

[换流阀]

特高压直流换流阀厅用套管运行状态监测研究

文/钟荣燧

中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司

为实现对套管过热故障、局部放电异常等状态的精准监测，以特高压直流换流阀厅用套管为例，对其运行状态监测方法的设计展开研究。在终端进行主机、传感器的布置，设计基于传感器技术的直流换流阀厅用套管状态数据采样；采用遗传算法对传感器状态图像进行处理，以优化图像特征提取；利用处理后的图像数据，通过光学传感器采集局部放电信号，结合卡尔曼滤波算法对数据进行处理，实现套管运行状态的在线监测。实践结果表明，设计的方法不仅可以实现对套管温度的精准检测，还能实现对套管局部放电异常的监测。

电力需求的持续增长和能源结构的优化，直流输电逐渐成为现代电网的重要组成部分。其中，套管作为连接换流阀与外部设备的关键组件，承担着电气绝缘和机械支撑的双重功能，其运行状态的监测尤为重要。

在特高压直流输电系统中，换流阀厅内的套管长期处于高电压、大电流的复杂环境中，容易受到电、热和机械应力等多重因素的影响，导致绝缘老化、局部放电和温升异常等问题^[1]。此部分问题若不能及时发现和处理，将会引发设备故障。因此，对套管运行状态进行实时监测和评估，成为保障特高压直流输电系统可靠运行的关键技术之一。同时，特高压直流换流阀厅的环境复杂，电磁干扰强，对监测方法的抗干扰能力和可靠性要求较高。如何在强电磁环境下实现高准确度、高可靠性的数据采集与传输，是当前研究中的主要挑战。此外，套管的结构复杂，监测参数的多样性和关联性也增加了数据分析的难度。因此，本文将结合现有成果，以特高压直流换流阀厅用套管为例，对其运行状态监测方法的设计展开研究。

基于传感器技术的直流换流阀厅用套管状态数据采样

为满足特高压直流换流阀厅用套管运行状态监测需求，在终端进行主机、传感器的布置。区中传感器部署在高压设备附近，用于采集原始信号，并与主机协同工作，形成完整的测量系统^[2]。主机内部集成数据采集模块，负责对传感器获取的信号进行调理和模数转换。信号分析调度模块则对转换后的数据进行初步处理，通过通信模块将结果传输至后台系统，实现数据的实时显示与存储。

在数据采样过程中，对传感器和测量系统进行优化。传感器采用高准确度制造工艺，确保其在强电磁干扰环境下仍能稳定工作^[3]。测量电缆选用双绞双屏蔽结构，有效抑制外部电磁场对信号的干扰，进一步提升数据采样的可靠性。同时，主机中的数据采集模块通过先进的信号调理技术，能够对原始信号进行高效处理，减少噪声干扰，确保采样数据的准确性。

基于遗传算法的传感器状态图像处理

在完成数据采样后，采用遗传算法对传感器状

态图像进行处理,以优化图像特征提取和分析过程。设群体规模为 N 。随机生成 N 个个体的初始种群 $P=(p_1, p_2, \dots, p_N)^{[3]}$ 。初始种群的生成对遗传算法的全局寻优性能具有重要影响,因此,生成个体向量 $v=(v_1, v_2, \dots, v_L)$,将其作为染色体。其长度 L 计算公式为

$$L=I \times H+H \times O+H+O \quad (1)$$

式中, I 为输入节点数; H 为隐含节点数; O 为输入层节点。

$p_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iL})$ 代表网络初始参数,每个基因值 v_{ij} 表示一个连接权值或阈值。

初始染色体赋给网络权阈值,输入样本进行训练。当训练准确度达标时,获取网络输出 z 。此时,个体的适应度值 F_i 依据式(2)计算,种群平均适应度值 $\bar{F}$ 依据式(3)确定。

$$F_i=\frac{1}{\sum_{k=1}^M(z_k-\hat{z}_k)^2}, i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$\bar{F}=\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i \quad (3)$$

式中, z_k 为输出值; $\hat{z}_k$ 为期望值; M 为样本数量。

采用轮盘赌法,按适应度比例选择每代种群中的染色体。 p_i 的选择概率 q_i 计算公式为

$$q_i=\frac{F_i}{\sum_{j=1}^N F_j}, i=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

个体实数编码采用实数交叉法,第 i 、 j 个体在第 k 位基因进行交叉,计算公式如下

$$v_{ik}'=v_{ik}(1-\alpha)+v_{jk}\alpha \quad (5)$$

$$v_{jk}'=v_{jk}(1-\alpha)+v_{ik}\alpha \quad (6)$$

式中, α 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数。

通过不断交叉,得到最优个体。遗传算法得到最优个体,分解为网络权值阈值,用BP算法训练,混合算法调整系统参数,误差反向传递更新前件。同时,根据设定概率密度函数的权值和阈值,结合传感器采集的图像数据库进行深度学习训练,输出电场和电位分布。以此种方式,实现基于遗传算法的传感器状态图像处理。

