

DOI: 10.7667/PSPC161305

## 变压器状态监测组件功能整合研究和性能提升设计

杨小铭<sup>1,2</sup>, 王煜<sup>1,2</sup>, 饶丹<sup>1,2</sup>, 张鹏<sup>1,2</sup>, 李云龙<sup>1,2</sup>

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 传统变压器状态监测组件 IED 较多, 信息交互复杂, 装置误报警率高, 系统可靠性低。针对上述问题, 提出了一种整合型变压器状态监测智能组件性能提升方案。通过对在线监测装置的硬件和软件功能集成及油色谱装置的优化设计, 可有效减少变压器状态监测组件的 IED 数量和提高系统可靠性。基于 Xenomai 的 Linux 实时系统的研究, 结合嵌入式 SQLite 数据库和 Web Service 应用技术, 实现变压器在线监测系统的采集功能集成化和诊断流程标准化设计。所设计的智能组件整合了油色谱在线监测、铁心接地电流监测和特高频(UHF)局部放电监测等监测功能, 已在重庆 220 kV 虎啸智能变电站中得到应用, 效果良好, 充分体现了未来智能监测组件向结构紧凑化、通信标准化和状态可视化的方向发展, 具备较好的推广前景。

**关键词:** 功能整合; 状态监测; 变压器智能组件; 油色谱

### Design and application of IED in integrated monitoring intelligent component of transformer

YANG Xiaoming<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>, RAO Dan<sup>1,2</sup>, ZHANG Peng<sup>1,2</sup>, LI Yunlong<sup>1,2</sup>

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The number of traditional transformer condition monitoring IED is more, the information interaction is complex, the device fault alarm rate is high, and system reliability is low. In view of the above problems, this paper proposes an integrated scheme of performance improvement for transformer intelligent condition monitoring. Hardware and software integration and oil chromatogram device optimization design can effectively reduce IED quantity and improve the reliability of the system. Based on the research of Xenomai real-time Linux operating system, and combined with SQLite embedded database and application of web service technology, online monitoring system for transformer of acquisition function integration, process standardization and model integration design diagnosis is realized. The design of the intelligent component integrated on-line monitoring of oil chromatogram, iron core grounding current monitoring, ultra high frequency (UHF) PD monitoring and other functions, has been used in the Chongqing Huxiao 220 kV intelligent substation, and achieved good results, which fully embodies the future of intelligent monitoring module to compact structure, communication standardization, state visualization the direction of development, with good prospects for promotion.

**Key words:** functional integration; condition monitoring; transformer intelligent component; oil chromatogram

## 0 引言

近年来, 随着智能变电站技术的不断深入和推广, 智能一次设备已成为智能变电站的重要组成部分。智能一次设备除了实现传统的二次信号采集数字化、控制网络化等重要智能化功能化外, 还需实现一次设备的状态可视化, 即通过采用先进的传感器技术实现对一次设备状态的实时监测, 采集数据经过状态监测系统的规范化处理和高级故障诊断模

型算法分析实现对一次设备的诊断和故障检修<sup>[1-6]</sup>。变压器状态监测智能组件是实现智能变压器的重要二次设备。前期投入工程的状态监测组件由于应用较快和现场经验缺乏, 主要存在以下几个问题: 1) 部分监测 IED 装置功能单一, 集成度不够, 导致现场智能组件柜装置数量多, 功耗大, 增加了系统不稳定性; 2) 装置故障率高, 其中通信和后台故障问题突出, 现场维护工作量大; 3) 技术标准不规范, 现场缺乏验收规范和方法, 导致投运后即不稳定;

4) 油色谱精度和稳定性较差, 且后台对监测数据利用和分析不够, 没有自动分析功能, 实用效果不佳。

针对以上问题, 本文从变压器状态监测智能组件工程应用性能提升的目标出发, 在充分分析现有状态监测传感器技术的条件下, 通过硬件和软件优化设计, 实现变压器状态监测组件的功能集成化、通信标准化、诊断就地化。

