

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.09.026

基于风险系数的输电线路覆冰舞动预警方法

王津宇¹, 李哲¹, 刘善峰¹, 卢明¹, 苑司坤²

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052; 2. 河南恩湃高科集团有限公司, 郑州 450052)

摘要:近年来输电线路舞动事故频发,严重威胁着电网的安全运行。为了达到提前预警、及早防范的目的,降低输电线路舞动对电网安全运行的影响,提出了基于风险系数的输电线路覆冰舞动预警方法。文中通过关联历史舞动样本和气象数据,分析了影响舞动的气象条件,在此基础上提出涵盖风速、舞动持续时间等参量的风险系数以表征输电线路舞动风险,根据实际生产需求划分出不同的输电线路舞动风险等级并建立覆冰舞动预警模型。采用河南电网历史气象资料进行了验证,证明了模型的有效性。

关键词:输电线路; 舞动; 风险系数; 气象; 预警

Early Warning Method of Iced Transmission Line Galloping Based on Risk Coefficient

WANG Jinyu¹, LI Zhe¹, LIU Shanfeng¹, LU Ming¹, YUAN Sikun²

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 2. Henan EPRI Hitech Group Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In recent years, accidents caused by the transmission line galloping have occurred frequently, which seriously threatens the safe operation of power grid. In order to realize the early warning and prevention of transmission line galloping, which could reduce the influence of transmission line galloping on the safe operation of power grid, an early warning method based on risk coefficient is proposed. The meteorological conditions which influence galloping are analyzed by associating historical galloping samples with meteorological data. On this basis, a risk coefficient covering wind speed and time of galloping is proposed to characterize galloping risk of transmission lines. According to the actual production demand, different risk levels of transmission line galloping are classified. Then an early warning model of iced transmission line galloping is established. The effectiveness of the model is demonstrated by using historical meteorological data of Henan power grid.

Key words: transmission line; galloping; risk coefficient; meteorology; early warning

0 引言

输电线路舞动指风对非圆截面导线产生的一种低频率、大振幅的导线自激振动^[1]。舞动多发生在寒冬偏心覆冰的输电线上,容易引起相间闪络、金具损坏,甚至导致杆塔倒塌,给电网的安全运行带来了极大威胁^[2-3]。中国是舞动发生最频繁的国家之一。据统计,全国1998年到2018年,仅500 kV输电线路发生舞动的有154条。输电线路舞动事故频

发,给社会用电安全和经济建设带来了巨大损失。

自20世纪30年代起,国外学者开始对舞动机理进行了研究,得到普遍认可的有Den Hartog的垂直舞动理论^[4]、O. Nigol的扭转舞动理论^[5]、P. Yu的偏心惯性耦合失稳理论^[6]等。中国学者尤传永提出的动力失稳起舞机理^[7]和蔡延湘提出的低阻尼系统共振理论^[8],受到了广泛关注。近年来,国内外学者在舞动监测和治理方面也开展了大量研究^[9-16],舞动监测装置和防舞装置在工程上应用广泛。在舞动预

收稿日期:2019-06-07; 修回日期:2019-08-09

基金项目:国家电网有限公司科技项目(52170216000A);中国气象局气候变化专项(CCSF201720)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52170216000A), Climate Change Program of China Meteorological Administration(CCSF201720).

警方面,基于数值预报对输电线路舞动进行自动化预警已逐步应用于生产^[17]。文[18]通过分析影响舞动的外界气象因素,提出了一种基于BP神经网络的舞动预警方法;文[19]提出了基于Adaboost算法的输电线路舞动预警方法;文[20]提出了一种基于SVM和Adaboost双层分类器的舞动风险预警方法。

