

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.01.025

基于决策树的输电线路覆冰故障诊断分析

周赞东^{1,2}, 龚浩^{1,2}, 吴念^{1,2}

(1. 南瑞集团有限公司, 南京 211106; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 输电线路作为电网薄弱环节之一,其安全稳定运行直接关系到电网的运行状态。目前,覆冰已成为威胁线路安全运行的重要因素。为了提高覆冰故障分析效率,研究其故障诊断模型显得愈发重要。文中通过某网省公司近5年输电线路覆冰跳闸数据,分析其发生规律,结合气象及微地形条件对覆冰故障的影响,构建基于决策树的线路覆冰故障诊断模型,梳理关键诊断变量因子及权重系数,提出疑似故障概率计算方法。最后结合诊断模型,对实际运行故障案例进行分析和计算,通过人工干预及现场排查确认覆冰故障类型,为输电线路故障诊断和故障排查奠定了良好的基础。

关键词: 输电线路; 绝缘子; 故障诊断; 决策树; 覆冰

Fault Diagnosis of Transmission Line Icing Based on Decision Tree

ZHOU Zandong^{1,2}, GONG Hao^{1,2}, WU Nian^{1,2}

(1. NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China; 2. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Transmission line as one of the weak links, its safe and stable operation is directly related to the operation of the grid state. Icing is an important factor which poses a threat to the safe operation of transmission lines. To enhance the icing fault analysis efficiency, icing fault diagnosis model becomes more and more important. In this paper, the data of icing tripping of transmission lines in the past five years are analyzed. Based on the influence of meteorological and micro terrain conditions, a fault diagnosis model of icing fault is constructed, which is based on decision tree. Combining the key diagnostic variable factors and weight coefficients, the calculation method of suspected failure probability is proposed. Finally, combining with the diagnosis model, the paper analyzes and calculates the actual running fault cases, and confirms the types of ice faults through manual intervention and on-site investigation, thus laying a good foundation for fault diagnosis and trouble shooting of transmission lines.

Key words: transmission line; insulator; fault diagnosis; decision tree; icing

0 引言

输电线路途经各种复杂地形条件,其故障直接威胁电力系统稳定运行。目前,输电线路常见的故障类型主要包括雷击、覆冰、外力破坏、污闪等。传统的线路故障排查主要以人工巡视确定方式为主,跳闸发生时信息分散且无法汇总,大量的报警信息或异常信息较难确定是何种因素或者多方面因素耦合效应引起的事故,仅凭运行人员的经验进行故障诊断,其快速性和正确性有所局限,因此研究智能化的输电线路故障诊断和分析系统对电力系统恢复

决策的制定和电力系统的安全运行具有重要意义^[1]。

文中通过分析近5年某网省公司线路覆冰跳闸数据,并对影响覆冰跳闸的气象及地形条件进行分析,研究输电线路覆冰故障诊断技术,融合多方位数据信息,通过海量数据对系统运行状态和异常情况做出判断,分析故障发生概率,并根据诊断为系统故障恢复提供依据^[2]。

1 典型缺陷覆冰跳闸分析

2011—2015年某网省公司电网220 kV及以上输电线路跳闸统计情况显示,输电线路年均覆冰跳

闸6次,特别是2013年,覆冰跳闸达11次,占该年省公司电网跳闸总数的18%,仅次于雷击跳闸和风偏跳闸。由此可见,覆冰跳闸已成为严重危害输电线路安全运行的多发故障之一^[3-4]。

根据对近5年该省份覆冰跳闸月度情况分析,覆冰跳闸集中发生在11月至次年3月份,其中2~3月发生覆冰跳闸次数为19次,占近5年覆冰跳闸总数的63.3%,因此覆冰跳闸主要发生在冬末春初。

