

考虑融冰因素的输电线路覆冰故障概率计算

朱斌¹, 潘玲玲², 邹扬³, 李峰², 冯树海², 徐鹏²

(1. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210000; 2. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003;
3. 华中科技大学, 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 根据导线覆冰表面热平衡方程分析内外部融冰因素对导线冰载荷的影响, 计及地形对冰载荷的影响以及覆冰引起导线等效半径增大对风载荷的影响, 通过气象实测的降雨量、风速、风向、温度等信息以及电网运行信息、当前监测覆冰厚度等信息建立输电线路覆冰厚度增长预测模型。从输电线路覆冰过载机理出发, 构建覆冰故障概率计算框架, 从力学角度分析覆冰厚度及风速对输电线路的共同作用, 采用反映金属承载极限特性的指数模型计算输电线路故障概率。以实际线路为例验证了该模型计算得到的线路覆冰故障概率变化趋势与实际故障情况相符, 能够充分验证覆冰故障率与实际天气的相关性。

关键词: 输电线路; 覆冰; 外部融冰; 内部融冰; 故障概率

Fault probability calculation of transmission line considering ice melting factors

ZHU Bin¹, PAN Lingling², ZOU Yang³, LI Feng², FENG Shuhai², XU Peng²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, China; 2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The impacts of internal and external ice melting factors on ice load are analyzed according to heat balance equation of ice surface, and then the landform factor and the increased equivalent radius of iced line are taken into account for ice load and wind load calculation. The measured meteorological data such as rainfall, wind speed, wind direction, temperature, the power grid operation information, and the monitoring ice thickness information are used to establish the icing-thickness growth forecasting model of transmission line. The framework of icing fault probability calculation is formed via the icing overload mechanism of transmission line. The combined influence of icing-thickness and wind speed on transmission lines is analyzed from the standpoint of mechanics, and the fault probability of transmission line is achieved using exponential model that reflects metal bearing limit characteristic. The actual example verifies that the calculated icing fault probability of transmission lines is consistent with the actual fault trend, and the model can fully verify the correlation between icing fault probability and the actual weather condition.

Key words: transmission line; icing; external ice melting; internal ice melting; fault probability

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)10-0079-06

0 引言

恶劣天气已经成为引起输电线路故障的重要因素。而覆冰是影响电力系统安全的严重自然灾害, 是最容易引发输电线路群发性跳闸的灾害类型。严重覆冰造成杆塔及导线过荷载产生不平衡张力, 将造成大面积的倒塔、倒杆、断线、跳闸事故^[1-3]。因

此, 深入研究电网覆冰灾害的影响因素及其数学模型, 实现冰雪灾害气象条件下电网安全量化评估, 从而精确分析外部气象事件对电网的影响程度, 是目前研究电网综合态势感知的重要基础。

目前, 关于覆冰对输电线路的影响研究主要有融冰技术研究^[4-6]、覆冰监视与预测^[7-8]、覆冰故障率计算等。覆冰故障率计算主要采用历史数据统计方法以及建立覆冰厚度与故障率间的概率模型。文献^[9-10]分析了冰灾气候条件下影响线路停运率的各种因素, 并通过模糊语言或历史数据统计描述

基金项目: 国家电网公司科技项目“基于态势感知的电网运行轨迹表征方法研究”(DZ71-13-039); 北京市自然科学基金资助项目(3132035)

覆冰对线路的故障率的影响, 根据冰灾的工程实际以及电网运行人员的经验定制模糊规则系统, 从而建立了元件停运模型。文献[11]根据气象预报信息、微地形信息以及冰灾的时空演变动态预测线路的覆冰厚度, 分别评估线路受力、绝缘子闪络、导线舞动对输电线故障率的影响, 但并未考虑地形地貌、融冰因素的影响。文献[12]建立了计及地形因素的冰载荷模型和计入覆冰影响的风力载荷模型, 并针对同一线路同一时段可能处于不同级别冰冻气候的状况, 计算出关于时间函数的线路故障率, 但该文没有考虑融冰因素对故障率的影响。

