

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.226427

# 基于物联网的环网柜在线监测技术研究

刘东超, 陈志刚, 崔龙飞

(南京南瑞继保电气有限公司, 南京 211102)

**摘要:** 针对目前环网柜在线监测设备融合度较低导致运维复杂、整体成本较高的问题, 研制了一种集成物联网传感器接入、机械特性在线监测、局部放电在线监测以及标准化通信接口的物联网环网柜监测终端。按照装置功能详细介绍了子模块的构成以及基于容器的软件架构。并重点介绍了机械特性在线监测相关的数据零漂调整、数据触发阈值选择、特征分析实现方法。同时介绍了一种用于局放采样的改进型峰值保持机制。为验证装置相关性能, 搭建了试验平台, 并模拟了部分典型机械特性故障。结果表明: 监测数据准确且一致性高, 能够满足现场的应用需求。

**关键词:** 环网柜; 物联网; 机械特性; 局部放电; 在线监测

## Online monitoring technology of a ring network cabinet based on the internet of things

LIU Dongchao, CHEN Zhigang, CUI Longfei

(NARI-Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** There are problems of complex operation and high overall cost caused by the low level of integration of current online monitoring equipment in a ring cabinet. Thus a monitoring terminal of the ring cabinet of the internet of things (IoT) is developed, integrated with micro-power sensor access, online monitoring of mechanical characteristics and of partial discharge and standardized communication interface. The structure of the sub-module and the software architecture based on the container architecture are introduced in detail, and the realization method of data zero drift adjustment, data trigger threshold selection and feature analysis related to the online monitoring of mechanical properties is emphasized. At the same time, an improved peak retention mechanism for local discharge sampling is introduced. In order to verify performance, an experimental platform is built and some typical mechanical characteristics faults are simulated. The results show that the monitoring data are accurate and consistent, and can meet the requirements of field applications.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFE0200400).

**Key words:** ring main cabinet; IoT; mechanical properties; partial discharge; on-line monitoring

## 0 引言

近年来我国不断加大配电网建设投资, 城市配电网得到了快速的发展, 供电质量显著提升。环网柜凭借其结构简单、安装方式灵活等优点得到了大规模的应用。由于环网柜数量多且分散在户外, 维护难度大。设计、制造、安装等环节导致的固有缺陷, 容易造成环网柜在安装和投运后出现电缆搭接处故障、操作机构故障、电缆支持绝缘子及母线桩头放电和气室故障等问题, 给一次设备状态监测的

运维巡检带来了极大的工作压力。因此, 迫切需要对环网柜设备运行状况进行实时和定时的在线监测, 实现预测性维护, 提升设备的连续可用性, 提高供电可靠性以及检修人员的安全性。用户可以根据设备的健康状态, 确定检修时间和措施, 减少停电时间和事故的发生, 大大缩减因为非计划停电所带来的经济损失, 减轻用电的综合使用成本, 提高电力装置运行的安全性和自动化程度<sup>[1-5]</sup>。

在当前大力发展能源互联网的背景下, 电力物联网与智能电网相辅相成, 可有效提升电网信息化、数字化和智能化水平<sup>[6]</sup>。随着物联网技术的不断发展, 特别是智能传感器、低功率广域通信等技术的

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2020YFE0200400)

成熟, 物联网技术可以对配电网中设备运行状态和运行环境状态进行监测, 解决人工定期巡检效率低的问题, 提升智能配电网的运维水平和智能化程度<sup>[7-10]</sup>。物联网以低功耗传感网络为基础<sup>[11]</sup>, 以 LoRa 为代表的低功耗广域网(LPWAN)技术具有通信覆盖范围广、低功耗以及抗干扰能力强的优势<sup>[12-14]</sup>, 能为广泛分布且数据实时性要求不高的环网柜提供环境气象数据、设备状态监测数据的通信支撑。

国外对环网柜一次设备的在线监测研究较早, 主要对绝缘气体、导体温度健康状态进行监测, 其中 ABB 公司提出了 Ability™ 配电系统资产健康管理解决方案, 通过 iUniGear 和 iVD4 中压智能化开关设备, 实现多种在线监测及诊断功能。施耐德公司提出了 EcoStruxure™ 配电解决方案, 通过一种基于物联网的架构和平台, 可实现中低压配电系统的数字化, 不管 ABB 公司还是施耐德公司, 检测系统都是分散的。目前国内环网柜在线监测与环网柜的设计也没有一并考虑, 造成环网柜上安装的在线监测设备数量、厂家众多, 且存在部分功能重叠的现象, 不仅不利于环网柜的运维, 也造成了环网柜在线监测整体成本较高的问题, 导致无法大规模推广

