

支撑大数据分析的发电厂变电站全息录波方法

熊小伏, 陈星田, 翁世杰

(输电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 发电厂、变电站故障录波及基于此信息的电力二次设备动态行为分析技术是电力系统故障原因确认、保护及自动装置动作原理与整定值正确性检验的重要依据, 故障录波器已成为厂站必配的二次装备。随着智能变电站技术的发展以及一次系统因大量新能源机组的接入、大量电力电子设备的应用而导致了故障特性的改变, 现有的故障录波器已不能满足电力系统暂态记录与智能分析的要求, 亟待发展新的故障录波与分析技术。在此背景下, 回顾了现有故障录波器的主要技术特征, 提出了面向未来发电厂、变电站的具有全景全时记录功能的全息录波新架构, 可支撑基于大数据的故障分析需求。指出了全息录波的关键技术与解决思路。

关键词: 发电厂; 变电站; 全息; 录波; 故障

A holographic record method supporting big data analysis for power plant and substation

XIONG Xiaofu, CHEN Xingtian, WENG Shijie

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Power plant and substation fault recording and dynamic behavior analysis technology for secondary equipment which is based on the recording information, are the important basis to identify the fault cause and to check the validity of acting principle and set value of protection and automation equipment. Fault recorder has become the essential secondary equipment in plant and substation. As the development of intelligent substation technology and the change of primary system fault characteristic caused by renewable energy generating units accessing into grid and the wide application of power electronics equipment, existing fault recorder cannot meet the requirements of power system transient record and intelligent analysis, thus a novel fault record and analysis technology is urgent to develop. Under this background, this paper reviews the main technical features of existing fault recorder, then proposes a novel framework of holographic recorder with full view and all time recording function for future power plant and substation which can support big data based fault analysis need. Finally this paper points out its key technologies and solving ideas.

Key words: power plant; substation; holography; record; fault

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)22-0017-06

0 引言

故障录波器是一种可以自动记录因短路故障、系统振荡、频率崩溃、电压崩溃等大扰动引起的系统电流、电压及其导出量, 如系统频率、有功功率、无功功率的全过程变化情况的二次设备, 同时它还记录继电保护与安全自动装置的动作行为。性能优良的故障录波装置对保证电力系统的安全可靠运行具有非常重要的作用^[1-2]。

故障录波装置一般具有以下3大功能^[3-4]。

(1) 为分析事故原因提供依据。在系统发生故障后, 可通过对录取的各故障波形图的比较和对记录的相关电气量、非电气量的分析, 及时地确定事故发生的原因。

(2) 为查找故障点提供依据。当系统发生故障, 继电保护装置动作正确时, 可以通过故障录波图迅速判明故障类型和相别, 并根据记录下来的电流、电压等特征量对故障点进行测距。

(3) 为评价继电保护和自动装置动作行为提供依据。当系统因继电保护或自动装置误动或拒动发生事故时, 可以利用记录的开关量动作情况来判断

基金项目: 重庆市科技攻关(应用重点)项目(cstc2012gg-yyjsB90003)

装置的动作是否正确,并据此发现存在缺陷的部分。

国内的电力系统故障录波器目前已有三代产品^[5]:第一代为机械-油墨式故障录波器,其已被淘汰;第二代为机械-光线式故障录波器,现已基本被取代;第三代为微机式故障录波器,由于其硬件设计灵活经济,采用单片机和微机技术提高了录波准确性和可靠性,性能较优越,目前广泛应用于国内各发电厂、变电站;第四代为数字式故障录波器,它是在我国大力发展数字化变电站的背景下应运而生的,其主要特点是采用更加灵活的分布式结构和数字化的网络通信技术。

1 传统故障录波器及其技术特征

1.1 故障录波器的结构

目前常用的故障录波器的基本结构如图1所示,主要包括隔离变送器、数据采集模块和管理分析单元^[6]。

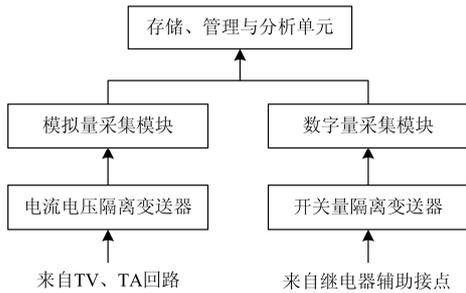


图1 故障录波器基本结构示意图

Fig. 1 Basic structure diagram of fault recorder

隔离变送器主要为采用电磁隔离或光电隔离方式对输入录波装置的模拟量信号、开关量信号进行隔离,减少与输入信号间的相互干扰;数据采集模块主要为故障录波器的启动判断和数据采集,根据对象的不同又分为模拟量采集和数字量采集模块;管理分析单元主要完成录波数据的计算分析(包括故障类型分析、故障定位等)和应用管理(包括录波数据的存储、传送,故障报告的形成、打印等)。