## 1 硬件功能整合提升设计

### 1.1 整合型主 IED 的硬件设计和组网方案

整合型主 IED 采用基于 Cortex-A5 内核的 Atmel 公司的 SAMA5D3X 系列处理器, 其特点为能效高、成本低、功耗小。芯片主频 536 MHz, 外设带 2 路 CAN 接口、6 路串口、2 路以太网、2 路 USB 接口。ARM 架构体系具备低功耗特点, 较好地满足了户外恶劣环境对状态监测 IED 长期运行的低功耗和通信稳定性要求。整合型主 IED 硬件设计框图如图 1 所示, 硬件最大考虑了变压器状态监测智能组件的通信接入功能要求, 以实现减少独立监测 IED 和简化现场复杂接线。

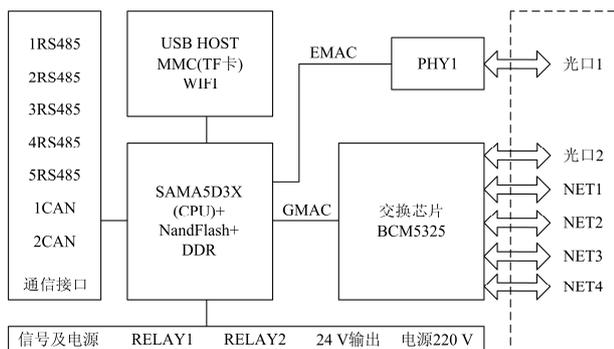


图 1 整合型主 IED 的硬件原理框图

Fig. 1 Hardware principle block diagram of integrated intelligent IED

主 IED 采用 1U 标准机架式设计, 其中采用了 Broadcom 公司的 BCM5325 交换芯片, 实现了变压器智能组件柜的内部网络通信交换问题, 并配置 2 路独立网段光口对外部通信, 节约了交换机配置。无线 WiFi 的功能方便了现场户外柜的调试和运维。板载 1 G 字节的 NandFlash 容量用于数据存储。24 V 隔离电源 50 W 的配置满足现场个别智能传感器的电源输入需求。一路装置报警继电器, 一路装置故障继电器, 用于远动信号。

以智能主 IED 为核心的变压器状态监测智能组件设备组网方案如图 2 所示<sup>[7-10]</sup>。

智能组件通信按照智能变电站站控层、间隔层、过程层 3 层网络架构划分。整合型主 IED 是变压器

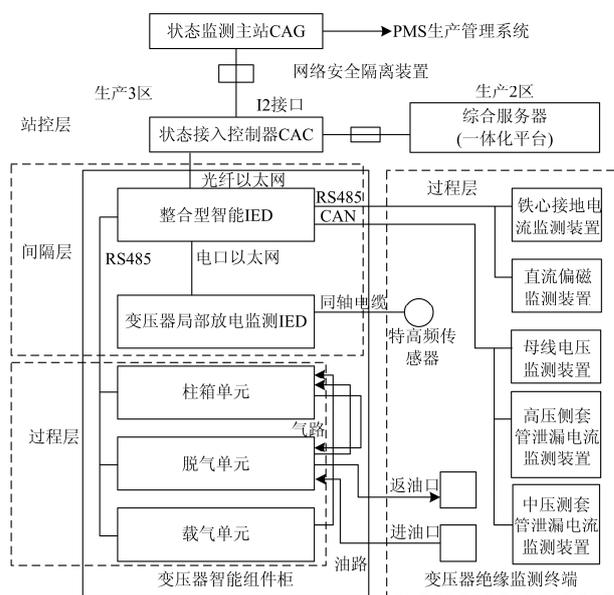


图 2 整合型变压器状态监测智能组件组网方案

Fig. 2 Networking scheme of intelligent component of integrated transformer condition monitoring

智能组件的通信中枢和核心管理单元, 对下通信总线采集各类智能监测终端, 对上 I1 接口 IEC 61850 规范与站控层的状态接入控制器通信。主 IED 在过程层通过 RS-485 总线使用 Modbus 规约连接铁心接地监测和直流偏磁智能采集终端; 考虑套管绝缘监测装置特点及其通信距离较远和布置点分散带来的通信可靠性差问题, 采用抗干扰和传输能力强的 CAN 总线分布式同步命令顺序采样套管绝缘监测装置; 其余监测终端如光纤绕组测温等装置可通过其余独立 RS-485 总线相互通信。变压器局放监测装置等其他网络类通信接口装置可通过主 IED 内部网络交换口直接上传或由主 IED 信息处理后间接上传。

