

电力变压器振动在线监测系统的开发与应用

周求宽¹, 万军彪¹, 王丰华², 徐晨博²

(1. 江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200240)

摘要: 设计了电力变压器在线振动监测系统。该系统包含传感器模块、实时处理器模块和上位机模块。传感器模块采集电力变压器的振动信号、电压和负载电流, 再传输给实时处理器模块进行预处理, 实时处理器模块将处理后的数据传输给上位机模块进行显示、存储和分析。虚拟仪器(VI)被用于模块间的通信, 模糊综合评价方法被引入到振动信号分析中。对于各模块的硬件参数进行了选择。基于 IEC61850, 将系统的各功能建模为若干逻辑节点, 实现对系统的 IED 信息建模。现场运行显示了所设计系统的实用性。

关键词: 智能变电站; 电力变压器; 振动; 监测; IEC61850; 模型; 通信; 傅里叶变换

中图分类号: TM 41

文献标识码: B

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.027

0 引言

作为电力系统中的关键设备之一, 变压器的运行状态直接关系到电力系统的安全稳定。统计结果表明^[1-2], 12%~15% 的变压器故障由遭受短路冲击时强大电动力引发的绕组变形引起, 且该类绕组故障逐年增加, 已成为电力变压器的主要故障。此外, 变压器绕组变形与松动具有累积效应, 虽然并不一定会立即发生绝缘击穿事故, 但具有此类故障隐患的变压器会在再次遭受不大的过电流或过电压, 甚至在正常运行的铁磁振动作用下发生绝缘击穿, 因此, 对变压器进行实时状态监测与故障判别意义重大。

变压器绕组变形的检测方法主要有频响分析法 FRA (Frequency Response Analysis)^[3] 和短路阻抗法^[4], 这 2 种方法可有效检测出较为明显的绕组变形故障, 但对绕组松动等早期故障不甚敏感。从绕组动力学特性出发的变压器绕组变形振动检测法近年来得到了国内外的广泛关注, 研究人员主要从变压器绕组的振动特性建模^[5]、变压器振动信号特性分析^[6] 以及基于振动分析法的变压器绕组变形检测^[7] 等方面展开了较为深入的研究。与已有的绕组变形检测方法相比, 振动分析法通过粘贴在变压器箱壁上的振动传感器获取振动信号来评估变压器的运行状态, 且测试系统与电力系统无电气连接, 安全可靠, 抗干扰能力强, 可方便实现电力变压器运行状态的在线监测。

智能变电站及电力设备状态检修的建设与发展对变压器振动在线监测系统的推广应用提出了新的要求, 因此, 需要进一步深入研制和开发高效可靠的可用于实际变电站中的振动在线监测系统, 基于 IEC61850 标准的变压器振动在线监测系统模型也亟待建立。本文在分析变压器振动在线监测实际功

能与数据需求的基础上, 应用 LabVIEW/CompactRIO 软硬件平台设计和研制电力变压器振动在线监测系统, 同时根据 IEC61850 标准, 尝试开发变压器振动在线监测系统智能电子装置 IED (Intelligent Electronic Device) 信息模型, 为其在智能变电站的推广应用奠定基础。

1 系统监测信号描述

1.1 振动信号

运行中的变压器本体振动主要源于铁芯振动和绕组振动^[8], 因此, 对振动信号的采集与监测是本文在线监测系统的核心功能。

变压器的铁芯振动主要由硅钢片的磁滞伸缩引起。若忽略变压器的磁滞现象, 可认为引起铁芯振动的电磁力与励磁电压的平方成正比, 如式(1)所示。

$$F_c \propto U^2 \quad (1)$$

其中, F_c 为铁芯电磁力; U 为励磁电压。

变压器绕组的振动是由流过绕组的负载电流所产生的电磁力引起, 该电磁力与绕组电流的平方成正比, 如式(2)所示。

$$F_w \propto i^2 \quad (2)$$

其中, F_w 为绕组电磁力; i 为绕组电流。

由式(1)、(2)可见, 铁芯振动和绕组振动均以 2 倍电源频率为基频, 即为 100 Hz。对运行中的变压器而言, 铁芯振动和绕组振动信号经绝缘油或结构件传递到油箱, 再经置于箱壁上的振动加速度传感器采集后送入振动在线监测系统, 通过内置的分析软件中的相关判据监测和评估变压器的运行状态。