本文首先根据覆冰热平衡方程得到内外部融冰体积, 然后计算考虑线路所经地理环境因素和内外部融冰因素的冰载荷以及考虑由覆冰引起导线等效半径增大的风载荷, 进而建立了覆冰故障率的总体计算框架, 评估线路覆冰故障率。该模型充分考虑融冰因素的影响, 并引入考虑微地形、微气象的相关因子, 计算线路覆冰故障率更符合实际天气。

1 输电线路覆冰故障率计算

1.1 热平衡方程

为对融冰过程进行热力学分析, 假设导线的通过电流是发热均匀的, 在融冰过程中导线电阻恒定; 且不考虑冰和水的分界面位置, 忽略导线上冰筒水层的影响。

把导线融冰过程看成准平衡过程, 则覆冰表面热平衡方程为

$$\Phi_F + \Phi_J + \Phi_{SOL} = \Phi_C + \Phi_E + \Phi_W + \Phi_S \quad (1)$$

式中: Φ_F 为液滴冻结时释放的潜热; Φ_J 为电流产生的焦耳热; Φ_{SOL} 为导线吸收太阳辐射所得热流量; Φ_C 为导线表面和空气之间因温差而产生的对流换热; Φ_E 为导线表面因水分蒸发而产生的潜热损失; Φ_W 为将过冷却水加热到表面温度所产生的显热损失; Φ_S 为导线与周围环境及太阳之间产生的热辐射而形成的辐射换热损失。

1.2 内部融冰

Vargas 和 Bejan 把覆冰导线冰过程分为两个阶段: 第一阶段是在导线由冰完全包裹的情况下融冰; 第二阶段, 导线上表面把冰筒剪破使冰脱落。在内部接触融冰过程中, 此时有热平衡方程为

$$Q_{MELT} = (\Phi_J - \Phi_C)\Delta t = \rho_i(1 + C_p(T_s - T_a))A_{MELT} \quad (2)$$

式中: Δt 为融冰时间间隔, s; Q_{MELT} 表示融冰所需要的热量; ρ_i 为覆冰密度, g/cm^3 ; C_p 为冰的定压比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; A_{MELT} 为导线融冰区域面积, m^2 ; T_s 为覆冰冰筒表面温度; T_a 是环境温度。计算

Φ_J 以及 Φ_C 需注意代入其中的导线温度为 0。

Δt 内导线中心与冰筒中心的距离为

$$x = A_{MELT}/D \quad (3)$$

式中: D 为线路直径, mm; 为简便计, 设 $x \geq R$ 时, 线路发生脱冰, R 为覆冰的厚度。

式(2)计算得到的融冰面积与 R 进行比较, 判断导线是否发生脱冰。未发生脱冰时, 利用式(11)减去内部融冰体积可得到考虑融冰因素的覆冰重量。

$$W = \rho_i g_n [10^{-6} \times \pi R_d (R_d + D) - A_{MELT}] L_t \quad (4)$$

式中: R_d 为预测的覆冰厚度半径, mm。当发生脱冰时, $R_d = 0$, W 亦为零。

1.3 外部融冰

天气久雪转晴, 环境温度升高时, 空气与冰表面的对流换热以及太阳和地面对倒显得辐射换热就会使导线上的覆冰开始融化。但只考虑外部融冰时, 则有

$$\rho_i(1 + C_p(T_0 - T_a))\Delta R_{MELT} = (\Phi_{SOL} - (\Phi_C + \Phi_S + \Phi_E + \Phi_W))\Delta t \quad (5)$$

式中, ΔR_{MELT} 为覆冰在 Δt 时间内减少的半径。

1.4 覆冰厚度增长

假设线路捕获到的雨滴均形成均匀覆冰, 则覆冰厚度增长量 ΔR 为^[13]

$$\Delta R = \frac{1}{\rho_i \pi} \sum_{j=1}^{t_1} \sqrt{(\rho_0 S_j)^2 + (3.6 V_j W_j)^2} \quad (6)$$