1.2 故障录波器的启动方式

故障录波器在正常情况下不启动或只进行数据采集,当发生故障或振荡时才进行录波,记录故障前后全过程的电气量和开关量。因此,故障录波器的准确可靠启动尤为重要。目前常见的录波启动有模拟量启动、开关量变位启动、手动就地启动和远方控制启动等4种基本方式^[7-8]。其中,模拟量启动又可分为:(1)各相电压、电流突变量启动;(2)各相、各序电压、电流越限量启动;(3)主变压器中性点电流越限启动(4)频率突变量和越限量启动;(5)

直流电压、电流突变量和越限量启动;(6)过激磁启动(针对变压器或发电机变压器组)。

1.3 故障录波器的数据通信方式

故障录波器最早采用 RS-232/RS-422/RS-485 串行接口来完成采集控制单元向当地分析管理单元的通信,再经调制解调器通过公用电话网送至远方调度端。后来 LON 和 CAN 现场总线逐渐取代了 RS 总线,提高了数据传输的正确率和实时性,但仍存在传输速率低、耗时长等缺点,且现场总线无法实现与广域网连接^[9]。另外,采用电话线作为通信媒介可能会出现拨号占线导致启动失败等问题。因此,目前一般采用以太网技术完成采集单元和管理单元间的通信,如图2所示。以太网不仅传输速率快、传输正确率高,而且还可通过路由器与 Internet 广域网相联,进而完成与远方调度端的录波数据通信,灵活方便且可扩展性强。

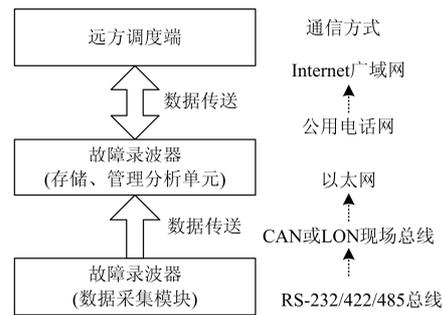


图2 故障录波器的数据通信方式变革

Fig. 2 Data communication mode of fault recorder

1.4 存在的主要技术问题

随着电力系统的发展以及人们对故障记录要求的提高,目前的故障录波器存在以下几个技术问题亟待解决。

(1)启动判据复杂。受存储容量限制,故障录波器仅在故障时启动录波,但因为电力系统故障种类多样,特别是发电机、变压器的运行工况和异常工况多样,为保证录波器的准确启动,就需设置繁杂的启动判据。此外,由于每个启动判据之间采用的是“或”逻辑,为避免录波器的频繁误启动,使得启动判据的整定非常复杂。

(2)启动判据不能适应一次系统故障特性的变化。随着电力系统互联性的增强,电网的故障特性越来越复杂,包含保护与断路器拒动与误动以及故障设备未及时切除而引起的发展型故障和连锁故障越来越多;尤其是智能电网建设背景下,新能源的大量接入,由于其间歇性和随机性,使得电网的动态行为更加多变^[10]。但是,目前的故障录波器启动

判据还未能适应这些特性的变化, 难以保证启动的灵敏性与可靠性。

(3) 数据记录时间短, 信息不完整。发电厂、变电站的结构复杂且配套多种保护和安自装置, 因而异常、故障状态分析所需的基础参数也较多, 这对录波数据的完整性提出了更高要求。但目前的故障录波器一般只对故障暂态过程短时采用采样值记录, 其它时段则辅以有效值记录^[11], 而有效值只能反映工频量的大小, 不能由此派生计算各种序量、频率和功率等电气量, 降低了故障分析的效率和准确性。

