

高压断路器潜伏性故障自动预警系统设计

钟加勇^{1,2}, 程晓², 项波², 厉仄平², 陈海洋²

(1. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044;

2. 国网重庆市电力公司 电力科学研究院, 重庆 401123)

摘要: 高压断路器的潜伏性故障具有潜伏期, 在早期阶段不容易被直接观察和检测, 但不及时被发现和处理, 会逐步损坏断路器的内部结构, 导致其性能下降或完全失效; 因此, 设计高压断路器潜伏性故障自动预警系统; 通过 RS485 数据采集器实时收集高压断路器的运行数据, 并利用基于 WS 设备的自动预警电源电路, 确保在复杂的电力环境中电源的稳定输出, 从而保障预警系统的连续稳定运行; 在数据处理方面, 利用 ARM Cortex-M4 故障数据寄存器中的故障信号, 通过 Karenbauer 变换进行去耦合处理, 再运用变分模态分解方法提取关键的自动预警指标; 为了更精确地评估故障信号的不确定性, 在模糊熵度量数据维度变化的基础上, 计算多尺度模糊熵阈值, 并据此划分自动预警的限制区域; 在此基础上, 结合内触头结构的实时感应功能, 实时检测高压断路器的潜伏性故障, 并通过 LCD 显示屏及时展示故障信息, 由此完成高压断路器潜伏性故障自动预警系统设计; 实验结果可知, 设计系统电压与实际故障电压之间的误差小于 2 V, 最大预警响应速度为 0.3 s, 具有精准且实时的自动预警效果。

关键词: 高压断路器; 潜伏性故障; 多尺度模糊熵; 自动预警

Design of Automatic Warning System for Latent Faults of High Voltage Circuit Breakers

ZHONG Jiayong^{1,2}, CHENG Xiao², XIANG Bo², LI Zeping², CHEN Haiyang²

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract: The latent faults of high-voltage circuit breakers have a latent period, which is difficult to observe and detect directly in the early stages. However, if not detected and dealt with in a timely manner, it will gradually damage the internal structure of the circuit breaker, leading to its performance degradation or complete failure. Therefore, an automatic warning system for latent faults in high-voltage circuit breakers is designed. The real time operation data of high-voltage circuit breakers are collected through the RS485 data collector, and an automatic warning power supply circuit based on the WS equipment is utilized to ensure the stable output of the power supply in complex power environments, thereby ensuring the continuous and stable operation of the warning system. In terms of data processing, the fault signals in the ARM Cortex-M4 fault data register are used for decoupling processing through the Karenbauer transform, and then the variational mode decomposition method is used to extract key automatic warning indicators. In order to more accurately evaluate the uncertainty of fault signals, a multi-scale fuzzy entropy threshold is calculated based on the change in data dimension measured by fuzzy entropy, which can be used to divide the restricted areas for automatic warning. On this basis, combined with the real-time sensing function of the internal contact structure, the hidden faults of the high-voltage circuit breaker are detected in real time, and the fault information is displayed in a timely manner through an LCD display screen, thus completing the design of the automatic warning system for hidden faults of the high-voltage circuit breaker. Experimental results show that the error between the designed system voltage and the actual fault voltage is less than 2 V, and the maximum warning response speed is 0.3 s,

收稿日期:2024-04-15; 修回日期:2024-05-24。

基金项目:重庆市国网重庆市电力有限公司科技项目基金(KJ2023_033)。

作者简介:钟加勇(1981-),男,博士,教授级高级工程师。

通讯作者:程晓(1993-),男,博士研究生,工程师。

引用格式:钟加勇,程晓,项波,等. 高压断路器潜伏性故障自动预警系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 54-59, 66.

with accurate and real-time automatic warning effects.