式中: ΔR 为计算所得覆冰增长厚度, mm; ρ_0 为水密度, g/cm^3 ; S_j 为降水强度, mm; V_j 为覆冰时的风速, m/s; $W_j = 0.067 S_j^{0.846}$ 为饱和空气中的液态水含量, g/m^3 ; t_1 为预报时冻雨持续时间, h。

同时, 风可以影响导线捕获雨滴的数量, 无风时原本可以被导线捕获的小水滴可能被风吹走。因此, 考虑风速的影响引入捕获系数 E , 按实验关联式计算^[14]

$$E = 1 / \left(1 + \frac{Cv}{Vd} \right) \quad (7)$$

式中: $C = 1.64$; v 为空气的运动粘度, 雨淞时取 $v = 13.2 \times 10^{-6} m^2/s$ 。导线捕获水滴量多少和水滴直径 d 等因素有关, 结合捕获系数, 同时还考虑了微地形因素的影响, 即风口及迎风坡等地形会加强风速, 使覆冰增厚, 而背风坡及谷底等地形则反之。

则修正后的覆冰厚度增长模型为

$$\Delta R = \frac{1}{\rho_i \pi} \sum_{j=1}^{t_1} \frac{1}{1 + \frac{Cv}{V_j d}} \sqrt{(\rho_0 S_j)^2 + (3.6 V_j W_j \alpha_d)^2} \quad (8)$$

式中, α_d 为地形系数, 加强风速与削弱风速的地形

取值不同。

在此模型的基础上, 覆冰厚度预测模型计入了已有覆冰实测数据, 以提高预测精度。可得覆冰厚度预测公式为

$$R_d = R_m + \Delta R \quad (9)$$

式中, R_m 为实测的覆冰厚度, mm。

1.5 覆冰故障率计算

假设覆冰荷载沿线路均匀分布, 考虑微地形对线路风荷载的影响, 计及线路自重, 则在冻雨过程中, 对于地理环境特征相同的一段档距, 作用在导线上冰风总荷载 H 可表示为

$$H = [(W + F_2 + G)^2 + F_1^2]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

式中: W 为覆冰荷载, N/m; F_1 为导线在水平方向上垂直于线路走向的风荷载, N/m; F_2 为沿线路走向垂直于地面方向向下的风荷载, N/m; G 为输电线路自重, N/m。可由下列公式获得。

$$W = 10^{-6} \times \rho_w \pi g_n R_d (R_d + D) L_t \quad (11)$$

$$F_1 = 10^{-3} \times \frac{\rho_w}{2} V_1^2 (2R_d + D) L_t \quad (12)$$

$$F_2 = 10^{-3} \times \frac{\rho_w}{2} V_2^2 (2R_d + D) L_t \quad (13)$$

$$G = \frac{10^{-3}}{4} \pi D^2 L_t \rho_l g_n \quad (14)$$

式中: L_t 为线路长度, m; g_n 为重力加速度, 取值 9.8 m/s^2 。 ρ_w 为空气密度, g/cm^3 ; V_1 为水平方向上垂直于线路走向的风速, m/s; V_2 为垂直地面方向的风速, m/s; ρ_l 为导线密度, g/cm^3 。

则导线的冰风总比载为

$$\gamma = 4H / \pi D^2 L_t \quad (15)$$

需要利用已知状态下线路水平应力以及荷载, 已知正常状态下线路比载(通常为自重比载) g_m 以及线路应力 σ_m , 结合冰风总比载 γ , 可利用线路状态方程式求解线路冰风荷载下线路最低点的应力 σ_n 。设 A 、 B 为

$$A = \frac{K g_m^2 l^2}{24 \sigma_m} - \sigma_m + \alpha E (t_n - t_m) \quad (16)$$

$$B = E \gamma^2 l^2 / 24 \quad (17)$$

则线路的状态方程为

$$\sigma_n^2 (\sigma_n + A) = B \quad (18)$$

式中: K 为线路的弹性系数, 单位为 N/mm^2 ; α 为线路温度膨胀系数, 单位为 $1/^\circ\text{C}$ 。 l 为线路档距, 单位为 m; t_n 、 t_m 分别为线路在覆冰环境下的温度以及已知应力情况下的初始温度。解式(18)可得线路