由于输电线路舞动机理复杂,影响因素众多,现有的舞动机理模型只能对一定条件的舞动适用^[21]。而舞动监测装置还存在某些缺陷,如信号传输的质量低、功耗大、监测范围狭隘等^[18]。同时,防舞装置是基于不同的舞动机理设计的,每一种都有其明显的设计特点和应用局限性,尚无一种防舞装置在任何情况下都能防止舞动的发生^[14, 16]。因此,现有的防舞技术还不能完全满足舞动治理的需要。而研究输电线路舞动预警技术有助于提高电网防灾减灾能力,保障电网的安全稳定运行。但是,在舞动预警方面,由于输电线路舞动是一个能量不断累积的过程,除了具体时刻的温度、风速等气象参数外,其影响因素还应加入刻画积累过程的物理量,如舞动持续时间等。

文中通过输电线路覆冰舞动—气象关联分析,建立了输电线路舞动条件模型用以判断输电线路是否达到舞动的气象条件;为了衡量输电线路舞动风险,提出涵盖风速、舞动持续时间等参量的舞动风险系数,并根据数理统计原理将不同舞动风险系数进行分类,获取满足电网运行实际生产需求的线路覆冰舞动不同风险等级,建立了基于风险系数的输电线路覆冰舞动预警模型,采用河南电网历史气象资料进行了验证。

1 输电线路覆冰舞动的气象条件分析

特定的气象条件是引起输电线路舞动的主要因素之一,只要满足条件,各区域、各电压等级的线路均可能发生舞动^[10]。对电网历史舞动样本进行统计并关联气象数据,得到与舞动相关的气象因素,分析得到舞动事件所对应的气象条件规律,可建立“输电线路覆冰舞动—气象条件”模型。

1.1 输电线路覆冰舞动—气象关联分析

输电线路舞动的形成与外界气象环境密不可分。统计分析表明,发生舞动的气温大多在-6~0℃内,此时易产生雨淞,而导致输电线路覆冰。覆冰的导线在风激励下易发生舞动^[22-23]。

河南是中国舞动灾害频发的省份之一,从1998年到2012年9月,河南电网共发生9次大范围的舞动,

对河南电网的运行造成了重大影响。文中以河南电网为例分析舞动与气象因素之间的关系。利用气象部门历史气象信息,提取舞动样本值所对应的气象数据,关联了2009—2012年覆冰舞动样本值所对应气象数据约300万条,对其进行分析,可得到温度、风速、相对湿度、风向等是舞动主要天气因素。

通过分析得到输电线路舞动事件所对应的气象条件规律如下:温度在-5.1~0.8℃;相对湿度大于等于70%;风速在4.0~11.0 m/s;风夹角(风向与导线间夹角)大于45°。

1.2 输电线路舞动条件模型

经过舞动样本与气象条件关联分析,可得到输电线路舞动条件模型。

$$R = \begin{cases} T \leq 0 \\ RH \geq 70 \\ 4 \leq v \leq 11 \\ DG \geq 45 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: T 表示温度,℃; RH 表示相对湿度,%; v 表示风速,m/s; DG 表示风向与导线夹角,(°)。

采用河南省历年舞动样本对其进行验证,在1998年至2011年103次舞动个例中符合该条件的舞动个例是86个,占总个例的83.5%,其中,风向与导线夹角这一因素所有样本均符合,部分验证结果见表1。

表1 舞动条件模型部分验证结果
Table 1 Partial validation results of galloping condition model

地域	时间	风速/(m·s ⁻¹)	温度/℃	相对湿度/%
开封	19981201KF	8.0	-1.4	86
郑州	19981201ZZ	6.6	-1.1	84
许昌	19981201XC	7.5	-1.0	88
宝丰	20030209PD	4.8	-0.2	76
郑州	20030209ZZ	6.0	-2.1	85
开封	20060130KF	6.5	-0.6	93
宝丰	20080110PD	4.2	0.0	92
郑州	20080110ZZ	4.4	-0.3	85
安阳	20080110AY	4.3	-1.3	88
开封	20091110KF	6.6	-1.1	90
商丘	20091110SQ	3.4	-0.1	94
郑州	20100209ZZ	6.6	-1.6	95
南阳	20100209NY	6.3	-1.7	86
安阳	20100228AY	5.1	0.3	81

