

DOI: 10.7667/PSPC170341

聚合时空特征的新疆 750 kV 特高压输电线路缺陷关联分析

田浩^{1,2}, 章涵^{1,2}, 王海涛^{1,2}, 何君^{1,2}, 范鹏^{1,2}, 郭钧天^{1,2}, 罗飞³

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430070; 3. 武汉大学计算机学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 输电线路缺陷的危害性小于故障, 但发生频率要远高于故障, 而且缺陷可由量到质转变为严重故障。为了保障线路的正常运行, 必须对缺陷防患于未然。在经典 Apriori 关联分析方法基础上进行改进, 新方法从时空特征的角度, 结合气象外力、设备、地形和缺陷进行联合关联分析, 可找出线路缺陷发生的关联因素。以新疆 750 kV 特高压输电线路为例, 所提方法发现 2012 年至 2015 年新疆 750 kV 特高压输电线路的缺陷关联因素表现出以下特点: 大风是缺陷主要外力因素, 自身主要因素是锁紧销缺损情况, 空间上与杆塔所在的纬度(北纬 43~43.5°)、坡向(158~202°)和杆塔高(50~55 m)有关, 气象特征上 24×7 h 持续保持在 175~235°的风向与缺陷关联。

关键词: 特高压输电线路; 缺陷; 气象因素; 地形; 时空特征

Defects association analysis of 750 kV UHV transmission lines in Xinjiang by combining spatial-temporal characteristics

TIAN Hao^{1,2}, ZHANG Han^{1,2}, WANG Haitao^{1,2}, HE Jun^{1,2}, FAN Peng^{1,2}, GUO Juntian^{1,2}, LUO Fei³

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. Wuhan NARI Technology Development Co., Ltd, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430070, China; 3. School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Defects of transmission lines are less harmful than faults, but the defects' frequency is much higher than the faults', and defects can change to serious faults when their amount increases. In order to protect the normal running of transmission line, it needs to take precautions against the defects. Based on the classical association analysis method Apriori, an improved method is proposed, which could find out key association factors of defects by combining the meteorological external force, equipment, terrains and defects in the spatial-temporal viewpoint. Taking Xinjiang 750 kV UHV transmission line as an example, it is found that the defects of 750 kV UHV transmission lines in Xinjiang show the following characteristics from year 2012 to year 2015: strong wind is the main external meteorological factor of defects, and their internal factors are the damage and loss of steady pins. In the spatial aspect, the latitude (N 43~43.5 degree), aspect (158~202 degree) and towers' height (50~55 meters) are strongly associated with defects. Especially, in meteorological aspect, in 24×7 hours the wind direction keeping in the 175 to 235 degree is strongly associated with defects.

This work is supported by Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2014CFB194).

Key words: UHV transmission lines; defects; meteorological factor; terrains; spatial-temporal characteristics

0 引言

根据中国电力联合会的数据, 截止 2015 年, 中国 500 kV、750 kV、1 000 kV 直流线路总里程为 157 974 km、15 665 km、3 114 km, 分别较 2014 年增加了 3.86%、12.85%和 0.1%。输电网络建设的

积累以及建设速度的进一步加快, 给现有输电线路运行维护带来了新的挑战^[1]。输电线路长时间暴露在自然界外, 穿越的地理环境复杂, 极易受到不同天气条件的影响而发生缺陷与故障。根据电力行业对输电线路故障与缺陷的区分方法, 本文所指缺陷是输电线路设备及其相应的辅助设备在运行及备用时, 出现影响电网安全运行或设备健康水平的一切异常现象, 而故障是输电设备在工作过程中, 因某

种原因“丧失规定功能”跳闸断电的现象。据文献[2]总结,目前我国输电线路故障中,雷击是主要导致因素;冰害故障有增长趋势;在大风多发地区,风偏放电时有发生。大量研究应用不同的理论模型和使用不同的实验手段,探索这些故障的物理形成过程和机理。文献[3-6]从热力学平衡、流体力学到结合风速、降水率和过冷水滴直径等多因素建模覆冰形成;文献[7]讨论了不同大风外力下,输电线风偏角度;文献[8-10]讨论了雷电放电机理及发生概率,雷击类型及识别,线路雷击特征。