环网柜智能化技术。

本文研制的基于物联网的智能环网柜监测装置, 通过利用环网柜设计及生产优势, 根据环网柜二次设备仓的典型结构尺寸, 提出一种小型化、一体化的智能环网柜监测终端设计安装方案, 将一次本体设备、高精度传感器与二次终端设备融合, 实现“可靠性、小型化、平台化、通用性、经济性”目标。通过优化采样电路及软件算法实现低成本、高识别率的局放监测功能; 通过高精度传感技术实现断路器分合闸电流、储能电机电流的在线监测功能; 通过物联网智能传感技术实现环网柜内电缆接头温度以及柜内温湿度等在线监测。通过以上研究, 解决目前环网柜在线监测不全面的问题, 提升环网柜经济性和可靠性, 保证环网柜运行安全。

## 1 整体方案

环网柜监测终端采用模块化设计理念, 该装置主要由处理器模块、机械特性在线监测、局放在线监测、通信接口、人机接口和电源模块等部分组成。功能模块架构如图 1 所示。

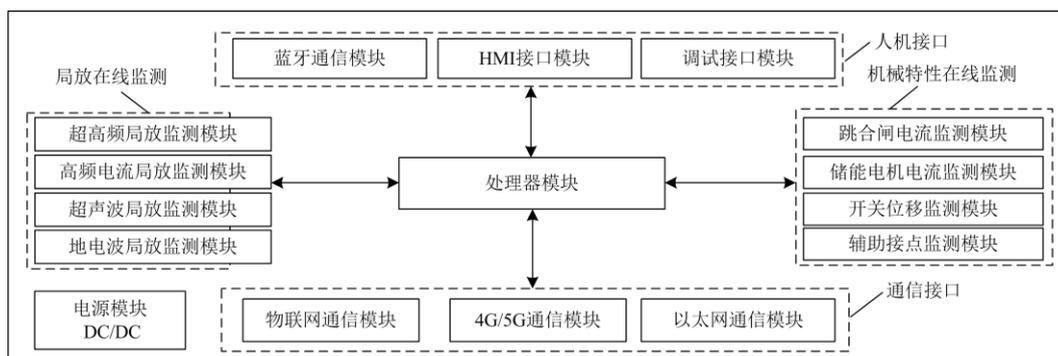


图 1 装置功能模块架构

Fig. 1 Architecture of device function module

1) 处理器模块。装置采用 Zynq-7000 硬件架构, 该器件集成了双核高级指令微处理器(ARM Cortex-A9)和现场可编程逻辑门阵列(FPGA), 具有软件可编程性和硬件可编程性, 不仅可以实现传感器数据的高速采样, 同时还能在单个器件上完成实时数据处理和操作系统功能。装置采用物联网边缘设备容器化架构, 整个系统使用消息队列遥测传输协议(MQTT)作为消息总线, 为容器中应用程序提供对外的服务软件接口<sup>[15-16]</sup>。

2) 机械特性在线监测。机械特性在线监测包含跳合闸电流监测模块、储能电机电流监测模块、开关位移监测模块、辅助接点监测模块, 采用卡扣式

霍尔电流传感器。装置针对传感器设计的 ADC 采样频率达到 10 kHz, 可实现电流曲线和行程曲线拐点的准确判别。

3) 局放在线监测。局放在线监测包含超高频局放监测模块、高频电流局放监测模块、超声波局放监测模块、地电波局放监测模块。与常见的局放在线监测装置采用的包络检波电路技术或直接采用千兆高速采样技术不同的是, 装置在局放信号串联检波电路的基础上增加了前置检波模块, 同时采用了峰值保持和触发采样机制相结合的设计, 并通过 FPGA 并行实现采样控制逻辑, 充分利用模数转换器(ADC)的采样率<sup>[17-18]</sup>。

4) 通信接口。物联网通信模块包含南向通信接口和北向通信接口，其中南向接口采用远距离无线电(LoRa)2.4 GHz 模组，用于环网柜内物联网传感器接入，包含断路器触头温度传感器、温湿度传感器、无线局放传感器、水浸传感器；北向通信接口采用 470 MHz(LoRa)模组用于装置接入至物联网网关。

5) 人机接口。装置设计的蓝牙通信模块通过蓝牙与手持式调试终端通信，给手持式调试终端提供用于展示装置运行状态、局放谱图、历史曲线的原始数据；调试接口模块通过专用调试电缆与电脑调试终端通信，用于装置程序和配置的更新，提供装置级维护手段。

## 2 关键技术

### 2.1 软件架构设计

配电物联网采用“云、管、边、端”的架构。“云主站”是云化的主站平台，以虚拟化技术为客户提供远程资源，采用云计算、大数据、人工智能等技术实现物联网架构下的全面云化；“边设备”是靠近信息采集设备具有边缘计算能力的分布式智能代理，就地或就近提供智能决策和服务，同时将筛选后的数据上传至云主站<sup>[19-20]</sup>。

配电网监测装置产生海量多源异构数据，通过对多维度的海量数据整合分析会产生巨大的价值。由 IBM 提出的 MQTT 协议具有低功耗、简单、开放、易于实现的特点<sup>[21]</sup>，适合在配电物联网云主站与边设备的通信中使用。

