

[电缆]

基于工况瞬时放电特征的光伏电缆绝缘缺陷诊断技术研究

文/许国泽 李海波 刘广林 孟科润 胡万浩
华能金昌光伏发电有限公司

从电缆绝缘缺陷放电机理入手，设计出可捕获电缆中宽频缺陷放电电流的传感器，并给出电缆缺陷在线监测装置各模块的组成条件；在硬件条件满足的基础上，研究绝缘缺陷识别算法，提出了电缆绝缘缺陷评估及定位方法；对传感器响应性能和算法有效性进行检验，检验结果较理想。

35 kV 光伏电缆在实际运行过程中，随着在役时间的延长，受电树枝、水树枝、热老化、化学老化和机械力损伤等因素的影响，绝缘性能逐渐衰退，导致在绝缘薄弱处，率先出现劣化状况。现有电缆绝缘状况评估手段，主要有直流耐压试验、局部放电、介质损耗和直流分量法等。由于直流耐压试验会导致电缆绝缘薄弱点积累空间电荷，当电缆继续投运后，受电荷间的相互作用，极易发生绝缘击穿，所以直流耐压试验逐渐被更具优势的检测手段所取代。而介质损耗法主要针对电缆整体绝缘状况做评估，无法定位缺陷点；直流分量法受电缆头泄漏电阻的影响大，使用时检测准确度误差大。局部放电法，主要检测电缆内部存在的缺陷放电信号，它是一种高频电磁信号，但由于该信号极易受外界干扰，而且信号量微弱，频率范围宽，导致信号难以提取，所以实际应用中，需攻克的问题难度较大。

研究发现，电缆绝缘缺陷从发展早期到临近击穿过程中，电缆芯线和绝缘层之间频繁出现放电电弧，会导致绝缘层中的气泡或杂质在电场作用下，在绝缘介质中微移动，演变成常见的水树枝和电树枝。后经大量的试验和实际论证，当电缆出现绝缘缺陷时，运行工频电压、电流会出现瞬时放电信号，若采样芯片和传感器设计合理，在工频波形上

可直观地观测到波形发生畸变。但该过程持续时间非常短，往往只持续几毫秒，且突变幅值较小，通常不会导致线路发生故障跳闸。

基于以上分析，本文考虑了两类问题：①如何准确捕捉电缆中的宽频缺陷放电信号；②如何提取有效数据，评估电缆绝缘状况。前者，本文从传感器的角度去考虑，介绍一种扩大传感器带宽的线圈设计方式，并探讨电缆缺陷监测装置的功能模块组成条件；后者则从电缆绝缘缺陷放电特性出发，通过分析工频信号中存在的高频分量，确定放电发生时刻，筛选出有效放电数据，评估电缆绝缘状况，并基于行波定位法，实现放电点定位，从而排查电缆绝缘问题。

检测传感器设计

35 kV 光伏电缆绝缘缺陷放电信号的频率，在几百 Hz 到几十 kHz 范围内不等，而传感器响应性能，主要取决于信号频率范围是否包含于传感器自身检测带宽。本文提出了一种适用于强电磁环境下采集宽频放电电流的传感器设计方式。

1. 线圈骨架结构

传感器设计采用罗氏线圈结构，具有无磁饱和的优势，对测量任意高频电流都实用。为解决线圈因线匝不均匀和回线有效面积设计不严格造成抗外磁

干扰性不好、频带测量范围受限等问题,采用了PCB板作为线圈骨架,如图1a所示为传感器线圈骨架的一半,另一半与之对称。骨架为四层空心圆柱结构,分别为A、B、C、D层,其中A、B、C层作为线圈内侧走线层,D层作为外侧走线层,各层垂直向下开孔。

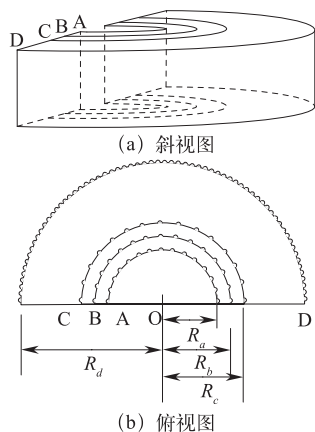


图1 传感器线圈骨架结构示意图

理论上讲,骨架截面宽度直接影响着检测灵敏度的高低,但由于传感器安装空间有限,需合理设计传感器尺寸大小。假设以B层作为内侧走线层的中心层,可按照式(1)设计尺寸大小,使之在该尺寸下具有最大的检测灵敏度。

$$\begin{cases} u = \frac{2\mu_0 h}{\delta} [3R_d - (R_d + R_b) - \frac{2R_d^2}{(R_d + R_b)}] (\frac{dI}{dt}) \\ R_c + R_a = 2R_b \end{cases} \quad (1)$$