Keywords: high voltage circuit breaker; latent faults; multi scale fuzzy entropy; automatic warning

0 引言

高压断路器作为电力系统中至关重要的设备, 负责在电路异常时切断电流, 以保护整个电力系统的稳定运行。然而, 随着电力系统规模的扩大和运行时间的增长, 高压断路器不可避免地会出现各种潜伏性故障, 这些故障若不能及时发现和处理, 可能会对电力系统的安全稳定运行构成严重威胁。因此, 实施断路器故障预警系统, 及早发现并排除潜在故障问题, 对于保障电力系统的稳定运行和人民生命财产安全具有重要意义。

文献 [1] 设计基于三相自搜寻比较法的监测系统, 通过三相分块搜索和温度对比判断过热区, 但环境非均匀性和设备间热量传导差异可能影响准确性。文献 [2] 提出基于改进 BEMD 与 Res-LSTM 的辨识系统, 用于高压电气设备红外图像故障诊断, 但计算复杂且训练和调优困难。文献 [3] 基于二次时间信息的预警系统依赖操作和作业相关性, 但复杂性和环境因素可能影响预警准确性。文献 [4] 分析容错永磁电机, 采用改进的滑模观测器和电流矢量容错控制策略提高转子位置估计精度, 但设计复杂且需要准确电流测量和模型参考自适应控制。文献 [5] 提出基于稀疏分解的数据驱动算法检测电力系统谐波, 但确定有效的过完备混合字典需要较大的计算和存储资源。文献 [6] 采用拟合模型算法构建设备标准化电流优化的 BP 神经网络预测模型, 实现了火炮系统健康状态的监测和故障预警, 有助于从“故障修”向“状态修”的转变。虽然该模型能有效辨识设备性能异常并提供预警, 但其预测准确性可能受到数据采集的完整性和准确性、神经网络模型的复杂度等多种因素的影响。文献 [7] 提出了一种基于模糊熵与布谷鸟改进的极限学习机的供输弹系统早期故障预示方法, 通过可调品质因子小波变换滤波降噪、模糊熵特征提取和故障分类, 实现了对供输弹系统早期故障的准确预示。尽管该方法在试验中显示出较高的预示准确率, 但其在实际应用中的性能可能受到信号复杂性、噪声干扰以及模型泛化能力等因素的影响。文献 [8] 提出了一种基于多尺度模糊熵特征提取和乌燕鸥优化算法优化支持向量机的风机轴承故障诊断方法, 通过多尺度模糊熵有效提取振动信号中的故障特征, 并借助乌燕鸥优化算法优化 SVM 模型, 实现了风机轴承故障的高准确率诊断。但是该方法在实际应用中可能会受到环境噪声、信号采集设备的精度以及风机运行工况多变等因素的影响, 导致诊断性能下降。

由于高压断路器运行状态具有时变非线性、随机不确定性及局部性等特点, 现有的研究手段很难充分体现

高压断路器运行状态的稳定、瞬态特性, 影响最终预警效果。多尺度模糊熵能够从多个尺度上提取信号的特征信息, 对复杂信号的描述更加全面和细致。同时, 模糊熵方法能够处理不确定性和模糊性, 对高压断路器运行过程中的随机性和波动性具有较好的适应性。为此, 本文结合多尺度模糊熵设计高压断路器潜伏性故障自动预警系统。

1 系统总体架构

设计系统是通过监测和分析高压断路器的工作状态和电流信号来预测潜在的故障, 并提前发出警报, 以避免事故的发生。因此, 需要综合考虑实际需求、数据采集和处理技术、信号处理和特征提取算法、故障诊断等多个方面的知识和技术, 构建一个高效的高压断路器潜伏性故障自动预警系统。系统的原理结构如图 1 所示。

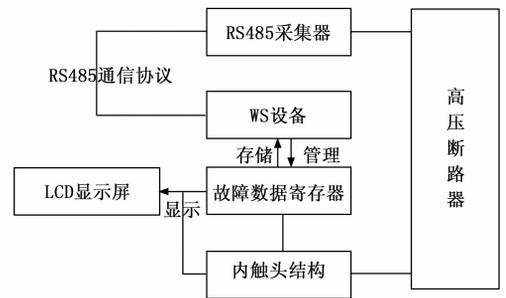


图 1 系统原理结构图

图 1 中, WS 设备为整个系统提供稳定可靠的电源供应, 确保在高压断路器运行时, 预警系统能够持续、稳定地工作。RS485 采集器通过 RS485 接口与高压断路器连接, 实时采集断路器的电压、电流、温度等运行数据。故障数据寄存器中存储采集到的故障数据, 并对数据进行滤波、去噪等预处理, 为后续故障识别提供干净、有效的数据。内触头结构的状态直接反映了断路器的健康程度, 是预警系统中的重要检测点。LCD 显示屏是预警系统与人交互的接口, 其直观性和准确性直接影响到操作人员对故障的判断和处理。由此, 从硬件设计和软件设计两个方面综合设计高压断路器潜伏性故障自动预警系统。

