

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.04.030

# 基于排列熵的绝缘架空地线直流融冰扰动与故障辨识

王云龙<sup>1</sup>, 邵俊人<sup>1</sup>, 陈开智<sup>1</sup>, 莫居跃<sup>1</sup>, 张群群<sup>2</sup>, 曹璞璘<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局, 云南 昆明 650000;

2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:**在覆冰过程中,地线脱冰容易导致绝缘地线出现短暂接地,进而造成直流融冰装置保护频繁动作。文中通过分析,指出脱冰导致的绝缘地线短暂接地会造成短时间内多次直流融冰装置极线上电气量扰动,而绝缘架空地线永久性故障不会造成此类电气量波动。基于上述电路分析,采用统计学排列熵方法刻画电压波形的整体变化趋势,有效避免了时频域分析易受到换流阀高频谐波干扰的问题,根据排列熵提取得到的电压变化趋势,以排列熵波形方差为依据,对绝缘架空地线直流融冰扰动与故障进行辨识。根据昆北换流站融冰装置参数进行仿真建模,对所提辨识方法进行验证,仿真结果证明所提方法可靠有效,可利用排列熵方差对脱冰扰动与永久性故障进行辨识。

**关键词:**直流融冰;绝缘架空地线;排列熵;扰动;永久性故障;电气量扰动

**中图分类号:**TM215.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)04-0229-07

## 0 引言

地线作为超高压架空输电线路不可或缺的部分,不仅起到防雷减灾作用,还兼具光纤通信等任务。由于地线本身不传输功率,在特殊气候条件下其表面极易出现覆冰,而覆冰在严重时会造成地线断裂、杆塔损坏和倒地<sup>[1-4]</sup>。近十年来,由于全球气候变化造成我国南方地区冰灾时有发生,直流融冰装置在南方电网得到了大面积推广应用,为输电线路在极端条件下的安全稳定运行提供了不可或缺的保障。

直流融冰装置与地线的连接方式包括串联融冰和并联融冰等,但其本质都是通过直流融冰装置在地线中输入电流对地线进行加热以实现脱冰。在融冰过程中,大块覆冰会随水流脱落,造成地线受力不均出现舞动,而线路舞动可能引起地线与导线之间距离过近,加之冰块与水流的下落将造成导线与地线之间的绝缘强度降低。若导线在融冰过程中保持运行,极易引起导线对地线放电。因此,除非有特殊要求,否则线路会在融冰过程中暂时停止输电,以避免不必要的跳闸。即使在线路停运的情况下,融冰过程中含杂质水流与大块脱冰依然会导致地线与杆塔间的短时短路,但直流融冰装置输出电流通常仅数百安培,难以形成稳定电弧,故冰块在完全脱落后线路可恢复绝缘。脱冰造成的短

时间扰动不会造成永久性故障,但是此类扰动会引起直流融冰装置电压波动,进而造成直流融冰装置保护动作,导致融冰工作中断,故对脱冰引起的扰动进行准确辨识以防止直流融冰装置保护频繁动作至关重要。

文献[5]通过观察自然覆冰实验站,研究了输电导线的脱冰分散过程及脱冰引起脱的冰跳跃、脱冰舞动现象。文献[6]提出一种基于微气象监测数据的输电线路覆冰与脱冰跳跃动态发展趋势估计模型。文献[7]对脱冰跳跃故障原因及过程进行了分析,并提出了2种解决方案,即加装相间间隔棒和将上下两相悬垂串改为“V”串的形式。文献[8]通过建立输电线路脱冰跳跃时杆塔体系的有限元模型,分析相间间隔棒对输电线路脱冰跳跃高度的抑制效果。文献[9]提出互补集合经验模态分解和小波包变换相结合去噪以提高Prony算法辨识精度。文献[10-13]分析了排列熵在生物、医学、机械、电气各个领域的应用发展研究现状,表明其算法简单、实用性高、应用范围广、能够反映时间序列复杂程度、突变程度的特点。目前辨识线路故障与扰动的原理主要分为基于高频暂态分量和利用时域波形两大类,文献[14]利用过渡电阻参数来识别输电线路的瞬时性故障和永久性故障。文献[15]通过分析直流配电网电能质量问题的形成机理,提出辨识扰动的5种特征指标。文献[16-19]分别提出基于雷击暂态电压信号、基于雷击暂态电流波形特征、基于故障类型多尺度的形态分解谱熵的方法对雷击干扰和故障进行识别研究。文献[20]以互感