1.2 电压信号

变压器运行电压的变化会对铁芯的振动特性产生影响, 那么根据监测到的变压器的运行电压, 可对铁芯的振动状态进行辅助判别。因此, 在线监测系统中使用电压互感器采集变压器三相运行电压信号。

1.3 电流信号

变压器的绕组振动与负载电流的变化密切相

关,变压器绕组振动幅值与负载电流的平方成正比,相应地,根据监测到的变压器的工作电流,可对绕组的振动状态进行辅助判别。因此,在线监测系统中使用电流互感器采集变压器的三相运行电流信号。

2 在线监测系统整体设计与实现

2.1 系统整体设计

图 1 为所设计的变压器振动在线监测系统的结构框图,该系统由传感模块、实时处理器模块和上位机模块构成。传感模块由振动传感器、电流互感器和电压互感器组成,用于振动、电流和电压数据的采集;实时处理器模块由数据采集板卡与实时控制器组成,对采集的数据进行预处理后传输至上位机;上位机模块实时接收实时处理器模块上传的数据,进行显示、存储与数据分析。

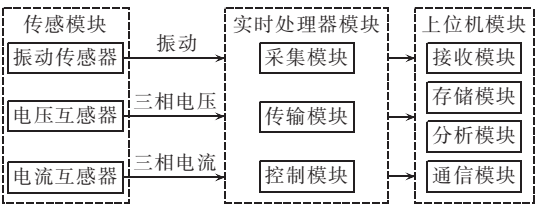


图 1 振动在线监测系统结构框图
Fig.1 Block diagram of online vibration monitoring system

2.2 硬件选择

变压器振动在线监测系统硬件部分主要包括传感器和 NI 公司提供的 CompactRIO 相关模块。考虑到变压器振动信号的幅值和频宽,本文选用 IEPE 压电式加速度传感器采集振动信号,其基本技术参数如表 1 所示。具体应用时,分别放置 3 路振动传感器于电力变压器的箱壁 A 相绕组、B 相绕组和 C 相绕组处。

表 1 振动传感器参数
Tab.1 Parameters of vibration sensor

传感器参数	参数值	传感器参数	参数值
量程	500 m/s ²	频率响应范围	0.5~5000 Hz
灵敏度	10 mV/(m·s ⁻²)	工作温度	-40~120 ℃

考虑到在线监测系统数据处理速率和变压器监测及状态评估的需求,选用 NI 公司实时处理器模块中的 CompactRIO 硬件平台进行数据采集参数设置和系统内数据传输,该平台主要由实时控制器、可重配置现场可编程门阵列 FPGA(Field Programmable Gate Array)背板和工业级 I/O 模块三部分组成^[9-10]。传感模块采集的数据由 I/O 模块进行信号调理,然后经过 A/D 转换后进入 FPGA 背板对数据进行预滤波等算法,最后通过 PCI 总线通信将数据送入实时控制器进行数据传输,满足系统实时数据处理的需要。具体地,选用的振动信号采集模块为 NI9234

I/O 模块,信号输入范围为 $\pm 5\text{ V}$,具有 24 位 A/D 转换功能,各通道采样率最高可达 51.2 kS/s。三相电压和电流数据的采集模块为 NI9206 模块,具有 16 路模拟差分测量通道,总采样率为 250 kS/s。

2.3 数据通信

变压器振动在线监测系统运行时,所采集的振动、电流和电压数据需由实时处理器模块进行预处理并向上位机传输,再由上位机模块接收并进行实时显示与分析,这对系统内实时数据处理与数据传输的精确性和可靠性提出了较高的要求。

根据图 1 中的监测系统结构,开发的 LabVIEW 程序分为 FPGA 层虚拟仪器 VI(Visual Instrument)、RT 层 VI 和 PC 层 VI。FPGA 层 VI 运行于 FPGA 背板,直接读取 NI9234 和 NI9206 板卡各端口数据,并通过 PCI 总线向 RT 层 VI 传输;RT 层 VI 运行于 CompactRIO 实时控制器中,读取 FPGA 层 VI 采集的数据并向 PC 层 VI 传输,此外,还实现对 FPGA 层 VI 各数据端口的参数设置;PC 层 VI 运行于上位机模块,负责实时接收 RT 层 VI 上传的数据并分别对振动数据和电压、电流数据进行显示、存储和数据分析。各个 VI 层间的数据通信流程见图 2。

