

[故障诊断]

基于周期性放电的风电场隐患预警研究及应用

文/陈耀峰 赵广宾 范钊祥 杨海仑 李 桥
东方绿色能源（河北）有限公司华中分公司

讲述一种集电线路隐患预警的判定过程，通过将集电线路不存在周期性或周期性不明显的异常放电数据进行二次判断，多层次分析集电线路的异常放电状况，再依据处理后的数据变化规律，判断线路的绝缘状况。诊断方式基于周期性放电数据的特征，将放电出现概率较高的时间段内的放电数据作为分析基础。

风电场电能输送过程中集电线路通常采用混架的敷设方式，不论是架空集电线还是电缆集电线，都会因线路本身的绝缘缺陷或者外部因素造成故障前预放电现象，后期阶段极易造成跳闸故障，例如架空集电线因绝缘子污秽、树障、金具松动造成的异常放电等，地下敷设的电缆集电线因年限老化、机械损伤造成的异常放电等。通过对异常放电数据的监测及诊断，实现风电场集电线路故障前的隐患预警。调研发现，线路电压等级的高低和放电数据的密集程度存在关联，电压等级越高，隐患放电数据越集中且周期性越明显，放电周期一般在1~2个工频周期，但是对于不存在周期性或周期性不明显的异常放电数据并不能排除线路不存在绝缘缺陷，而这种现象多出现在集电线路中。

目前现有诊断技术用于判断线路绝缘状况的方式有：一方面依靠人工巡查线路，比如利用紫外线、超声、红外线等仪器巡查线路上的隐患放电点，这种方式不仅费时，而且由于受地形条件限制及巡视人员经验影响，同时渐变型的异常放电较隐蔽，难以及时发现线路上的绝缘缺陷，受设备监测范围的限制，无法及时查出线路全线是否存在绝缘缺陷；另一方面利用在线监测设备，对监测到的异

常放电数据进行初步诊断，若符合周期性的特征，即可判断线路存在隐患放电点，但这种有规律的异常放电现象在集电线路中出现的时间多临近于故障时刻，而在早期隐患放电阶段中出现较少，大多因外界不同的干扰因素使设备所采集到的异常放电数据呈现出一种非周期性的形态或者误触发，比如放电类型不同、线路自身结构不同、监测设备参数预设值等影响因素。

本文主要对不存在周期性或周期性不明显的异常放电数据进行二次判断，多层次分析集电线路的异常放电状况，从而判断集电线路是否存在绝缘缺陷。该方式将初步诊断无效的异常放电数据纳入数据库中，再进行归纳、统计、分析和比对，降低了集电线路隐患预警的漏报率及跳闸率，防止故障发生。

数据区段选取

本文讲述的隐患判定分析方法所作用的对象主要为非周期性或周期性不明显的异常放电行波数据。依据周期性隐患放电行波的特征，行波的触发电点对应工频交流电压的波峰或波谷附近，如图1所示。

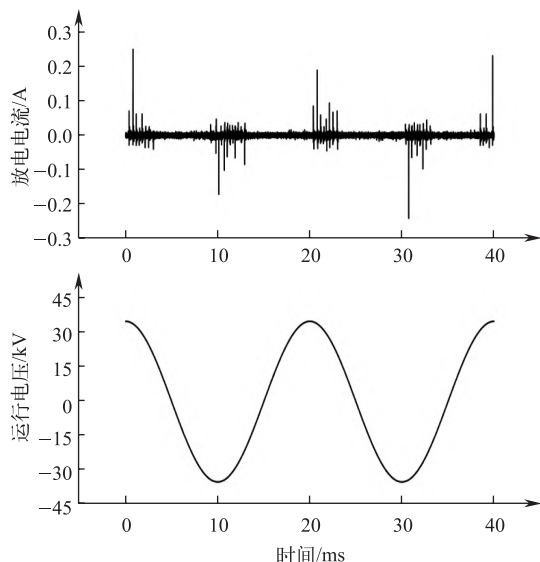


图1 周期性放电波形图

数据区段的选取由异常放电频率高的时间段 $[t_1, t_2]$ 决定, 如图2所示, t_1 、 t_2 通常在工频电压极值附近, 为保证所选数据的准确性, 基于周期性放电数据的特征及历史隐患放电数据, t_1 、 t_2 时刻对应的电压值 U_{t1} 、 U_{t2} 所属区间范围为