收稿日期:2022-02-16;修回日期:2022-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61963020);云南省基础研究计划资助项目(202001ATO70096)

器二次侧的输出波形为基础,利用瞬时功率对故障行波进行刻画,通过主成分分析聚类的方法对雷击干扰和故障进行判别。但这些辨识方法都是针对输电线路正常运行情况下发生的干扰和故障,有相应的电压、电流等暂态分量变化,却不适用于直流融冰工程中架空地线因脱冰发生扰动和故障的情况。

由于直流融冰装置通常不设置直流滤波器对电压进行滤波,故融冰装置电压包含大量高次谐波,难以利用时频域分析手段进行突变特征提取,且检测动态变化的许多数值方法大都耗时严重,忽略了时间序列之间的关系。文中分析得出直流融冰装置输出电压包含大量高次谐波,提出采用排列熵算法对电压波形的整体趋势进行量化,依据脱冰扰动造成的电压波动较大而永久性故障电压波动较小的特点,对扰动与永久性故障进行判别。

## 1 绝缘架空地线脱冰扰动与永久性故障特征分析

### 1.1 融冰扰动

当直流融冰装置运行时,输出的直流电压将在闭合的架空地线回路上产生直流电流,实现融冰发热。由于地线上各处的覆冰厚薄程度、覆冰类型和融冰电流波在地线上传播的时间先后不同,所以在覆冰厚度比较薄、融冰电流先行传播到达的地线处,冰层会先行融化,打破地线的静态平衡,地线开始发生波动,产生波动力。在此种波动力的作用下,地线上的冰层将会脱落,覆冰的重量迅速减小,此处地线开始收缩,形成一个向上抬升的收缩力,地线发生位移。地线的位移会使得地线与其他导线或地线的静态距离缩短,若位移过大,则有可能导致地线与杆塔或其他导地线之间距离过短,进而引发地线故障。此外,融冰产生的大块覆冰脱落与水流会显著降低地线与杆塔之间的绝缘强度,造成地线对杆塔放电,而放电过程会给直流融冰系统带来极大扰动,冲击融冰换流器,引起换流阀输出电压波动。

在脱冰过程结束后,地线与导线之间绝缘强度通常能够恢复。直流融冰装置对地线进行融冰时电流通常不高以避免地线内光纤过热受损,这使得电弧易自行熄灭且地线接地扰动持续时间较短。图1为脱冰线路发生扰动时的等效图, $L$ 为平波电抗器;在地线某一位置处发生因脱冰而造成的扰动, $R_{\Omega}$ 为此故障的过渡电阻。

由于脱冰过程引起的绝缘强度降低具有强烈

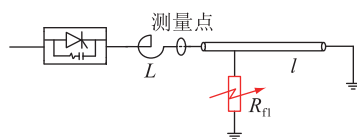


图1 脱冰线路扰动时的等效示意

Fig.1 Equivalent diagram of de-icing circuit disturbance  
的随机性和不确定性,所以其电弧通道电阻  $R_{\Omega}$  可用一个随机函数表示,如式(1)所示。

$$\begin{cases} R_{\Omega} \rightarrow \infty & t < t_0 \\ R_{\Omega} = \text{rand}(t) & t_0 \leq t \leq t_1 \\ R_{\Omega} \rightarrow \infty & t > t_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $t$ 为融冰持续时间; $t_0$ 为扰动故障发生时间; $t_1$ 为保护装置动作切除扰动故障时间。考虑到扰动过程中过渡电阻为随机变化量,其上限按照高阻故障的范围取为10倍波阻抗,约3000Ω,过渡电阻变化范围为0~3000Ω<sup>[21]</sup>。

即使融冰装置输出的直流电流较小,融冰引起的扰动持续时间通常较短,但考虑到扰动带来的电气量波动可能导致直流融冰装置横差保护与直流过电压保护动作,因此须在短时间内对扰动进行辨识,避免直流融冰装置保护频繁启动。