最低点的应力 σ_n 。

对连续档导线, 考虑到较高杆塔承受压力较大, 引入高差角 β , 忽略绝缘子偏移对 β 的影响, 则导线最低点到较高杆塔的水平距离为^[15]

$$l_m = \frac{l}{2} + \frac{\sigma_n h}{\gamma l} \cos \beta \quad (19)$$

可得较高杆塔所受水平应力为

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_n^2 + \frac{\gamma^2 l_m^2}{\cos^2 \beta}} \quad (20)$$

针对单档距, 采用指数函数拟合输电线路覆冰过程断线故障概率 P_1 与导线最大应力 σ_s 之间的关系

$$P_1 = \begin{cases} K_1 e^{\frac{\sigma_0}{\mu_1 \sigma_s}}, & \sigma_0 \leq \sigma_s \\ 1, & \sigma_0 > \sigma_s \end{cases} \quad (21)$$

式中: μ_1 为安全系数; K_1 为常数。

将线路 X 段中的每段作为一个独立部分, 则线路某段发生故障时, 线路整体都停运。利用逻辑串联公式, 某条线路故障的概率为

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^X (1 - P_i(t)) \quad (22)$$

式中: i 为段标号; $P_i(t)$ 为线路的 i 段在 t 时刻的故障概率值。

2 覆冰故障率计算框架

输电线路覆冰故障率计算流程如图 1 所示, 主要包括 4 个阶段: ①基本信息读入; ②线路覆冰/

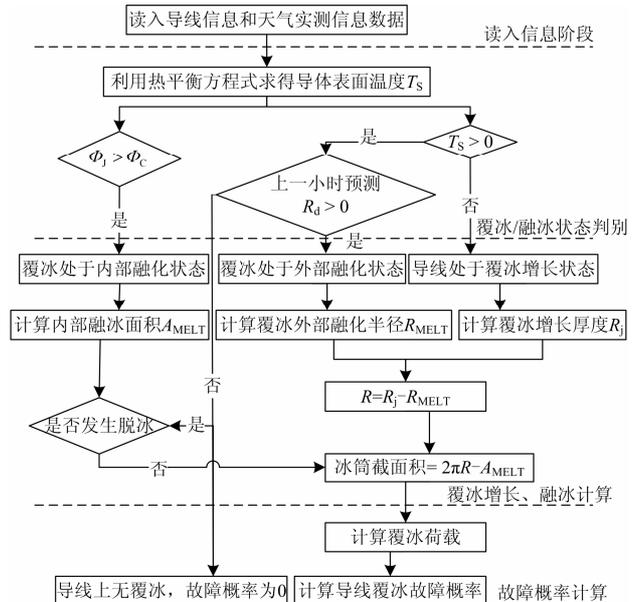


图 1 故障概率计算流程图

Fig. 1 Framework of fault probability calculation

融冰状态判断；③覆冰增长预测和融冰体积计算；
④输电线覆冰故障概率评估。

读入信息包括输电线路基本信息(导线线型、档距长度、导线外径、高差角、安全因子、制造时温度、温度膨胀系数、导线弹性系数、平均运行应力、线路数量、线路设计最大拉力等)、地理环境信息(地形、坡度等)、气象预报信息(冻雨发生范围)、气象实测信息(风速、风向、温度、降雨量等)和电网实测信息(电网实时运行数据、线路覆冰厚度监测数据)。覆冰/融冰状态判断是根据电网运行状态以及气象实测数据分析导线覆冰表面热平衡方程，判断线路是否处于融冰状态。覆冰增长预测和融冰体积计算则根据覆冰厚度增长模型以及内外部融冰公式预测输电线的覆冰厚度，计算冰载荷。结合冰风总载荷以及导线自重，以线路设计最大拉力评估覆冰过载引起的输电线故障概率。