2 系统硬件设计

2.1 RS485 采集器设计

高压断路器潜伏性故障的预警需要准确、实时和可靠的数据采集和处理技术。在实际工程应用中, 高压断路器广泛分布于电网各个节点, 但普遍缺乏现场监测设备和实时数据传输网络。该背景下, 需要一个较高性能

的数据采集器，解决断路器数据采集困难、噪声干扰等问题，有效地获取和处理相应的数据。

高压断路器运行的数据采集系统配备了一个 12 通道的万用数据采集装置，该装置具有广泛的采集能力，能够灵活设定并采集交流、直流的电压、温度、容量、阻力以及电流等多种参数。在工作方式上，该数据采集装置采用了电池与电力双重供电模式，确保了其在各种条件下的稳定运行。装置的结构如图 2 所示。

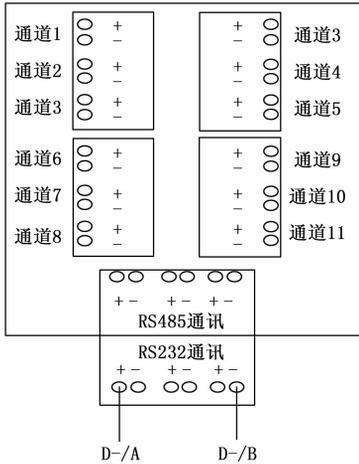


图 2 高压断路器运行 RS485 数据采集器

高压断路器潜伏性故障自动预警期间，需要面对故障数据的实时采集和远距离传输、工业环境中的电磁干扰等挑战，因此，在高压断路器运行 RS485 数据采集中分别设计 RS485 和 RS232 两个通信接口，以满足通信需求。

RS485 通信接口能够支持长距离的通信传输，适用于需要远距离数据传输的场景。而 RS232 通信接口则适合较短距离通信需求^[9]。在系统中根据实际通信距离做出选择，可以提供灵活性和优化布线方案。同时，RS485 通信接口具备较强的抗干扰能力，适用于工业环境中可能存在的电磁干扰等情况。相比之下，RS232 通信接口的抗干扰能力较弱。根据实际环境中干扰程度的不同，选用 RS485 通信接口能够确保通信的稳定性和可靠性。此外，RS485 通信接口支持多点通信^[10-11]，能够满足与高压断路器中 WS 设备的数据交互需求。

2.2 自动预警电源电路设计

稳定的电源供应是预警系统正常工作的基础，但电力系统中电源的稳定性可能受到多种因素的影响，如电压波动、电磁干扰等。这可能导致预警系统的电源不稳定，进而影响其正常运行。WS 设备能够在复杂的电力环境下提供稳定的电源输出，确保预警系统的持续稳定运行，同时具有标准的接口和通信协议，以便能够与 RS485 采集器和故障数据寄存器进行数据交互，这使得

预警系统能够实时获取高压断路器的运行数据，对潜伏性故障进行持续监测和分析。基于 WS 设备的自动预警电源电路连接结构如图 3 所示。

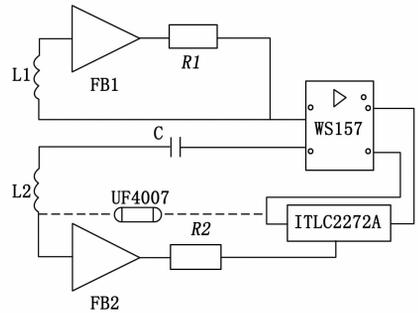


图 3 自动预警电源电路连接结构

R 电阻是具有相当高阻值的电阻，因为 R1、R2 电阻器都处于次级侧，故 R1、R2 电阻器的幅值也相对较小。在潜伏性故障自动预警时，FB1、FB2 元件同时承担着电路输出的负荷电压，此时负荷电压数值越大，就代表着潜伏性故障行为表现能力越强。