舞动样本值在三维坐标系(温度、湿度、风速)中的展示见图1。图1中星号表示的是符合舞动条件模型的样本;圈圈表示的是不符合的样本。

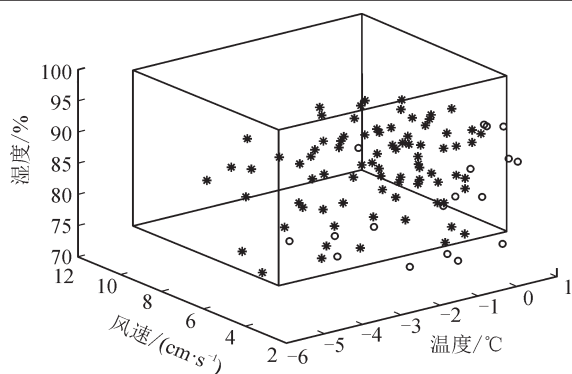


图1 舞动条件模型验证结果展示图

Fig. 1 Diagram of validation results for galloping condition model

2 基于风险系数的输电线覆冰舞动预警模型

2.1 舞动风险系数指标

输电线路覆冰舞动是环境温度、空气相对湿度、风速、风向、气压等多种气候参数综合作用下,舞动能量不断积累并最终导致线路跳闸的一个过程。在分析影响舞动的因素时除了具体时刻的温度、湿度等气象参数外,还应考虑表示积累过程的物理量,如持续时间等。其中对输电线路舞动跳闸影响最大的分别为满足覆冰舞动条件下的风速和舞动持续时间两个参数。所以可以把输电线路覆冰舞动的概率看成主要由这两个参数影响,从而建立输电线路舞动风险系数,见式(2)。

$$P(v_i, T) = \sum_{t_i=1}^T k \cdot f(t_i) \cdot v_i^a \quad (2)$$

式(2)中: $P(v_i, T)$ 为输电线路舞动风险系数; v_i 为第*i*个小时的平均风速; T 为满足覆冰舞动条件的时间; t_i 为覆冰第*i*个小时的时刻; k 为输电线路舞动强度系数; $f(t_i)$ 为单位时间对舞动风险系数的影响因子; a 为风速对舞动风险系数的影响因子。

在历年的输电线路舞动记录中,发生舞动的输电线路条数最多的年份是2010年,总计发生了187次。下面以河南电网2010年由输电线路覆冰舞动引起的跳闸事故为样本研究舞动风险系数指标。根据输电线路舞动判别条件,将河南省全省124个自动气象站逐个小时的气象数据共1 086 240条代入舞动模型进行计算,得到舞动开始时间、舞动结束时间并与河南电网2010年由输电线路覆冰舞动引起的跳闸事故记录的跳闸时间进行对比分析,计算出各次事件从输电线路开始舞动到最后跳闸的舞动持续时间,结果见表2。

由表2可以看出:

1)从输电线路达到舞动条件到线路跳闸,通常

表2 河南电网2010年部分舞动跳闸事故舞动持续时间统计

Table 2 The statistical results of galloping time for some trip accidents caused by galloping in Henan power grid in 2010

线路	区域	舞动持续时间/h
鹤岳线	浚县	3.250 00
鹤岳线	浚县	5.383 33
北灵线	鹤壁	3.250 00
灵鹤线	鹤壁	3.183 33
乐天线	驻马店	7.150 00
浚灵线	浚县	1.300 00
祥杏线	开封	7.533 33
鹤岳线	濮阳	5.300 00
虢李线	三门峡	0.150 00
邵花 I 线	鄢陵	4.650 00
花祥 I 线	长葛	6.800 00
花祥 I 线	长葛	8.166 67
香邵线	漯河	10.400 00
香邵线	漯河	8.200 00
邵花 I 线	漯河	5.166 67
邵花 I 线	漯河	9.733 33