除了机理和规律的探索,故障事件发生的时间和空间分布以及与气象的联系特点得到越来越多的研究关注。文献[11]研究发现江苏省雷电总的地域分布,南部比北部多,西部比东部多;丘陵低山地区多于大片的平原地区,陆上大的水体附近也是多雷区,而且江苏省的雷电多发区与经济发达区大体重叠;文献[12]研究发现输电线路因火跳闸具有明显的时空特性、重合闸成功率低、杆塔附近以及线路档中等位置为山火下的绝缘薄弱点、强送电成功率高的特点。对于风偏,覆冰,更是与特定地形、季节和气象条件直接相关^[13-14]。

在输电线路日常维护中,线路缺陷的危害性小于跳闸断电故障,但发生频率要远高于跳闸断电故障。客观上,跳闸断电故障发生很大程度是日常小缺陷随时间的日积月累加上突发性的外力刺激引起的,是一个量变到质变的过程^[15-17]。输电线路影响外力包括的范围较广泛,如气候、人力、动物以及不可抗拒力量等,但是主要是气象因素。及时地发现^[18-20]、分析^[21-22]到排除^[23]缺陷,将有助于防控缺陷向跳闸断电故障的转变。对大量缺陷与外力因素进行关联分析,考查其发生的时间和空间分布特征,分析的结论对基层输电线路运维单位具有重要指导意义。一方面,基于时空的因素-缺陷关联分析可以突出运维重点,比如哪些杆塔,哪些设备缺陷率高。这些设备往往是跳闸断电故障发生的高危潜在发生源;另一方面,从外力因素与缺陷的关联分析中可以推演出缺陷密切相关的诱因和发生环境。将这些典型诱因和环境作为预警特征,在线路状态监测过程中,对它们进行识别,可以提前预警。

综上,本文提出一种聚合时空特征的因素与输电线路缺陷关联分析方法,并以新疆 750 kV 特高压线路为例,进行因素-缺陷关联分析应用。

1 聚合时空特征的关联分析方法

目前,输电线路的组成设备均有详细的台帐记录,规格、型号等参数均可以快速查询。线路运行

管理过程中,已经建立了完整严格的监测、记录、处理缺陷的标准体系,所有缺陷事件都被记录在案。除此之外,输电线路的区域管理节点上,已经具备了气象监测的能力,或者通过第三方公共数据提供源,可以方便得到有效的气象数据。因此,用于关联分析的气象、设备和输电线路缺陷三者的数据信息在大部分情况下是具备的。在此基础上,关联规则分析方法可提供三者内在联系的发现方法,其中 Apriori 是经典的关联规则方法。但关联规则处理的变量必须为布尔型或者标量数值型,设备的状态信息,缺陷信息均满足此要求。气象数据是一个多维的时序数据,从数据形式上是一个矢量数据。因此,本文在 Apriori 的基础上,提出了一种气象数据矢量进行标量化的处理方法,使得 Apriori 可以应用到聚合时空特征的输电线路因素-缺陷关联分析中。

设 Q 为气象外力集合, S 为设备集合, QX 为缺陷集合, D 为地形集合。根据分析问题的需要,每类集合可以包括不同数量的元素,例如: Q 可以包括风速、风向、温度、湿度、气压、降雨量等; S 可包括导线,杆塔,杯具等设备的规格属性以及安装属性等; QX 可包括缺陷发生时间和位置,发生线路,发生的具体设备,责任原因、技术原因等; D 可包括缺陷发生设备所在的海拔高度、坡度、坡向等。缺陷发生的设备有准确位置信息,空间特征可以通过高信息含量的遥感图像解析等手段获得。

1.1 气象时序数据标量化

设某次缺陷发生的时刻为 t ,在进行关联分析时通常关心缺陷发生前 a 个时间点和后 b 个时间点这一段时间内的 p 个气象属性,可以表示为表 1。

表 1 一条缺陷记录对应的气象矢量数据

Table 1 Meteorological vector data for one defect record

Q	$t-a$...	$t-1$	t	$t+1$...	$t+b$
q_1 =温度(°C)	23	...	21	25	27	...	26
q_2 =风速(m/s)	2		1.3	1.7	1.9	...	2.1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
q_{p-1} =风向(°)	180		172	162	197	...	
q_p =降雨(mm)	21		14	16	18	...	20

