4. Ice thickness and sag

图 4. 覆冰厚度和弧垂

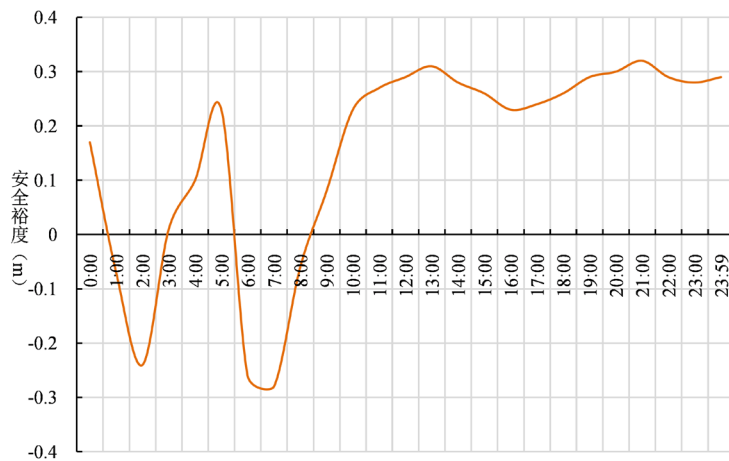


Figure 5. Headroom safety margin

图 5. 净空安全裕度

通过实际计算与该次事故记录可以发现, 该输电通道在 2017 年 12 月 1 日 1:12 至 2:25 分和 6:03 至 7:46 分发生多次跳闸事故, 可以发现, 冬季覆冰已经成为影响线路安全的主要因素。自 0:00 开始, 随着温度的降低, 导线覆冰重量不断增加, 弧垂相应减小, 至 1:12 分安全裕度转为负值, 随时可能发生放电事故, 威胁电网的运行安全。同理可知, 在 6:03 分安全裕度也减为负值, 并且覆冰厚度大于 30 mm, 应对其作出及时响应, 避免故障的发生。根据事故记录记载, 11:34 分发生脱冰跳跃, 由在线监测装置检测到拉力突变和相关加速度, 因脱冰跳跃造成连续 3 次跳闸事故。计算结果与实际记录相符, 证明了所提模型的准确性。虽然当天夜间温度较高, 但后期寒流还会持续到来, 对架空输电线路的结构强度和实际承载力提出了很大考验, 应及时关注线路实际状态, 保证电网的安全稳定运行。

5. 结论

重庆地区输电走廊气候环境恶劣, 是冬季极端天气多发区域, 恶劣的气象环境和地势特征给巡线工作造成了巨大困难, 输电线路长时间经受覆冰荷载, 线路安全裕度常常不能满足要求。本文所提模型和方法根据实时微气象监测数据进行覆冰增长预测及弧垂安全裕度发展趋势的动态估计, 并用图像检测技术进行校核, 不仅可知导线覆冰厚度, 还可以得到因覆冰造成的弧垂增大和其安全裕度是否符合要求。本文所得结果具有超前性、趋势性明显, 有助于电网运行和调度决策。电网调度运行人员可以提前发现安全隐患, 及时发出风险预警, 进行人员分配, 防范因导线覆冰和弧垂安全裕度过小导致的线路故障, 保证电网安全稳定运行。

参考文献

- [1] 王琼, 王黎明, 卢明, 等. 覆冰四分裂导线风洞试验与舞动研究[J]. 高电压技术, 2019(5): 1608-1615.
- [2] 阳林, 郝艳捧, 黎卫国, 等. 架空输电线路在线监测覆冰力学计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 100-105.
- [3] 李隆基, 高群, 孔相欢, 等. 防冰雪复合绝缘子悬挂方式优化及其影响因素分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019(6): 74-79.
- [4] 王乐, 孙强, 刘建琴. 中外应对电网冰灾事故措施对比分析[J]. 能源技术经济, 2008, 20(2): 6-10.
- [5] Liu, Y., Gao, S., Huang, D., et al. (2010) Icing Flashover Characteristics and Discharge Process of 500 kV AC Transmission Line Suspension Insulator Strings. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **17**, 434-442. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5448098>
- [6] 庄文兵, 祁创, 王建, 等. 基于微气象监测的输电线路覆冰动态过程估计模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 87-94.
- [7] Yang, H., Chung, C.Y., Zhao, J., et al. (2013) A Probability Model of Ice Storm Damages to Transmission Facilities. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **28**, 557-565. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2212216>
- [8] Zhou, N. and Xiong, X.F. (2015) *Electrical and Meteorological Technology and Its Application*. China Electric Power Press, Beijing.
- [9] 李泽椿, 毕宝贵, 金荣花, 等. 近 10 年中国现代天气预报的发展与应用[J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1069-1078.
- [10] IEEE Power and Energy Society (2012) IEEE Std. 738-2012. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. IEEE, New York.
- [11] 李佳, 王海燕, 梁艳, 等. 极端恶劣气候条件下的配电系统可靠性分析[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(12): 62-66.
- [12] 张志劲, 黄海舟, 蒋兴良, 等. 复合绝缘子雾凇覆冰厚度预测模型[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 318-325.
- [13] Bain, M. and Gayet, J.F. (2017) Contribution to the Modeling of the Ice Accretion Process: Ice Density Variation with the Impacted Surface Angle. *Annals of Glaciology*, **4**, 19-23. <https://doi.org/10.1017/S0260305500005176>
- [14] 庄文兵, 祁创, 熊小伏, 等. 计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019(17): 181251.
- [15] CIGRE TB324 (2016) Sag-Tension Calculation Methods for Overhead Lines. CIGRE, Paris.
- [16] Dong, X. (2016) Analytic Method to Calculate and Characterize the Sag and Tension of Overhead Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **31**, 2064-2071. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2510318>