### 1.2 油色谱在线监测性能提升设计

工程上绝大多数的油色谱在线监测装置均为独立机柜设计, 并采用钢瓶载气方案。由于钢瓶载气的容量约束, 一般为 10 L 左右载气, 按照色谱装置每天采集 2 次的频度, 大约 5~6 个月需要更换。耗材维护费用较高, 且不能满足色谱实时性分析需要。同时由于色谱柱老化或脱气环节带来的精度漂移问题, 现场更换及二次精度标定不方便。

经过论证, 整合型变压器油色谱监测组件采取气相色谱和真空脱气为技术基础的装置方案。按照色谱的工作原理流程, 将色谱装置分为 3 个智能控制采集单元: 柱箱单元、脱气单元和载气单元。单元均采用机架式 4U 整层装置结构设计, 由主 IED

经柜内 RS-485 总线统一轮询控制。柱箱单元负责温控模块启停加热和气样流经色谱柱后的模拟信号采集，并响应由主控间隔 10 ms 的读取周期实时发送采集数据；脱气单元负责油路的清洗、油样的进样和返油，通过步进电机多次抽真空实现油气分离，通过载气将气样吹入柱箱单元；载气单元采用以空气为载气，以气泵打压方式自动维持载气压力，保证持续稳定的载气流速。经过硬件模块化处理，智能组件实现油色谱装置传感单元的独立性和互换性，解耦了传统色谱装置的控制方式，并提供理论无限制持续载气方式，解决现有色谱装置维护、返修等难题。脱气单元采用真空脱气法，严格控制脱气过程温度，提高脱气率的稳定性。柱箱单元采用高精度双传感器设计，一个传感器对烃类气体灵敏度较高，另一个传感器对其他气体(如 H<sub>2</sub>、CO 等)灵敏度较高，提高了检测精度。

通过硬件功能整合，主 IED 整合了早期多个 IED 独立采集功能，通信更加紧凑，简化了接线，有效地解决了目前智能组件柜由于装置数量多、功耗高而难以散热等问题。同时通过整合设计，一台变压器监测组件只需要一面智能组件柜，减少了现场占地面积，实现变压器智能组件的紧凑化、小型化，满足新一代智能站的需求。

## 2 软件功能整合提升设计

### 2.1 主 IED 的系统架构设计

由于状态监测系统重在通过传感器对高压设备状态进行数据采集和存储，采用历史数据趋势分析和设备缺陷特征值比较作为重要诊断手段，因此嵌入式操作系统的可靠性、设备驱动的多样性和高级应用软件模块的资源支撑是装置操作系统类型选择的重要条件。本系统采用的内核版本为 Linux-3.16，对该系统进行了实时内核改造，充分利用了 Xenomai 的实时任务调度能力，从而实现双内核机制的强实时扩展及采取 RTnet 的实时数据通信方法解决 LINUX 操作系统的实时通信任务处理问题。通过系统实时任务和非实时任务的优化调度，实现主 IED 的软件模块充分整合。通过优选高级应用模块，系统软件基础架构如图 3。

Xenomai 是 Linux 内核的一个实时框架，基于 Adeos 纳内核为上层操作系统提供了原语操作机制，如 RTAI 等接口实现硬件的实时操作和数据共享，从而实现在 Linux 操作系统上构建类似内核态的实时应用任务空间和准实时的用户任务空间。在内核态空间，主 IED 采用实时通信进程处理油色谱各传感单元的轮询控制，并通过基于 XDDP 的

