

南方山区线路覆冰在线监测数据特征分析与预测模型研究

黄宵宁¹, 许瑞², 许家浩¹

(1. 南京工程学院电力学院, 江苏 南京 211167; 2. 国网浙江杭州市萧山区供电公司, 浙江 杭州 311200)

摘要: 我国南方山区由于地形气候的影响, 易在冬季导致输电线路严重覆冰, 进而给电网的安全运行带来巨大的挑战。因此通过对线路覆冰研究, 总结出南方山区覆冰数据中的规律和存在问题, 其重要性不言而喻。先从覆冰在线监测系统的原理入手, 并针对南方某典型山区覆冰在线监测数据开展导线覆冰特征定量分析, 总结出该山区在不同微气象条件下, 各个气象参数组合对覆冰的影响的规律。最后, 提出一种基于模糊逻辑和神经网络建立输电线路覆冰组合预测模型的方法。

关键词: 在线监测; 覆冰计算模型; 关键影响因素; 模糊逻辑

Analysis of the characteristics for on-line monitoring data and research of the forecast model of the line icing in southern mountain area

HUANG Xiaoning¹, XU Rui², XU Jiahao¹

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. Xiaoshan Power Supply Company of State Grid Zhejiang Hangzhou Electric Power Company, Hangzhou 311200, China)

Abstract: The transmission line is easy to ice severely in winter because of the influence of terrain climate in southern mountain area, which brings great challenge to the safe operation of power system. Therefore, it is important to discover the law and to find the defect of the icing data in this area through researching transmission line icing. Firstly, the principle of on-line monitoring system for transmission line icing is discussed. On this basis, the characteristic of icing is analyzed based on the on-line monitoring data. Moreover, the law of the influence on the ice of the combination of various meteorological parameters is summarized in different micro meteorological conditions of this mountain area. Finally, a method based on fuzzy logic and artificial neural network is proposed to build the combination model for forecasting the icing of the transmission line.

Key words: on-line monitoring; calculating ice model; key influence factor; fuzzy logics

中图分类号: TM933

文章编号: 1674-3415(2015)23-0111-06

0 引言

输电线路作为电力系统的动脉, 在电能的输送过程中起着桥梁与纽带作用。然而, 由于大量的输电线路以架空布线的形式存在, 无法避免长期暴露于野外, 使其成为电力系统中最为脆弱的部分^[1-2], 尤其是我国南方山区由于极端气候的影响, 极易在冬季形成覆冰。2008年, 我国南方山区线路覆冰导致严重事故, 其中500 kV 架空线路发生倒塔, 受损六百余基; 220 kV 架空线路发生倒塔, 受损一千多基, 其造成数以亿计的财产损失。2013年, 浙江宁波受到寒流影响, 发生雨雪冰冻灾害, 因覆冰灾害引起故障跳闸的高压线路一共有17条, 造成60万

负荷缺口无法填补, 给电网的安全运行带来了严峻的挑战^[3-4]。因此, 现在广泛采用输电线路覆冰在线监测装置, 采集大量覆冰相关数据, 为研究覆冰规律和预测覆冰提供了数据基础。

国内外对线路覆冰现象已有相关研究基础。日本在一个风洞设施中开展了试验研究, 监测单位时间内围绕导线的雪花分布、风速、湿度、温度、雪花中的液态水含量等参数, 分析了各种气象参数对冰雪的影响; 文献[5]提出了微气象和微地形的概念, 并分析了其对局部地区覆冰的影响; 文献[6-7]在覆冰在线监测装置的基础上, 利用线性拟合的方式研究了覆冰厚度与相对湿度、环境温度和风速之间的关系式; 文献[8-10]采用灰关联方法分析了输

电线路导线覆冰与微气象条件和导线温度等因素之间的关系,确定了导线覆冰和上述各个因素之间的关联度,并对导线覆冰主要因素的重要程度做了排序。

以上对线路覆冰的研究一方面停留在从覆冰物理过程的角度总结推导更精确的输电线路覆冰的数学模型。另一方面重点研究基于灰色综合关联分析方法和模糊逻辑理论,得出了覆冰和各个参数之间的关联度,用来对覆冰的发展进行预测。然而,由于外界气象因素变化不定,无法完全模拟在自然条件下复杂的覆冰过程,并且在对微气象因素与覆冰厚度的相关性分析时不够全面,从而影响了覆冰预测精度。本文通过线路覆冰在线监测系统所采集的大量微气象数据,推导了覆冰计算模型,并分析了某南方山区近年覆冰情况与微气象数据的内在联系,弥补了理论对组合条件因素考虑不足的缺陷,为提出结合模糊逻辑的神经网络算法提供了理论依据。