套管运行状态在线监测

在完成图像处理后,利用处理后的图像数据,设计套管运行状态在线监测方法。通过光学传感器

采集局部放电信号,并结合卡尔曼滤波算法对数据进行处理,以实现实时监测与故障定位^[5]。

在高压电力阀厅内部关键位置布置光学传感器,传感器发射特定波长的光线并持续扫描,当检测到局部放电信号时,将位置信息反馈至后台处理系统。通过综合多个传感器的数据,可精确定位局部放电的发生位置。由于测量过程中存在噪声,第 K 次测量的数据准确度并非100%,其基本测量方程为

$$Z(K)=X(K)+V(K) \quad (7)$$

式中, $Z(K)$ 为测量值; $X(K)$ 为实际值; $V(K)$ 为测量噪声。

在上述内容的基础上,系统的状态方程为

$$X'(K)=AX(K-1)+BW(K-1) \quad (8)$$

式中, $X'(K)$ 为系统的状态方程; A 、 B 为噪声系数,取值为常数; W 为测量噪声。

为消除噪声对测量结果的影响,采用卡尔曼滤波算法对数据进行处理,计算公式为

$$\hat{X}(k+1|k)=\phi\hat{X}(k|k) \quad (9)$$

式中, $\hat{X}$ 为去噪后的相关数据。

完成数据的去噪后,通过光学传感器实时采集局部放电信号,利用卡尔曼滤波算法对数据进行处理,并结合遗传算法优化后的图像数据,实现对套管运行状态的精准监测。以此种方式,实时显示套管的电场分布、电位分布及局部放电位置,实现对套管运行状态的在线监测。

实例应用分析

1. 实验准备

在选定的某特高压变电站中,直流换流阀厅作为核心设备区域,其运行状态对电力系统安全至关重要。该试点单位的直流换流阀厅采用了先进的套管技术,以应对特高压直流输电中的高电压、大电流挑战。但在运行过程中,套管会出现高温现象,如某次监测中记录到套管表面温度异常升高至80℃以上,经检验是由于电流过载或散热不良所致。

此外,局部异常放电也是套管运行中的常见问题。据统计,过去一年内,该试点单位共记录了5次套管局部放电事件,每次放电均伴随着短暂的电流波动和电磁辐射。对本次实验用套管的规格与技术参数进行分析,见表1。

表1 实验用套管的规格与技术参数

序号	项目	参数
1	标称直流电压/kV	± 800
2	额定峰值电压/kV	± 880
3	额定电流/A	4 000
4	爬电比距(户内)/(mm/kV)	>14
5	爬电比距(户外)/(mm/kV)	>45
6	套管类型	SF ₆ 气体绝缘, 复合材料
7	套管长度/m	室内段约8.3室外段约9.9
8	安装角度(°)	与水平方向呈10
9	雷电冲击耐受电压/kV	2 160
10	操作冲击耐受电压/kV	1 843

在此基础上, 根据实验需求, 选择合适的监测点位, 安装支架和固定装置。确保监测设备能够安全、稳定地安装在套管附近, 避免对换流阀厅的正常运行造成干扰。将数据采集器、传感器等安置在便于操作和维护的位置。确保终端与监测设备之间的连接可靠, 且数据传输线路无阻碍。实验现场布置如图1所示。



图1 特高压直流换流阀厅用套管运行状态监测现场

根据监测设备的接线要求, 连接各条线路, 确保信号传输的准确性和稳定性。同时, 对接线进行标识记录, 以便后续维护和故障排查。

2. 直流换流阀厅用套管温度检测

直流换流阀厅用套管的温度检测是运行状态监测中的重要指标, 套管在长期运行过程中, 由于电流的热效应以及环境因素的影响, 其温度会逐渐上升。过高的温度会导致套管绝缘材料的老化加速, 甚至引发绝缘击穿等严重故障。

因此, 将温度作为检验指标, 应用设计的方法进行直流换流阀厅用套管温度检测。现已知套管1存在过热故障, 实测温度为113℃, 套管2实测温度为84℃,

对本文方法的检测结果进行分析, 如图2所示。

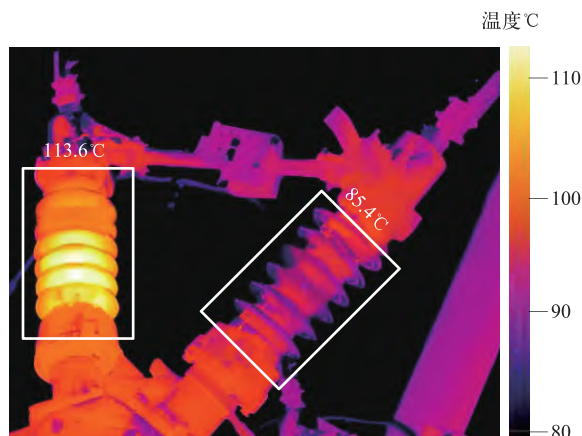


图2 直流换流阀厅用套管温度检测结果

从图2所示的实验结果可以看出, 应用本文设计的方法进行直流换流阀厅用套管温度检测, 检测得到套管1的温度为113.6℃, 套管2的温度为85.4℃, 检测温度与实测温度高度一致, 由此可以证明, 设计的方法在该指标的监测中可以达到较好的效果。