3 算例分析

根据以上故障概率计算流程框架，考虑融冰因素建立的覆冰故障概率预测模型，对某 220 kV 输电线路进行算例分析。采用型号为 LGJ 400/20 架空线路，相关参数可通过相关手册查得。将此线路分成五段，标号为 a/b/c/d/e，并认为各段所在区域地形系数、周边环境系数、档距以及杆塔高角差等各不相同，整条线路各段参数如表 1 所示。当地实测 24 h 内天气变化信息如图 2。

表 1 各段导线参数

Table 1 Wire parameters

	a 段	b 段	c 段	d 段	e 段
线路档距/km	0.6	0.4	0.5	0.7	0.8
地形系数	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
杆塔高差角/(°)	15	5	10	15	20
周边环境系数	0.6	0.8	1	1.2	1.4

根据覆冰厚度预测模型，并考虑融冰因素的影响，可得到各段线路所承受的覆冰荷载变化曲线，如图 3 所示。

可以看出，当前天气状况对线路的初始覆冰影响不大。由于线路所在区域的天气在该时段并不恶劣，线路所产生的焦耳热大于对流换热的损失，使得初始覆冰能在一到两个小时内融化。同时，受地形系数及周边环境系数的影响，线路 a、b 两段覆冰荷载明显较 c、d、e 段小，在 12~19 h 时刻尤其明显。由此可知，模型加入地形系数以及周边环境系数后，增强了对区域中各段环境地形的适应程度，提高了故障概率预测的准确性。

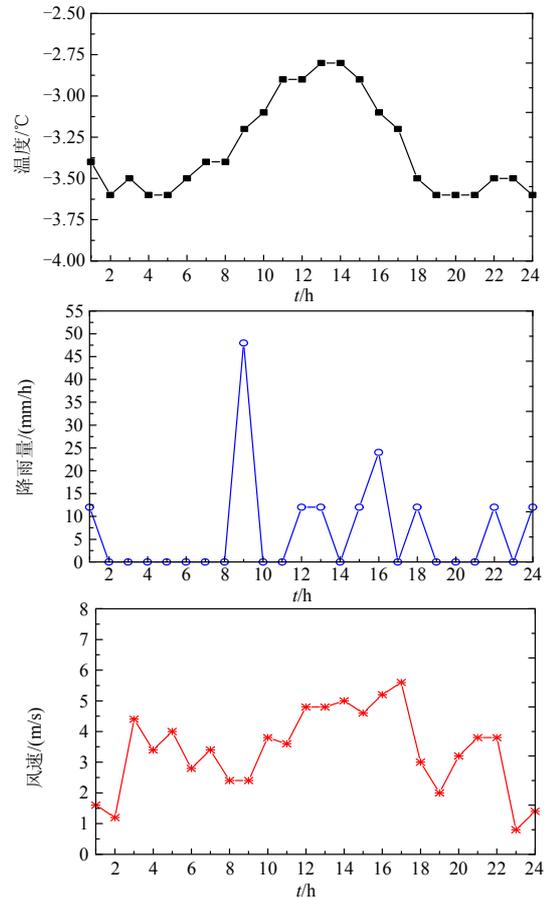


图 2 天气信息

Fig. 2 The measured meteorological information

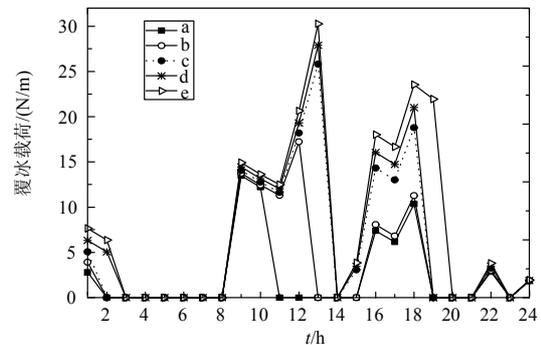


图 3 线路各段覆冰荷载

Fig. 3 Icing load of each line

同时，根据模型计算得出每段线路所承受的风力荷载变化曲线，如图 4 所示。风力荷载与风力情况相关，曲线变化较剧烈。风力荷载相对覆冰荷载来说数值较小。当覆冰厚度增加时，风力荷载会明显增加。