1 覆冰在线监测系统的原理

1.1 在线监测系统构成

总体来说,覆冰在线监测系统主要由监测终端、通信网络和主站组成。线路覆冰在线监测前端通过微气象传感器获得微气象参数:相对湿度、风速、风向、环境温度及气压等,在监测设备上还有泄漏电流传感器。设备通过绝缘子拉力传感器获得拉力数据,并由两个角度传感器分别采集绝缘子倾角及悬垂串线夹出口处的导线倾角,随后采用 GSM/GPRS 无线网络将传感器数据上传到服务器主站,再由后台软件根据静力学计算模型结合实际参数计算得出当前等效覆冰厚度,并在等效覆冰厚度接近设计冰厚阈值时报警。

1.2 架空线路覆冰计算模型

通过覆冰在线监测所采集的拉力和角度数据,常采用称重法计算导线覆冰厚度,在简化计算中的假设理想条件如下^[11-13]。

(1) 将绝缘子串和导线视为刚体,在风吹时不产生任何弯曲或变形。

(2) 将风压力视为静态力,均匀作用在导线和绝缘子串上。

(3) 导线和绝缘子串在受力平衡时风偏角最大。

文献[14]以拉力传感器替代绝缘子的球头挂环,同时利用角度传感器测量悬垂绝缘子串的倾角、风偏角和导线荷载,由于导线覆冰时受到风压荷载增大,导致绝缘子串发生倾斜,通过引入风偏角分析模型来计算导线覆冰厚度。

依据以上假设和依据,得出标准冰厚的公式如式(1)所示^[15]。

$$b = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{4q_{\text{ice}}}{9.8\pi\rho_0} + d^2} - d \right) \quad (1)$$

式中: q_{ice} 为覆冰载荷集度; ρ_0 为冰的密度; d 为导线直径; b 为覆冰厚度。

2 覆冰数据特征分析

线路覆冰和气象及地理位置条件有极其紧密的联系,考虑到覆冰预测模型应具有典型性和普遍性,由此本文选取了杭州临安某山区线路覆冰灾害记录及该山区线路覆冰在线监测系统数据为研究对象,通过对覆冰数据的聚类分析,总结出典型的南方山区覆冰的总体特征,为输电线路覆冰预测和防治提供理论基础。

2.1 覆冰影响因素分析

根据对杭州临安某山区覆冰灾害事故的调查,发生于该山区的线路覆冰主要是由雨淞、湿雪现象出现而造成的混合冻结,产生这类冻结的气象条件一般是气温在 $-5\sim 0^\circ\text{C}$,相对湿度 85%以上,即低温和高湿条件配合是线路覆冰的基本气象条件。在一些高海拔的山区线路上,由于气温较低,也出现了雾淞、雨淞、湿雪而形成的混合冻结。根据该山区发生输电线路覆冰事故的历史数据,可总结出。

(1) 随着海拔高度的逐渐提高,输电线路发生覆冰的次数也随之增加。

(2) 在海拔高度 0~200 m,随着海拔高度增加,线路覆冰次数急剧增加,而在海拔高度 300~700 m,覆冰次数较为平稳。同时,微地形对线路覆冰影响也不可忽视,例如:由于线路靠近水库、湖泊、河流等水体,造成周围水汽、湿度较大,在低温时加重了覆冰。如表 1 所示,许多线路由于临湖而建,导致受到大型水体湿气影响而覆冰严重。其中“溪岩 4397 线”、“天江 4486”等海拔高度并不算太高,但由于靠近大型水体,导致线路覆冰严重。

表 1 海拔高度与大区域水汽对覆冰的影响
Table 1 Altitude and the influence of large area water vapor to ice

线路名称	故障段 海拔/m	标准冰厚/ mm	附近水库 名称	水库距离/ km
双瓯 5463 线	571	25.4	雅溪水库	0
龙瓯 5464 线	625	27.6	雅溪水库	0
北春 5410 线	448	16.7	城湾水库	2
天晓 5477 线	448	16.7	城湾水库	2
丹浦 5445 线	527	16.6	南江水库	1
溪浦 5446 线	529	16.6	南江水库	1