(4) 一些重要的非电气量没有纳入记录。发电机转速、绕组温度, 变压器油温、气体压力等非电气量的不同变化, 可表征不同故障的影响; 而发电厂、变电站环境参数(温度、湿度等)的变化, 可能是引起故障的诱因。这些非电气量能为准确、及时的分析电力故障提供重要的辅助参考。然而, 还未见有故障录波系统将它们纳入记录中。

(5) 未充分利用信息存储与处理技术。以往, 受限于存储容量, 使得故障录波器缺乏足够的灵活性, 尤其是短时间内发生多次启动时, 有可能会造成数据丢失。近些年, 随着大数据时代的到来, 信息存储与处理技术都有了飞跃式的提升, 遗憾的是目前故障录波器的发展没能及时跟上信息技术的步伐, 相关技术还未得到充分利用。

2 发电厂、变电站全息录波系统

随着计算机技术、通信技术、数据处理技术等长足进步, 以往制约故障录波器发展的瓶颈正快速消解。因此, 本文提出一种面向未来发电厂、变电站的全息录波方法, 其核心是使录波器从故障启动选择性录波向无门槛全时段录波转变, 从单纯的数据、波形记录向结合视频、音频、环境信息的全景记录转变, 从主要依托电气量波形的故障分析转向依托全景、全时大数据的智能分析转变, 将是传统故障录波器的重要技术革新。

2.1 全景录波

电力系统的故障、事故主要由外部冲击、内部设备自身老化、人为过失等引发, 电力系统的故障与事故过程中不仅有电气量的变化, 还会伴随非电气量特征的出现。多种信息的记录有助于完整还原故障前状态、故障触发、故障持续过程、故障处置过程、故障后恢复过程等全时间链的系统行为, 是一个大数据的积累过程, 同时也是建立智能分析技术的必要基础。为此, 在已有的电气量录波基础上,

可将过去分散的信息记录子系统进行整合, 形成具有统一时标、统一数据库、统一传输规约的全息记录系统。近期主要应整合视频、音频及非电量记录系统的信息。

(1) 视频信息。厂站的视频系统主要有两种功能, 即用于设备操作时的位置校核和厂站运行环境的监视^[12]。相关运行经验表明, 部分事故可能由运行检修人员误操作、误入带电间隔、误碰带电设备引发, 或是由于动物闯入等外部因素导致。因此, 视频图像信息的采集与存储, 有助于快速确认事故源和事故地点, 是发电厂、变电站录波系统应纳入的记录量。

(2) 音频信息。电力设备在出现缺陷或发生故障时往往会发出异常的声音, 通过对声音的记录、监测, 能够快速识别设备的运行状态、潜在缺陷、甚至故障性质^[13]。通过增加对发电机、变压器、电容器、GIS 等主设备的音频记录, 可为分析发电厂变电站内设备的运行状态起到重要的参考作用。

(3) 非电气量。厂站温度、湿度、电缆沟水位等环境参数、以及电气主设备的重要辅助系统状态数据等也可用于分析故障出现原因和故障发展过程, 是很有价值但目前并未引入录波系统的非电气量信息。因此, 各类热敏、湿敏、力敏、气敏等传感元件的数据也有必要加入录波系统作为后续分析的依据。

2.2 全时录波

故障录波启动判据的设计直接影响事故记录的灵敏度, 是影响录波器性能的重要因素之一。在实际运行中, 录波器易受到噪声干扰, 其启动判据的判定结果可能产生错误, 进而导致故障事件未记录或记录不完整。因此, 人们为了提高故障录波器启动的灵敏性和可靠性, 设立了多种启动判据。启动判据越多, 对计算的硬件能力和实时性要求越高。

追本溯源, 规定录波器仅在故障时启动录波是由于以往存储空间和传输速度有限, 才不得以通过设置启动门槛对信息进行选择性记录。其效果是对突发性、强波动性数据进行了记录。而对于渐变性、小扰动性数据则可能难于记录。

随着数据压缩技术、大容量存储技术和高速网络技术的蓬勃发展, 传统桎梏被逐渐打破, 使得全时段录波成为可能。

全时段录波, 即不设置启动条件来区分故障前与故障后, 而是保持相同的采样频率或变化的采样频率全程记录相关数据。运行人员可在故障发生后调阅智能分析系统的分析结果, 或定期对录波文件