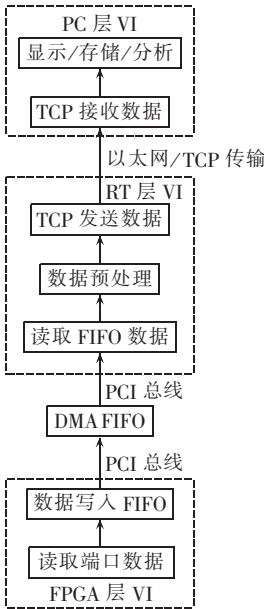


图 2 VI 层间通信流程
Fig.2 Process of communication among VI layers

程序运行时,为防止上溢或下溢造成数据丢失,在 FPGA 层 VI 和 RT 层 VI 之间引入了先入先出 FIFO(First In First Out)数据缓存机制,即 FPGA 层 VI 将 NI9234 和 NI9206 数据端口采集的数据捆绑后循环写入 FIFO,再由 RT 层 VI 循环读取,通过同步 FIFO 的数据写入与数据读取操作实现 FPGA 层 VI 和 RT 层 VI 间精确的数据通信。此外,根据变电站现场的实际需求,在 RT 层 VI 与 PC 层 VI 间通过 TCP/IP 网络体系实现了远距离数据传输,即系统采用服务器/

客户机模式,实现 VI 层间的数据通信。

2.4 数据在线存储与分析

上位机模块中 PC 层 VI 负责对 RT 层 VI 上传的数据进行解捆绑,并将数据送入不同功能模块进行处理,主要包括数据显示、数据存储与数据分析。

对采集的实时振动及电压、电流数据进行分析是变压器振动在线监测系统的核心所在。根据变压器振动机理及振动信号典型特征,由内嵌于上位机分析软件中的稳态振动信号分析模块和突发短路时的振动信号分析模块结合模糊评判法对变压器的运行状态进行监测。

稳态振动信号分析模块中主要包括 3 个模块。

a. 快速傅里叶变换函数模块:对振动信号进行频谱分析,获取振动信号 100 Hz 分量的时变曲线。

b. 变压器振动信号预测模块:根据历史电压、电流信号和振动信号使用改进 BP 神经网络对振动信号的 100 Hz 分量进行预测。

c. 变压器振动烈度分析模块:通常认为运行中的变压器的工作电压保持不变,将监测到振动信号归算到变压器额定电流时的数值,进而计算其均方根值,即振动烈度^[7]。

突发短路时变压器的振动信号呈现强时变性和非平稳性,因此,分析软件利用内嵌总体经验模态分解 EEMD(Ensemble Empirical Mode Decomposition)法对突发短路时的振动信号进行时频分析,通过计算希尔伯特边际谱和希尔伯特能量识别绕组状态^[11]。

根据前述判据,考虑到变压器的箱壁振动特性及变压器绕组的运行状态与多种因素密切相关,且存在着若干不确定因素,分析软件中引入模糊综合评判法根据监测到的振动信号对绕组状态进行评估,如图 3 所示。

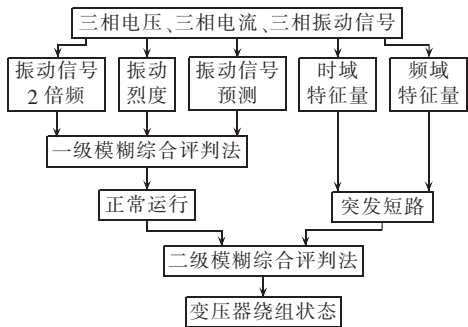


图 3 变压器绕组状态监测方法

Fig.3 Monitoring of power transformer winding states

2.5 程序扩展性

现有的变压器振动在线监测系统共采集变压器三相振动信号、变压器三相电压信号和三相电流信号,测试系统程序可通过修改 FIFO 深度及数据读写操作相关参数方便地扩展数据通道、新增振动测点或引入新的监测量。此外,LabVIEW 函数节点的应

用使得系统可方便地根据需要内嵌自定义的数据处理函数,可实时更新内嵌的系统自定义模块,进一步补充完善现有的振动信号分析模块。

3 振动在线监测系统的 IED 建模

以实现互操作性为首要目标的 IEC61850 标准是智能化变电站的发展方向,因此,开发基于 IEC61850 标准的变压器振动在线监测系统的 IED 信息模型对其推广应用意义重大。根据 IEC61850 标准^[12],变压器振动在线监测系统属于间隔层设备,其与过程层数据采集器间通过以太网进行系统内数据通信,与站控层通过光纤以报告形式进行数据交换,其整体架构如图 4 所示。