根据覆冰历史数据不同海拔高度所表现的温度也不尽相同, 如1月21日和1月13日, 各个海拔高度温度差异巨大, 海拔1000 m与200 m温度差异达到6°C以上, 此时虽然海拔200 m温度还高于零度, 但在海拔1000 m高度下, 温度已下降到零下6°C, 如果此时线路所处地区湿气较重将可能引起输电线路严重覆冰。

虽然各个测量地点所处海拔高度各不相同, 但其大气相对湿度变化的趋势却是一样的, 也就是说在各个海拔高度下, 大气湿度与其所处的海拔高度并没有直接联系, 这与之前的理解有所冲突。由此可见, 输电线路覆冰事故除了相对湿度条件配合外, 主要反映在不同海拔高度的低温差异上。

2.2 覆冰在线监测数据分析

从杭州临安某山区的气象站可以获得各个海拔高度下空气的相对湿度及温度, 再结合在线监测系统前端采集的气象信息、导线覆冰信息为本文研究微地形及微气象环境对线路覆冰产生的影响提供了可供分析的数据。

(1) 线路覆冰数据特点

通过对三个微气象点采集的数据进行分析, 发现有如下几个特点。

1) 部分线路的覆冰在线监测终端对于最终的计算结果采取了归零措施, 即在覆冰厚度小于2 mm时, 采用零值代替, 采用此种算法大大降低了外部环境对最后计算结果的影响, 同时能减少运维人员对数据处理的工作量。但对于没有采用归零处理的监测终端, 覆冰厚度在2 mm以下的占到数据总量的百分之八十。

2) 通过监测数据可以发现, 在恶劣的天气条件下, 前端传感器可能出现失效和坏数据。例如当线路出现覆冰后一段时间内到线路覆冰结束, 风速始终为零, 并且风向一直保持在固定的角度。这种情况是不符合常理的, 因为形成覆冰时, 过冷却水滴应该在一定风速的驱动下撞击导线表面才能形成覆冰, 由此, 基本可以判定是风速传感器失效。

(2) 线路覆冰数据类型

通过对线路覆冰非零数据的分析, 可以帮助运维人员了解该地区经常出现的覆冰状况及其发展趋势, 从而准确高效率地实现覆冰线路的在线监测。

1) 中长期维持

覆冰厚度数据变化并不大, 在整个覆冰阶段内保持在2~3 mm之间, 从图1也可以看出, 风速始终保持在1~2 m/s之间, 变化厚度也不大, 且湿度始终在87%。当微气象条件不足以维持覆冰增长, 而气温还维持在零度以下, 此时易形成线路覆冰的

中长期维持, 由于覆冰厚度基本不再增长, 若前期覆冰情况较为严重, 可考虑到线路覆冰现场采取人工除冰措施。

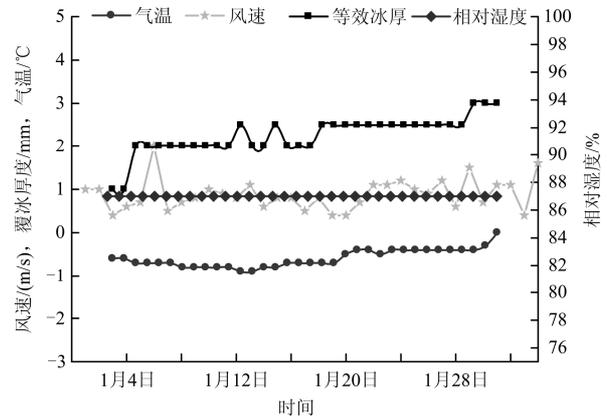


图1 中长期维持

Fig. 1 Altitude and humidity diagram

2) 线路覆冰震荡发展

此种情况在线路覆冰中较为常见, 其主要出现在冷空气南下, 给山区带来降雨或降雪时。如图2中所示, 风速与温度变化较为剧烈并与空气湿度相互影响, 使得线路覆冰厚度有时在快速增长而有时出现消融现象, 同时线路覆冰厚度的测量也可能受风速的影响, 造成导线风压荷载增大, 从而使导线覆冰测量出现偏差。