覆冰跳闸按跳闸发生月份统计见图1。

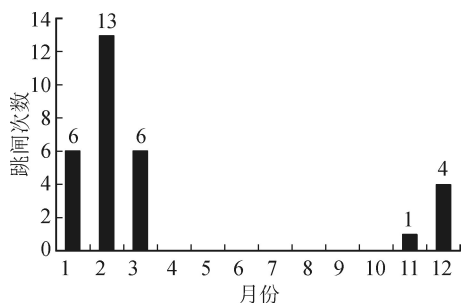


图1 按月份统计覆冰跳闸次数

Fig. 1 Statistics of icing trips by month

根据对近5年该省份覆冰跳闸故障类型统计分析,不均匀覆冰/不同期脱冰、绝缘子覆冰闪络为覆冰跳闸主要类型,分别占到总数的36.7%和26.7%。覆冰跳闸按故障类型统计见图2。

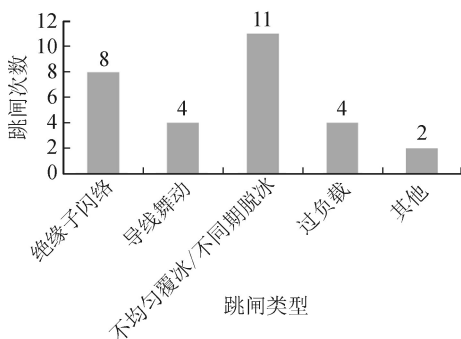


图2 按故障类型统计覆冰跳闸次数

Fig. 2 Statistics of icing trips by fault type

不均匀覆冰故障是不均匀覆冰导致相邻档距或连续档距内弧垂变化,引起导地线放电或者相间放电。不同期脱冰主要是因为不同时期脱冰造成导线承受荷载突然消失,引起导线大幅度跳跃,从而造成相间距离不足放电。绝缘子闪络主要是融冰过程中的表面导电水膜及表面冰柱造成的桥接。导线舞动则是在不规则覆冰条件下,在一定的风速、风向条件下,覆冰导线产生的自激振动频率与结构的固有频率相近产生叠加引起的。过负载是冰荷载接近甚至超过导线、杆塔本身最大抗冰荷载^[4-6]。

2 气象条件及环境对覆冰跳闸的影响

输电线路所处的地理位置和海拔高度、风速、风向与线路走向之间的夹角等因素与覆冰形成密切相关。

1)雨雪冰冻等恶劣天气。根据覆冰跳闸机理分析,低温、风及雨雪等恶劣气象条件是引起线路覆冰跳闸的重要因素。当温度在零点附近时,随着空气湿度增大,易在导线表面凝结成雾凇或雨凇形式的覆冰。据相关资料统计分析,风对于导线覆冰的作用主要体现在当风速在3~6 m/s时,导线覆冰增长最快^[2]。

当线路发生覆冰后,若覆冰的重量远大于所能承受的设计值时,弧垂增大,导线间或导地线易因距离不足而引发短路故障,也易引发因水平荷载严重而导致横向串基倒杆事故。当气温回升时,易形成输电线路大范围的绝缘子冰棱冰闪事故^[4,7-8]。

2)微地形环境。覆冰受山区地形、地貌的影响比较大,易发生覆冰的典型微地形区域包括高山分水岭型、水气增大型、垭口型、地形抬升型和峡谷风道型等。微地形影响线路覆冰主要是由于该地形条件下气候因子,如温湿度满足条件时易形成较大的水汽或风速较强时,形成的不均匀覆冰易引发导线不同期摆动,造成相间短路。当跨越特殊区域时,大高差或不均匀档距导致线路荷载不平衡,当线路发生覆冰现象时,荷载不平衡增加了导地线拉力,影响转角塔及基础的角变荷载,易造成绝缘子串倾斜等,随着覆冰厚度增长,导地线间距变小,最终因相间放电导致短路故障^[4,8]。

在海拔较高的山坡上,湿度一旦满足覆冰形成条件,易造成较严重的情况。主要原因为绝缘子悬挂高度较高,高处风速较大,向绝缘子串输送的水滴量变大,单位时间内覆冰厚度也越大,易发生绝缘子冰闪事故。

3 故障诊断模型

当线路发生跳闸故障时,第一步判断该故障是属于哪一种故障形式;第二步通过分析诊断该故障的具体故障类型找到发生故障的根本原因,从而为检修提供可靠的决策依据。

线路运行部门在接到调度部门故障查找通知后,首先根据线路故障发生的季节、时间、气候状况、故障录波(测距)数据、自动重合闸动作情况等数据对输电线路的故障性质进行初步判断,然后针对