Socket 接口与用户态非实时任务交换数据。

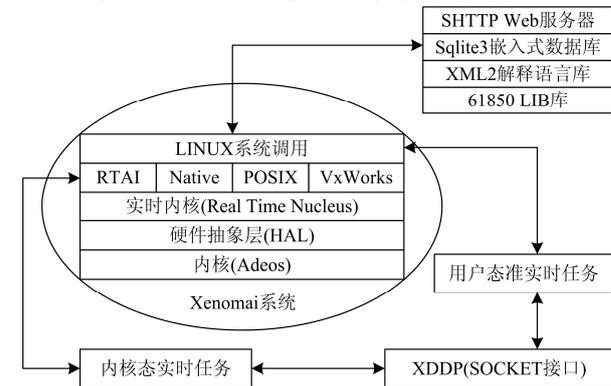


图 3 基于 Xenomai 的实时 Linux 架构

Fig. 3 Real time Linux architecture based on Xenomai

考虑到嵌入式资源限制，文件系统中包含了轻量级的嵌入式关系型数据库 Sqlite3。Sqlite3 提供了对 ANSISQL92 的大多数支持，支持多表、视图、索引、事务、触发和一系列的程序接口、API 函数，支持标准的 SQL 语言，非常适合间隔层装置的故障定位分析使用。装置的配置文件、录波记录描述和定值接口均采用 XML 接口实现。XML 的文本格式大大增强了系统的标准化设计和文件交互跨平台的通用性、自适应性、可阅读性，为状态监测装置现场调试、维护带来方便。

### 2.2 应用软件详细设计

系统的 CPU 资源有限，主 IED 为保证程序稳定性和扩展性，按照任务的实时性、非实时周期性、突发响应等特征将应用软件分为平台管理进程、通用在线监测进程、油色谱监测专用进程、数据库存储和诊断进程、Web 服务器进程、守护进程，具体流程框架见图 4<sup>[11-14]</sup>。由于在线监测进程双向通信数据较少，进程间通信基本采用共享内存映射方式实现，简化了程序复杂度，提高了数据交换效率。

状态监测数据实时数据刷新按照规范要求小于 5 min，数据存储每间隔 15 min。经过实测，主 IED 平均负荷 30%~40%，很好地满足了系统设计要求。

为了解决在线监测装置工程中长期存在误报警概率高的问题，本文采取了基于数据库的历史多点计算阈值报警方式，并结合历史趋势分析来提高装置报警逻辑的正确性和就地诊断的有效性。嵌入式数据库的使用，有效解决了诊断数据来源统一性和分析逻辑模块的独立性，并方便 Web 采用 CGI 接口灵活读取数据库。