### 1.2 永久性故障

直流融冰过程中,若线路走廊周边树木因覆冰出现倒塌造成倾轧线路,将引发永久性故障。同时,融冰地线绝缘子串挂点处张力较强,脱落的冰易产生较强的冲击力,可能使杆塔与周围树木发生折断而引起永久性故障。脱冰线路发生永久性故障时,直流电流通过故障点入地,由于接地点稳定,因此融冰装置输出电压处于平稳状态。

$R_{\Omega}$ 为在负极某一位置处出现永久性故障时线路与地或杆塔发生金属性短接的过渡电阻。其大小为一个固定值,不随故障持续时间的变化而变化,即可表示为:

$$R_{\Omega} = c \quad (2)$$

式中: $c$ 为常数。

### 1.3 架空地线融冰扰动时融冰装置实际输出直流电压的特点

图2为昆柳龙三端柔性直流输电工程昆北站现场测试得到的直流融冰装置输出电压。由图2可知,为了增加融冰效率,在未装设直流滤波器对谐波进行滤除时,直流融冰装置输出电压包含大量高次谐波,谐波含量极大。

对图2所示电压波形进行快速傅里叶变换,由于正负极所得频谱差异极小,因此文中仅列出正极电压频谱,所得频谱见图3。由图2和图3可知,现

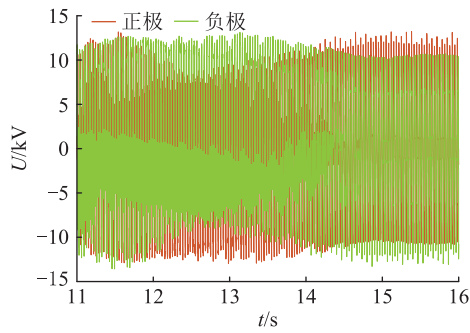


图2 线路脱冰扰动时融冰装置实际输出直流电压

Fig.2 The actual output DC voltage of ice-thawing device during the line de-icing disturbance

场直流融冰装置输出电压包含了大量高次谐波,利用时频域的突变检测方法难以从中找出突变点。

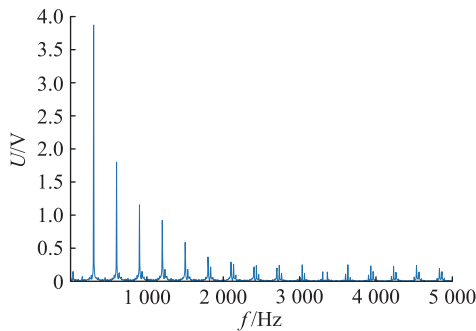


图3 线路脱冰扰动时融冰装置实际输出直流电压频谱

Fig.3 Spectrum of the actual output DC voltage of ice-thawing device during line de-icing disturbance

## 2 针对融冰线路脱冰扰动与永久性故障的排列熵辨识方法

### 2.1 排列熵算法

排列熵是用来检测动力学突变和时间序列随机性的一种方法,能够定量评估时间序列中含有的随机噪声,所针对的时间序列具有空间性。该方法过程简单、方法明确、抗噪干扰能力强,对时间较为敏感,能得到较高分辨率,可识别突出信息。

设一时间序列为  $x(i)$ , 其中  $i=1, 2, \dots, k$ , 将其进行相空间重构, 得到矩阵如式(3)所示。

$$Z = \begin{bmatrix} x(1) & x(1+t) & \cdots & x(1+(d-1)t) \\ x(2) & x(2+t) & \cdots & x(2+(d-1)t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(k) & x(k+t) & \cdots & x(k+(d-1)t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $d$  为嵌入位数;  $t$  为延迟时间;  $k=n-(d-1)t$ 。每一行为一个重构分量, 共有  $k$  个重构分量, 将每个重构分量的每一位置的元素根据数值大小按升序排列, 就可得到每一组的符号序列, 共有  $d!$  种符号序列, 若每一种符号序列出现的概率为  $P_1, P_2, \dots$ ,