不同的故障性质和线路状况采取针对性的故障巡线措施^[9]。

结合输电线路覆冰形成机理及故障特征,基于历年大量的线路覆冰现场数据及故障分析报告,构建如图3所示的覆冰跳闸故障诊断决策树,每一种故障都具有表征其特征的状态量,通过采集或计算得到的这些状态量输入到故障诊断模型中并可以得到相应的结论,在进行诊断推理的过程中可加入人工干预,充分利用专家库及故障案例库进行故障分析。

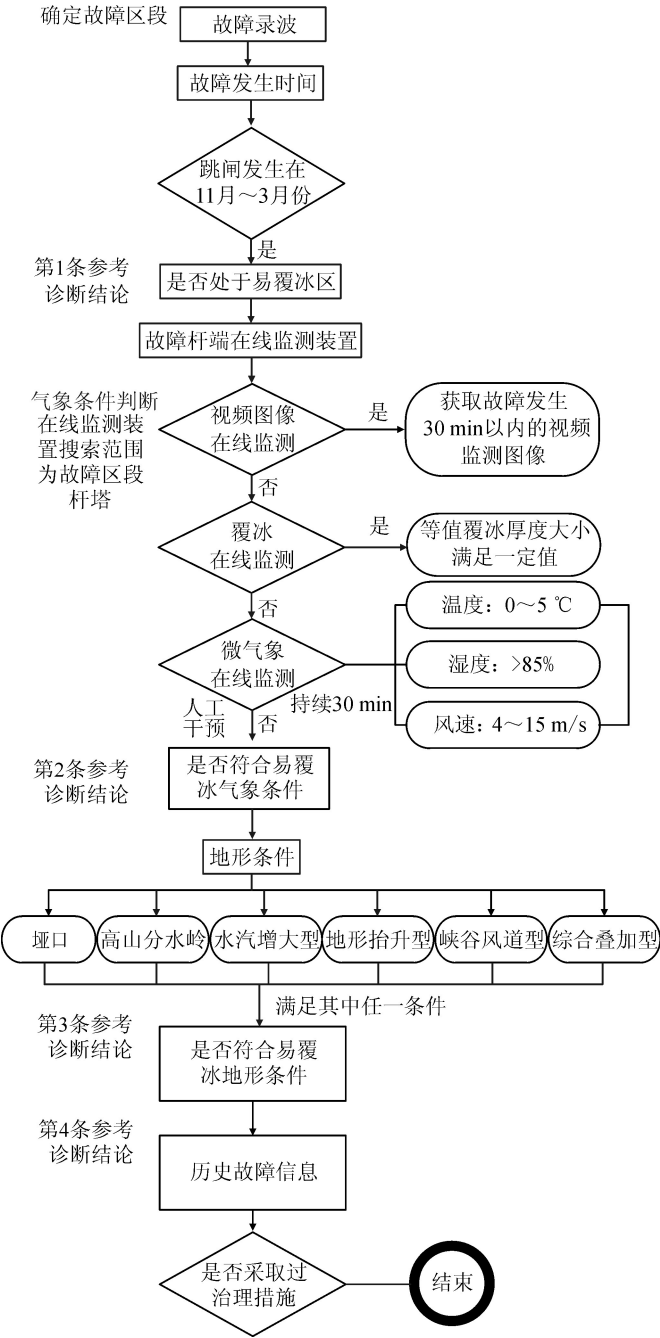


图3 基于决策树的覆冰故障诊断模型

Fig. 3 Icing fault diagnosis model based on decision tree

根据图3可知,覆冰故障诊断4个关键因子为:

A₁为是否处于易覆冰时段;A₂为是否符合易覆冰气象条件;A₃为是否符合易覆冰地形条件;A₄为是否发生过历史故障;

通过对基于决策树的覆冰故障诊断模型进行研究,结合网省公司现场实际运行经验、线路覆冰故障特征及发生机理,进行220 kV及以上输电线路跳闸统计数据样本训练及综合分析,覆冰故障诊断因子、影响因素及其权重分析见表1。