在实际应用时,使用如温度是多少度这种精确表达去关联一种缺陷发生的气象属性是没有意义的,而一个区间的表达方式更具有指导意义。为此,本文使用数据自适应描述手段,以无监督聚类方法,将缺陷考虑的每个气象属性在 $a+b+1$ 时刻点的取值以相似性归类,每个类中心代表该气象属性的一个区间特征。这样一条缺陷记录在第 $i(1 \leq i \leq p)$ 气象属性下的 $a+b+1$ 维时序数据可用一维的聚类号来代表,

实现了矢量数据标量化的目的。在同一个气象属性下,聚类号相同的记录,表示缺陷发生在该气象属性下有相似气象情况。本文使用 K-means 聚类方法。总共 N 条缺陷记录在计及 p 种气象因素的 Q 集合的 K-means 聚类过程如下。

1) 从 Q 集合依次取一个气象属性,执行步骤 2)~5);

2) 设 N 条缺陷记录在当前气象属性下的 $a+b+1$ 时间点上的值构成子集 Q_{sub} ,从 Q_{sub} 任意选择 k 个记录作为初始聚类中心;

3) 根据每个聚类的中心对象,计算 Q_{sub} 中每条记录与这些中心对象的距离;并根据最小距离重新对相应记录进行划分;

4) 重新计算每个聚类的中心记录;

5) 循环 3)到 4)直到每个聚类不再发生变化为止。每条缺陷记录在当前气象属性的 $a+b+1$ 维时序数据转为 k 个类中的一个类号。

聚类完毕后,气象的时序数据变成了类号,完成了矢量到标量化的转换,最终考虑 p 种气象属性、设备和地形的一条缺陷记录表示为

$$\{q_{(k_1, k_2, \dots, k_p)}, s, qx, d\} \in \{Q, S, QX, D\}$$

其中 k_i 表示缺陷 qx 在第 i 气象属性中 K-means 所属的类号。在聚类过程中,设置的 k 值越大,气象描述精细度越高,反之越小概括力越强。

1.2 Apriori 方法

经过上述步骤处理后,气象、设备、地形和缺陷信息均标量化,可以使用标准 Apriori 程序进行关联分析。关联分析的结果形式为

$$\text{if } lhs \text{ then } rhs$$

其中, lhs 和 rhs 为来自 Q 、 S 、 QX 和 D 的项,语义解释为,如果项 lhs 出现,则 rhs 项出现。通过控制 rhs 为缺陷性质,规则中 lhs 项则可以指出哪些具体因素与特定性质的缺陷密切相关。

Apriori 的实现过程分为两个步骤,通过满足最小支持度或者置信度筛选频繁特征项,然后通过同时满足式(1)和式(2)的最小支持度、置信度得到强规则。

$$\text{support}(lhs \geq rhs) = P(lhs) \cup P(rhs) \quad (1)$$

$$\text{confidence}(lhs \geq rhs) = P(rhs | lhs) \quad (2)$$

支持度度量了“if lhs then rhs ”这种规则中, lhs 和 rhs 同时出现的概率。置信度表示该规则的可信程度。

基于支持度,还可以辅助上一节中的 K-means 确定 k 参数。支持度反映了规则出现的频率,如果某个气象属性确实与缺陷有关,即满足最小支持度

要求,那么这种结论应表现出非随机的显著性,那么 k 应大于 $1/\text{最小支持度的整数}$ 。

2 资料

为了验证本方法的有效性和实用性,本文收集了新疆 750 kV 特高压输电线路的历年缺陷及相关数据并进行聚合时空特征的缺陷关联分析。

新疆 750 kV 特高压输电线路是我国新疆地区实施优势资源转换战略的重要组成部分,在能源战略布局上可实现南北疆电力互供、水电与光伏互补,提高电网供电可靠性及互供能力、新能源接纳能力。截至 2016 年 11 月,新疆共建成 750 kV 变电站 18 座,变电容量 4 100 万 kVA,新疆 750 kV 线路长度达到 6 101.56 km。对它的缺陷研究可以为将来更多 750 kV 特高压的线路相关工作提供参考。

本文收集新疆 750 kV 特高压输电网中的 27 条线路,其中有缺陷记录的线路 17 条,总共包括 839 条缺陷记录。缺陷的时间跨越 2012 年至 2016 年。它们在这五年内间的分布如表 2 所示。