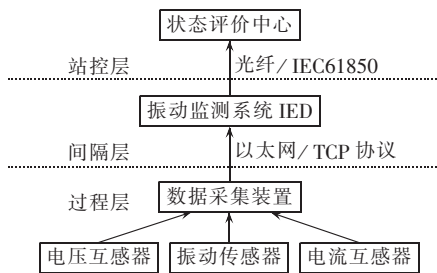


图 4 振动在线监测系统 IED 的整体架构
Fig.4 Overall IED architecture of online vibration monitoring system

3.1 在线监测系统 IED 信息模型

对 IED 进行建模,首先需将监测系统 IED 抽象成虚拟的逻辑设备(LD),再根据实际系统功能需要,将逻辑设备合理分解为若干逻辑节点(LN),由其实现应用功能。针对变压器振动在线监测系统 IED 实际功能需要和数据需求,将其功能建模为 GGIO、MMXU、MMXN、LPHD 和 LLN0 逻辑节点,具体说明如表 2 所示。表中,LLN0 和 LPHD 是 IED 建模中必需的 2 个逻辑节点,GGIO、MMXU 和 MMXN 是实现变压器振动在线监测功能的逻辑节点。其中,通用过程 I/O 逻辑节点 GGIO 用于表征变压器振动监测功能,对采集的振动信号进行处理,当系统判定状态异常时由该节点产生告警信号,完成监测系统 IED 的核心数据交换;MMXN 节点获取并上传变压器三相绕组振动幅值;MMXU 节点获取并上传变压器三相运行电压和电流信号。

由于要实现对三相绕组振动状态的分别监测和

表 2 在线监测系统 IED 逻辑节点

Tab.2 IED logical nodes of online monitoring system

节点	逻辑功能	说明
LLN0	逻辑节点 0	访问逻辑装置公用信息
LPHD	物理装置信息	建模物理装置公共信息
GGIO	通用过程 I/O	监测变压器,发出告警
MMXN	相别无关测量	监测变压器振动状态
MMXU	测量	监测变压器电压、电流

预警,需对 GGIO 和 MMXN 节点的数据对象进行扩展。对于 GGIO 节点,对数据对象总告警(Alm)加字母后缀扩展为 VibAlmA、VibAlmB、VibAlmC,分别表征 A、B、C 相绕组振动告警。对于 MMXN 节点,增加了数据对象 VibMeaA、VibMeaB、VibMeaC 表征监测系统三相振动幅值实测值,数据对象 VibTheA、VibTheB、VibTheC 表征计算得到的三相振动幅值预测值,数据对象 VibIntA、VibIntB、VibIntC 表征三相振动烈度。

3.2 在线监测系统 IED 信息通信

监测系统 IED 通过报告机制实现与站控层间的信息通信,其中,报告上传的是数据集(DataSet)中的数据值。在 IED 中,可通过设置数据集 VibAlm 和 VibMea 实现振动告警、振动实测量及预测量的数据交换,分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 数据集 VibAlm 数据对象
Tab.3 Data objects of data-set VibAlm

数据	描述
GGIO.VibAlmA	A 相绕组振动告警
GGIO.VibAlmB	B 相绕组振动告警
GGIO.VibAlmC	C 相绕组振动告警

表 4 数据集 VibMea 数据对象
Tab.4 Data objects of data-set VibMea

数据	描述
MMXN.VibMeaA	A 相 100 Hz 振动实测值
MMXN.VibMeaB	B 相 100 Hz 振动实测值
MMXN.VibMeaC	C 相 100 Hz 振动实测值
MMXN.VibTheA	A 相 100 Hz 振动预测值
MMXN.VibTheB	B 相 100 Hz 振动预测值
MMXN.VibTheC	C 相 100 Hz 振动预测值
MMXN.VibIntA	A 相振动烈度值
MMXN.VibIntB	B 相振动烈度值
MMXN.VibIntC	C 相振动烈度值