式中, μ_0 、 h 分别为真空磁导率和骨架截面宽度; R_d 和 R_b 分别为D层和B层到载流导体O点的距离; δ 为相邻两个线匝之间的最短距离, $\delta = 2\pi R_b / N$; N 为线圈所绕线匝总数。

要保证感应电压 u 取值最大,需尽量满足 $R_b = (2^{1/2} - 1)R_d$ 。另外, R_a 、 R_c 排布相对 R_b 而言,需等间距设计,间距适宜即可。

2. 线圈走线方式

研究发现,当被测信号频率较高时,传感器线圈的内部电容、内部电感对输出电压的影响很大,其等效电路图如图2所示。

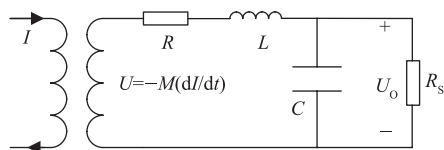


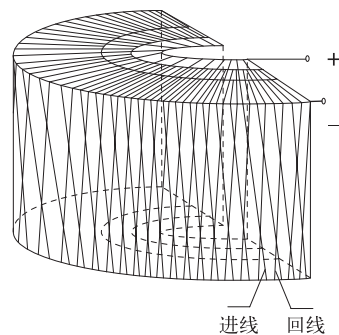
图2 线圈等效电路图

$$\frac{U_o}{I} = \frac{-j\omega R_s M}{(j\omega)^2 LCR_s + j\omega(L + RCR_s) + R + R_s} \quad (2)$$

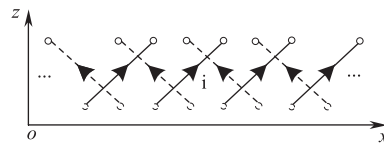
式中, R 为线圈的内部电阻; L 为线圈的内部电感; R_s 为线圈外部阻尼电阻; C 为线圈内部电容; M 为互感系数。

式(2)可以解释扩大带宽的方法:电流频率较高情况下,线圈内部参数 R 、 L 、 C 越小,检测带宽越宽。由于 R 、 L 可认定为固定的变量,所以主要考虑线圈内部电容 C ,主要包括杂散电容和对地电容。

因此,本文设计了一种降低线圈内部电容的线圈走线方式,来扩大传感器带宽。假设在A、C层PCB板上的走线孔数量都为 n 个,且同层的相邻走线孔的弧长长度相等。同样,在B层上开设 $(n+1)$ 个走线孔,就可将A/C/D层作为进线走线层,以B/D层作为回线走线层,使得回线和进线呈交替排列,且内部电流方向同向。D层上的走线孔数量为内侧走线层所有走线孔数的2倍,即 $(6n+2)$ 个,实际应用中,D层走线孔排布较密集,线圈走线如图3所示。



(a) 线匝走线示意图



(b) 侧面线匝展开示意图

图3 线圈走线结构

对降低线圈内部电容,起决定性作用的是侧面线匝的交替排布方式。根据高斯定理单位长度绕线导体所产生的磁场强度,与一层绕线方式相比,减少了单位长度绕线导体带电量 q 的大小。由于外层线匝排布紧密,此时线圈内部电容主要是绕线导体对屏蔽层之间产生的电容。其电容换算为

$$\begin{cases} u = \int_R^{R+H} \frac{q \cos \theta}{2\pi R \varepsilon} dR \\ R = R_d + R_w \\ c = \frac{q R_w N}{u} \end{cases} \quad (3)$$

式中, u 为单位长度绕线导体与线圈屏蔽层之间的电压差; H 为屏蔽层的高度; R_w 为绕线导体的截面直径; ε 为介电常数; θ 为侧面线匝与 z 轴之间的夹角。

故 q 值减小, 会直接影响绕线导体对屏蔽层之间的电容 c , 从而降低线圈内部电容, 达到扩大检测带宽的目的。

在线装置必要组件

在上述传感器设计的基础上, 满足了捕获光伏电缆宽频放电电流信号的条件, 但要实现数据的精准捕获和后续处理, 还需要其他功能模块来支撑。采样芯片决定着信号的还原性, 采样率越高, 信号呈现的越完整。所以为准确得到放电数据, 采样频率建议设计在 1 MHz 以上, 采集工频电流瞬时放电数据和放电电流行波。为判断两种数据之间的关联性, 需配备时钟同步模块, 对每个采样点赋予一个时刻。存储模块的选取需和采样频率相匹配, 存储速度大于采集速度, 避免闪跳, 遗漏关键数据。为满足实时采集需求, 须加装通信模块、供电模块, 对各模块冗余性设计, 组建出电缆缺陷在线监测装置。