会有一些的时间间隔,因此舞动到跳闸,有一个能量积累的过程;

2)引起输电线路舞动跳闸的舞动持续时间一般为3~9 h,占事故总数的78.75%;

3)引起输电线路跳闸的舞动持续时间一般小于12 h。在较低风速作用下,舞动可能持续12 h以上,该情况导致的输电线路舞动跳闸很少,可以认为能量累积对线路跳闸的影响越来越小,即单位时间舞动风险系数的影响因子随时间递减。根据统计学原理,得到单位时间对舞动风险系数的影响因子 $f(t_i)$ 为

$$f(t_i) = 1 - \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{(t-6)^2}{8}} dt \quad (3)$$

单位时间对舞动风险系数的影响因子 $f(t_i)$ 的分布见图2。由图2可以看出,单位时间舞动风险系数的影响因子随时间递减。

将式(3)代入式(2)可得

$$P(v_i, T) = \sum_{t_i=1}^T k \cdot \left(1 - \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{(t-6)^2}{8}} dt\right) \cdot v_i^a \quad (4)$$

利用河南省2010年输电线路覆冰舞动跳闸事故数据对舞动风险系数表达式中的 k 和 a 进行拟

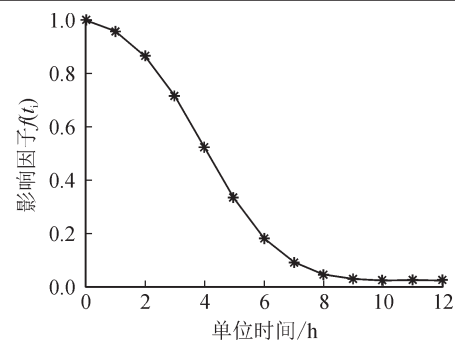


图2 单位时间对舞动风险系数的影响因子 $f(t)$

Fig. 2 The influencing factor of unit time on galloping risk coefficient $f(t)$

合。每个舞动个例作为一个样本,将舞动持续时间和逐个小时满足舞动条件的风速代入式(4)使得其在跳闸时刻的风险系数为1,对所有的样本数据进行拟合得到 k 和 a 的值,见表3。

表3 2010年舞动风险系数拟合值

Table 3 Fitting value of risk coefficient in 2010	
输电线路舞动强度系数 k	风速对舞动风险系数的影响因子 a
0.002 5	1.864 6

仅使用2010年的覆冰舞动数据进行拟合,样本值较少,拟合结果存在一定偏差,并考虑到留有一定裕度提高风险预警的可靠性,将风速对舞动风险系数的影响因子 a 取为2。

得到输电线路舞动风险系数的表达式为

$$P(v_i, T) = \sum_{t_i=1}^T 0.002\ 5 \cdot \left(1 - \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \int_0^{t_i} e^{-\frac{(t-6)^2}{8}} dt\right) \cdot v_i^2 \quad (5)$$

2.2 输电线路覆冰舞动风险等级

舞动风险系数指标可直观表征线路在覆冰舞动条件下的能量积累,根据实际生产需求,参考气象灾害预警对预警等级的划分,文中依据舞动风险指标划分出不同的舞动风险等级。

通过对河南省2009—2012年的输电线路覆冰舞动跳闸事故进行统计,并利用数理统计原理,将不同舞动事件的风动风险系数结果进行分类,与输电线路最终跳闸结果进行关联分析,得出了以舞动风险系数为特征的输电线路覆冰舞动风险等级,见式(6)

$$R = \begin{cases} \text{IV级} & P(v_i, T) > 0.9 \\ \text{III级} & 0.8 < P(v_i, T) \leq 0.9 \\ \text{II级} & 0.6 < P(v_i, T) \leq 0.8 \\ \text{I级} & 0.4 < P(v_i, T) \leq 0.6 \end{cases} \quad (6)$$