通过利用 WS 设备优化电源电路设计，可以为预警系统提供稳定可靠的电源供应，从而确保电力系统的安全稳定运行。

2.3 故障数据寄存器设计

故障数据寄存器是预警系统数据处理和程序控制的核心组件。当系统需要处理或分析高压断路器的实时数据时，这些数据首先会被加载到这些寄存器中。为了使预警系统能够实时响应并准确识别潜在故障，设计基于 ARM Cortex-M4 的故障数据寄存器。通过故障数据的集中管理和追溯，可以深入了解断路器历史工作情况，利用地址加法器设备，区分电压故障、电流故障等各种不同的故障行为。基于 ARM Cortex-M4 的故障数据寄存器结构，如图 4 所示。

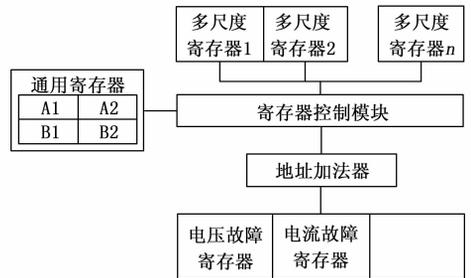


图 4 基于 ARM Cortex-M4 的故障数据寄存器结构

通过对故障数据寄存器标识，可以将已完成抽取过程的故障数据直接返回寄存器主机^[12]。ARM Cortex-M4 处理器通过对不同类型的故障特征进行精确识别，并根据特征对其定位信息解析，实现对不同类型分路故障特征的精准预警。

2.4 内触头结构设计

高压断路器自动预警内触头结构设计直接关系到断路器的正常运行和故障检测。触头作为断路器中的关键部件,负责在电路中建立或断开连接。当电路中出现故障时,设计合理的内触头能够及时感知到异常电流或电压信号,并通过相应的机制触发预警系统。这种快速、准确的故障检测能力有助于减少故障对电力系统的影响范围,防止故障扩大化,从而提高电力系统的稳定性和可靠性。

高压断路器自动预警内触头安装方式为双柜串接方式,采用定长双尾纤传感器组,在活动柜的动触头中,可将尾纤沿触头引线体引至前面板上。再用 sc 接口器固定于前面板上,在同一竖直位置也可安装 sc 接口器,并与传输光纤相连^[13]。在安装活动盒后,通过一根光缆将两组交流电源的接口连接起来,当从活动盒中取出时,将光缆从活动盒中拔出^[14]。两组柜采用双尾纤串联后再与传送线相连,如图 5 所示。

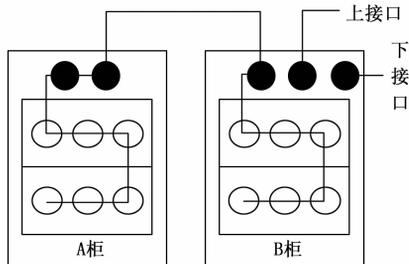


图 5 高压断路器自动预警内触头结构

在两组柜中的 B 组被拔出后,不会对 A 组的监视造成任何干扰,在拔出 A 组机架时,不会对 B 组进行监视,只有在 A 组机架上的 S 套接口被短接后,才会对 B 套进行监视。

3 系统软件设计

在高压断路器中,潜伏性故障不会直接表现出来,且这类故障通常与其他故障一同出现,形成连续故障,对电力系统的稳定运行构成潜在威胁。多尺度模糊熵算法通过分析故障信号在不同尺度下的模糊熵值,提取出与故障相关的特征信息,从而实现了对潜伏性故障的有效检测,为电力系统的稳定运行提供有力保障。具体步骤如下所示:

1) 将 RS485 数据采集器中采集到的高压断路器的数据作为输入信号。

2) 高压断路器潜伏性故障可能会产生由于干扰或信号交叉引起的假警报。去耦合处理可以更好地突出隐藏在复杂信号中的目标故障特征。高压断路器系统中存在着各种信号,如电流、电压、温度等。通过去耦合处理,可以将目标故障信号与其他无关信号分离开来,提

取出有效的故障特征,并更容易识别出潜伏性故障。因此,采用 Karenbauer 变换对故障信号进行去耦合处理,去耦合表达式如下:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ I_H \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_P \\ I_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, I_G 、 I_H 分别为地模和线模电流分量, I_P 、 I_N 分别为整流侧正、负极电流^[15]。