表1 覆冰故障诊断因子及权重
Table 1 Icing fault diagnosis factor and weight

关键因子	权重α	影响因素	参数值	权重β
A ₁	0.2	A ₁₁ 故障时间	11~次年3月份	1.0
			2~10月份	0.0
		A ₂₁ 视频在线监测	有覆冰	1.0
			无覆冰	0.0
A ₂	0.4	A ₂₂ 覆冰在线监测	无覆冰	0.0
			覆冰比值0.3	0.3
			覆冰比值0.3~0.5	0.6
			覆冰比值0.5以上	1.0
		A ₂₃ 微气象监测	温度0~-5℃、湿度>80%、风速3~15 m/s	1.0
			不符合温度、湿度和风速条件之一	0.0
		A ₂₄ 人工干预	满足覆冰条件	1.0
			不满足覆冰条件	0.0
A ₃	0.3	A ₃₁ 垭口	是	1.0
			否	0.0
		A ₃₂ 高山风	是	1.0
			否	0.0
		A ₃₃ 水汽增大型	是	1.0
			否	0.0
		A ₃₄ 地形抬升型	是	1.0
			否	0.0
A ₄	0.1	A ₄₁ 历史故障信息	峡谷风道型	1.0
			否	0.0
			综合叠加型	1.0
			否	0.0
			发生过历史覆冰故障,采取治理措施后超过2年未发生过覆冰跳闸	0.2
			发生过历史覆冰故障,但未改造	1.0
			未发生过历史故障	0.3

关键因子所占判定疑似故障权重因子为 α ,关键因子中涉及的影响因素判定疑似覆冰故障权重因子为 β ,则根据关键因子概率为

$$P_i = \alpha_{A_i} \max \beta_{ij} \quad (1)$$

当 $P_1=0$ 或 $P_2=0$ 时,则直接否定为疑似覆冰故障;

当 $P_1 \neq 0$ 且 $P_2 \neq 0$ 时,则疑似故障概率 P 为

$$P = \sum P_i \quad (2)$$

式(1)、(2)中: $i=1,2,3,4; j=1,2,3,4,5,6$ 。

1)当线路跳闸后,线路运行管理人员要及时与调度沟通,摸清故障线路保护动作情况,根据行波测距和故障录波系统,确定大致故障区段^[10-13];

2)根据线路跳闸发生月份,判断 A_1 关键因子是否发生在11月~次年3月份,若是则进行下一步诊断,否则直接否定为疑似覆冰故障;

3)当 $P_1 \neq 0$ 时,根据在线监测等多方面因素判断气候条件是否满足覆冰要求,若无实时数据判定,则需人工干预辅助判定;

4)当 $P_1 \neq 0$ 且 $P_2 \neq 0$ 时,根据线路实际运维数据、线路台账信息、特殊区域等,获取覆冰区段是否为特殊微地形区域;

5)线路的故障历史资料为故障的判定具有一定的指导价值,通过调阅历史故障库分析历史是否发生过跳闸,且对改造措施进行分析。

4 案例分析

输电线路故障诊断以线路状态信息为基础,当线路发生跳闸故障时,通过在线监测、历史数据库等方式可以获得大量的数据信息,这些状态参数经过数据预处理过程转变为可以支持故障诊断的状态量信息。将这些采集到的状态量信息代入到故障诊断模型便能得出故障诊断分析结果^[14]。

故障诊断实现对已发生故障的线路进行分析诊断,实现线路故障诊断自动化和故障诊断全过程的可视化,从而减少运维工作人员工作量。文中建立的故障诊断模型,对线路故障实现进行自动诊断,同时进行专家系统的人机交互,以决策树模型进行诊断溯源,以专家支持完善诊断分析流程^[15-17]。

1)自动诊断。根据故障决策树融合后的故障信息和监测参数信息,依据线路故障诊断模型,对线路跳闸进行综合诊断,最终得到疑似覆冰线路跳闸诊断结果。

2)人工诊断及审核。在自动诊断基础上,结合专家意见,对诊断结果不合理或者变量信息与实际不符的情况,可以对变量状态进行更改,实现人机

交互诊断功能,以保证诊断结果的准确性。同时,同一故障可由不同用户进行诊断,对不同的诊断结果,由专家进行审核,综合各方诊断意见,最终对线路跳闸原因进行确诊,保证诊断结果的准确性与可靠性^[18-20]。