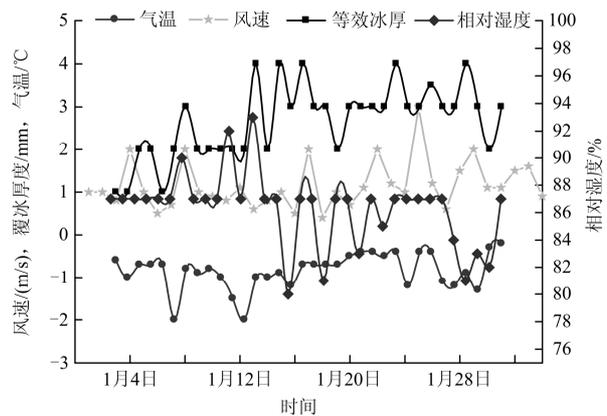


图2 线路覆冰震荡发展

Fig. 2 Lines in the ice shock development

3) 传感器失效的情况

图3是典型的传感器失效的情况。由图分析导致风速传感器失效的原因主要是低温覆冰时传感器被冻住而影响风速数据的正确采集。

(3) 线路覆冰全过程数据分析

如图4为杭州临安某山区线路在线监测装置所采集的一段覆冰趋势图, 它完整的记录了线路覆冰由开始到消融的全部过程, 其测量时间步长为15 min,

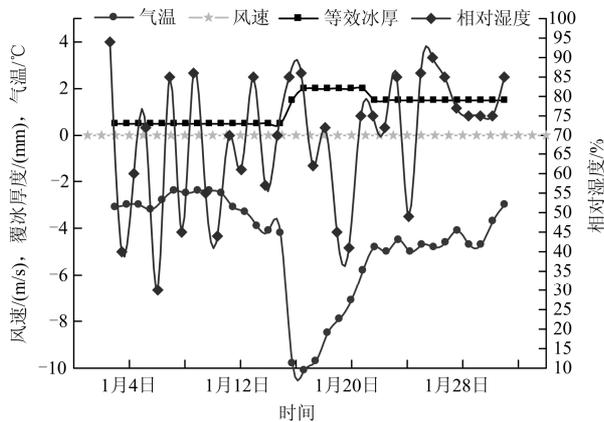


图3 风速传感器失效

Fig. 3 Wind speed sensor failure

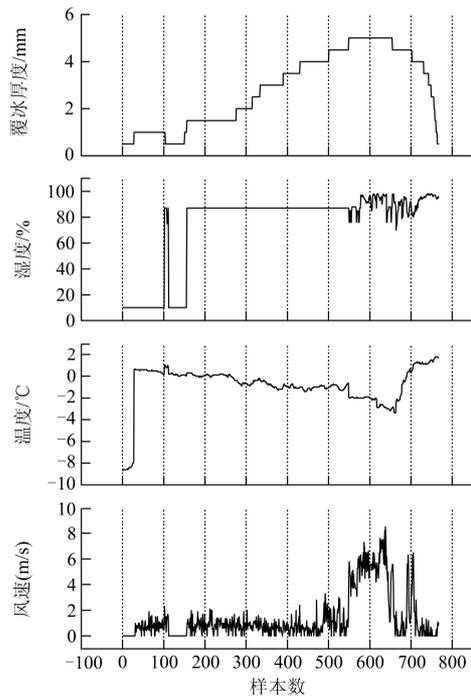


图4 等效覆冰厚度及同期微气象发展趋势

Fig. 4 Equivalent thickness of ice and development trend of micro climate

对于个别缺失的数据采用线性插值的方法进行处理。

从图4可以看出,在覆冰的初期阶段(采样点编号0~200)空气的相对湿度并不高,随后温度持续走低,并维持在-4~0℃之间,此时开始形成覆冰,但发展速度并不快,仅能维持在较大波动的动态平衡范围内,紧接着,空气湿度快速升高,并且伴随着2~4 m/s的风速,线路覆冰快速增长,微气象环境达到适合覆冰的条件(采样点编号400~500),之后由于

风速变大,覆冰增长受到影响,并在气温爬升之后覆冰快速消融。

3 线路覆冰组合预测模型

从上文分析中可见,地理位置对线路覆冰厚度有显著的影响,微气象条件下线路覆冰是一个多变量非线性系统,而且缺少针对微气象条件量化方法。本文通过对线路微气象数据进行模糊逻辑处理,然后再结合神经网络对历史覆冰数据与气象数据进行拟合,进而提出了线路覆冰组合预测模型。