变压器状态监测诊断模块主要分为两个部份：实时诊断模块，用于 IEC 61850 模型通信输出注意或告警状态。Web 诊断模块，主要采用 Web 方式提

供面向远程的人机诊断模式。变压器状态监测实时诊断模块流程图见图 5。

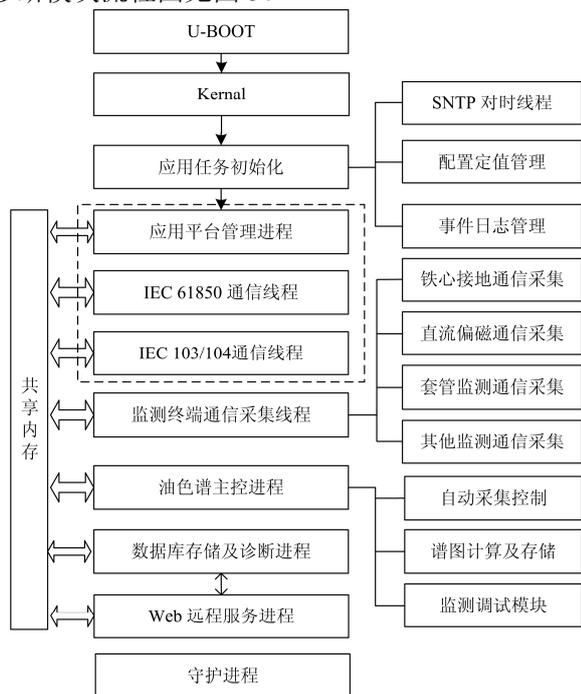


图 4 应用软件框图

Fig. 4 Block diagram of application software

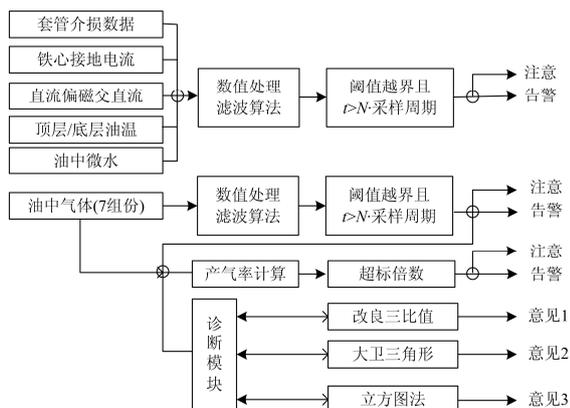


图 5 变压器状态监测实时诊断模块流程图

Fig. 5 Flow chart of transformer condition monitoring real time diagnosis module

变压器状态监测实时诊断模块根据采集信号原理及特征主要分为两个模块。其中套管介损、铁心接地电流、直流偏磁、油温、油中微水采取阈值预警模式，方便就地监测装置直接判定逻辑，便于现场检查 and 装置功能验收的有效性和及时性。另外油中气体需要按照 GB/T 7252-2001《变压器油中溶解气体分析和判断导则》中规定的油气故障识别的流程来诊断。

变压器状态监测 Web 诊断模块主要包括：通过

内存交换实时数据显示各个监测装置的实时数据、通信状态及装置内部状态；通过数据库 SQL 语句读取选择时间段的历史数据，以表单和趋势曲线两种形式页面显示或下载保存表单数据；油色谱分析通过选择诊断方法，图例显示变压器的故障类型，见 Web 界面诊断图 6 和图 7。通过远程或就地，专家可通过登录装置 Web 页面及时方便地确认数据的正确性和诊断当前设备运行状态。Web 装置就地诊断服务有效解决了由于在线监测系统建设不完善或系统通信故障导致的主站数据丢失问题，最大限度地保留历史监测数据，方便后期运维和故障诊断<sup>[15]</sup>。

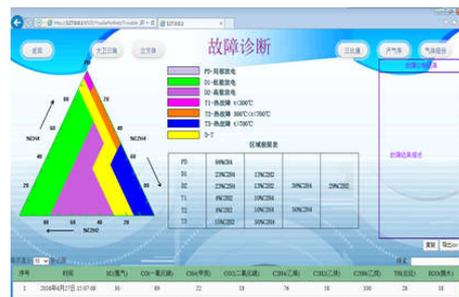


图 6 大卫三角形诊断法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of David triangle diagnosis



图 7 立方图诊断法示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the diagnostic method of cubic chart

### 3 变压器智能组件性能测试

本文研制的整合型变压器智能组件通过嵌入式硬件和软件的优化整合，将传统需要多个状态监测子 IED 实现的功能融合为一个装置，减少了变压器状态监测设备数量，有效提高了系统集成度、可靠性和数据的归一化程度。

产品分别通过了中国电科院和国网电科院试验验证中心的第三方委托试验。其中：油色谱监测精度达到 A 级精度要求(精度要求见表 1)；铁心接地电流监测与容性设备介质损耗监测均满足试验要求。表 2 给出了油色谱精度试验通过率最低的低浓度测试对比结果。表 3 给出了铁心接地电流精度试验结果。

表 1 油色谱在线监测精度等级评定表  
Table 1 Oil chromatographic online monitoring accuracy rating scale

检测参量	检测范围/ ( $\mu\text{L/L}$ )	A 级误差 限值	B 级误差 限值	C 级误差 限值
H <sub>2</sub>	2~20	$\pm 2\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 30\%$	$\pm 6\mu\text{L/L}$	$\pm 8\mu\text{L/L}$
	20~2000	$\pm 30\%$	$\pm 30\%$	$\pm 40\%$
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0.5~5	$\pm 0.5\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 30\%$	$\pm 1.5\mu\text{L/L}$	$\pm 3\mu\text{L/L}$
	5~1000	$\pm 30\%$	$\pm 30\%$	$\pm 40\%$
CH <sub>4</sub> ,C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ,C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.5~10	$\pm 0.5\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 30\%$	$\pm 3\mu\text{L/L}$	$\pm 4\mu\text{L/L}$
	10~1000	$\pm 30\%$	$\pm 30\%$	$\pm 40\%$
CO	25~100	$\pm 25\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 30\%$	$\pm 30\mu\text{L/L}$	$\pm 40\mu\text{L/L}$
	100~5000	$\pm 30\%$	$\pm 30\%$	$\pm 40\%$
CO <sub>2</sub>	25~100	$\pm 25\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 30\%$	$\pm 30\mu\text{L/L}$	$\pm 40\mu\text{L/L}$
	100~15000	$\pm 30\%$	$\pm 30\%$	$\pm 40\%$
总烃	2~20	$\pm 2\mu\text{L/L}$ 或 $\pm 30\%$	$\pm 6\mu\text{L/L}$	$\pm 8\mu\text{L/L}$
	20~4000	$\pm 30\%$	$\pm 30\%$	$\pm 40\%$