传统嵌入式平台系统软件使用面向对象的模块化设计思想，从分布式计算应用出发，定义统一的软件模型和编程接口，设计直观易用的信号命名方式，创新灵活高效的自动变量交换技术，解决单个保护设备到复杂的直流控制保护系统等分布式系统难以扩展管理的问题。

为适应用户新业务需求功能组件的快速部署，同时提升配网设备的运维能力，监测装置应用容器技术，将不同业务的功能组件通过 APP 部署在容器中，并通过容器设备映射功能访问各外设设备，APP 之间通过容器间 IP 化技术和 MQTT 总线实现各类消息主题的订阅和发布。本文在监测装置中部署了一种 MQTT Bridge 的代理元件，用于连接平台系统软件与 MQTT Broker、各种 APP 应用，如图 2 所示。

MQTT Bridge 元件部署在容器的外面，MQTT Bridge 启动后先向 MQTT Broker 订阅其能处理的请求，APP 应用在启动后向 MQTT Broker 订阅其需要的响应。在业务处理过程中，APP 应用向 MQTT Broker 发布数据访问请求，MQTT Broker 将数据访

问请求经 MQTT Bridge 转发给订阅了该请求的高级软件。平台系统软件对接收到的请求进行处理后，再经 MQTT Bridge 向 MQTT Broker 发布响应，最终 MQTT Broker 将数据访问响应转发给订阅了该响应的 APP。

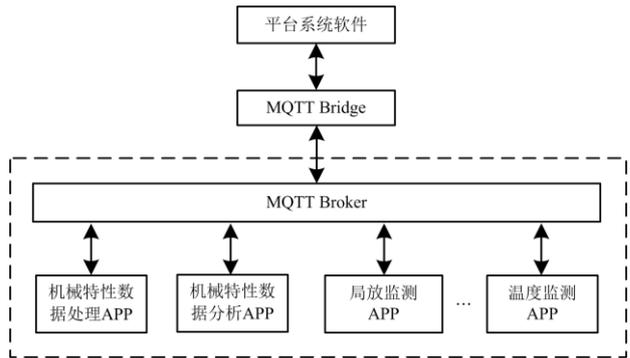


图 2 装置软件架构

Fig. 2 Software architecture of the device

### 2.2 机械特性采样模块设计

断路器的分合闸线圈电流波形信号含有反映其操动机构状态的丰富信息，通过检测分合闸线圈电流波形，将线圈波形参量与历史数据进行比对，可判断断路器操动机构是否存在问题，提出检修建议。

小电流霍尔传感器响应时速度快、失调电流小、线性度好、动态领域大，有利于保证整个测量系统的精准度和稳定性。本文采用的是卡扣式霍尔传感器，额定输入电流为 0~20 A，额定输出电压为 0~5 V。

根据断路器的线圈电流特点，本文采用 FPGA 高速并行采样方式对传感器输出电压进行 ADC 采样，采样频率为 10 kHz，ARM 处理器通过直接存储器访问接口(DMA)读取采样数据。

1) 数据零漂处理。受户外电磁环境以及采样电路硬件参数的影响，采集到的霍尔传感器输出电压会引入一个随机分布的噪声，可能会对后端数据处理过程中的阈值选择和曲线拐点分析产生影响，因此需要综合考虑装置采样硬件通道和霍尔传感器的总体噪声。将采样数据构成一个一维的信号序列，数据长度为  $L(L = 2N + 1, N$  为正整数)，经中值滤波处理，将这  $L$  个数据进行大小排序，取其序号为中心点的那个数作为滤波后的输出。随着所选用窗口长度  $L$  的增加，滤波效果越好算法所耗费系统资源就越多，因此需要对中值滤波算法进行优化处理。本文选取数据窗口长度  $L = 9$ ，数据结构是由序号和数值构成，对原始数据进行排序后，生成新的数据结构，即数据序号、排序号和数值构成。在新的数据进来的时候，先剔除数据序号为 1 的数据，在排

序后的数组的基础上插入新的数据, 生成新的排序序列, 能够简化计算。分合闸线圈电流波形信号的采样数据经过中值滤波后, 消除了干扰点、噪声点以及异常点。

分合闸线圈电流信号经 ADC 采样之后是一个电压值, 按照霍尔传感器的变比关系折算后可以得到实际电流值, 本文从不丢失采样数据精度的角度出发, 直接采用电压采样值进行数据处理。同时选取经过中值滤波后的分合闸线圈电流信号波头 100 ms 内的采样数据, 通过平均值算法获得采样电压固定偏置近似值  $v_0$  作为采样数据的零漂值, 再将中值滤波后的分合闸线圈电流减去采样电压固定偏置  $v_0$ , 即可获得精确的采样数据。