$$U_{t1}, U_{t2} \in [80\%U_{\max}, 85\%U_{\max}] \quad (1)$$

式中, $U_{\max}$ 为运行交流电压的幅值。

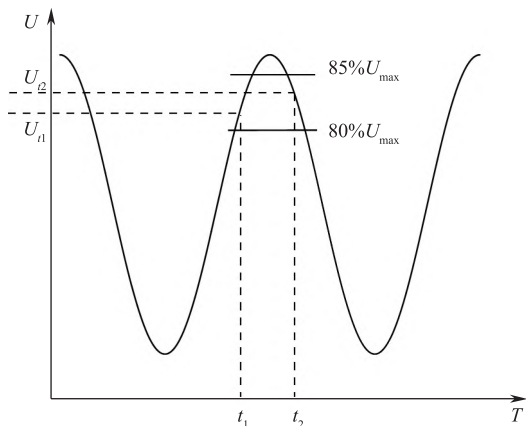


图2 所选数据段对应时间区间图

基准值求取

基准值用 Q_0 表示, 是数据筛选的基准。在对所选数据区段内的异常放电数据进行计算后, 将基准值 Q_0 与计算后的 Q 值进行比较, 进而筛选出异常值, 找出异常数据区段。

基准值 Q_0 的求取方式: 在待分析线路无任何异

常放电的条件下, 即未达到监测设备所设定的触发值, 将设备定时采集到的数据, 按照图2所示时间段进行数据区段分类。由于数据以离散信号的形式传递信息, 相邻数据点的间隔时间由采样率 f 而定, 将相邻数据点与时间轴对应的区域用 Q_i 表示, 如图3所示, $1 \leq i \leq i_{\max}$, $i_{\max}$ 由式 (2) 得出, 计算出 $[t_1, t_2]$ 时间段内各相邻数据点与时间轴对应的区域并求和, 选取该线路 h ($h \geq 100$) 个正常的数据区段, 得出 Q_0 所属的范围值 a 和 b , 即 $Q_0 \in [a, b]$, a 和 b 的数值大小因线路电压等级的不同存在小范围的波动。

$$i_{\max} = (t_2 - t_1)f - 1 \quad (2)$$

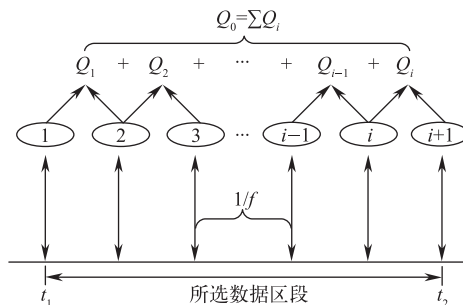


图3 基准值求取

异常放电数据处理

将集电线路设备上采集到的异常放电数据以时间段 $[t_1, t_2]$ 为准, 将触发点在该时间段内的数据以相同的时间区间划分为一个待分析异常数据区段, 若触发点未在该时间段内, 可直接判定为误触发, 即无效的异常放电数据。

上述得到的异常数据区段同基准值 Q_0 的计算方式一致, 得出每个待分析段的 Q 值, 假定统计出 j 个待分析段, Q 值按照时间先后依次排列为 Q_{11} 、 Q_{12} 、 $\dots$ 、 Q_{1j} , 将满足式 (3) 的 Q 值进行筛选, 将筛选后得到的 n 个 Q 值按照时间的先后顺序排列为 Q_{21} 、 Q_{22} 、 $\dots$ 、 Q_{2n} 。