3) 重新定义去耦合后的故障信号成分,并获得一组具有不同起算点和不同区间的高程时间序列,确定了缩放系数、嵌入维数和延时。由于时滞对信息熵的影响不大,所以选取延迟时间值为 1。由于嵌入维度较小,往往会造成实际的相位信息较小,从而影响去噪结果,因此,选择 2~6 维作为嵌入维度。在标度系数大小上,标度系数与嵌入维数相关,以时间移动多标度排序熵量度系数为依据,采用排序熵量度系数作为时间移动多标度系数。

4) 对经过粗粒化处理后的时间序列进行排序后的熵进行运算,从而利用下列公式进行均值化处理:

$$S' = a \sum_{m=1}^c T_m [t(i), \eta, \Delta t] \quad (2)$$

式中, $t(i)$ 为 i 个时间序列, η 为嵌入维度, Δt 为延迟时间, T_m 为时移多尺度排列熵。结果得到的时移多尺度排列熵在 0~1 之间,反映了 IMF 分量的随机和复杂程度。当时移多尺度排列熵值越小,时移多尺度排列熵值变得越低,说明多尺度安排的时间序列变得越来越简洁和有序;反之,时移多尺度排列熵值越大,说明多标度组合所表现出的是一种具有较强随机性和复杂性的时间序列。

5) 利用 VMD 分解得到的 IMF 和能量—比例特性,提取各个 IMF 分量^[16]。提取表达式定义为:

$$a = \frac{C \cdot \lim_{m \rightarrow \infty} (U_1 \cdot U_2 \cdots U_m)}{I_G I_H m \cdot f(I)} \quad (3)$$

式中, m 为运维模量指标数量, $f(I)$ 表示基于电流模量指标定频系数的预警表达式, C 为尺度^[16-17]; $U_1 \cdot U_2 \cdots U_m$ 为电压模量指标。

当 $0.5 < S' < 1$ 时, IMF 分量记为噪声分离状态,需全部剔除,返回 2); 当 $0.4 < S' < 0.45$ 时, IMF 分量记为信号分量形式,需全部保留,执行步骤 4); 当 $0.45 \leq S' \leq 0.5$ 时,将分离出的信号与分量部分重构,以此作为降噪后的信号,执行步骤 4)。

6) 当一组数据的模糊性较大时,模糊熵值就会变得较高^[17-18]。模糊熵值是将两个时间序列的相似度进行对比分析,以一个指标函数作为一个模糊函数的边缘,以一个参数作为一个参数,比较两个参数的相似度。其计算过程如下:

对时间序列处理,获取 c 维向量,可表示为:

$$t_i^c = S'[t(i), t(i+1), \dots, t(i+c-1), t(i+c)] - t_0(i) \quad (4)$$

式中, $t_0(i)$ 为均值。根据模糊函数, 计算任意 t_i 、 t_j 两个时间序列的相似度, 可表示为:

$$sim_{ij}^c = t_i^c e^{-(z_{ij}^c/l)^v} \quad (5)$$

式中, l 为模糊函数宽度, v 为模糊边界梯度, z_{ij}^c 为 t_i 、 t_j 最大绝对值之差。

因为在不同尺度上, 故障信号的特征频率范围和复杂性都不相同^[19-20], 所以通过对不同尺度上 IMF 分量模糊熵的提取, 提高结果精确度。因此, 通过对已处理过的时间序列进行粗粒化, 就可以构成新的时间序列, 可表示为:

$$T_i(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=(j-1)n+1}^j t_i \quad (6)$$

式中, n 为尺度因子。多尺度模糊熵能刻画出多个时间尺度之间的相互关系, 能有效地克服传统的单一模糊熵值衡量时间序列方法所带来的特征单一性问题。根据以上步骤构造 $c+1$ 向量, 可表示为:

$$R^c(l, v) = T_i(n) \sum_{i=1}^c \left(\frac{1}{c-1} \sum_{i=1}^c sim_{ij}^c \right) \quad (7)$$

根据以上步骤, 得到的模糊熵值为:

$$\zeta(c, l, v) = \lim_{K \rightarrow \infty} [\ln R^c(l, v) - \ln R^{c+1}(l, v)] \quad (8)$$

式中, K 为 IMF 分量数量。

7) 求解多尺度模糊熵阈值。多尺度模糊熵阈值是影响模糊熵方法对故障信息的有效因素, 在潜伏性故障自动预警中, 增大阈值可以降低单元劣化的累计数量, 提高系统对潜伏性故障信息的准确辨识能力。熵阈值求解方案符合如下公式:

$$a = \zeta(c, l, v) \cdot \frac{1}{\gamma} \sum_{i=1}^{\infty} X_i^2 \quad (9)$$