2) 数据触发门槛。断路器在没有分合操作时跳合闸电流、储能电机电流采样值只有零漂值, 因此不必耗费装置系统资源来进行复杂的数据分析。断路器在分合操作后需要一段内存来完整地缓存采样数据, 装置的采样率越高对于后端提取分合闸线圈电流曲线拐点越有利。断路器进行分合操作时分合闸线圈电流曲线时间典型值不超过 50 ms, 储能电机电流曲线时间典型值不超过 6 s。因此需要针对分合闸线圈电流曲线和储能电机电流曲线, 分别选取适宜的数据触发门槛用于缓存采样数据, 否则容易造成采样数据缓存占用过多的装置内存空间并导致故障提取算法运算量增加。

装置采样频率为 10 kHz, 即采样点之间的时间间隔固定为 0.1 ms, 因此可以用采样数据建立一个横坐标为时间  $t$ 、纵坐标为采样电压  $v(t)$  的二维坐标系。装置通过定时中断方式读取到采样数据后, 用最新采样点电压  $v_i$  与历史采样点电压  $v_{i-n}$  进行一阶求导计算, 进而得到电流曲线的斜率。由于采样点之间的间隔固定, 因此可以直接用电压突变量  $\Delta v_i$  进行等效计算, 若  $\Delta v_i$  大于预设的触发门槛  $u_0$ , 则开始缓存采样数据。通过研究断路器跳合闸电流、储能电机电流的特性<sup>[22-23]</sup>, 结合装置处理性能, 本文选取当前采样点之前 1 ms 的采样点进行电压突变量  $\Delta v_i$  计算, 即  $\Delta v_i = v_{i+10} - v_i$ 。同时考虑到实际工程应用中户外强电磁干扰可能导致的数据误触发, 因此在以上基础上进行了单点大数剔除处理。具体实现方法是: 对包含当前采样点在内的连续 3 个采样点进行电压突变量计算后得到  $\Delta v_i$ 、 $\Delta v_{i-1}$ 、 $\Delta v_{i-2}$ , 当这 3 个值的绝对值均大于设定的数据触发门槛时, 则认为断路器进行了分合操作, 装置立即缓存采样数据并进行后续的数据分析。

### 2.3 机械特性特征分析

断路器的分合闸线圈电流典型波形根据铁心的

运动过程一般可以分为 5 个阶段<sup>[24-26]</sup>, 如图 3 所示。

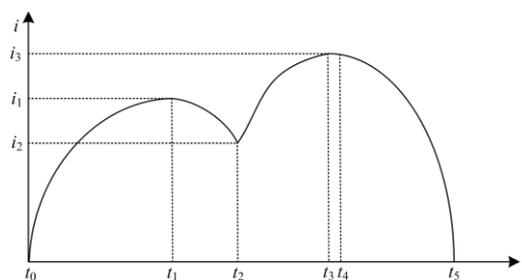


图 3 典型分(合)闸线圈电流曲线

Fig. 3 Coil current curve of typical circuit breaker switching

1) 铁心启动阶段。线圈在  $t_0$  时刻开始通电,  $t_1$  时刻线圈中的电流、磁通上升到足以驱动铁心开始动作。铁心启动阶段的特点是电流呈指数上升而铁心静止, 并在  $t_1$  时刻达到峰值后铁心开始启动, 此时线圈电流为铁心启动电流  $i_1$ , 该阶段的时间  $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ ,  $\Delta t_1$  和  $i_1$  能够反映线圈电阻  $R_0$  和铁心开始运动瞬间的阻力, 可以作为线圈匝间短路和铁心卡涩故障的判据。

2) 铁心运动阶段。随着铁心运动速度的增加, 运动反电动势会导致线圈电流减小。铁心在  $t_2$  时刻与脱扣板接触, 铁心运动速度以及反电动势瞬间降低, 之后线圈电流再次上升, 因此  $t_2$  时刻为曲线谷值, 此时线圈电流为铁心停止电流  $i_2$ , 该阶段的时间  $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ ,  $\Delta t_2$  和  $i_2$  能够反映铁心与导向套之间的摩擦阻力, 可以作为铁心卡涩故障的判据。

3) 铁心停止阶段。由于铁心运动速度和反电动势均降为零, 因此线圈电流会持续增加并达到最大值, 线圈工作电流  $i_3$  是整个曲线中的最大电流值, 该阶段的时间  $\Delta t_3 = t_3 - t_2$ ,  $\Delta t_3$  和  $i_3$  能够反映线圈电阻  $R_0$  和机构脱扣阻力, 可以作为线圈匝间短路、接头松动故障以及半轴扣入过深故障的判据。

4) 稳态阶段。该阶段线圈电流基本处于稳态且持续时间较短, 在曲线上并不明显, 持续时间  $\Delta t_4 = t_4 - t_3$ 。

5) 电流开断阶段。该阶段辅助开关分断, 线圈电流迅速减小, 持续时间  $\Delta t_5 = t_5 - t_4$ 。

根据以上断路器的典型分合闸线圈电流曲线, 本文通过 2 个算法来获取线圈电流曲线关键参数, 其中稳态阶段的参数  $\Delta t_4$  由于持续时间较短导致容易误判并且对于故障分析的参考意义不大, 因此不做详细分析处理。