表 2 缺陷数的年份分布

年份	2012	2013	2014	2015	2016
次数	45	37	111	156	490

新疆地区的代表性气象特征为大风^[24]。因此,本文中 Q 以风属性为例。大风风源数据时间范围覆盖了从 2011-01-01 到 2015-12-31 的 5 年时间。风源数据来自欧洲中心 EC-INTERIM 数据,该数据基于全球观测站的基本要素数并将预报融合观测数据得到,原始数据的分辨率是 0.125~0.125,按照新疆边界提取了数据之后,用二次样条插值方法插值到 9 km 的精度。风源包括了风速和风向信息,每 3 个小时采样一次,其中风速描述单位为 m/s,风向为度。

地形信息来自于遥感影像数据,以 DEM 的数据格式进行保存。通过 ArcGIS 软件分析 DEM 数据得到主要地形信息。从 DEM 高程数据进一步可以得到海拔高度信息,坡度和坡向等信息。图 1 显示了线路杆塔所在的坡向情况。基础 DEM 的解析度为 63 740 列,29 804 行,胞格大小(cell size)为 24.811,线性单位(linear unit)为 m。

3 新疆 750 kV 特高压输电线路缺陷关联分析

3.1 预处理

表 3 列出了新疆 750 kV 特高压输电线路缺陷关联分析使用的字段。每个发生缺陷的设备都有准确

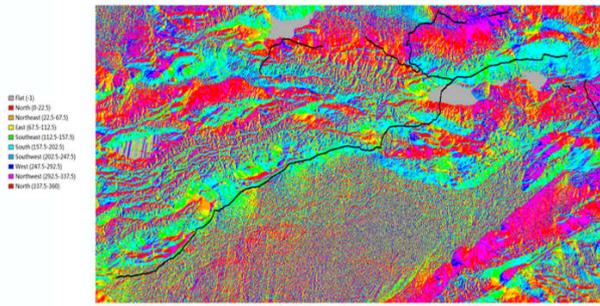


图 1 750 kV 线路不同坡向的杆塔地理位置分布
Fig. 1 Position distribution of poles with different aspect in the Xinjiang 750 kV transmission lines

表 3 关联分析使用的字段
Table 3 Fields used in association analysis

类型	字段
缺陷(QX)	缺陷线路、缺陷设备、 <i>缺陷发生时间</i> 、缺陷性质、缺陷描述、技术原因、责任原因、状态量
设备(S)	设备型号、 <i>投运日期</i> 、档距、呼称高、杆塔高、 <i>经度</i> 、 <i>纬度</i>
气象(Q)	风速、风向
地形(D)	<i>海拔</i> 、 <i>坡度</i> 、 <i>坡向</i>

的经纬度信息，用最近原则对应到测风站点获得该缺陷设备位置点的风况数据。然后根据缺陷发生时间检索对应时间段的风况数据。同时缺陷经纬度还可以定位具体的海拔、坡度和坡向空间特征。

表 3 中斜体标注的字段为连续量，对它们按区间进行离散化。经过处理后，除了缺陷性质字段，本数据其他所有字段的取值数均超过 8 个。

缺陷发生时间覆盖年份是 2012—2016 年，风况数据是 2011—2015 年，两者重叠年份是 2012—2015 年。最终 839 条中有 349 条记录发生在这 4 年间用于关联分析。其中缺陷性质有三个取值“一般”，“危急”和“严重”，分别占 88%、8%和 4%。技术原因是根据新疆 750 kV 线路维护基层单位在每次发现缺陷后，对缺陷产生的技术原因描述，包括了“变形、弯曲”，“电气距离不足”，“断股”，“断裂”，“断线”，“风偏放电”，“腐蚀”等技术方面的原因描述；责任原因包括了缺陷产生的内外因素，包括了“大风”，“大雨”，“沙尘”、“材质不良”等内外因素描述。状态量描述了“OPGW 及其附件情况”、“U 型挂环缺螺帽情况”、“腐蚀、断股、损伤和闪络烧伤情况”等具体部位缺陷情况。

3.2 关联分析结果

分析本实例时，对 Apriori 设置参数 $support =$

0.24, $confidence = 0.8$, $minlen = 2$ 。考查缺陷的风属性的时间特征时，取缺陷发生时间前 7 天作为气象风属性考查时间跨度。因为最小支持度取 0.24 并且所有字段的有效取值数大于 8，所以 K-means 聚类的 k 值取 8。所有数据经过前述处理后，实验分析在 R 语言环境中实现，结果中限制 rhs 包含“缺陷性质”，形成语义描述：

if lhs then rhs = 缺陷性质: XXX

上述形式规则构成了最后关联分析的关联规律结论，解释为当出现 lhs 时，则有 XXX 性质的缺陷。在得到的规则中，rhs 中没有包含“缺陷性质: 危急”和“缺陷性质: 严重”的强规则，说明没有典型因素显著地导致危急或者严重缺陷，危急和严重等级的缺陷有较高的随机性。得到的所有有效规则的 rhs 均为“缺陷性质: 一般”，说明一般化的缺陷中存在有典型诱导因素，表 4 列出了所有“rhs=缺陷性质: 一般”的有效强规则。