表 2 油色谱在线监测精度试验结果  
Table 2 Precision test results of chromatographic online monitoring system

	单位	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
参照值	$\mu\text{L/L}$	16.25	41.56	498.35	1.90
实测值	$\mu\text{L/L}$	17.50	54.20	507.70	1.70
测量误差	$\mu\text{L/L}$	1.25	12.64	9.35	-0.20
	%	7.69	30.41	1.88	-10.53
	单位	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	总烃
参照值	$\mu\text{L/L}$	1.18	1.56	1.04	5.68
实测值	$\mu\text{L/L}$	1.50	1.50	1.20	5.90
测量误差	$\mu\text{L/L}$	0.32	-0.06	0.16	0.22
	%	27.12	-3.85	15.38	3.87

表 3 铁心接地电流监测精度试验结果  
Table 3 Precision test results of core grounding current

标准值	电流值/mA	
	测量值	绝对误差
5.00	5.00	0.00
10.00	9.99	-0.01
20.00	20.01	0.01
49.99	49.83	-0.16
100.00	99.90	-0.10
200.00	200.10	0.10
500.00	500.70	0.70
999.70	1001.40	1.70
2000.00	2002.79	2.79
9878.00	9883.0	5.00

## 4 实践和工程应用

本文研究内容依托于国家电网公司科技项目《面向新建变电站的一体化系统和整合型设备技术研究与应用》，所研制的整合型变压器状态监测智能组件于 2015 年在重庆 220 kV 虎啸智能变电站投入运行。该状态监测智能组件与变压器本体智能终端组成智能变压器的一次设备智能化系统，通过过程层 GOOSE 网与间隔 MMS 网信息分层分流，并汇总到站控层综合服务器。

该综合服务器基于变电站全景数据平台，综合运用变压器主 IED 汇集的油色谱、铁心接地电流等状态监测信息及 SCADA 系统的油温、负荷、非电量参数告警等监控信息，实现了变压器全景数据展示，并采用了多种故障分析诊断方法分析变压器运行状态，为运行人员提供全面的变压器状态信息及评估建议。

现场设备运行至今，智能监测组件的传感器监测数据稳定，通信误报率和报警误报率有效降低，提高了状态监测系统的稳定性。油色谱的自动载气技术实现了免维护，并可根据需要提高色谱工作的采样频率，实现运检人员对迎峰度夏期间变压器高负荷运行的实时灵活监测需求，有效降低了变压器设备运维费用，同时提高了变压器的运行可靠性。

## 5 结语

本文研制的整合型智能组件整合了油色谱在线监测、铁心接地电流监测、特高频(UHF)局部放电监测等多种状态监测功能，顺利通过了中国电科院和国网电科院实验验证中心的委托试验。所研制的智能组件已在重庆 220 kV 虎啸智能变电站中成功试点应用，体现了功能集成化、结构紧凑化、网络通信标准化技术特点，有效地降低了装置的运行和维护费用，提高了变压器在线监测装置的管理水平，满足了变压器在线状态检修的要求。同时智能组件有效减少了设备数量，简化了系统接线，提升了变压器状态监测系统的整体可靠性。本文研究成果对变压器状态监测组件的设计和推广具有重要的参考价值。

## 参考文献

- [1] 谢善益, 杨强, 梁成辉, 等. 输变电设备远程诊断信息平台中的统一状态监测模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 86-91.  
XIE Shanyi, YANG Qiang, LIANG Chenghui, et al. Research of unified condition monitoring information model in data platform of power transmission equipment