$P_k$ , 则排列熵就可定义如式(4)所示。

$$H_{PE}(d) = - \sum_{j=1}^k P_j \ln P_j \quad (4)$$

将  $H_{PE}(d)$  进行归一化处理可得:

$$0 \leq H_p = H_{PE} / \ln(d!) \leq 1 \quad (5)$$

$H_p$  值的大小表示时间序列  $x(i)$  随机程度,  $H_p$  值越大, 时间序列越复杂, 越随机;  $H_p$  值越小, 时间序列越整齐, 越规则, 且其波形可反映时间序列  $x(i)$  的突变程度。

文中采用排列熵算法检测整流融冰装置直流侧电压随着脱冰线路发生扰动和永久性故障时产生的一系列变化, 提取电压信号突变信息, 观察融冰线路故障对融冰装置的影响。排列熵算法检测可反映直流电压信号时间序列的复杂程度, 对于信号每一个微小的变化, 都具有放大作用。

### 2.2 融冰系统输出直流电压排列熵波形的方差分析

方差常被用来度量随机变量和其数学期望之间的偏离程度, 可用方差计算来进一步验证直流电压数值排列熵波形的随机程度、离散程度和突变程度。设  $X$  是一个离散型随机变量, 则离散型随机变量方差的计算公式为:

$$D(X) = E((X - E(X))^2) = E(X^2) - E^2(X) \quad (6)$$

式中:  $E(X)$  为期望值。

方差越大, 说明数据的波动越大, 越不稳定, 越离散; 方差越小, 数据的波动越小, 越聚集。由于扰动会在短时间内产生多次电压波动, 扰动的过程中电压整体波动幅度大、次数多, 排列熵波形突变程度大, 方差较大; 而永久性故障的电压整体变化规律趋近于稳定、波动极小, 排列熵波形突变程度小, 方差较小。根据二者之间特性区别, 可对永久性故障与脱冰扰动进行辨识。由于目前直流融冰保护时延通常会达到数百毫秒, 因此有较长时间对直流融冰过程中的扰动与永久性故障进行辨识。

可根据式(7)判据对故障类型进行确认。

$$\begin{cases} D(X) \geq D_{th} & \text{扰动} \\ D(X) < D_{th} & \text{故障} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $D(X)$  为方差计算值;  $D_{th}$  为方差阈值。根据大量不同情况下故障仿真以及计算结果可知, 在融冰线路脱冰扰动时, 电压排列熵方差普遍大于 0.001, 而永久性故障情况下, 方差小于 0.001<sup>[22]</sup>。据此, 可将  $D_{th}$  取为 0.001, 即  $D_{th} = 0.001$ 。

## 3 建模仿真与算例分析

### 3.1 建模

以昆北换流站直流融冰系统为例, 在 PSCAD/

EMTDC 中搭建仿真模型,整体结构如图 4 所示,相关元件参数如表 1 所示。

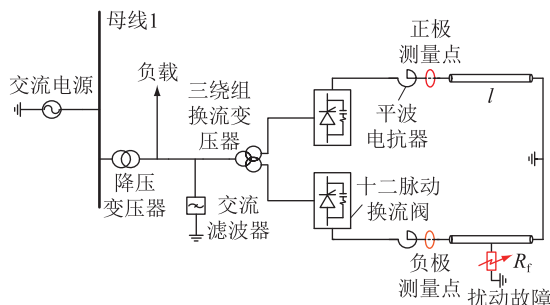


图 4 融冰系统整体结构

Fig.4 Overall structure of ice-thawing system

表 1 换流站融冰系统各元件参数

Table 1 Parameters of each element for the ice-thawing system in the converter station

元件	参数
交流电源/kV	500
降压变压器变比	500 kV/38.5 kV
交流滤波器/Mvar	20
三绕组换流变压器变比	35 kV/15 kV/15 kV
12 脉动换流阀额定电流/kA	4.5
12 脉动换流阀额定电压/kV	20
平波电抗器/H	0.025
地线长度/km	70
站内负载/MW	20
地线单位长度电阻/ $\Omega$	0.387 6