表 4 有效强规则

Table 4 Effective and significant rules			
	lhs	S	C
1	{状态量=锁紧销(开口销、弹簧销等)缺损情况}	0.24	0.88
2	{投运日期=2010-01-01}	0.88	0.92
3	{aspect=(158,202)}	0.31	0.86
4	{杆塔高=(50,55)}	0.36	0.91
5	{df=6}	0.39	0.88
6	{纬度=(43,43.5)}	0.41	0.88
7	{责任原因=大风}	0.5	0.84
8	{纬度=(43,43.5), 投运日期=2010-01-01}	0.26	0.83
9	{纬度=(43,43.5), 责任原因=大风}	0.36	0.88

从表 4 的结果中反映出新疆 750 kV 特高压线路缺陷在内在因素、空间、时间、气象外力的特点如下：

缺陷产生的内在因素上，锁紧销与缺陷有关联，特别是“锁紧销(开口销、弹簧销等)缺损情况”的“一般缺陷”比较突出。这与大风外力主要使锁紧销损坏的事实吻合，该结果也指明了新疆 750 kV 特高压线路的缺陷预防需要特别注意“锁紧销”的维护。

空间上，杆塔高、纬度、坡向与缺陷有关；而海拔高度并没有显示出关联性，纬度与缺陷有关，而经度没有。坡向与缺陷有关而坡度无关。同时，没有线路名称出现在有效结果规则的 lhs 中，说明缺陷的发生并没有偏向具体某条线路，而是偏向于与北纬 43~43.5°的地理纬度区域带，并且与设备所处的坡向有关。

时间上，2010 年投运线路的缺陷率显著高，这

反映出—个基本常识, 即越陈旧的设备, 到后期的缺陷率越高。

气象外力上, 大风的风向与缺陷有关。该结论非常与众不同。通常认为风速是引起缺陷的主要原因, 但是本例却指示为风向。表 4 结果中类别 6 显示与缺陷有关。还原 8 个类的中心到原有的风速和风向向量(24×7 h, 每 3 h 采样一次)进行相互对比。从图 2 可见, 类别 6 中心(黑色代表类别 6)代表的风速并不是 8 个类中最大的, 24×7 h 上基本稳定保持在 2.7 m/s 左右, 其他几个类也具有类似的特点, 在风速上并没有表现出与其他类别显著不同的特点。但是在风向上, 从图 2 中可以明显地观察到类别 6 的风向持续稳定性以及方向的集中性与其他 7 个类截然不同。风向持续在区间[175, 235], 这跟规则 3 发现的设备所在坡向[158, 202]重叠度。说明设备缺陷的发生与其所在坡向和持续迎风风关联很强, 即使风速不是极端情况, 迎风坡上的设备受持续迎风影响也容易出现缺陷。

以上的规则为新疆 750 kV 特高压线路的缺陷预防指明了方向: 大风是新疆 750 kV 特高压线路缺陷的主要外力; 特别要注意针对防风的锁紧销部件的巡检; 重点关注北纬 43~43.5°区域, 在[158, 202]坡向和杆塔在 50~55 m 的设备; 持续[175, 235]风向的风对线路造成危害导致缺陷出现的可能性较高。

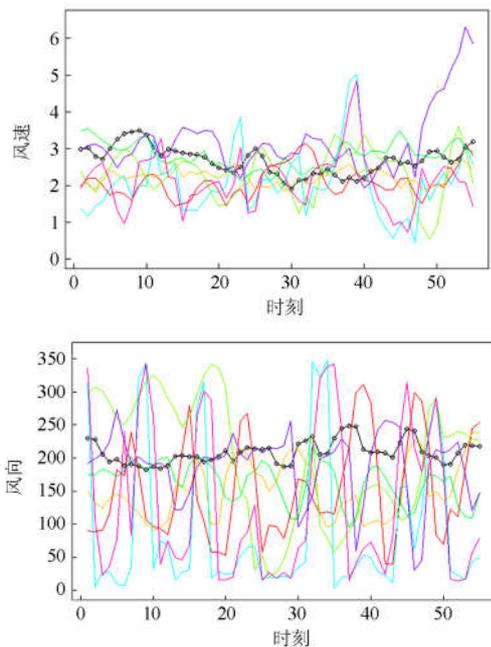


图 2 缺陷发生前 24×7 h, 8 个类中心的风速和风向图

Fig. 2 Eight centers' wind speed and direction during 24×7 hours before defects' occurrences