文中将舞动分为4个等级, $P(v_i, T) > 0.9$ 时,舞动风险等级最高,为IV级。 $0.4 < P(v_i, T) \leq 0.6$ 时,舞动风

险等级为I级,舞动风险较低。在实际生产中,可根据不同的舞动风险等级采取不同的措施。

2.3 基于风险系数的输电线路覆冰舞动预警

由于输电线路舞动机理复杂,影响因素众多,文中主要采用统计分析的方法对舞动发生时的气象数据进行关联分析,得到了舞动发生时气象条件模型,提出了涵盖风速、舞动持续时间等因素的线路舞动风险系数以衡量输电线路舞动风险,并对其进行分级,在此基础上提出了输电线路覆冰舞动预警模型,流程图见图3。

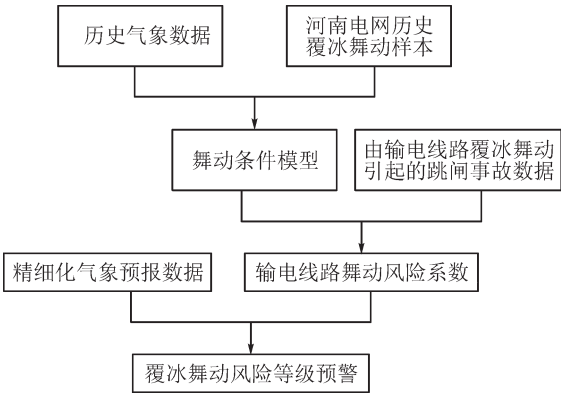


图3 基于风险系数的输电线路覆冰舞动预警流程

Fig. 3 Early warning process of iced transmission line galloping based on risk coefficient

主要步骤包括:

- 1)根据河南电网历史覆冰舞动样本和历史气象数据关联分析得到影响舞动的气象因素,建立输电线路舞动条件模型。
- 2)由舞动跳闸样本和舞动气象条件模型,建立输电线路舞动风险系数。
- 3)获取精细化的气象预测数据。气象预测、预报在时间、空间方面的精度严重影响着覆冰舞动预测结果的准确性。因此要进行输电线路覆冰舞动的精细化预警,必须首先获取时间、空间更加精细化的天气预测数据,在此基础上进行输电线路舞动预警,文中引入精细化气象服务产品平台气象预测数据。

4)将精细化气象预报数据代入输电线路舞动气象条件模型,判断是否达到覆冰舞动气象条件,如果达到,则计算输电线路舞动风险系数。

5)根据输电线路舞动风险系数,判断输电线路覆冰舞动风险等级并预警。

3 模型验证

文中选取2010年至2018年冬季作为验证时段开展舞动模型验证工作。将验证时段内自动气象

站监测数据逐一输入预警模型进行计算得到输电线路舞动风险系数,按照式(6)判断,若输电线路覆冰舞动风险等级为I-IV级时,发出预警,若风险系数不超过0.4,不发出预警。将模型预警结果与河南省输电线路舞动记录信息进行比对。舞动预警与实际舞动记录对比出现的4种情况见表4。分别是:有预警有舞动记录;有预警无舞动记录;未预警有舞动记录;未预警无舞动记录。

表4 舞动预警结果与实际舞动预警记录对比表

Table 4 Comparisons between early warning results and actual galloping records

舞动预警情况	有舞动记录	无舞动记录
有预警	N_A	N_B
未预警	N_C	—

表4中: N_A 表示有预警实际也有舞动记录的次数; N_B 表示有预警实际没有舞动记录的次数; N_C 表示未预警实际有舞动记录的次数。预警总次数为 N_A+N_B ,实际舞动记录总数为 N_A+N_C 。文中采用空报率和漏报率作为评价指标来评估预警结果。