### 3.2 仿真实证

#### 3.2.1 融冰线路发生扰动

设置扰动时的短路故障位于融冰线路距离整流装置负极 20 km 处。表 2 为随机设置的一组随融冰时间变化的脱冰线路扰动过渡电阻。经仿真可得相应的融冰电压波形,如图 5 所示。

表 2 随机设置的一组过渡电阻数据

Table 2 Transition resistance data with random set

$t/s$	$R_f/\Omega$	$t/s$	$R_f/\Omega$
0	0	3.3	1 800
3	1	3.4	50
3.1	0.5	3.5	1 000
3.2	2 500		

以此故障或扰动一极的电压作为一维时间序列  $U(i)$ ,其中  $i=1,2,3,\dots,n$ ,取嵌入位数  $d=1$ ,延迟时间  $t=1$ ,进行相空间重构,得到式(3)中 1 列  $k$  行的矩阵, $k=n$ 。对矩阵中的每个重构分量元素按照数值大小升序排列,可得到 1 种符号序列,若  $k$  种符号序列出现的概率为  $P_1, P_2, \dots, P_k$ ,则根据式(4)所示的排列熵值算法,进行归一化处理生成图 6。

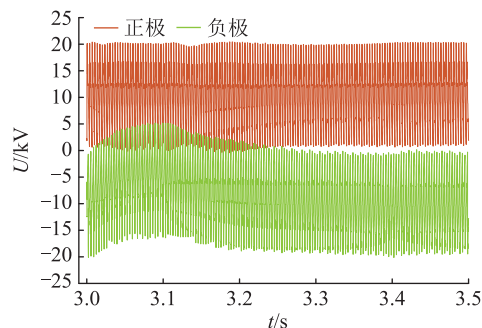


图 5 随机扰动故障的融冰电压

Fig.5 Ice-thawing voltage of random disturbance fault

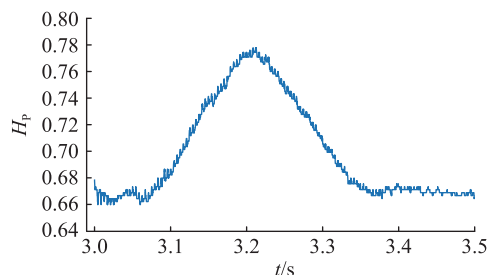


图 6 随机扰动故障的融冰电压排列熵

Fig.6 Permutation entropy of ice-thawing voltage for random disturbance fault

由图 5 和图 6 分析可知,在融冰过程中,线路脱冰可能会发生扰动,造成短时间接地短路,且脱冰造成的电阻值变化,会导致融冰电压在短时间内产生多次突变。图 5 中,因短路故障设在负极,所以负极融冰电压尤其明显,正极融冰电压变化相对来说更小,可近似忽略。由于谐波影响造成直流融冰装置输出电压中存在大量高频突变,因此从波形难以直接提取其中的扰动。利用排列熵可较为轻易地从谐波中检测到扰动,根据式(6)计算可得图 6 波形方差为 0.014,在 Python 中计算排列熵及方差共耗时 69 ms。

#### 3.2.2 融冰线路发生永久性故障

设置永久性故障位于距离融冰装置负极 5 km 处,过渡电阻为常数  $0.01 \Omega$ 。经过仿真,所得融冰电压波形如图 7 所示。对发生故障的负极进行排列熵计算,排列熵波形如图 8 所示。

永久性故障发生时,故障点过渡电阻保持恒定,直流融冰装置输出电压平稳,不包含谐波外的突变,其排列熵数值较大,但相比扰动时波形更平滑。根据式(6)计算所得方差为  $5.923 8 \times 10^{-7}$ ,与扰动相比其数值较小,排列熵及方差计算共耗时 72 ms。根据扰动和永久性故障 2 次仿真计算所得排列熵及方差的差别,可清晰地辨识扰动和永久性故障。