式中, γ 为故障信号特征识别系数, X_i 为模糊度标记系数 i 下的数据模糊程度。

8) 划分自动预警限制区域。警限区域的划分确定了系统主机对高压断路器潜伏性故障的预警能力, 当出现潜伏性故障行为时, 系统主机对于预警指标的取值不会为 0, 因此, 警限区域的规划度量值也不会为 0。因为模糊熵算法的作用规则是单一方向性的, 所以预警指标的取值越大, 警限区域的规划度量值也就越大。为了能够精确地辨识出电路的分路故障特性, 报警主机在设定警限区时, 需要保证电路的总电压、电流和电阻的数值等级是恒定的。自动预警限制区域界定, 可表示为:

$$\Upsilon = \left\{ q \mid q = \frac{1}{2\lambda} \prod_{b=1}^{+\infty} a_b \times \frac{\sqrt{q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_m^2}}{m} \right\} \quad (10)$$

式中, $q_1 + q_2 + \dots + q_m$ 为 m 个不等于 0 的故障数值, \mathbf{b} 为识别的特征向量, λ 为系统对高压断路器潜伏性故障数据的识别权限。

9) 故障自动预警。当 $\Upsilon < \alpha$ 时, 说明高压断路器运行稳定, 没有故障出现, 也不会触发系统的自动预警功能; 当 $\Upsilon \geq \alpha$ 时, 说明高压断路器运行不稳定, 出现了故障, 结合内触头结构的实时感应功能, 触发系统的自动预警功能。将预警结果传输至 LCD 显示屏, 通过高精度的数据显示和清晰的图形化界面, 操作人员能够更准确地识别故障类型和位置, 以便采取相应的措施进行故障诊断和修复。由此完成高压断路器潜伏性故障自动预警系统设计。

4 实验与分析

4.1 实验准备

以 VS1ZN63A-12 高压真空断路器为实验对象, 该设备额定电压 12 kV, 三相交流 50 Hz, RS485 数据采集器采集频率为 1 Hz, ARM Cortex-M4 故障数据寄存器容量为 32 kB。该设备采用复合绝缘结构, 无污染, 无爆炸危险, 绝缘水平高。实验期间, 调试了主控设备, 使实验电源达到预期数值。因为在测试时, 各导线的内阻均为常数, 所以将负载电压作为测试时的变化量。电路设备连接中, 通过设置限流器和继电器设备, 一方面能够保证高压断路器不会因负载电流过大而导致超速运行, 另一方面也能够给 EPC-B2205 主机足够的时间分析和处理采集到的故障数据。在实验过程中, 通过人工操作实验设备松动接触的方式, 保证该线路的一条分支上传送的电压级别很低, 存在潜伏性故障; 当发生故障现象时, 控制开关与高压端子相连, 所以在电路分路中传输的电压的数值水平较高, 这是报警主机可以根据电压的数值判断分路中是否存在潜伏性故障现象的一个重要因素。

4.2 实验数据集和流程设计

4.2.1 实验数据集

通过非故障电压与故障电压之间的差值水平, 判定系统主机对高压断路器潜伏性故障的预警能力。在不将其他干扰条件纳入考量情况下, 故障电压与非故障电压之间差值越小, 就表示系统主机对高压断路器潜伏性故障的预警能力越强; 反之, 则越弱。

非故障电压与实际故障电压随着运维时间的变化, 对应的数值如表 1 所示。

表 1 预警电压标准数值

时间/min	非故障电压	实际故障电压/V
10	250	250
20	250	385
30	250	385
40	250	385
50	250	385
60	250	385

由表 1 可知, 非故障电压始终保持在一个稳定数值, 即 250 V。在 hxgn-12 高压开关柜运维 10 min 后, 出现了故障, 当运维时间为 20 min 时, 故障电压为 385 V, 并随着运维时间增加, hxgn-12 高压开关柜电压一直保持在故障电压数值状态。

4.2.2 实验流程

设计的实验具体流程如下所示:

1) 将控制开关连接到低电压端子上, 并在没有发生故障时, 对其进行电压值测量, 然后把采集到的故障数据输入到 EPC-B2205 主机中, 直到显示出操作界面;

2) 在 EPC-B2205 主机中, 将基于模糊熵的电路分路潜伏性故障自动预警系统应用程序输入, 通过对实验结果进行分析, 记录该点的电压值, 并将记录结果用作实验组变量;

3) 在 EPC-B2205 主机中, 将高压断路器融合诊断及智能报警软件的应用软件导入到 EPC-B2205 中, 并测量实验后的电压值, 以此为控制变量;

4) 生成实验结果, 如图 6 所示。

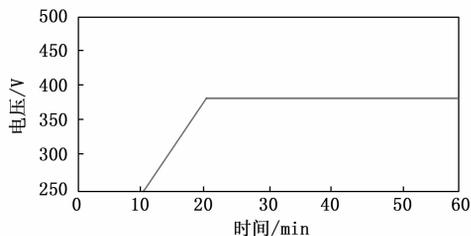


图 6 电压分析结果

由图 6 可知, 设计系统在 10 min 时, 电压数值就超过了 250 V, 说明 hxgn-12 高压开关柜出现了故障, 运维 10 min 后, 故障电压保持 383 V 不变, 与实际故障电压仅存在 2 V 的误差。通过上述分析结果可知, 使用所设计系统相比对比系统, 故障电压检测结果相对精准, 能够起到精准预警的作用。

实验过程中的相关参数设置如表 2 所示。

表 2 实验参数设置

参数名称	参数值
Karenbauer 变换窗口宽度	100 ms
变分模态分解分解层数	3 层
多尺度模糊熵计算时间窗口长度	500 ms
熵阈值范围	1~10

4.3 实验结果与分析

4.3.1 劣化系数分析

劣化系数是指在一定时间内或使用寿命内, 某项指标 (如性能、可靠性等) 相对于初始状态的变化程度。劣化系数通常表示为一个小数或百分数, 用于衡量高压断路器随时间或使用的变化程度。在高湿度、高温度和

高电磁干扰 3 个环境中, 测试本文设计系统的性能。结果如表 3 所示。

表 3 劣化系数分析

多尺度模糊熵阈值	高湿度环境	高温环境	高电磁干扰环境
1	0.125	0.125	N/A
2	0.125	N/A	0.125
3	0.125	0.125	0.125
4	N/A	0.125	0.125
5	N/A	N/A	0.125
6	N/A	0.125	N/A
7	0.125	0.125	N/A
8	N/A	0.125	N/A
9	0.125	N/A	0.125
10	N/A	N/A	N/A

表 3 中, “N/A” 表示数据不可用。

由表 3 可知, 无论是在高湿度、高温度和高电磁干扰 3 个环境中的哪一个环境, 设计系统的劣化系数平均值为 0.125, 表示预警系统的准确性较高。受环境干扰影响较小, 其主要原因是, 设计系统将 WS 设备作为中央控制单元, 实现了高性能的断路器数据接收和预警。同时, 设计了数据 RS485 采集器, 更精准地采集了不同环境中的故障数据。此外, 融合 Karenbauer 变换和变分模态分解方法, 准确提取了高湿度、高温度和高电磁干扰 3 个环境中的相关信号, 实现了自动预警, 保证了可靠性。

4.3.2 预警响应速度分析

为了验证所设计系统的自动预警实时性, 通过 5 组实验再次对比 4 种系统的从发现故障到预警所耗费的时间, 对比结果如表 4 所示。

表 4 不同系统预警响应速度分析

实验组别/组	系统 1	系统 2	系统 3	设计系统
1	0.5	0.6	1	0.1
2	0.7	0.4	0.9	0.1
3	0.3	1.0	1.2	0.2
4	0.9	0.7	0.6	0.1
5	0.5	0.6	0.7	0.3

由表 4 可知, 使用对比系统所耗费的预警时间较长, 无法起到实时自动预警效果; 而使用所设计系统所耗费的预警时间较短, 且始终未超过 0.3 s, 能够起到实时自动预警效果。

5 结束语

为了保证高压断路器的稳定运行, 以多尺度模糊熵为核心, 进行高压断路器潜伏性故障自动预警系统设计。实验结果表明, 该系统在高湿度、高温度和高电磁

(下转第 66 页)