算法 1: 通过平均值算法获得缓存采样数据区首端和数据区末端的  $N$  个采样点的电流平均值  $\bar{I}_1$  和

$\bar{I}_2$ ，分别沿着时间轴  $t$  递增和递减的方向计算平均值电流突变量  $\Delta I_1$  和  $\Delta I_2$ 。将  $\Delta I_1 \geq \Delta I_0$  ( $\Delta I_0$  为 10 倍的采样零漂值) 时刻的前一个采样点作为线圈通电时刻  $t_0$ ，将  $\Delta I_2 \geq \Delta I_0$  时刻的后一个采样点作为电流开断阶段时刻  $t_5$ 。即通过算法 1 可以得到线圈通电时刻  $t_0$  和电流开断阶段时刻  $t_5$  两个参数。

算法 2: 对于函数表达式确定的曲线可以通过求导数的方法找到曲线拐点(反曲点), 即改变曲线向上或者向下趋势的点, 曲线拐点满足其二阶导数为零且二阶导数两侧符号相反, 即

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (1)$$

$$f''(x) = \lim_{\delta x \rightarrow 0} \frac{\delta y}{\delta x} = \lim_{\delta x \rightarrow 0} \frac{f'(x + \delta x) - f'(x)}{\delta x} \quad (2)$$

分合闸线圈的阻抗参数很难实际精确测量, 因此无法通过函数来表示线圈电流  $i$  与时间  $t$  的关系。但是通过式(1)和式(2)可以做近似等效转换, 即: 在采样率足够高的情况下, 电流曲线在采样点  $x$  处的一阶导数值等效于相邻两个采样点构成的直线斜率; 图 3 中的  $(t_1, i_1)$ 、 $(t_2, i_2)$ 、 $(t_3, i_3)$  3 个点对应于电流曲线的拐点, 其二阶导数等效于曲线拐点两侧斜率相等且符号相反。因此装置在进行特征点筛选的过程中只需要采用以上方法就可以获取曲线拐点。同时由于装置采样率比较高, 经滤波算法处理后的电流曲线数据可能存在重复点, 因此实际处理过程中需要采用滑窗算法对数据进行处理, 避免因为重复采样点导致拐点计算异常, 数据窗的大小需要根据采样率进行调整。即通过算法 2 可以得到启动电流峰值时刻  $t_1$ , 铁心接触时刻  $t_2$  和铁芯停止时刻  $t_3$  3 个参数。

## 2.4 局放信号采样模块设计

检波原理最早用于信号的解调, 利用检波原理可在高频信号中分离出低频载波信号, 实现信号的接收功能。高频信号通过检波器之后, 可以得到一个缓慢变化的包络信号, 其幅值和原始信号的峰值相对应。

针对包络信号分析所普遍采用的固定频率采样机制会导致装置提取到的局放信号失真的问题, 本文采用了一种改进型峰值保持采样机制, 对数检波器的输出经自适应噪声阈值电压比较器后自动触发采样命令, 并通过实际局部放电量来动态调整采样窗口数据长度, 局放信号采样架构如图 4 所示。

对数检波信号通过峰值保持模块中的保持电容实现信号的峰值保持, 同时通过实时噪声采样以及动态噪声计算后获得触发阈值比较基准, 经硬件比较电路后由数据窗选择模块给采样模块提供触发

信号, 采样模块在收到触发信号后采集信号峰值点, 通过信号处理单元判断是否存在局放信号, 并根据判断结果动态调整采样数据窗的大小。采样模块在完成数据采样后会通过可控三极管对峰值保持电容进行快速放电, 为下一次局放监测做准备。

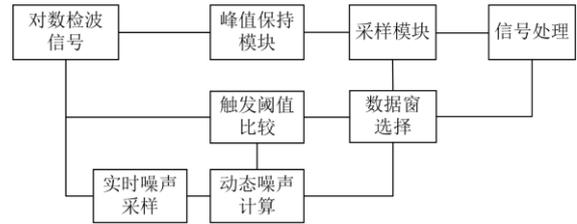


图 4 局放信号采样示意图

Fig. 4 Schematic diagram of PD signal sampling

放电持续时间由峰值保持模块 RC 电路参数决定, 需要确保峰值保持电容具有足够的放电时间使其幅值降低到噪声基准以下, 本文设计的局放信号采样电路整组时间为 220 ns, 因此 ADC 采样频率只需要达到 4 MHz 即可, 极大地降低了采集电路的硬件成本。

## 3 装置试验

### 3.1 试验平台

由于环网柜小型化的发展, 很多型号的环网柜内剩余空间已缩小到接近极限, 使得内部可供安装传感器的空间相当有限, 在进行传感器选型时应该充分考虑安装位置等因素。本文采用物联网环网柜搭建了试验测试平台, 如图 5 所示。