3)案例分析。2016年12月30日14时30分开始下毛毛雨,气温2℃左右,西北风2~3级,12月30日晚气温骤降至-5℃,雨夹雪,根据气象监测信息显示,20:00~22:30时间段内,风速约4.5 m/s,湿度约98%。

12月30日22时15分,500 kV某线路直接三跳,两侧双套主保护动作,B-C相发生短路故障。

A变电站侧故障录波测距显示在96-99号范围内,保护测距18.6 km,B变电站故障测距86.41 km。

故障区段线路情况:

1)历史覆冰故障。2010年2月12日,舞动造成96-97号档内A-C相间(两上相之间)短路故障,发现A-C相第8个子导线间隔棒和C相子导线间隔棒附近导线上有明显放电灼伤痕迹。

2)历史覆冰改造。2010年7月,按照省电力设计院制定方案,对600 m档距进行了综合防舞治理。

3)故障区段地形情况:96-97号地处两个山梁,地形高差相对较大,97号比96号高165 m,档距中间横线路方向跨一道沟谷和土路,98、99号地形高差不大,位于同一个山梁上。

4)设备情况。为紧凑型线路,全线按中冰区和轻冰区设计,其中96-97号、98-99号按轻冰区设计,双串玻璃绝缘子(2×30×FC400/205)。

系统诊断结果:

根据发生月份在12月(符合11至3月条件);雨加雪(符合雨、雪、雾条件),气温-5℃,风速4.5 m/s,湿度95%,诊断为疑似覆冰故障^[15],故障计算概率: $P_1=\alpha_1\beta_{11}=0.2$; $P_2=\alpha_2\max(\beta_{21}, \beta_{22}, \beta_{23}, \beta_{24})=0.4$; $P_3=\alpha_3\max(\beta_{31}, \beta_{32}, \beta_{33}, \beta_{34}, \beta_{35}, \beta_{36})=0.3$; $P_4=\alpha_4\beta_{41}=0.02$; $P=\sum P_i=0.2+0.4+0.3+0.02=0.92$ 。

基于决策树覆冰故障诊断模型自动判定线路疑似覆冰故障概率达92%,通过人工干预审核及现场故障确认,96-97号档内B、C相间覆冰舞动。在2010年采取措施后仍发生故障,说明对山区微地形舞动认识还存在差距,治理措施的适用性、有效性有待进一步验证^[21-22]。