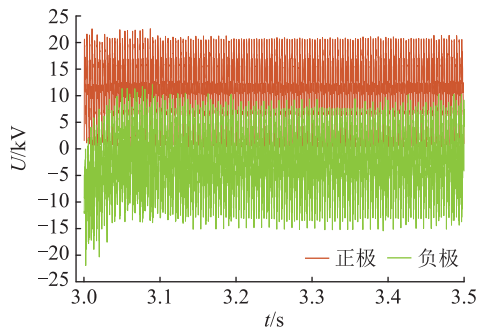


图7 5 km处永久性故障时融冰电压

Fig.7 Ice-thawing voltage for permanent failure at 5 km

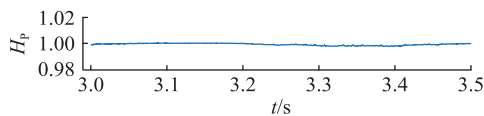


图8 5 km处永久性故障时融冰电压的排列熵

Fig.8 Permutation entropy of ice-thawing voltage for permanent fault at 5 km

### 3.3 算例分析

对图4所示仿真系统进行多种扰动情况测试,测试结果如表3所示。

表3 融冰线路扰动

Table 3 Disturbance of ice-thawing line

故障距离/km	正负极	方差	算法耗时/s
10	正	0.008 7	0.078 9
10	负	0.008 0	0.076 9
25	正	0.001 6	0.081 2
25	负	0.001 9	0.077 7
30	正	0.003 4	0.078 4
30	负	0.003 2	0.074 7
45	正	0.004 5	0.077 6
45	负	0.004 5	0.076 6
50	正	0.003 7	0.075 8
50	负	0.003 6	0.079 1
65	正	0.001 2	0.077 9
65	负	0.001 3	0.071 0

对图4所示仿真系统进行多种永久性故障情况测试,测试结果如表4所示。

由以上仿真结果分析可知,融冰线路发生永久性故障后,电压波动起伏很小,与扰动存在较大差异,其排列熵方差小于0.001,而受到随机过渡电阻的影响,扰动情况下直流融冰装置输出电压会发生多次变化,其排列熵方差数值大于0.001,易与永久性故障进行区分。此外,直流融冰装置保护动作时间通常为0.1~0.8 s,由表3和表4可知,排列熵及方差计算总耗时均在0.1 s以下,小于保护动作时

表4 融冰线路永久性故障

Table 4 Permanent failure of ice-thawing line

故障距离/km	正负极	方差	算法耗时/s
10	正	$3.787 8 \times 10^{-5}$	0.074 0
10	负	$1.475 8 \times 10^{-5}$	0.074 6
25	正	$2.073 1 \times 10^{-5}$	0.074 8
25	负	$6.234 1 \times 10^{-5}$	0.075 4
30	正	$1.219 9 \times 10^{-4}$	0.077 9
30	负	$1.918 6 \times 10^{-4}$	0.073 7
45	正	$1.300 1 \times 10^{-4}$	0.076 7
45	负	$2.040 9 \times 10^{-4}$	0.075 8
50	正	$2.625 8 \times 10^{-5}$	0.077 7
50	负	$3.415 7 \times 10^{-5}$	0.076 6
65	正	$2.910 2 \times 10^{-6}$	0.072 6
65	负	$1.989 8 \times 10^{-5}$	0.076 5

间,验证了所提方法辨识融冰线路脱冰扰动与永久性故障的可行性。

## 4 结语

(1) 在发生脱冰扰动时,直流融冰装置电压波形出现多次大幅波动,而永久性故障由于故障点稳定的原因不出现此类电压波动。

(2) 由于没有直流滤波器的抑制,直流融冰装置输出电压包含大量的高次谐波,使用传统时频域分析手段难以准确发现扰动或故障引起的电压波动。

(3) 通过排列熵计算对直流融冰装置电压的整体变化规律进行检测,可准确提取扰动及永久性故障带来的电压波动,利用排列熵计算结果的方差估计,可准确辨识扰动与永久性故障。