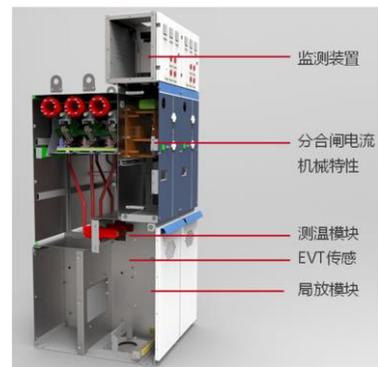


图 5 传感器安装示意图

Fig. 5 Schematic diagram of sensor installation

监测装置安装于环网柜二次设备仓内, 与柜内的站所终端(DTU)共用 DC24 V 电源; 霍尔传感器采用卡扣方式安装于跳合闸线圈和储能电机线圈导线上, 监测装置给霍尔传感器提供 DC5 V 电源; 超高频局放传感器通过强磁吸附方式安装于环网柜的电缆室内壁, 通过 50  $\Omega$  同轴电缆与监测装置的

SMA 接口连接; 环网柜堵头无线测温传感器浇注于绝缘塞, 可以直接测量电缆头的温度, 采集的数据通过物联网 2.4 GHz 无线模组发送给监测装置; 超声波无线局放传感器安装于观察窗内, 采集的数据通过物联网 470 MHz 无线模组发送给物联网网关设备或监测装置。

### 3.2 应用分析

通过以上测试平台除了完成物联网无线传感器、物联网网关设备的通信规约测试以及无线功率裕度外, 还对断路器机构进行了 500 次分闸、合闸试验, 监测装置通过高速录波功能完成了分(合)闸线圈电流以及储能电机电流波形的记录, 如图 6 和图 7 所示, 电流波形各个阶段的拐点都比较清晰, 有利于提取波形的特征值。表 1 给出了其中 3 次的试验数据, 监测装置提取的电流特征值的电流幅值和对应的时刻均在较小的范围内变化, 说明监测装置采用的基于曲线拐点的分析方法具有较好的一致性, 满足工程现场的应用需求。

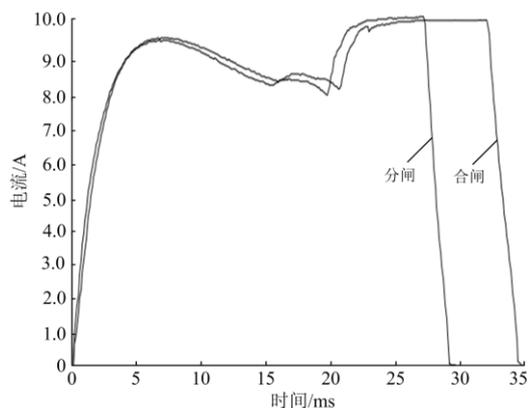


图 6 分(合)闸线圈电流高速录波曲线

Fig. 6 High speed recording wave of switching coil current

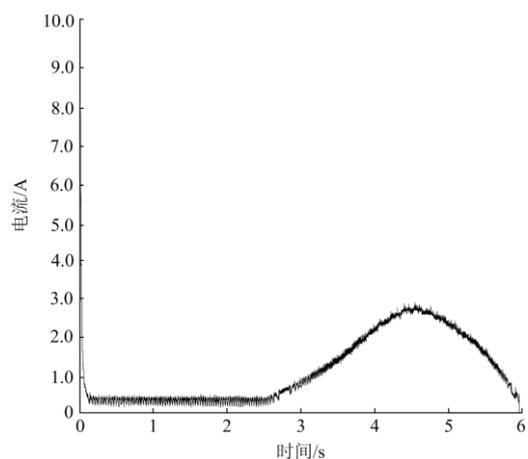


图 7 储能电机电流高速录波曲线

Fig. 7 High speed recording wave of motor current

环网柜断路器实际应用过程中比较常见的故障有铁芯卡涩、线圈匝间短路、脱扣器卡滞等<sup>[27]</sup>。本文通过在铁芯上加装了一段弹簧来模拟铁芯卡涩故障, 同时选用了相同规格的线圈并短接部分绕组, 用于模拟线圈短路故障, 实验数据如表 2 所示。其中铁芯卡涩电流波形与正常电流波形基本吻合, 但波形特征值  $i_2$  幅值以及整个分合闸操作的时间  $t_5$  均有较大幅度的增加; 线圈短路电流波形特征值  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$  均有明显的增加, 而整个分合闸操作的时间  $t_5$  均有较大幅度的减小。

表 1 分合闸及储能电机电流特征值

Table 1 Characteristic value of current of switching coil and motor

项目	$i_1/A$	$i_2/A$	$i_3/A$	$t_1/ms$	$t_2/ms$	$t_3/ms$	$t_5/ms$
分闸 1	8.641	7.172	9.266	6.7	19.8	27.6	29.4
分闸 2	8.641	7.172	9.262	6.8	19.9	27.5	29.6
分闸 3	8.641	7.173	9.265	6.9	19.9	27.4	29.2
合闸 1	8.703	7.359	9.188	6.9	20.8	32.4	34.7
合闸 2	8.707	7.359	9.187	6.9	20.9	32.5	34.9
合闸 3	8.705	7.352	9.187	6.9	20.8	32.3	34.8
储能 1	9.688	0.625	2.734	5.4	2765.6	4557.4	5962.5
储能 2	9.702	0.624	2.747	5.3	2753.3	4559.9	5963.2
储能 3	9.795	0.625	2.731	5.4	2758.7	4558.1	5964.3