5 结语

文中通过融合在线监测、台账信息、历史故障库等多方位信息,研究构建了基于决策树的输电线路

路覆冰故障诊断模型及方法,并对覆冰故障诊断关键因子及权重进行分析,在自动诊断基础上引入专家支持和人工干预对诊断结论进行核实及确认,实现线路故障诊断自动化和故障诊断全过程的可视化,从而减少运维工作人员工作量。该模型系统已在某网省公司投入应用,后续将通过更多的数据积累和案例诊断,为输电线路故障诊断提供有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 王敦青,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 Xiaqing, DAI Dong, HAO Yanpeng, et al. Statistics and analysis of transmission lines icing data based on online monitoring system[J]. High Voltage Engineering, 2012,38(11):3000-3007.
- [2] 蒋兴良,舒立春,孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
JIANG Xingliang, SHU Lichun, SUN Caixin. Contamination and icing insulation of power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [3] 林韩. 电网防灾减灾应急管理系统建设与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2009:39-50.
LIN Han. The construction and application of grid disaster emergency management system[M]. Beijing: National Defense University Press, 2009:39-50.
- [4] 蒋兴良,马俊,王少华,等. 输电线路冰害事故及原因分析[J]. 中国电力,2005,38(11):27-30.
JIANG Xingliang, MA Jun, WANG Shaohua, et al. Transmission lines' ice accidents and analysis of the formative factors[J]. Electric Power, 2005,38(11):27-30.
- [5] 陆佳政,张红先,彭继文,等. 基于极值 I 型概率分布模型的湖南地区电网覆冰重现期计算[J]. 高电压技术,2012,38(2):464-468.
LU Jiazheng, ZHANG Hongxian, PENG Jiwen, et al. Calculation of Hunan power grid icing recurrence interval based on extreme-value type I probability distribution model[J]. High Voltage Engineering, 2012,38(2):464-468.
- [6] 曹永兴,张昌华,黄琦,等. 输电线路覆冰在线监测及预警技术的国内外研究现状[J]. 华东电力,2011(1):96-99.
CAO Yongxing, ZHANG Changhua, HUANG Qi, et al. Research status of on-line ice coating monitoring & forewarning technology of overhead transmission lines in China and abroad[J]. East China Electric Power, 2011(1):96-99.
- [7] 刘泽洪. 直流输电线路覆冰与防治[M]. 北京:中国电力出版社,2012:9-44.
LIU Zehong. Icing and prevention of DC transmission line[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012:9-44.
- [8] 巢亚锋,黄福勇,蒋兴良,等. 500 kV 输电线路绝缘子融冰闪络事故分析及应对措施研究[J]. 高压电器,2013,49(7):60-65.
CHAO Yafeng, HUANG Fuyong, JIANG Xingliang, et al. Analysis and countermeasures of ice-melting flashover for ice-covered insulator strings of 500 kV transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2013,49(7):60-65.
- [9] HITOSHI O. Recent progress and future perspective on condition monitoring and diagnostic techniques for power equipment in Japan[C]//2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Recent Progress and Future Perspective on Condition Monitoring and Diagnostic Techniques for Power Equipment in Japan. Beijing, China: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society, 2008:13-18.
- [10] 徐青松,劳建明,侯炜,等. 输电线路非均匀覆冰的实时监测和计算模型[J]. 高电压技术,2009,35(11):2865-2869.
XU Qingsong, LAO Jianming, HOU Wei, et al. Real-time monitoring and calculation model of transmission lines unequal ice-coating[J]. High Voltage Engineering, 2009,35(11):2865-2869.
- [11] 朱晔,王海涛,吴念,等. 输电线路覆冰在线监测动态预警模型[J]. 高电压技术,2014,40(5):1374-1381.
ZHU Ye, WANG Haitao, WU Nian, et al. Icing on-line monitoring dynamic prediction model[J]. High Voltage Engineering, 2014,40(5):1374-1381.
- [12] 王黎明,李海东,梅红伟,等. 输电线路覆冰在线监测系统国内外研究综述[J]. 高压电器,2013,49(6):48-56.
WANG Liming, LI Haidong, MEI Hongwei, et al. Review of on-line monitoring system of ice coating on transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2013,49(6):48-56.
- [13] 韩富春,周林伟,贾雷亮,等. 基于灰色关联度的架空线路运行状态的评价[J]. 高电压技术,2009,35(2):399-402.
HAN Fuchun, ZHOU Linwei, JIA Leiliang, et al. Evaluation of overhead transmission lines operation based on grey relation correlation[J]. High Voltage Engineering, 2009,35(2):399-402.
- [14] 戴栋,黄筱婷,代州,等. 基于支持向量机的输电线路覆冰回归模型[J]. 高电压技术,2013,39(11):2822-2828.
DAI Dong, HUANG Xiaoting, DAI Zhou, et al. Regression model for transmission lines icing based on support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2013,39(11):2822-2828.
- [15] 李晓明,周冬旭,江建飞,等. 输电线路覆冰自动防御系统建模及其对电网的影响分析[J]. 高电压技术,2013,39(3):698-704.
LI Xiaoming, ZHOU Dongxu, JIANG Jianfei, et al. Modeling for de-icing automatic defense system of transmission lines and analysis of influence on power grid[J]. High Voltage Engineering, 2013,39(3):698-704.