### 参考文献:

- [1] 王勇,苗虹,莫思特,等. 高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(18):178-187.  
WANG Yong, MIAO Hong, MO Site, et al. Summary of research on anti-ice, ice melting and de-icing of high voltage overhead transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(18):178-187.
- [2] 林锐,翁兰溪,何园丁,等. 30 mm 重冰区±1 100 kV 特高压直流线路设计[J]. 全球能源互联网,2020,3(3):255-263.  
LIN Rui, WENG Lanxi, HE Yuanding, et al. Design of ±1 100 kV UHVDC transmission line at 30 mm heavy icing area[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020,3(3):255-263.
- [3] 徐世泽,龚坚刚,李江涛,等. 中重冰区输电线路防雷措施及分区防雷研究[J]. 电瓷避雷器,2021(4):47-54.  
XU Shize, GONG Jiangang, LI Jiangtao, et al. Lightning protection methods and zoning protection strategy for transmission lines in serious icing areas[J]. Insulators and Surge Arresters,

- 2021(4):47-54.
- [4] 念路鹏,阳林,郝艳捧,等. 均匀覆冰时重冰区 110 kV 直线塔关键构件的受力分析[J]. 智慧电力,2020,48(1):15-22.  
NIAN Lupeng, YANG Lin, HAO Yanpeng, et al. Forces analysis on key components of 110 kV tangent tower with uniform icing in heavy icing area[J]. Smart Power, 2020, 48(1): 15-22.
- [5] 蒋兴良,毕茂强,黎振宇,等. 自然条件下导线直流融冰与脱冰过程研究[J]. 电网技术,2013,37(9):2626-2631.  
JIANG Xingliang, BI Maoqiang, LI Zhenyu, et al. Study on DC ice melting and ice shedding process under natural condition [J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2626-2631.
- [6] 庄文兵,祁创,王建,等. 基于微气象监测的输电线路覆冰动态过程估计模型[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(14):87-94.  
ZHUANG Wenbing, QI Chuang, WANG Jian, et al. Dynamic ice process estimation model of transmission line based on micrometeorological monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 87-94.
- [7] 杨寒斌,陈洋. 线路脱冰跳跃故障的分析[J]. 电工技术,2017(10):102-103.  
YANG Hanbin, CHEN Yang. Analysis of line de-icing jump fault[J]. Electric Engineering, 2017(10): 102-103.
- [8] 牛彪,王春伟,梁伟. 220 kV 同塔双回线路防脱冰跳跃故障措施应用研究[J]. 山西电力,2020(4):46-48.  
NIU Biao, WANG Chunwei, LIANG Wei. Applied research on deicing jump fault preventive measures of 220 kV double circuit transmission lines[J]. Shanxi Electric Power, 2020(4): 46-48.
- [9] 张煜林,陈红卫. 基于 CEEMD-WPT 和 Prony 算法的谐波间谐波参数辨识[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(12):115-121.  
ZHANG Yulin, CHEN Hongwei. Parameter identification of harmonics and inter-harmonics based on CEEMD-WPT and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 115-121.
- [10] 冯辅周,饶国强,司爱威,等. 排列熵算法的应用与发展[J]. 装甲兵工程学院学报,2012,26(2):34-38.  
FENG Fuzhou, RAO Guoqiang, SI Aiwei, et al. Application and development of permutation entropy algorithm [J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2012, 26(2): 34-38.
- [11] 曾傲,徐柳. 排列熵算法发展与应用综述[J]. 信息通信,2020,33(2):57-59.  
ZENG Ao, XU Liu. Review on the development and application of permutation entropy algorithm[J]. Information & Communications, 2020, 33(2): 57-59.
- [12] 高浩瀚,张利,梁军,等. 基于改进排列熵算法和 Yamamoto 算法的非侵入式用电设备状态变化检测[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):192-197.  
GAO Haohan, ZHANG Li, LIANG Jun, et al. Non-intrusive electrical equipment state change detection based on improved permutation entropy algorithm and Yamamoto algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 192-197.
- [13] 杨鹏,申洪涛,陶鹏,等. 云平台下时间序列数据并行化排列熵特征提取方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):217-223.  
YANG Peng, SHEN Hongtao, TAO Peng, et al. Parallel permutation entropy feature extraction method for time series data based on cloud platform [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 217-223.
- [14] 索南加乐,代玲,宋国兵,等. 利用过渡电阻参数识别的输电线路永久性故障确认方法[J]. 高电压技术,2011,37(8):1944-1951.  
SUO Nanjiale, DAI Ling, SONG Guobing, et al. Permanent fault identification method of transmission lines using transition resistance parameter [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1944-1951.
- [15] 吴建章,沙浩源,张宸宇,等. 基于 PSO-SVM 的直流配电网电能质量扰动辨识[J]. 电力工程技术,2019,38(4):18-25.  
WU Jianzhang, SHA Haoyuan, ZHANG Chenyu, et al. Identification of power quality disturbance in DC distribution network based on PSO-SVM [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 18-25.
- [16] 宋晓星,高艳丰,丁光彬,等. 输电系统雷击干扰与故障类型识别研究[J]. 电瓷避雷器,2021(1):96-102,110.  
SONG Xiaoxing, GAO Yanfeng, DING Guangbin, et al. Lightning strike interference and fault identification of transmission system [J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(1): 96-102, 110.
- [17] 吕哲,王增平. 基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(6):18-26.  
LYU Zhe, WANG Zengping. Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 18-26.
- [18] 陈仕龙,曹蕊蕊,毕贵红,等. 基于多尺度形态分解谱熵的雷击干扰与短路故障识别研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2014,39(6):74-81.  
CHEN Shilong, CAO Ruirui, BI Guihong, et al. Study of lightning interference and fault identification based on multi-scale morphological decomposition spectral entropy [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 39(6): 74-81.
- [19] 王帅,毕天姝,贾科. 基于小波时间熵的 MMC-HVDC 架空线路单极接地故障检测方法[J]. 电网技术,2016,40(7):2179-2185.  
WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Wavelet entropy based single pole grounding fault detection approach for MMC-HVDC overhead lines [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2179-2185.
- [20] 束洪春,曹璞璘,杨竞及,等. 考虑互感器传变特性的输电线路暂态保护雷击干扰与线路故障识别方法[J]. 电工技术学报,2015,30(3):1-12.  
SHU Hongchun, CAO Pulin, YANG Jingji, et al. A method to distinguish between fault and lightning disturbance on trans-