3.1 地理位置信息模糊逻辑的建立

基于覆冰数据特征分析,本文采用模糊逻辑算法,补偿线路所处微气象对线路覆冰产生的影响,并对水汽和高度的两个主要因素的地理位置信息进行模糊化处理。

使用隶属度函数对水汽对线路覆冰的影响情况进行模糊化,如图5所示。

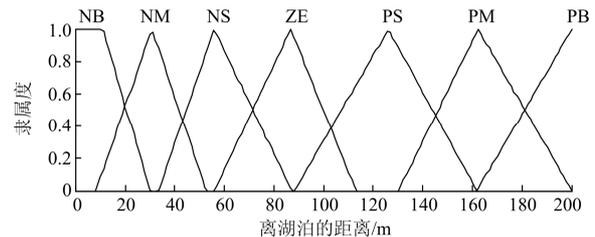


图5 水汽隶属度函数

Fig. 5 Subordinating degree function of moisture

在图5中,本文通过7种(NB,NM,NS,ZE,PS,PM,PB)模糊语言变量值对距离进行了模糊化,隶属度函数越密集说明影响程度越大。

如图6所示,本文通过4种(AL,AM,AH,AU)模糊语言变量值,对线路所处的海拔高度进行了模糊化。4个模糊语言变量值分别代表了线路四个不同的海拔。各个量的具体关系应该根据不同山区的具体特点来确定。如图,本文选取的山区地形高度隶属度函数相对平缓。

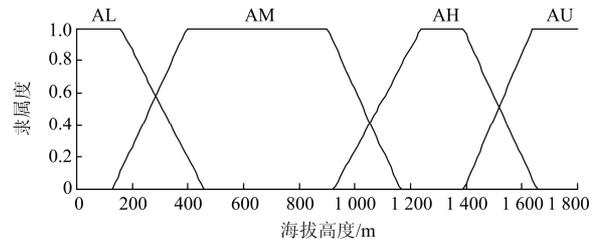


图6 线路高度隶属度函数

Fig. 6 Subordinating degree function of line height

在完成隶属度函数之后,采用模糊条件语句if...and...then的推理方法,建立模糊规则库,如此即可将大区域型水汽因素、海拔高度对输电线路覆

冰的影响充分考虑进去, 通过解模糊化便可得出误差校正系数。误差校正隶属度函数如图 7 所示: 取 5 个模糊变量: NB(负大); NS(负小); ZE(零); PS(正小); PB(正大)。

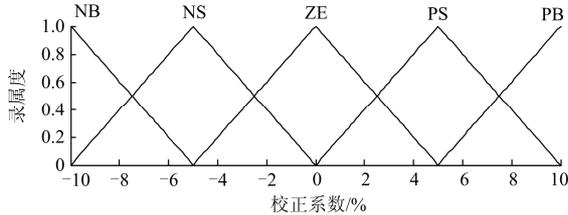


图 7 校正系数隶属度函数

Fig. 7 Subordinating degree function of correction factor

3.2 覆冰组合预测模型

本文建立的组合预测模型覆冰厚度计算式为

$$D_h = D_n + D_n \times \ell / 100 \quad (2)$$

式中: D_h 为预测厚度; D_n 为神经网络的输出值; ℓ 为校正系数。组合预测模型的流程如图 8 所示。

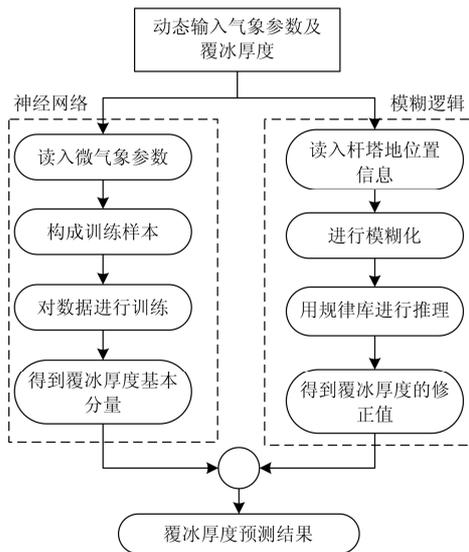


图 8 组合预测模型结构图

Fig. 8 Structure of combination forecast model

4 结论

本文结合典型的南方某山区导线覆冰的在线监测数据, 定量分析出该类地区线路覆冰受气温影响较大, 覆冰概率随着海拔高度增加而变大, 并且受到线路所处的微地形和微气象条件影响的结论。发现并提出南方山区输电线路覆冰发展状况分为中长期维持、震荡发展等特征, 指出了在线监测装置由于传感器失效而导致坏数据影响等问题。