此外,IED 中的 2 个报告控制块 TrgOPS 选项均设置为数据变化(dchg)、品质变化(qchg)和数据更新(dupd)。通过 SetBRCBValues 和 SetURCBValues 服务将 2 个报告使能属性 RptEna 均设定为 TRUE 后,ACSI 服务器事件监视器即不断监视数据集 VibAlm 和 VibMea 中所引用的数据对象,若发生 dchg、qchg 或 dupd 的内部事件,即触发数据的主动上传。除此之外,2 个报告控制块中还设置完整性周期(IntgPd)为 2000,即以 2000 ms 为周期循环发送数据集的所有数据,实现变压器告警和测量数据的定时上报。

3.3 振动波形文件传输机制

突发短路时变压器的振动波形蕴含着大量设备信息,因此,对其波形特征进行分析是监测和评估变压器绕组状态的关键,因此,变压器振动在线监测系统 IED 将突发短路时变压器箱壁振动加速度信号存储为 COMTRADE 格式文件,保存在存储器中等待文件传输的启动。

实际运行时,监测系统 IED 实时监测变压器运行电流,当运行电流大于某一定值时系统认定可能发生短路冲击,从而触发振动波形文件的存储。通过 1 个扰动功能节点 RDRE 和 3 个模拟量通道节点 RADR 实现振动信号录波。RDRE 节点采用外部触发模式,监测 SPTR 节点数据对象 ShortCircuitAlm,当其值为 True 表示发生突发短路,监测系统开始录波,同时 RDRE 节点数据对象 RcdStr(扰动记录启动)实例值被更新。当录波结束后,RDRE 节点数据对象 RcdMade(扰动记录结束)实例值被更新,监测系统 IED 即发送“数据准备就绪状态”节点信息,等待客户端接口轮巡读取数据后启动文件传输。

4 在线监测系统的现场应用

目前,所研制的变压器振动在线监测系统已在某电力公司的 500 kV 变电站内投入使用,其中,振动传感器分别置于 500 kV 变压器三相绕组的箱壁上,而变压器振动在线监测系统以单独成屏的形式置于变电站的继电器室内。到目前为止,在投入实际运行的 6 个月期间,该变压器振动在线监测系统运行状态一直良好。

5 结论

- a. 变压器箱壁的振动信号蕴含大量变压器运行状态信息,本文使用 LabVIEW/CompactRIO 软硬件平台研制了变压器振动在线监测系统,通过构建合理的数据通信机制、应用多样化的数据分析手段,实现了振动信号的精确采集和实时分析。
- b. 基于所研制的变压器振动在线监测系统,应用 IEC61850 标准,通过扩展使用 GGIO、MMXN 节点,建立了变压器振动在线监测系统 IED 信息模型。该模型已通过国网 IEC61850 一致性测试,为系统在数字化变电站中的应用打下了基础。
- c. 变电站主变压器监测实例表明,所设计的变压器振动在线监测系统运行稳定,积累了大量的现场振动监测数据,为振动判据的进一步完善及振动监测系统的大规模应用奠定基础。

参考文献:

[1] 金文龙,陈建华,李光范,等. 全国 110 kV 及以上等级电力变压器短路损坏事故统计分析[J]. 电网技术,1999,23(6):70-74.
JIN Wenlong, CHEN Jianhua, LI Guangfan, et al. Statistics and analysis on power transformer damages caused by short circuit fault in 110 kV and higher voltage classes[J]. Power System Technology, 1999, 23(6): 70-74.

[2] 尹金良,朱永利,俞国勤. 基于多分类相关向量机的变压器故障诊断新方法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(5):77-79.
YIN Jinliang, ZHU Yongli, YU Guoqin. New transformer fault diagnosis method based on multi-class relevance vector machine