4 结语

在未来“十三五”期间, 新疆 750 kV 特高压线路还将在准东、哈密分别建成至中东部地区的两回特高压直流输电线路, 在伊犁地区建成至中东部地区的一回特高压直流输电线路。预计至 2020 年, 连接新疆地区的主要负荷中心均将形成双回 750 kV 电压等级的输电线路。

本文提出了一种新的关联分析方法, 可将线路缺陷数据和线路设备本身的参数信息、所在空间地理位置信息以及外力气象因素在时间维度上的信息进行联合分析, 找出缺陷形成的关联关系。在新疆 750 kV 特高压线路上发现了非常有意义的结论, 证明了本方法的有效性。本文方法可推广到其他输电线路的缺陷分析, 为重点维护和及时排除风险提供有效依据。

参考文献

- [1] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.
- [2] 胡毅, 刘凯, 吴田, 等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3491-3499.
HU Yi, LIU Kai, WU Tian, et al. Analysis of influential factors on operation safety of transmission line and countermeasures[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3491-3499.
- [3] 谢云云, 薛禹胜, 文福拴, 等. 冰灾对输电线路故障率影响的时空评估[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 32-41, 98.
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, 98.
- [4] 孙保强, 侯镭, 孟晓波, 等. 不同风速下导线风偏动力响应分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2808-2813.
SUN Baoqiang, HOU Lei, MENG Xiaobo, et al. Characteristics analysis of conductors displacement under different wind speeds[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2808-2813.
- [5] 马文勇, 顾明, 全涌, 等. 准椭圆形覆冰导线气动力特性试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(10): 1409-1413, 1427.
MA Wenyong, GU Ming, QUAN Yong, et al. testing

- study on aerodynamic force characteristics of quasi-oval shape iced conductor[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(10): 1409-1413, 1427.
- [6] 张喆, 何青. 输电线覆冰时冻结系数的影响因素研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, 43(2): 50-55.
ZHANG Jian, HE Qing. Study on the influencing factors of the frozen coefficient under icing on the transmission lines[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2016, 43(2): 50-55.
- [7] 楼文娟, 王嘉伟, 吕中宾, 等. 运动雷暴冲击风作用下输电线路风偏的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4539-4547.
LOU Wenjuan, WANG Jiawei, LÜ Zhongbin, et al. Calculation method of wind-induced oscillation of transmission line under moving downburst[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4539-4547.
- [8] 代杰杰, 刘亚东, 姜文娟, 等. 基于雷电行波时域特征的输电线路雷击类型辨识方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 242-250.
DAI Jiejie, LIU Yadong, JIANG Wenjuan, et al. Identification of back striking and shielding failure on transmission line based on time domain characteristics of traveling wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 242-250.
- [9] 王剑, 谷山强, 赵淳, 等. 计及工作电压时同塔双回输电线路雷击闪络特性[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2923-2930.
WANG Jian, GU Shanqiang, ZHAO Chun, et al. Lightning flashover characteristics of double-circuit transmission line on the same tower considering working voltage[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2923-2930.
- [10] 吴广宁, 熊万亮, 曹晓斌, 等. 输电线路绕击特性的三维分析方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 374-382.
WU Guangning, XIONG Wanliang, CAO Xiaobin, et al. Three-dimensional analysis method of shielding failure characteristics of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 374-382.
- [11] 冯民学, 焦雪, 韦海容, 等. 江苏省雷电分布特征分析[J]. 气象科学, 2009, 29(2): 246-251.
FENG Minxue, JIAO Xue, WEI Hairong, et al. An analysis of the lightning distribution features in Jiangsu Province[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29(2): 246-251.
- [12] 吴田, 阮江军, 张云, 等. 输电线路因山火跳闸事故统计特性与识别分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 138-143, 148.
WU Tian, RUAN Jiangjun, ZHANG Yun, et al. Study on the statistic characteristics and identification of AC transmission line trips induced by forest fires[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 138-143, 148.
- [13] 王建, 熊小伏, 李哲, 等. 气象环境相关的输电线路故障时间分布特征及模拟[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 109-114, 123.
WANG Jian, XIONG Xiaofu, LI Zhe, et al. Time distribution of weather-related transmission line failure and its fitting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 109-114, 123.
- [14] 贺海. 青海电网架空输电线路运行工况分析及防御能力提升[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.
HE Hai. Enhancing the operating condition analysis and defense ability of transmission line of Qinghai power grid[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- [15] 龚瑾, 李喆, 刘新月. 氧化铝/环氧树脂复合材料空间电荷特性与高温高湿环境下交流电场老化[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 191-198.
GONG Jin, LI Zhe, LIU Xinyue. Space charge and AC field aging in high hygrothermal environment of alumina/epoxy resin composites[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 191-198.
- [16] 黄成才, 李永刚, 汪佛池, 等. 基于电导电流测试的硅橡胶复合绝缘子伞群材料老化特性分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 252-259.
HUANG Chengcai, LI Yonggang, WANG fochi, et al. Study on aging characteristics of silicone rubber sheds of composite insulators based on conduction current test[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 252-259.
- [17] 唐超, 张松, 张福州, 等. 变压器绝缘纸纤维素耐热老化性能提升的模拟及试验[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 68-76.
TANG Chao, ZHANG Song, ZHANG Fuzhou, et al. Simulation and experimental about the thermal aging performance improvement of cellulose insulation paper[J]. Transactions OF China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 68-76.
- [18] 王淼, 杜毅, 张忠瑞. 无人机辅助巡视及绝缘子缺陷图像识别研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12): 1862-1869.
WANG Miao, DU Yi, ZHANG Zhongrui. Study on power transmission lines inspection using unmanned aerial vehicle and image recognition of insulator defect[J].

- Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12): 1862-1869.
- [19] 赵景峰, 李睿, 王晓光, 等. 基于超声波的远距离配电线路快速状态检修的应用研究[C] // 中国电机工程学会高电压专业委员会 2015 年学术年会论文集, 2015: 1-10.
- ZHAO Jingfeng, LI Rui, WANG Xiaoguang, et al. Research on application of rapid state maintenance for long-distance distribution lines based on ultrasonic wave[C] // Proceedings of the 2015 Annual Conference of High Voltage Professional Committee of China Society of Electrical Engineering, 2015: 1-10.
- [20] 谢敏, 吴亚雄, 黄庶, 等. 基于有色自控 Petri 网的电网故障区域识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 56-64.
- XIE Min, WU Yaxiong, HUANG Shu, et al. Identification of fault area in power system based on colored self-modifying Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 56-64.
- [21] 方丽华, 熊小伏, 方嵩, 等. 基于电网故障与气象因果关联分析的系统风险控制决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 113-119.
- FANG Lihua, XIONG Xiaohua, FANG Song, et al. Power system risk control decision based on cause and effect correlation analysis of fault and meteorology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 113-119.
- [22] 金学成, 陈堂龙, 邹根华, 等. 自适应外部环境的电网安全稳定智能防御系统应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 137-142.
- JIN Xuecheng, CHEN Tanglong, ZOU Genhua, et al. Application of power grid security and stability intelligent defense system self-adapting the external environment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 137-142.
- [23] 陈海华, 姜文瑾. 构建电网缺陷设备召回制度探讨[J]. 中国电力, 2011, 44(5): 46-48.
- CHEN Haihua, JIANG Wenjin. Probing into construction of defective equipment recalling system in Chinese power grids[J]. Electric Power, 2011, 44(5): 46-48.
- [24] 李娟, 廖峥, 张陵, 等. 新疆强风沙尘环境下 750 kV 线路运维技术[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 123-130.
- LI Juan, LIAO Zheng, ZHANG Ling, et al. Operation and maintenance techniques for 750 kV transmission lines under severe wind and sand-dust weather in Xinjiang[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 123-130.

收稿日期: 2017-03-10; 修回日期: 2017-04-10

作者简介:

田浩(1984—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为雷电监测与预警; E-mail: tianhao9905@163.com

章涵(1986—), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为雷电物理与监测预警技术。E-mail: hanhan_bch@163.com

(编辑 周金梅)