后台诊断算法

1. 绝缘缺陷评估

由于光伏电缆出现绝缘缺陷时, 工频电压、电流同时刻伴随有类似于闪络的瞬时放电, 其瞬时过电压、电流幅值往往达不到保护器动作条件, 持续时间约为几个毫秒。因此, 若能找出工频中存在的瞬时放电数据, 便可对电缆绝缘状况进行评估。

由于本文设置的采样率较高, 须对工频原始数据做去噪处理。采用离散傅里叶变换 (DFT) 及其反变换 (IDFT) 对原始数据去噪, 假设采样得到的有限长数据, 记为 $x[t]$, $t=0, \dots, N-1$, t 为采样点数。DFT 和 IDFT 的数学表达式为

$$X(k) = \sum_{t=0}^{N-1} x[t] e^{-jk \left(\frac{2\pi}{N} \right) t}, \quad k=0, \dots, N-1 \quad (4)$$

$$x(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{jk \left(\frac{2\pi}{N} \right) t}, \quad t=0, \dots, N-1 \quad (5)$$

去噪后, 可得到相对平稳的工频波形 $x(t)$ 。但如果靠人工甄别判断瞬时放电, 显然有悖于智能化、数字化建设的目标。本文再对 $x(t)$ 采用小波变换做滤波处理, 通过高通滤波器 $h(t)$, 分离出高频分量 $F(k)$ 。数学表达式为

$$F(k) = \sum_{t=0}^{N-1} x[t] h[2k-t] \quad (6)$$

这样, 就可根据高频分量发生时刻, 反向关联出该时刻对应的工频电压、电流, 判断是否符合电缆出现绝缘缺陷时的工况瞬时放电特征, 从而判断出光伏电缆出现绝缘缺陷的可能性。

2. 绝缘缺陷定位

电缆绝缘缺陷是一种芯线和绝缘层之间的放电过程, 等同于电缆本体经护层出现间歇性闪络接地, 如图 4 所示, 只是该过程的接地电压 U_f 非常小。根据行波产生原理可知, 缺陷点会产生一个放电电流行波沿线路两端传输, 该电流行波幅值主要取决于接地电压大小。本文在光伏电缆左右两端部署电缆缺陷在线监测装置, 在已知电缆长度 l 、波速度 v 和行波到达 1#、2# 测量端的时差 Δt 的条件下, 便可利用行波双端定位式 (7) 计算出缺陷点距某一测量端的距离 d 。装置部署间距可根据线路长度、电缆结构, 做合理的配置。一般的, 针对 35 kV 电压等级的电缆, 监测装置间隔 5~15 km 较为适宜, 若监测区间内包含支路, 需在分支节点处再部署一套装置。因此, 可利用高频分量发生时刻关联出该时刻下的放电电流行波, 定位出实际放电位置。

$$d = \frac{1}{2} (L - \Delta t v) \quad (7)$$

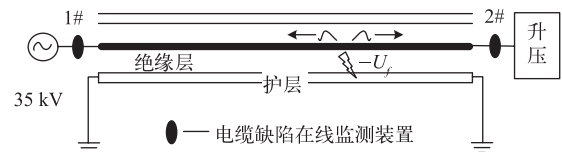


图4 电缆绝缘缺陷放电示意图

整个诊断算法处理流程如图 5 所示。

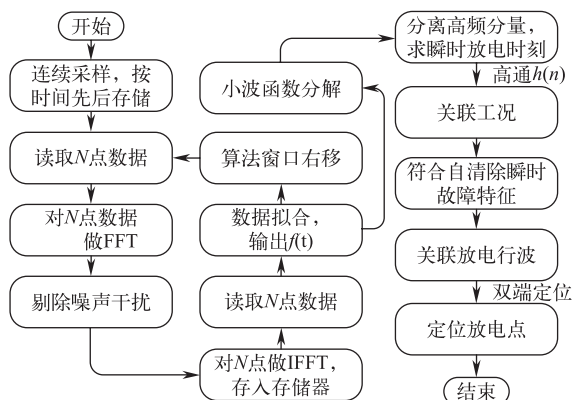


图5 电缆绝缘缺陷诊断算法流程图

有效性检验

1. 带宽性能检验

为验证传感器对不同频率信号的响应能力, 本文利用信号发生器模拟出同电流而不同频率的正弦波激励信号, 作为传感器一次侧信号。如图6所示, 为传感器采集50 Hz、500 Hz、5 kHz、50 kHz和500 kHz激励信号后输出的波形。