- [17] 邵瑰玮, 闵 绚, 董彦武, 等. 输电导线悬挂点处等效风荷载仿真分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 476-482.
SHAQ Guiwei, MIN Xuan, DONG Yanwu, et al. Simulation analysis of the equivalent wind loads on the transmission conductor two hanging points[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 476-482.
- [18] 孔德怡, 李 黎, 龙晓鸿, 等. 悬垂绝缘子串动态风偏角有限元分析[J]. 电力建设, 2008, 29(9): 5-9.
KONG Deyi, LI Li, LONG Xiaohong, et al. Finite element analysis of dynamic windage angle of suspended insulator strings[J]. Electric Power Construction, 2008, 29(9): 5-9.
- [19] 郑佳艳, 严 波, 刘小会, 等. 悬垂绝缘子串动态风偏响应的数值模拟[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(12): 100-103.
ZHENG Jiayan, YAN Bo, LIU Xiaohui, et al. Numerical simulation of dynamic response of suspension insulator string[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2006, 29(12): 100-103.
- [20] 严 波, 林雪松, 罗 伟, 等. 绝缘子串风偏角风荷载调整系数的研究[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 221-227.
YAN Bo, LIN Xuesong, LUO Wei, et al. Research on dynamic wind load factors for windage yaw angle of suspension insulator strings[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 221-227.
- [21] 闵 绚, 文志科, 吴向东, 等. 特高压长串绝缘子对风偏计算的影响研究[J]. 中国电力, 2014, 47(1): 28-34.
MIN Xuan, WEN Zhike, WU Xiangdong, et al. Research on the windage yaw calculation of UHV long insulator string[J]. Electric Power, 2014, 47(1): 28-34.
- [22] 郑佳艳. 动态风作用下悬垂绝缘子串风偏计算研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
ZHENG Jiayan. Study on computation methods of windage of suspension insulator strings under dynamic wind loads[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [23] 楼文娟, 李天昊, 吕中宾, 等. 多分裂子导线气动力系数风洞试验研究[J]. 空气动力学学报, 2015, 33(6): 787-792.
LOU Wenjuan, LI Tianhao, LYU Zhongbin, et al. Wind tunnel test on aerodynamic coefficients of multi-bundled sub-conductors[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2015, 33(6): 787-792.

吕中宾(1974—), 男, 硕士, 高工, 主要从事输电检修技术工作。

白 航(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究结构风工程。

(上接第 169 页)

- age Engineering, 2013, 39(3): 698-704.
- [16] 朱功辉, 孙 浩, 曲 毅. 输电线路覆冰预警一体化应用平台研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 69-72.
ZHU Gonghui, SUN Hao, QU Yi. Study on the integrative icing-alarm application platform for power transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(5): 69-72.
- [17] 夏辉军. 输电线路防冰减灾技术研究及覆冰在线监测系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
XIA Huijun. Transmission line icing mitigation technology research and online monitoring system design and implementation[D]. Chengdu: Xidian University, 2011.
- [18] 阳 林, 郝艳捧, 李立涅, 等. 架空输电线路覆冰状态评估模糊专家系统[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3028-3035.
YANG Lin, HAO Yanpeng, LI Licheng, et al. Fuzzy expert system for condition assessment of overhead transmission line icing[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3028-3035.
- [19] 彭向阳, 钱冠军, 李 鑫, 等. 架空输电线路跳闸故障智能诊断[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1965-1972.
PENG Xiangyang, QIAN Guanjin, LI Xin, et al. Intelligent trip-out fault diagnosis of overhead transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1965-1972.
- [20] 欧阳丽莎, 黄新波, 李俊峰, 等. 1 000 kV 特高压输电线路覆冰区的研究与划分[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 4-8.
OUYANG Lisha, HUANG Xinbo, LI Junfeng, et al. Research and division of icing area along 1 000 kV ultra high voltage AC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 4-8.
- [21] 史尊伟, 阳 林, 李 昊. 基于改进 Canny 算子的覆冰厚度测量方法[J]. 电瓷避雷器, 2013(6): 24-29.
SHI Zunwei, YANG Lin, LI Hao. Icing thickness measuring based on improved Canny operator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(6): 24-29.
- [22] 李亚伟, 张星海, 杨晓磊, 等. 四川西部电网覆冰特征及影响因素分析[J]. 电瓷避雷器, 2016(3): 167-172.
LI Yawei, ZHANG Xinghai, YANG Xiaolei, et al. Analysis of characteristics and influence factors of network icing in the Sichuan mountains[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(3): 167-172.

周赞东(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为输电线路智能运维技术研究。