3. 局部放电监测

局部放电监测是直流换流阀厅用套管运行状态监测中的另一项关键指标, 局部放电是套管绝缘内部或表面存在的微小缺陷在电场作用下产生的放电现象, 是绝缘劣化的早期征兆。

通过局部放电监测方法, 可以实时捕捉并分析套管中的局部放电信号。局部放电监测的实施, 有助于提前发现套管的绝缘问题, 为运维人员提供足够的预警时间, 从而采取有效措施防止故障的发生, 确保直流换流阀厅的安全稳定运行。现已知套管局部存在-30~30 mV的局部异常放电, 应用本文方法对其进行监测, 监测结果如图3所示。

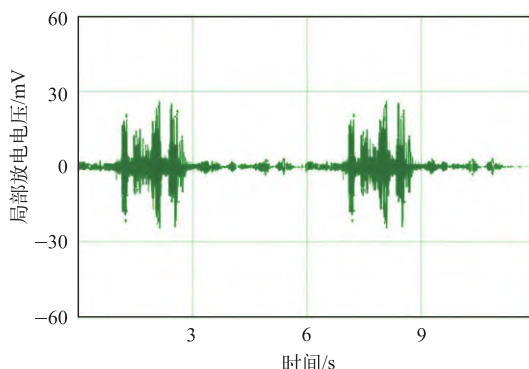


图3 局部放电监测结果

(下转第133页)

料，如纳米晶材料。

2) 在设计变压器时，需仔细评估工作频率范围内的谐波特性，确保工作在安全的能量损耗范围内。实际应用中，应定期进行谐波分析，及时识别存在的谐波问题，降低对系统的潜在风险。

结束语

深入探讨高频趋肤效应的谐波模型及其在变压器绕组材质辨识中的应用，通过趋肤效应辨识原理明确高频电流在导体中的分布特性，分析长直导体在趋肤效应下的谐波模型，为理解复杂电气系统中的谐波行为提供基础。在变压器绕组的谐波模型部分，阐述趋肤效应影响变压器的电气特性，探讨磁心材料对谐波特性的影响，对铁心损耗进一步揭示铁心材料对谐波模型的影响，通过实验分析，验证理论模型在实际应用中的有效性，为后续研究提供实证支持。EA

(收稿日期：2025-01-07)

参考文献

- [1] 徐超, 李慧, 徐健, 等. 高频数字集成电子元件无损检测仪设计与研制[J]. 电子制作, 2024, 32(2): 86-88, 110.
- [2] 张宇堃. 小型低功耗的超声无损检测系统的设计与实现[J]. 科技资讯, 2023, 21(12): 28-31.
- [3] 赵志刚, 郑宇萱, 陈天缘, 等. 基于镜像法的高频圆导线变压器漏感计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6697-6706.
- [4] 李元, 林金山, 邵先军, 等. 基于等效媒质理论的高频变压器利兹线周期性结构均质化建模方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4440-4449.
- [5] 王永强, 郑志宏, 李建芳, 等. 基于有限元法的高频变压器绕组损耗研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(15): 17-21.

(上接第129页)

从图3所示的结果可以看出，应用本文设计的方法，可以监测到特高压直流换流阀厅用套管在运行中，存在 $-30 \sim +30$ mV的局部异常放电现象，与已知条件一致，说明本文方法监测得到的结果真实、可靠。

结束语

随着传感器技术、数据采集与处理技术以及人工智能算法的快速发展，如何设计高效、可靠的在线监测方法，为特高压直流输电系统的安全运行提供有力保障，成为业内技术人员的研究热点。本文方法采用传感器技术，能够实时、准确地采集套管的状态数据，包括温度和局部放电信号，为监测提供数据基础。通过遗传算法对传感器状态图像进行处理，有效提高监测的准确性和灵敏度，使得即使是微小的局部放电信号也能被捕捉到。通过实例应用分析，本文方法在实际监测中得到验证，检测结果与实测数据高度一致，证明其可靠性和实用性。EA

(收稿日期：2025-03-24)

参考文献

- [1] 高树国, 相晨萌, 王丽丽, 等. 基于振动超声复合信号的变压器套管及升高座故障监测方法[J]. 电瓷避雷器, 2024(1): 177-186.
- [2] 张晋寅, 陈晓东, 谢志成, 等. 特高压直流穿墙套管故障的振动监测研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(5): 190-193.
- [3] 何乐, 朱炬辉, 梁兴, 等. 基于管外光纤监测的页岩气水平井多簇压裂效果评价[J]. 石油勘探技术, 2024, 52(4): 110-117.
- [4] 胡子昂, 王强, 谷小红, 等. 基于分布式光纤传感的合成气管道温度在线监测研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(1): 90-96.
- [5] 谢佳, 杨海涛, 丁国成, 等. 变压器高压套管末屏在线监测系统设计与[J]. 电瓷避雷器, 2023(4): 213-220.