- [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 77-79.
- [3] 徐剑, 邵宇鹰, 王丰华, 等. 振动频响法与传统频响法在变压器绕组变形检测中的比较[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 213-215.
- XU Jian, SHAO Yuying, WANG Fenghua, et al. Comparative research on behavior of vibration frequency response analysis and frequency response analysis in detection of transformer winding deformation[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 213-215.
- [4] 诸兵. 基于短路电抗分析的变压器绕组变形在线诊断[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- ZHU Bing. On-line diagnosis of winding deformation of power transformer based on short-circuit reactance analysis[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [5] 谢坡岸, 饶柱石, 朱子述. 大型变压器绕组有限元建模与分析[J]. 振动与冲击, 2006, 25(2): 134-136.
- XIE Poan, RAO Zhushi, ZHU Zishu. Finite element modeling and analysis on transformer windings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(2): 134-136.
- [6] 颜秋容, 刘欣, 尹建国. 基于小波理论的电力变压器振动信号特征研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 165-166.
- YAN Qiurong, LIU Xin, YIN Jianguo. Features of vibration signal of power transformer using the wavelet theory[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 165-166.
- [7] 邵宇鹰, 徐剑, 饶柱石, 等. 短路冲击下变压器绕组状态在线诊断[J]. 振动与冲击, 2011, 30(2): 173-175.
- SHAO Yuying, XU Jian, RAO Zhushi, et al. On-line diagnosis of a transformer winding's state under short-circuit shock[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(2): 173-175.
- [8] 徐志. 基于振动法的变压器在线监测研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- XU Zhi. Study of transformer on-line monitoring based on vibration[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [9] 任宏达, 王丰华, 金之俭. 应用 NI LabVIEW 和 CompactRIO 系统开发变压器振动特性测试平台[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 441-443.
- REN Hongda, WANG Fenghua, JIN Zhijian. Transformer vibration performance measurement system under the environment of LabVIEW and CompactRIO[J]. Chinese Journal of Scientific Instruments, 2011, 32(12): 441-443.
- [10] 刘震涛, 刘宏瑞, 张鹏伟, 等. 基于 CompactRIO 控制器的机体疲劳模拟试验台的研制[J]. 汽车工程, 2012, 34(4): 356-358.
- LIU Zhentao, LIU Hongrui, ZHANG Pengwei, et al. Development of fatigue test bench for engine crankcase based on CompactRIO controller[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(4): 356-358.
- [11] 周求宽, 万军彪, 王丰华, 等. 变压器绕组状态诊断方法: 中国, CN103135035A[P]. 2013-06-05.
- [12] 常广, 赵婷, 罗礼全, 等. 基于虚拟仪器技术的汽轮发电机组扭振测试系统[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 137-141.
- CHANG Guang, ZHAO Ting, LUO Lique, et al. Virtual instrumentation based measuring system of turbo-generator torsional vibration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 137-141.
- [13] 刘东超, 王开宇, 胡绍刚, 等. 基于数字化变电站的集中式保护[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 117-122.
- LIU Dongchao, WANG Kaiyu, HU Shaogang, et al. Integrated protection based on intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 117-122.
- [14] 杜凤青, 盛戈峰, 徐剑, 等. 基于 IEC61850 的 GIS 智能监测信息建模及信息交互设计[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 163-167.
- DU Fengqing, SHENG Gehao, XU Jian, et al. Information modeling for GIS smart monitoring based on IEC61850 and development of information interaction system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 163-167.
- [15] 韦宝泉, 林知明. 基于 IEC61850 的牵引变电站线路保护 IED 设计[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 122-124.
- WEI Baoquan, LIN Zhiming. Design of line protection IED based on IEC61850 for traction substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9): 122-124.
- [16] 黄明辉, 邵向潮, 张弛, 等. 基于 OPNET 的智能变电站继电保护建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(5): 144-149.
- HUANG Minghui, SHAO Xiangchao, ZHANG Chi, et al. Modeling and simulation of relay protection for intelligent substation based on OPNET[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 144-149.

作者简介:



周求宽

周求宽(1981-), 男, 江西奉新人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力变压器状态诊断及试验研究工作;

王丰华(1973-), 女, 河南偃师人, 副研究员, 博士, 研究方向为电力变压器在线监测、电能质量分析、储能技术等(E-mail: fhwang7723@sjtu.edu.cn)。

Design and implementation of online vibration monitoring system for power transformer

ZHOU Qiukuan¹, WAN Junbiao¹, WANG Fenghua², XU Chenbo²

(1. Jiangxi Electric Power Testing & Research Institute, Nanchang 330096, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: An OVS(Online Vibration monitoring System) is developed for power transformer, which consists of sensor module, real-time CPU module and superordinate unit module. The vibration signal, voltages and load currents of power transformer are acquired by the sensor module, pre-processed and then transferred by the real-time CPU module to the superordinate unit module for display, store and analysis. Visual instrument is applied for the communication among modules and fuzzy synthetic evaluation is adopted in vibration signal analysis. The hardware parameters of modules are selected. The system functions are modeled as the logical nodes to realize the modeling of IED information. Field operation shows the feasibility of the developed OVS.

Key words: smart substation; power transformers; vibration; monitoring; IEC61850; models; communication; Fourier transforms