$$Q_{1k} \notin [a, b], \quad Q_{1k} > b \quad (k=1, 2, \dots, j) \quad (3)$$

隐患预警判定

集电线路隐患预警的判定过程如图4所示。

将筛选出的 Q_{21} 、 Q_{22} 、 $\dots$ 、 Q_{2n} , 基于隐患放电的数据特征, 采用数学分析方法进行类型的归纳和统计。

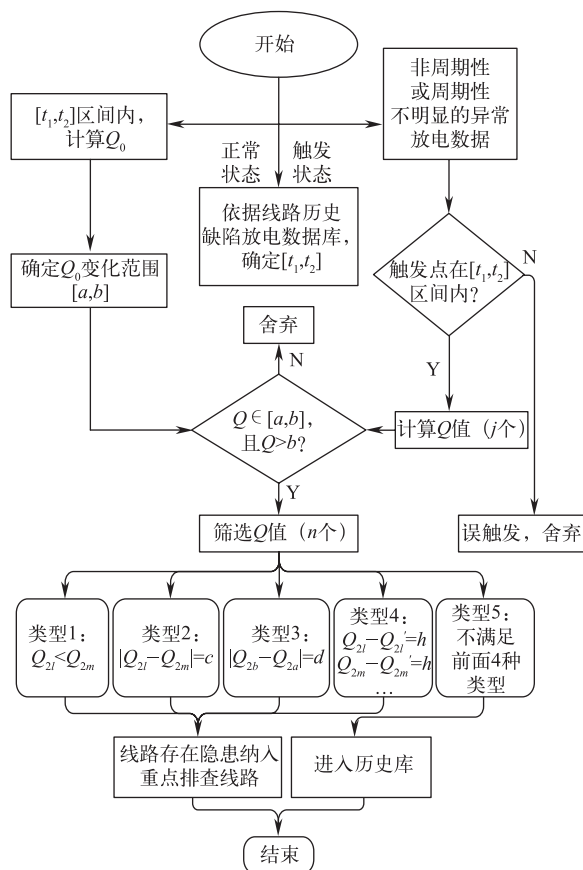


图4 集电线路隐患预警判定流程图

类型1：在1到 $n-1$ 个 Q 值中任取一个数，记为 Q_{2l} ， $1 \leq l < n$ ；如果在1到 n 个 Q 值内存在一个数，记为 Q_{2m} ， $l < m \leq n$ ，使得 Q_{2l} 和 Q_{2m} 满足式(4)的关系，即可判断线路存在隐患。

$$Q_{2l} < Q_{2m} \quad (4)$$

类型2：在1到 n 个 Q 值中任取两个数，记为 Q_{2l} 和 Q_{2m} ，若 Q 值与 b 值相差较大且满足式(5)的关系，即可判断线路存在隐患。

$$|Q_{2l} - Q_{2m}| = c \quad (5)$$

式中， $0 \leq c \leq 0.1 \max(Q_{2l}, Q_{2m})$ 。

类型3：在1到 l 和 m 到 n 个 Q 值中，各取值两个数，记为 Q_{2a} 和 Q_{2b} ， $1 \leq l < m \leq n$ ，若存在多个连续的 Q_{2b} 满足式(6)的关系，即可判断线路存在隐患。

$$|Q_{2b} - Q_{2a}| = d \quad (6)$$

式中， $d \geq 0.5 Q_{2b}$ 。

类型4：在1到 n 个 Q 值中存在多个连续的数，记为 Q_{2l} 、 Q_{2m} 、 Q_{2a} 、 Q_{2b} 、...， $1 < m < a < b < \dots$ ，在相同间隔时间 $t \in [5 \text{ ms}, 15 \text{ ms}]$ 内，同样存在 Q_{2l}' 、 Q_{2m}' 、 Q_{2a}' 、 Q_{2b}' 、...， $l' < m' < a' < b' < \dots$ ，表现出式(7)的

关系，即可判断线路存在隐患。

$$\begin{aligned} Q_{2l} - Q_{2l}' &\approx h, Q_{2m} - Q_{2m}' \approx h, \\ Q_{2a} - Q_{2a}' &\approx h, Q_{2b} - Q_{2b}' \approx h, \dots \end{aligned} \quad (7)$$

式中， $0 \leq h \leq 0.1 \max(Q_{2l}, Q_{2m}, Q_{2a}, Q_{2b})$ 。

在经过上述类型1~类型4的算法处理后，若 Q_{21} 、 Q_{22} 、...、 Q_{2n} 满足任意一种类型，即可判定该线路存在隐患，并将不满足上述变化趋势的数据归类为类型5，将之存入历史数据库中，以便连续观察后续 Q 值的变化趋势。

应用效果及分析

35 kV某集电线路架空段于2022年11月安装故障预警定位在线监测设备，线路运行频率为50 Hz，设备设定的采样频率为1 MHz，线路异常放电行波的触发值设定为0.025 A。该线路至设备挂网运行后，于2023年1月初连续7日多次采集到间歇性、非周期性的异常放电行波，经诊断定位及现场巡线证实该线路6#杆塔存在放电现象，具体原因是导线接头处安装的温度传感器出现松动，因风吹引起传感器舞动产生间歇性、非周期性的放电行波，解决此问题后，异常放电随机消失。

该集电线路的监测设备所采集到的部分非周期性放电行波如图5所示，包括第1、3、6、7日的部分放电数据，第1日和第7日的放电数据为所选待分析数据的初始阶段数据和结束阶段数据。经统计，设备在这7日内共采集到非周期性异常放电行波的触发次数约1 106次。