在以上研究的基础上, 针对微地形、微气象条件对输电线路覆冰的影响, 采用模糊逻辑将主要影

响因素地理位置等信息模糊化处理并结合神经网络对历史覆冰数据与气象数据进行拟合, 从而建立了线路覆冰组合预测模型, 工程实践证明有较好的预测精度。

参考文献

- [1] 陆佳政, 张红先, 方针, 等. 自适应分割阈值在覆冰厚度识别中的应用[J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 563-567. LU Jiazheng, ZHANG Hongxian, FANG Zhen, et al. Application of self-adaptive segmental threshold to ice thickness identification[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(3): 563-567.
- [2] MACIEJ B. Digital image processing in measurement of ice thickness power transmission lines: a rough set approach[D]. Winnipeg: University of Manitoba, 2002.
- [3] 王教青, 戴栋, 郝艳捧, 等. 基于在线监测系统的输电线路覆冰数据统计与分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3000-3007. WANG Xiaoqing, DAI Dong, HAO Yanpeng, et al. Statistics and analysis of transmission lines icing data based on on-line monitoring system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3000-3007.
- [4] 陆佳政, 朱思国, 李波, 等. 特高压输电线路直流融冰变流系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 124-129. LU Jiazheng, ZHU Siguo, LI Bo, et al. DC ice-melting converter system design for EHV transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 124-129.
- [5] 张志劲, 蒋兴良, 胡建林, 等. 环境参数对绝缘子表面覆冰增长的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2418-2423. ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, HU Jianlin, et al. Influence of environment parameters on the icing accretion on the surface of insulator[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2418-2423.
- [6] FARZANEH M, SAVADJIEV K. Statistical analysis of field data for precipitation icing accretion on overhead power lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1080-1087.
- [7] 欧阳丽莎, 黄新波. 基于灰关联分析微气象因素和导线温度对输电线路导线覆冰的影响[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 31-36. OUYANG Lisha, HUANG Xinbo. Influences of meteorological conditions and conductor temperature on icing of transmission line based on grey relational analysis[J]. High Voltage Engineering, 2011, 47(3): 31-36.

- [8] 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.
- [9] 阳林, 郝艳捧, 黎卫国, 等. 输电线路覆冰与导线温度和微气象参数关联分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 775-781.
YANG Lin, HAO Yanpeng, LI Weiguo, et al. Relationships among transmission line icing conductor temperature and local meteorology using grey relational analysis[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 775-781.
- [10] 王阳光, 尹项根, 游大海, 等. 基于无线传感器网络的电力设施冰灾实时监测与预警系统[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 14-19, 35.
WANG Yangguang, YIN Xianggen, YOU Dahai, et al. Real-time monitoring and warning system for electric power facilities icing disaster based on wireless sensor network[J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 14-19, 35.
- [11] 张乐, 周步祥, 王小红, 等. 导线覆冰监测系统的力学模型与预警功能优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(11): 42-46.
ZHANG Le, ZHOU Buxiang, WANG Xiaohong, et al. Mechanical model of transmission line icing monitoring systems and optimization of alarm function[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(11): 42-46.
- [12] 杨伟, 章慧芸, 仲海波. 基于模糊神经网络的VSC-HVDC系统控制器的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 115-120.
YANG Wei, ZHANG Huiyun, ZHONG Haibo. Research on controller of VSC-HVDC system based on fuzzy neural network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 115-120.
- [13] 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, 3.
JIANG Xinliang, 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, 3.
- [14] 宋亚奇, 周国亮, 朱永利, 等. 云平台下输变电设备状态监测大数据存储优化与并行处理[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 255-267.
SONG Yaqi, ZHOU Guoliang, ZHU Yongli, et al. Storage optimization and parallel processing of condition monitoring big data of transmission and transforming equipment based on cloud platform[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 255-267.
- [15] 李立涅, 阳林, 郝艳捧. 架空输电线路覆冰在线监测技术评述[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 237-243.
LI Licheng, YANG Lin, HAO Yanpeng. Review of on-line monitoring of ice coating on overhead transmission line[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 237-243.

收稿日期: 2015-05-11; 修回日期: 2015-09-01

作者简介:

黄宵宁(1972-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事电力系统运行与控制、输配电装备与电网安全的研究工作。E-mail: huangxiaoning@njit.edu.cn

(编辑 姜新丽)