空报即通过模型计算发出了舞动预警,但是实际没有舞动记录。空报率计算公式为

$$\text{空报率} = \frac{N_B}{N_A + N_B} \times 100\% \quad (7)$$

漏报是无预警但实际有舞动记录,漏报率计算公式为

$$\text{漏报率} = \frac{N_C}{N_A + N_C} \times 100\% \quad (8)$$

将预警结果与实际舞动记录进行对比,计算得到的空报率和漏报率见表5。

表5 舞动预警结果统计

Table 5 Statistics of early warning results for galloping

空报率/%	漏报率/%
85.49	4.08

从验证结果可知舞动预警模型漏报率较低,但存在空报率较高的情况。在本次舞动数据验证过程中可以看到,部分小范围天气过程中模型计算结果没有得到输电线路舞动记录的支撑,即出现了“空报”的情况。分析可能存在两种原因:一是输电线路舞动是一个大范围系统性气象灾害,文中模型是逐小时发出预警,很大一部分空报发生在舞动发生当日,在实际舞动前的几个时刻都有预警发出,属于可以接受的误差范围,也能起到预警作用。二是舞动记录数据获取手段单一,现场观测较为困难,舞动记录可能并未完全反映输电线路真实舞动情况。而较低的漏报率能保证对输电线路舞动的

全面预警,在实际生产中能达到提前预警,提早防范的目的。

4 结语

文中以河南电网为例,通过关联历史舞动样本与气象数据分析了影响舞动的气象因素,进而提出了涵盖风速、舞动持续时间等参量的输电线路舞动风险系数,根据实际生产需求划分出不同的风险等级,建立了预警模型,并对模型进行了验证。结果表明基于舞动风险系数建立预警模型的技术方法是有效的,在电网实际生产中能达到提前预警的目的,使相关部门提前做好准备,有助于提高电网安全运行水平。

文中重点分析了影响舞动的气象因素,需要注意的是输电线路的结构与参数也是影响舞动的因素,如导线类型,导线截面、档距等。下一步将综合考虑气象因素与线路参数构建输电线路舞动预警模型,以提高预警准确性。

参考文献:

- [1] 周宁. 电力气象技术及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2015.
ZHOU Ning. Electrical and meteorological technology and its application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [2] 郭应龙,李国兴,尤传永. 输电线路舞动[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
GUO Yinglong, LI Guoxing, YOU Chuanyong. Transmission line galloping[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [3] 王黎明,高亚云,卢明,等. 特高压输电线路新型防舞技术计算[J]. 高电压技术,2017, 43(8):2541-2550.
WANG Liming, GAO Yayun, LU Ming, et al. Calculation on a new anti-galloping technique for UHV transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8): 2541 - 2550.
- [4] DEN HARTOG J P. Transmission line vibration due to sleet [J]. AIEE Trans., 1932, 51(91): 1074-1086.
- [5] NIGOL O, CLARKE G J. Conductor galloping and control based on torsional mechanism[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, PA93(6): 1729.
- [6] YU P, DESA Y, SHAH A H, et al. Three-degree-offreedom model for galloping(part I:formulation and part II:solution) [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1993, 119(20): 2405-2448.
- [7] 尤传永. 导线舞动稳定性机理及其在输电线路上的应用 [J]. 电力设备, 2004, 5(6): 13-17.