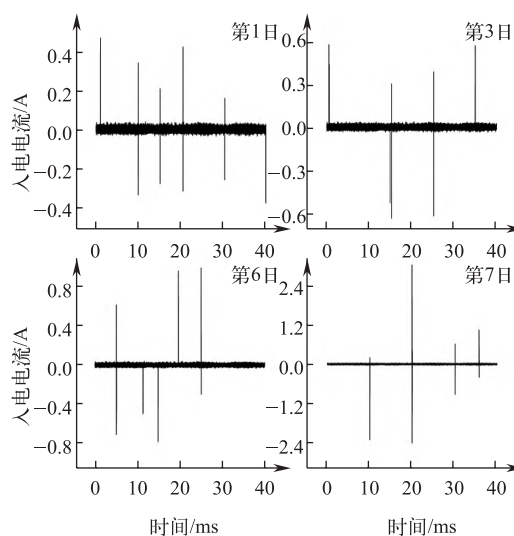


图5 该集电线路的异常放电行波

按照上述线路隐患预警的判定流程进行处理。

1) 数据区段的选取。该线路电压等级为35 kV, 相比于110 kV及以上电压等级线路, 越靠近运行电压峰值处, 出现放电的概率越大。依据以往诊断经验, 取数据区段对应的时间段 $[t_1, t_2]$, $t_1 \rightarrow 85\% U_{\max}$, $t_2 \rightarrow 85\% U_{\max}$, 故 t_2 与 t_1 的时间差为3 531 μs 。

2) 基于数据区段的选取。按照上述基准值 Q_0 的求取方式, 求取该线路的基准值。由于统计的数据量较大, 需要统计3 531* h 个采样点与时间轴对应的区域值 Q , 运用MATLAB计算出该线路 Q_0 的数值范围。在正常数据区段中, 设第 k 个数据放电电流值为 I_k , 该基准值计算式为

$$Q_0 \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{(I_k + I_{k+1}) - \frac{1}{2f}}{2f(I_k - I_{k+1})} & I_k I_{k+1} > 0 \\ \frac{f I_k |I_k| - I_{k+1} |I_{k+1}| + (1-f) I_k |I_{k+1}|}{2f(I_k - I_{k+1})} & I_k I_{k+1} < 0 \\ \frac{I_k}{2f} & I_k \neq 0, I_{k+1} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

按以上方式计算出该线路基准值取值范围为220 $\text{A} \cdot \mu\text{s} \leq Q_0 \leq 255 \text{ A} \cdot \mu\text{s}$ 。

3) 处理该集电线路的非周期性异常放电数据。按照2) 的方式进行计算, 将计算出的数据按照式(3) 进行比较、筛选, 筛选结果显示。原触发次数为1 106次, 有效触发次数为818次, 原 Q 值个数为585个, 有效 Q 值个数为327个。

4) 将有效的 Q 值按照时间先后顺序排列, 该线路 Q 值的变化趋势如图6所示。

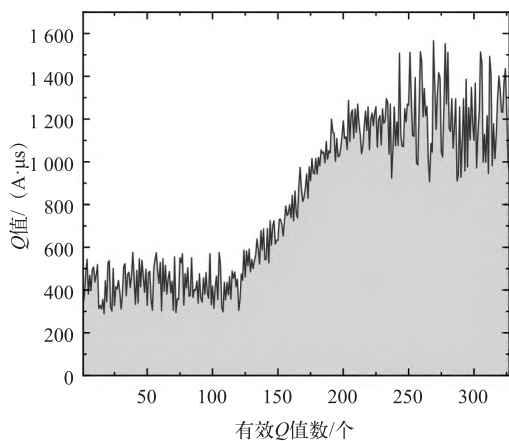


图6 趋势变化图

分析：有效 Q 值的数值区间随着时间的推移, 由起始的[300, 600]变化至[1 000, 1 600], 且存在多个连续的数值, 满足式(3) 的关系, 诊断 Q 值为

类型3。

图7~图9分别对应现有诊断案例中, 归属为类型1、类型2和类型4的趋势变化。其中, 对应的某集电线路, 基准值范围分别为 $230 \text{ A} \cdot \mu\text{s} \leq Q_0 \leq 273 \text{ A} \cdot \mu\text{s}$ 、 $370 \text{ A} \cdot \mu\text{s} \leq Q_0 \leq 435 \text{ A} \cdot \mu\text{s}$ 和 $299 \text{ A} \cdot \mu\text{s} \leq Q_0 \leq 379 \text{ A} \cdot \mu\text{s}$ 。