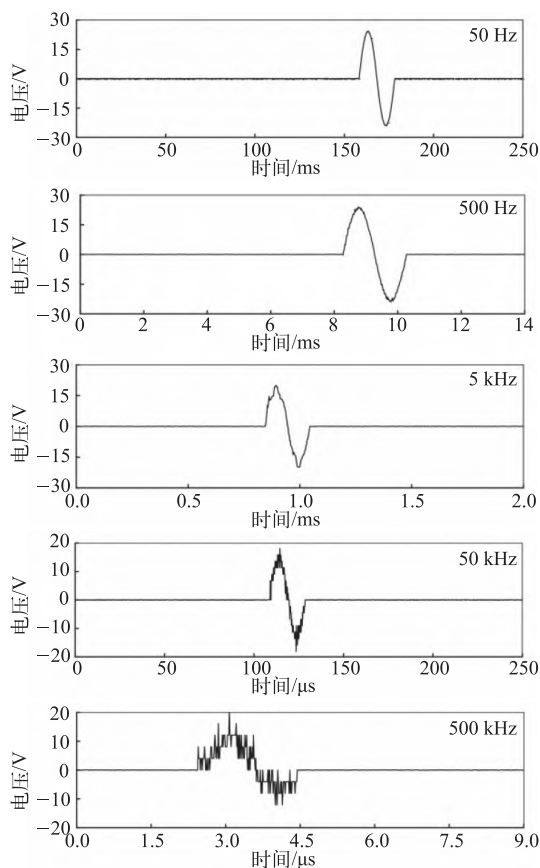


图6 传感器采样不同频率信号的输出波形

由图6中可以看出, 随着一次侧信号频率不断增加, 信号失真和畸变越明显。当一次侧信号频率达到500 Hz时, 输出波形在波峰位置有轻微变化, 达到5 kHz时, 变化较明显; 而当达到50 kHz时, 波峰出现明显失真, 达到500 kHz时, 整个输出信号出现失真和畸变。本文用传感器输出幅值增益来表示传感器带宽性能, 以增益不超过-3 dB 为标准, 根据式(8)计算增益 L , 对比采样输出电压 V_1 和原边电压 V_0 之间的增益大小, 如图7所示。

$$L = 20 \log \frac{V_1}{V_0} \quad (8)$$

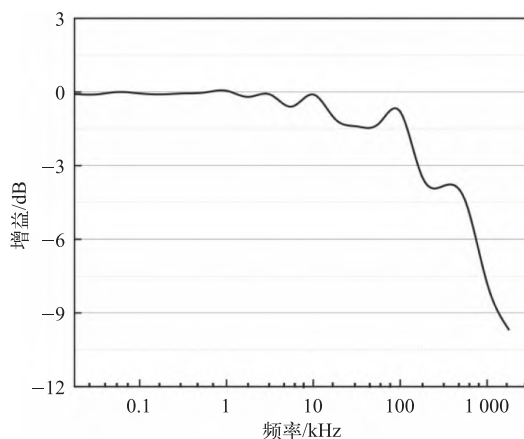


图7 传感器输出增益随频率变化关系图

图7中可以看出, 本文设计的传感器对50 ~ 100 kHz的信号, 能准确捕捉并还原, 至于更高频率信号, 失真系数呈指数衰减, 但已不在本文考虑的范围, 并不影响电缆绝缘缺陷放电信号采集。

2. 诊断算法检验

为验证算法的有效性, 从电缆绝缘缺陷诊断案例中, 取一段包含有瞬时放电数据的原始工频电流信号, 但并不清楚瞬时放电出现在哪个时刻。按照图5所示流程做去噪、滤波处理, 如图8所示, 为信号经高通滤波后, 从工频电流信号中分离出的高频分量。以该高频分量的起始点所在时刻点为准, 反向关联工频电压及电流, 如图9所示。

从图9可以看出, 其符合电缆出现绝缘缺陷时的工况瞬时放电特征, 可判断出光伏电缆在这一时刻疑似出现绝缘缺陷放电现象。为避免发生跳闸, 需结合该时刻出现的放电电流行波 (如图10所示), 利用式(7)定位出放电点, 从而安排巡检人员, 在该放电点附近排查电缆绝缘问题。