通过把冰力、风力荷载计算值与设计值拟合对应并综合处理，得到线路不同时段分段故障率，进而求得各段线路的实时故障率。每段线路覆冰故障概率如图 5 所示。

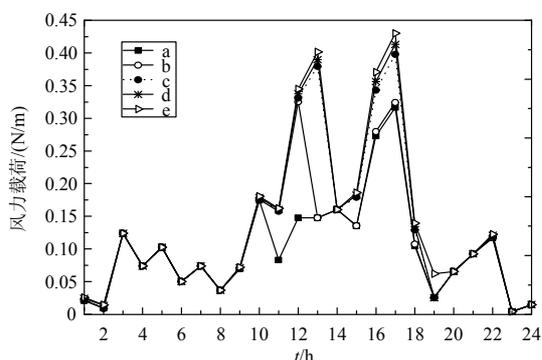


图 4 各段线路风力载荷

Fig. 4 Wind load of each line

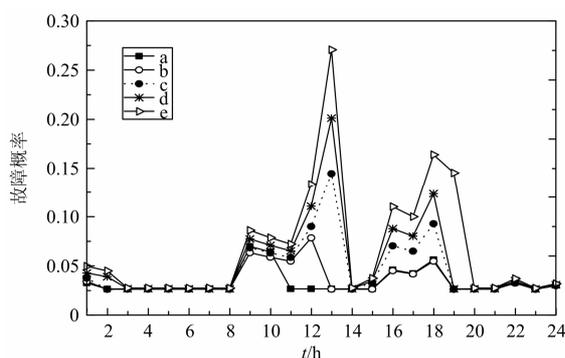


图 5 每段线路的覆冰故障概率

Fig. 5 Icing fault probability for each line

由图 5 可知, 覆冰故障概率走势与区域天气信息一致。利用式(22)可计算得出线路总体故障概率曲线, 如图 6 所示。

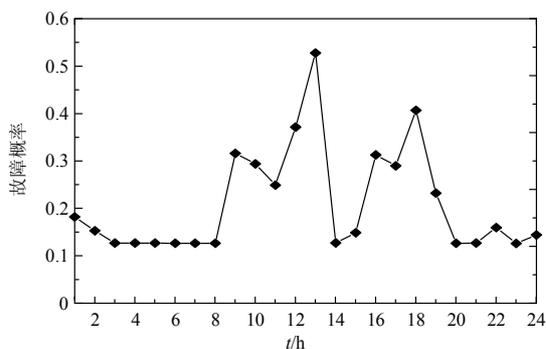


图 6 线路总体故障概率

Fig. 6 The total fault probability

根据该线路实际运行故障清单, 此线路在该区域于当天 7 h, 8 h, 10 h, 20 h 发生故障 1 次, 11 时发生故障 3 次, 从图 3 曲线可看出, 此模型预测出 8 h、10 h 故障概率升高, 尤其是在 11 h 与 12 h 两个时刻故障概率达到峰值, 线路总体故障概率变化趋势与实际故障情况基本相符。而在 7 h 以及 20 h

的故障并未预测到, 是由于即使线路所在区域没有降水, 空气中湿度较高同样可使线路处于覆冰增长状态, 本文没有充分考虑空气湿度影响, 对覆冰荷载的增长速度有所低估。另外, 计算故障概率时采用的指数模型使得在覆冰厚度不大时有可能出现低估线路故障概率的情况。

4 结语

本文通过研究导线表面覆冰热平衡方程, 建立了内外部融冰模型, 计算考虑地形因素覆冰影响的冰载荷和风载荷, 并给出覆冰故障率计算流程框架, 从而评估了覆冰对输电线路的影响。

极端冰雪灾害是小概率、大范围、长过程事件, 可对电力基础设施造成严重损坏, 直接影响系统的安全稳定运行。随着电网电源、负荷、输电等多个环节的不确定性因素增强, 基于不确定性模型的电网发展趋势风险评价方法能够实现电网运行风险的提前预警, 综合态势感知需要预知气象事件, 从而评价极端覆冰灾害等极端气象事件对电力系统运行的影响, 提升电网抵御可能风险的水平, 有效降低连锁故障发生的几率。