表 2 铁芯卡涩故障电流与正常特征值对比

Table 2 Difference between the fault current of iron core jam and normal feature

项目	$i_1/A$	$i_2/A$	$i_3/A$	$t_1/ms$	$t_2/ms$	$t_3/ms$	$t_5/ms$
正常分	8.641	7.172	9.266	6.7	19.9	27.5	29.4
卡涩分	8.766	7.672	9.359	6.9	18.2	27.5	32.9
短路分	10.063	8.422	10.844	6.9	19.0	24.1	26.3
正常合	8.703	7.359	9.188	6.9	20.8	32.4	34.8
卡涩合	8.703	7.703	9.063	7.3	19.0	36.5	38.7
短路合	9.891	8.422	10.641	6.7	20.1	29.6	32.1

## 4 结语

将不同类型设备进行集成与优化整合是二次设备专业发展的一个重要方向, 尤其是对于数量众多的中低电压等级应用场景更为重要。本文介绍了基于物联网的智能环网柜监测装置的研制, 按照装置功能详细介绍了子模块的构成以及基于容器架构的软件架构, 并重点介绍了机械特性在线监测相关的数据零漂调整、数据触发门檻选择、特征分析实现方法, 同时介绍了一种用于局放采样的改进型峰值保持机制。为验证装置的相关性能, 搭建了试验平台, 并模拟了部分典型机械特性故障, 结果表明:

监测数据准确且一致性高,能够满足现场的应用需求。本文研制的基于物联网的智能环网柜监测装置在山西、武汉等地的环网柜智能化改造工程中得到了应用,后续将进一步研究装置功能集成后在运行过程中的技术和管理问题。

### 参考文献

- [1] 李波涛, 张宝英, 赵世坡, 等. UHF RFID 温度标签的研究及其在开关柜温度监测系统中的应用[J]. 电测与仪表, 2017, 54(4): 117-122.  
LI Botao, ZHANG Baoying, ZHAO Shipo, et al. Research on UHF RFID temperature tags and its application in switch cabinet temperature monitoring system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(4): 117-122.
- [2] 黄新波, 方寿贤, 王霄宽, 等. 基于物联网的智能高压开关柜设计[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 147-151.  
HUANG Xinbo, FANG Shouxian, WANG Xiaokuan, et al. High voltage switchgear cabinet based on IoT technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 147-151.
- [3] 刘树鑫, 曹云东, 侯春光, 等. 新型固体环网柜在线监测系统设计[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 38-44.  
LIU Shuxin, CAO Yundong, HOU Chunguang, et al. Design of online monitoring system for solid-insulated ring main unit[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 38-44.
- [4] 张志锋, 缪希仁, 江灏. 基于面阵测温的高压开关柜温度状态监测系统研究[J]. 电器与能效管理技术, 2021(3): 51-56, 75.  
ZHANG Zhifeng, MIAO Xiren, JIANG Hao. Research on temperature monitoring system of high voltage switchgear based on area array temperature measurement[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(3): 51-56, 75.
- [5] 熊兰, 徐敏捷, 杨子康, 等. 高压开关柜电缆室温度场分析及在线监测系统构建[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 153-157.  
XIONG Lan, XU Minjie, YANG Zikang, et al. Thermal field analysis for cable room of high-voltage switchgear and design of online monitoring system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 153-157.
- [6] CHEN H, WANG X, LI Z, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 151-158.
- [7] 朱彦名, 徐潇源, 严正, 等. 面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 176-187.  
ZHU Yanming, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 176-187.
- [8] 刘喜梅, 马俊杰. 泛在电力物联网在电力设备状态监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 69-75.  
LIU Ximei, MA Junjie. Application of the ubiquitous power internet of things in state monitoring of power equipment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 69-75.
- [9] 李天友, 杨智奇, 刘松喜. 基于物联网技术的低压配电网单相断线故障识别研究[J]. 供用电, 2020, 37(12): 1-7.  
LI Tianyou, YANG Zhiqi, LIU Songxi. Research on single-phase recognition fault identification of low-voltage distribution based on internet of things[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(12): 1-7.
- [10] 吕军, 盛万兴, 刘日亮, 等. 配电网物联网设计与应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1681-1688.  
LÜ Jun, SHENG Wanxing, LIU Riliang, et al. Design and application of power distribution internet of things[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1681-1688.
- [11] 艾精文, 党晓婧, 吕启深, 等. 基于物联网的具有全景功能的全维度设备状态监测系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 122-128.  
AI Jingwen, DANG Xiaojing, LÜ Qishen, et al. Research on full dimension equipment status monitoring system with panoramic function[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 122-128.
- [12] 陈皓勇, 蔡伟钧, 陈健润. 能量与信息融合的电力物联网技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 8-17.  
CHEN Haoyong, CAI Weijun, CHEN Jianrun. Power internet of things technology with energy and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 8-17.
- [13] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 1-8.  
CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 1-8.
- [14] 陈永波, 汤奕, 艾鑫伟, 等. 基于 LPWAN 技术的能源电力物联专网[J]. 电信科学, 2017, 33(5): 143-152.  
CHEN Yongbo, TANG Yi, AI Xinwei, et al. Electricity internet of things based on LPWAN technology[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(5): 143-152.
- [15] 聂峥, 章坚民, 傅华渭. 配变终端边缘节点化及容器化的关键技术和应用场景设计[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 154-161.  
NIE Zheng, ZHANG Jianmin, FU Huawei. Key