- YOU Chuanyong. Stability mechanism of conductor galloping and its application on transmission line[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(6): 13-17.
- [8] 蔡廷湘. 输电线舞动新机理研究[J]. 中国电力, 1998, 31(10): 62-66.
- CAI Tingxiang. A new mechanism of transmission line galloping[J]. Electric Power, 1998, 31(10): 62-66.
- [9] 杨柱石. 基于无线传感器网络的导线舞动监测系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- YANG Zhushi. Study on monitoring system of transmission lines galloping based on wireless sensor network[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [10] 李新民, 朱宽军, 李军辉. 输电线路舞动分析及防治方法研究进展[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 484-490.
- LI Xinmin, ZHU Kuanjun, LI Junhui. Review on analysis and prevention measures of galloping for transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 484-490.
- [11] 赵彬, 程永锋, 王景朝, 等. 阻尼间隔棒及双摆防舞者对特高压架空输电导线覆冰舞动特性的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3837-3843.
- ZHAO Bin, CHENG Yongfeng, WANG Jingchao, et al. Effect of damping spacers and double-swinging protectors on iced galloping properties for UHV overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3837-3843.
- [12] 王少华. 架空输电线路导线舞动及防治技术分析[J]. 高压电器, 2010, 46(12): 63-67.
- WANG Shaohua. Analysis of conductor galloping phenomena on overhead transmission lines and anti-galloping techniques[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 63-67.
- [13] 任西春, 朱宽军, 刘超群. 特高压输电线路新型防舞者建模分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 96-101.
- REN Xichun, ZHU Kuanjun, LIU Chaoqun. Modeling and analysis of new anti-galloping devices on UHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 96-101.
- [14] 邵颖彪, 卢明, 魏建林, 等. 特高压输电线路新型防舞者装置及其有效性分析[J]. 电瓷避雷器, 2018(1): 177-182.
- SHAO Yingbiao, LU Ming, WEI Jianlin, et al. New anti-galloping devices for UHV transmission lines and its effectiveness[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(1): 177-182.
- [15] LIU Jianjun, ZHU Kuanjun, WANG Jingchao, et al. Application and research on conductor galloping online-monitoring in power transmission lines[C]//International Conference on Remote Sensing (ICRS). Hangzhou: [s.n.]: 2010: 625-628.
- [16] 朱宽军, 刘超群, 任西春, 等. 特高压输电线路防舞者研究[J]. 高电压技术, 2007, 28(11): 61-65.
- ZHU Kuanjun, LIU Chaoqun, REN Xichun, et al. Research on anti-galloping for UHV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2007, 28(11): 61-65.
- [17] 李帅, 梁允, 李哲, 等. 基于数值天气预报结果的输电线路舞动预测[J]. 智能电网, 2016, 4(12): 1242-1246.
- LI Shuai, LIANG Yun, LI Zhe, et al. Transmission line galloping prediction based on numerical weather prediction results[J]. Smart Grid, 2016, 4(12): 1242-1246.
- [18] 廖峥, 熊小伏, 李新, 等. 基于BP神经网络的输电线路舞动预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 154-161.
- LIAO Zheng, XIONG Xiaofu, LI Xin, et al. An early warning method of transmission line galloping based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 154-161.
- [19] 李哲, 王建, 梁允, 等. 基于Adaboost算法的输电线路舞动预警方法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2016, 39(1): 32-38.
- LI Zhe, WANG Jian, LIANG Yun, et al. An early warning method of transmission line galloping based on Adaboost algorithm[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2016, 39(1): 32-38.
- [20] WANG Jian, XIONG Xiaofu, ZHOU Ning, et al. Early warning method for transmission line galloping based on SVM and AdaBoost bi-level classifiers[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(14): 3499-3507.
- [21] 刘昌盛, 刘和志, 姜丁尤, 等. 输电线路覆冰舞动研究综述[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(24): 156-164.
- LIU Changsheng, LIU Hezhi, JIANG Dingyou, et al. Research overview on galloping of iced transmission lines[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(24): 156-164.
- [22] 张敬民, 柯祖梁, 马冬梅, 等. 大容量融冰装置系统设计与仿真[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(5): 113-118.
- ZHANG Jingmin, KE Zuliang, MA Dongmei, et al. Design and simulation of large-capacity DC ice-melting systems[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(5): 113-118.
- [23] 王建. 输电线路气象灾害风险分析与预警方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- WANG Jian. Research on meteorological disaster risk analysis and fault early warning methods for overhead transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

王津宇(1994—), 女, 研究生, 主要研究方向为电网气象预警。