参考文献

- [1] 胡毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 215-219.
HU Yi. Analysis and countermeasures discussion for large area icing accident on power grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 215-219.
- [2] BOWLES J B. Commentary caution. constant failure rate models may be hazardous to your design[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2002, 51(3): 375-377.
- [3] 王少华, 蒋兴良, 孙才新. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 11-14.
WANG Shaohua, JIANG Xingliang, SUN Caixin. Study status of conductor galloping on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10): 11-14.
- [4] 覃晖, 邓帅, 黄伟, 等. 南方电网输电线路融冰措施综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 231-235.
QIN Hui, DENG Shuai, HUANG Wei, et al. Summary of power transmission line thawing measures[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 231-235.
- [5] 舒立春, 罗保松, 蒋兴良, 等. 智能循环电流融冰方法及其临界融冰电流研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 26-34.
SHU Lichun, LUO Baosong, JIANG Xingliang, et al. Intelligent cycled current ice melting method and its critical ice-melting current study[J]. Transactions of

- China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 26-34.
- [6] 焦重庆, 齐磊, 崔翔, 等. 输电线路外施中频电源融冰技术[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 159-164.
JIAO Chongqing, QI Lei, CUI Xiang, et al. Power line de-icing using medium frequency power source[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 159-164.
- [7] 黄文焘, 邵能灵, 范春菊. 基于杆塔结构力学测量的线路覆冰在线监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 71-75, 83.
HUANG Wentao, TAI Nengling, FAN Chunju. Study on icing monitoring system of different tower overhead transmission lines based on mechanics measurements[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 71-75, 83.
- [8] 曹翊军, 董兴辉, 曹年红, 等. 基于图像采集与识别的输电线路覆冰监测系统[J]. 电工技术, 2010(8): 51-53.
CAO Yujun, DONG Xinghui, CAO Nianhong, et al. Ice monitoring system of overhead transmission line based on image acquisition and recognition technology[J]. Electric Engineering, 2010(8): 51-53.
- [9] 张志劲, 黄海舟, 蒋兴良, 等. 基于流体力学的不同型式绝缘子覆冰增长过程分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 35-43.
ZHANG Zhijin, HUANG Haizhou, JIANG Xingliang, et al. Analysis of ice growth on different type insulators based on fluid dynamics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 35-43.
- [10] 孙荣富, 程林, 孙元章. 基于恶劣气候条件的停运率建模及电网充裕度评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 7-13.
SUN Rongfu, CHENG Lin, SUN Yuanzhang. An outage rate model and system adequacy assessment based on adverse weather conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 7-13.
- [11] 张勇军, 许亮, 吴成文. 计及多因素的电网冰灾风险评估模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 12-17.
ZHANG Yongjun, XU Liang, WU Chengwen. Research on ice disaster risk evaluation model of power system considering multi-factors[J]. Power System Protection and Control, 2012, 30(15): 12-17.
- [12] 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 Fushuan, 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.
- [13] 韩卫恒, 刘俊勇, 张建明, 等. 冰冻灾害下计入地形及冰厚影响的分时段电网可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 81-86.
HAN Weiheng, LIU Junyong, ZHANG Jianming, et al. Power system time-section reliability assessment analysis considering topography and icing under freezing disaster weather[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 81-86.
- [14] RKJAR. Icing severity in the December 2002 freezing-rain storm from ASOS data[J]. Monthly Weather Review, 2003(132): 1630-1644.
- [15] 刘和云, 周迪, 付俊萍, 等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 45-48.
LIU Heyun, ZHOU Di, FU Junping, et al. A simple model for predicting glaze loads on wires[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 45-48.

收稿日期: 2014-08-05; 修回日期: 2014-10-09

作者简介:

朱 斌(1965-), 男, 高级工程师, 研究方向为智能电网, 调度自动化和配网自动化;

潘玲玲(1985-), 女, 工程师, 研究方向为电力系统优化调度与仿真; E-mail: panlingling@epri.sgcc.com.cn

邹 扬(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行风险评估。

(编辑 葛艳娜)