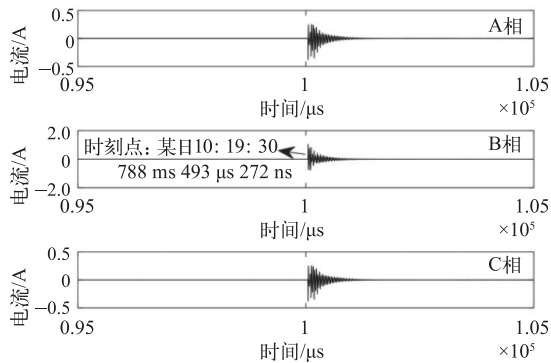


图8 高频分量的波形图

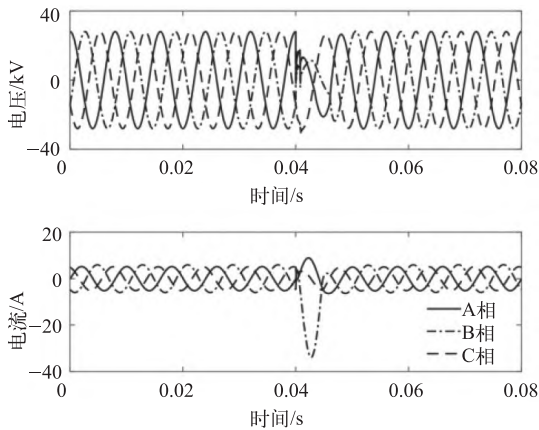


图9 对应时刻下的工频电压及电流波形图

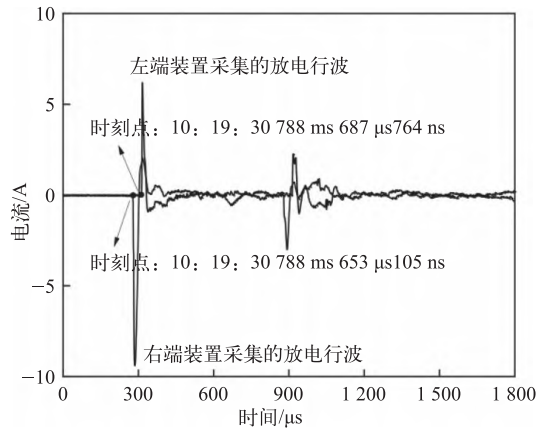


图10 对应时刻下的放电电流行波

结束语

通过对光伏电缆绝缘缺陷诊断技术研究, 得出: 若检测传感器设计合理, 可准确捕捉缺陷放电信号; 同时, 若能在海量采集数据中, 提取这类放电信号, 便能发现电缆中存在的绝缘缺陷。

1) 研究发现, 可以通过改变线圈线匝的排布方

式, 扩大传感器的检测带宽, 从而能对宽频信号具备更优异的响应能力, 提升电缆缺陷放电信号的测量准确度。

2) 光伏电缆中出现绝缘缺陷时, 工频电压、电流同时刻伴随有类似于闪络的瞬时放电。可通过分析工频信号中存在的高频分量, 确定放电发生时刻, 筛选出有效放电数据, 实现电缆绝缘缺陷评估及定位, 排查电缆绝缘问题, 提升光伏发电电能输送的稳定性。EA

(收稿日期: 2023-09-22)

参考文献

- [1] 周正雄. 地下电缆早期间歇性电弧故障检测与识别技术研究[D]. 湖南: 长沙理工大学, 2021.
- [2] 张成, 李洪飞, 杨延滨, 等. 交联聚乙烯电缆老化、诊断及修复研究进展[J]. 绝缘材料, 2020, 53(7): 1-11.
- [3] 张然. XLPE电缆的绝缘状态评价预测和可靠性评估[D]. 广东: 华南理工大学, 2017.
- [4] 汪颖, 孙建风, 肖先勇, 等. 基于优化卷积神经网络的电缆早期故障分类识别[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 10-18.
- [5] 张婧. 电缆绝缘超低频介质损耗因数在线测量方法研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2022.
- [6] 王备贝. 电力电缆绝缘缺陷检测方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [7] 高向南. 基于频域反射的电缆局部老化诊断仿真研究[D]. 陕西: 西安理工大学, 2020.
- [8] 刘世涛, 徐兆国, 杨凯, 等. 典型缺陷下电力电缆局部放电特征与识别[J]. 高电压技术, 2020, 49: 36-39.
- [9] 侯书奇. XLPE电力电缆局部放电信号特征及现场实测分析[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [10] 成志威, 夏向阳, 李明德, 等. 电力电缆的自清除瞬时故障测距研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(5): 1606-1612.
- [11] 聂永杰, 赵现平, 李盛涛. XLPE电缆状态监测与绝缘诊断研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1361-1371.