mission lines based on CVT secondary voltage and CT secondary current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 1-12.

- [21] 徐丙垠, 李胜祥, 陈宗军. 电力电缆故障探测技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 179-180.  
XU Bingyin, LI Shengxiang, CHEN Zongjun. Power cable fault detection technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 179-180.
- [22] 侯思祖, 郭威. 基于改进 EEMD 与混沌振子的配电网故障选线 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 77-87.  
HOU Sizu, GUO Wei. Fault line selection in distribution net-

work based on modified EEMD and chaos oscillator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 77-87.

作者简介:



王云龙

王云龙 (1986), 男, 学士, 工程师, 从事直流融冰系统保护技术相关工作 (E-mail: 543491917@qq.com);

邵俊人 (1990), 男, 学士, 工程师, 从事多端柔性直流输电线路保护相关工作;

陈开智 (1996), 男, 学士, 助理工程师, 从事特高压直流输电保护相关工作。

## Identification of faults and disturbance induced by de-icing for overhead transmission line based on the permutation entropy

WANG Yunlong<sup>1</sup>, SHAO Junren<sup>1</sup>, CHEN Kaizhi<sup>1</sup>, MO Juyue<sup>1</sup>, ZHANG Qunqun<sup>2</sup>, CAO Pulin<sup>2</sup>

(1. Kunming Bureau of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China;

2. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The ice-shedding may induce isolated ground wires temporary grounding during de-icing, which can cause the protective relay of direct current de-icing devices triggered frequently and unnecessarily. After analyzing the circuit of the grounding isolated ground wire, the conclusion can be obtained that the temporary grounding of isolated ground wires leads to the fluctuation of electric quantities. On the basis of above analysis, the permutation entropy is applied to describe the trend of the voltage waveform, which is able to overcome the influence of high frequency harmonics caused by converters. Based on the voltage trend acquired by the permutation entropy, the variance is employed to determine the fault and the disturbance. Then, parameters of the de-icing device in Kunbei substation is utilized for simulation. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method, which can be performed to identify the disturbance induced by de-icing and the permanent fault.

**Keywords:** direct current de-icing; insulated overhead ground wire; permutation entropy; disturbance; permanent fault; fluctuation of electric quantities

(编辑 李栋)