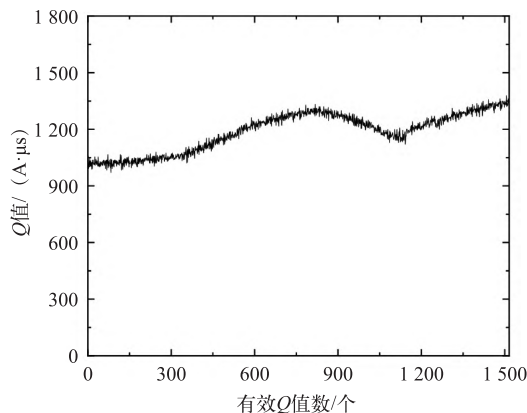


图7 类型1趋势变化案例图

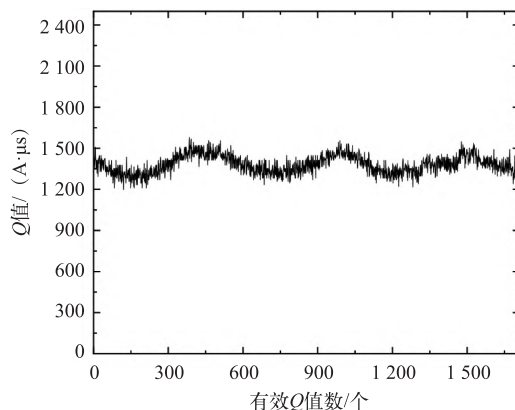


图8 类型2趋势变化案例图

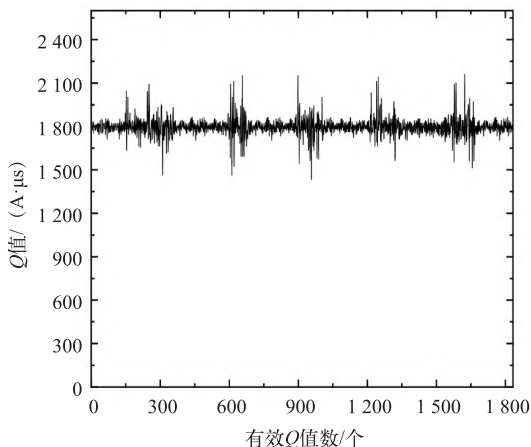


图9 类型4趋势变化案例图

结合典型应用案例的分析,进一步说明该集电线路隐患预警的判定流程在实际应用中的表现效果,可对集电线路运行过程中出现的非周期性或周期性不明显的异常放电数据进行二次判断,降低了集电线路隐患预警的漏报率,提高了线路的安全性。

结束语

本文讲述一种集电线路隐患预警的判定过程,作用对象主要为不存在周期性或周期性不明显的异常放电数据。基于处理后得到的 Q 值,提出4种类型判定,凡符合4种类型中的任何一种,即可判定该线路存在隐患。结合实际诊断案例的应用效果,采用本文讲述的处理方法及判定流程,当线路出现变化特征不明显的异常放电时,能够判定出线路是否存在绝缘缺陷,可帮助线路运维人员及时掌握线路运行状况。**EA**

(收稿日期:2023-03-22)

参考文献

- [1] 谭振龙,张伶俐,陈希,等.远海大容量机组海上风电集电系统技术经济研究[J].电气应用,2021,40(6):64-71.
- [2] 瞿业明,李洪兵,戚立峰.基于模糊故障树的

输电线路建设安全风险分析[J].电气应用,2021,40(4):20-24.

- [3] 任俊谕,李本瑜,赵明,等.基于计算电阻指标和双端测量信息的高压直流输电线路故障测距方法[J].电气应用,2021,40(6):24-31.
- [4] 王双喜,锤议苇,唐家宾,等.架空输电线路绝缘缺陷放电风险预警方法研究[J].电工技术,2022(5):185-188.
- [5] 王震宇.输电线路绝缘缺陷检测系统的研究[D].北京:华北电力大学,2009.
- [6] 曾华荣,杨旗,马晓红,等.输电线路树障隐患预放电特征模拟试验研究[J].电气技术,2020(8):93-97.
- [7] 邢丁丹,沈家正.某山区风电场工程35 kV集电线路运行期出现的问题及处理策略[J].水利水电工程设计,2021,40(4):40-46.
- [8] 杨霄.输电线路运维管理研究[D].南京:东南大学,2019.
- [9] 白剑锋.基于大数据分析的输电线路状态评估和故障预测研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [10] 杨旗,曾华荣,黄欢,等.基于BP神经网络的输电线路隐患预放电识别研究[J].电力大数据,2020,23(3):47-54.