- remote monitoring and diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 86-91.
- [2] 张卫华, 苑津莎, 王杉, 等. 基于改良三比值法的变压器故障基本信度分配计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 115-121.  
ZHANG Weihua, YUAN Jinsha, WANG Shan, et al. A calculation method for transformer fault base probability assignment based on improved three-ratio method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 115-121.
- [3] 尹凯, 笃峻, 葛立青. 关键绩效指标在变电站设备在线监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 63-68.  
YIN Kai, DU Jun, GE Liqing. Application of KPI in online monitoring system for electrical equipment in substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 63-68.
- [4] 公茂法, 张言攀, 柳岩妮, 等. 基于 BP 网络算法优化模糊 Petri 网的电力变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 113-117.  
GONG Maofa, ZHANG Yanpan, LIU Yanni, et al. Fault diagnosis of power transformers based on back propagation algorithm evolving fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 113-117.
- [5] 石鑫, 朱永利, 萨初日拉, 等. 基于深度信念网络的电力变压器故障分类建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 71-76.  
SHI Xin, ZHU Yongli, SA Churila, et al. Power transformer fault classifying model based on deep belief network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 71-76.
- [6] 毛知新, 文劲宇. 光声光谱技术在油浸式电气设备故障气体检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 76-82.  
MAO Zhixin, WEN Jinyu. Dissolved gas analysis in oil-immersed electrical equipment based on photoacoustic spectroscopy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 76-82.
- [7] 张斌, 卢萍, 黄国方, 等. 变压器智能组件设计方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 85-88.  
ZHANG Bin, LU Ping, HUANG Guofang, et al. Design scheme of transformer intelligent components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 85-88.
- [8] 包伟, 李刚, 白申义, 等. 新一代整合型变压器智能组件的研制[J]. 高压电器, 2014, 50(7): 94-99.  
BAO Wei, LI Gang, BAI Shenyi, et al. Development of a new generation of integrated transformer intelligent components[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(7): 94-99.
- [9] 陈晓国, 王俊锶, 张炜, 等. 基于 IEC 61850 的设备状态在线监测系统架构优化及数据模型[J]. 南方电网技术, 2015, 9(7): 95-99.  
CHEN Xiaoguo, WANG Junke, ZHANG Wei, et al. Structure optimization and data modeling of IEC 61850 based online equipment monitoring system[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(7): 95-99.
- [10] 鲁东海, 孙纯军, 王晓虎. 智能变电站中在线监测系统的设计[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(1): 134-137.  
LU Donghai, SUN Chunjun, WANG Xiaohu. Online monitoring system for smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(1): 134-137.
- [11] 王德文, 邸剑, 张长明. 变电站状态监测 IED 的 IEC 61850 信息建模与实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 26(3): 81-86.  
WANG Dewen, DI Jian, ZHANG Changming. Information modeling and implementation for status monitoring IED in substation based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 26(3): 81-86.
- [12] 王德文, 阎春雨. 变电站在线监测系统的一体化建模与模型维护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 78-82, 113.  
WANG Dewen, YAN Chunyu. Integrated modeling and model maintenance of on-line monitoring system in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 78-82, 113.
- [13] 翟瑞聪, 谢善益, 范颖, 等. 基于 IEC 61850 的在线监测装置通信仿真系统开发与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 137-141.  
ZHAI Ruicong, XIE Shanyi, FAN Ying, et al. Development and application of the communication simulation system for the online monitoring device based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 137-141.
- [14] 印蓉, 周鸣籁. 变压器智能组件 IEC61850 通信的实现[J]. 电测与仪表, 2014, 51(10): 94-98.  
YIN Rong, ZHOU Minglai. Implementation of the IEC 61850 communication protocol on a transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(10): 94-98.
- [15] 翟瑞聪, 王红斌, 谢善益, 等. 电力设备状态检修系统研究与应用[J]. 广东电力, 2013, 26(5): 96-100.  
ZHAI Ruicong, WANG Hongbin, XIE Shanyi, et al. Study on electric power equipment condition-based maintenance system and its application[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(5): 96-100.

收稿日期: 2016-08-15; 修回日期: 2016-10-27

作者简介:

杨小铭(1976—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统自动化装置及变电站在线监测系统研制;

E-mail: yangxiaoming@sgepri.sgcc.com.cn

王煜(1985—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为配电网自动化及变电站在线监测系统研制; E-mail: wangyu2@sgepri.sgcc.com.cn

饶丹(1977—), 女, 硕士, 主要研究方向为电力自动化装置嵌入式软件平台。E-mail: raodan@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)