- technologies and application scenario design for making distribution transformer terminal unit being a containerized edge node[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 154-161.
- [16] 赵睿林. MQTT 协议在智能电网关中的实现[J]. 电器与能效管理技术, 2021(7): 83-87.  
ZHAO Ruilin. Realization of MQTT protocol in intelligent power gateway[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(7): 83-87.
- [17] 白鹭, 李小婧, 董理科, 等. 基于超声波法识别环网柜的局部放电类型研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 42-48.  
BAI Lu, LI Xiaojing, DONG Like, et al. Study on the partial discharge types of ring network cabinets based on ultrasonic method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 42-48.
- [18] 关少平, 韩肖清, 王佳莉, 等. 基于联合检测的环网柜局部放电方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 126-129, 136.  
GUAN Shaoping, HAN Xiaoqing, WANG Jiali, et al. Research on partial discharge of ring network cabinet based on combined detection method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 126-129, 136.
- [19] 吕军, 栾文鹏, 刘日亮, 等. 基于全面感知和软件定义的配电物联网体系架构[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3108-3115.  
LÜ Jun, LUAN Wenpeng, LIU Riliang, et al. Architecture of distribution internet of things based on widespread sensing & software defined technology[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3108-3115.
- [20] 孔垂跃, 陈羽, 赵乾名. 基于 MQTT 协议的配电物联网云边通信映射研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 168-176.  
KONG Chuiyue, CHEN Yu, ZHAO Qianming. Research on cloud-side communication mapping of the distribution internet of things based on MQTT protocol[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 168-176.
- [21] 应俊, 蔡月明, 刘明祥, 等. 适用于配电物联网的低压智能终端自适应接入方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 22-27.  
YING Jun, CAI Yueming, LIU Mingxiang, et al. Adaptive access method of low voltage intelligent terminal for distribution internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 22-27.
- [22] 谭佳明, 陈玲玲, 蒋佳成, 等. 交流中压真空断路器机械特性在线监测装置的研制[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 69-76.  
TAN Jiaming, CHEN Lingling, JIANG Jiacheng, et al. Development of on-line monitoring device for mechanical characteristics of AC medium voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 69-76.
- [23] 赵洪山, 赵阳, 宋玮, 等. 基于结构分析的断路器操作机构的建模及仿真分析[J]. 高压电器, 2021, 57(8): 32-40.  
ZHAO Hongshan, ZHAO Yang, SONG Wei, et al. Modeling and simulation analysis of operating mechanism for circuit breaker based on structural analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(8): 32-40.
- [24] 宋亚凯, 张一茗, 张文涛, 等. 断路器分合闸线圈电流波形特征值提取算法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 181-187.  
SONG Yakai, ZHANG Yiming, ZHANG Wentao, et al. Research on extraction algorithm of current waveform characteristic value of circuit breaker opening and closing coil[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 181-187.
- [25] 张佳, 陈志英, 陈丽安, 等. 基于改进集合模态分解的真空断路器分合闸线圈电流特征值提取[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 116-123.  
ZHANG Jia, CHEN Zhiying, CHEN Li'an, et al. Feature extraction of vacuum circuit breaker's opening and closing coil current based on modified ensemble empirical mode decomposition[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 116-123.
- [26] 陈辰, 厉小润. 基于线圈电流分析的操动机构故障诊断方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(3): 527-535.  
CHEN Chen, LI Xiaorun. Fault diagnosis method of circuit breaker operating mechanism based on coil current analysis[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(3): 527-535.
- [27] 关永刚, 杨元威, 钟建英, 等. 高压断路器机械故障诊断方法综述[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 10-19.  
GUAN Yonggang, YANG Yuanwei, ZHONG Jianying, et al. Review on mechanical fault diagnosis methods for high-voltage circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 10-19.

收稿日期: 2021-12-30; 修回日期: 2022-04-06

作者简介:

刘东超(1980—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能变电站过程层设备及一次设备在线监测; E-mail: liudc@nrec.com

陈志刚(1983—), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为智能变电站过程层设备及一次设备在线监测。E-mail: chenzg@nrec.com

(编辑 周金梅)