进行检查分析，并将已经解读过的历史信息中的有用部分经过滤后提取至专门的存储设备，对无关信息则做丢弃或覆盖处理。

2.3 全息录波系统架构

参考已有的数字化故障录波器设计^[1,14]，本文提出了新型全息录波系统架构，如图3所示。

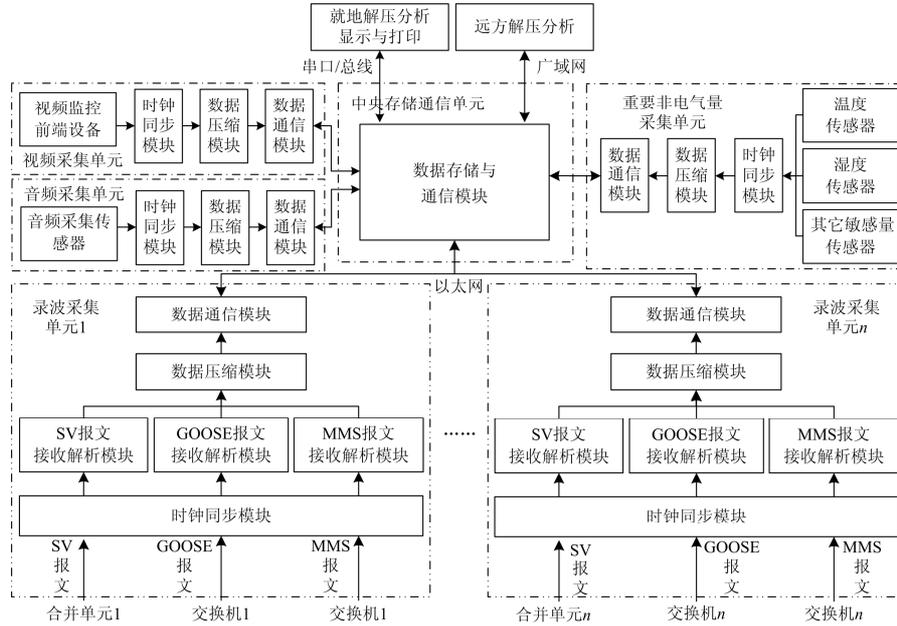


图3 全息录波系统架构

Fig. 3 Holographic recording system structure

与传统故障录波系统不同的是，由于采取全时段录波工作形式，全息录波系统的采集单元以数据压缩模块取代故障录波启动判别模块，以便于大量实时录波数据的传输与存储。同时，全息录波新增了视频、音频和非电气量采集单元。各数据采集单元都必须具备时钟同步、数据压缩与通信功能，然后将信息集中送至中央存储通信单元，它再经串口/网络总线向就地解压分析计算机或经广域网向远方解压分析计算机传输全息录波数据。

3 关键技术及解决思路

3.1 新的存储技术

在智能电网背景下，录波数据具备了广域、全景、海量的特征，使得存储压力增大。如何实现录波数据的快速、可靠存储，成为录波器发展的掣肘因素之一。

幸运的是，近年来存储技术有了飞速的发展。高密度、大容量存储设备(磁带库、磁盘阵列、光盘库、光盘塔等)，新一代的非易失性存储器(相变存储器 PCM、铁电介质存储器 FeRAM、磁阻式存储器 MRAM 和阻变式存储器 RRAM 等)^[15]，新兴的网络存储模式(网络接入存储 NAS、存储区域网络 SAN 和云存储模式)以及面向未来的氦气填充磁盘

技术、叠瓦式磁记录技术、热辅助磁记录技术等，都为大数据的存储提供了有效的解决方案。

3.2 数据压缩技术

本文所提全息录波方法将产生更大量的录波数据，为降低其存储量和减少数据通信负担，对录波数据的高效压缩处理成为了关键点之一。

数据压缩方法分为无损压缩和有损压缩两大类。目前，应用于电力系统中的无损压缩技术主要有哈夫曼编码、Lempel-Ziv 及其衍生算法、算数编码算法等；有损压缩技术主要有傅里叶压缩算法、小波及小波包压缩算法等^[16]。受限于冗余度理论，无损压缩的压缩比(文件压缩前与压缩后所占空间的比值)较低，一般只能达到 2:1 到 8:1 左右。由于实际工程上允许出现一定的误差，采用有损压缩更符合应用需要。

傅里叶压缩算法只具有频域分析能力而缺乏时域分析能力，不适宜于录波数据的压缩；小波分解压缩方法对高频故障信号的处理能力较弱，而小波包技术却克服了这一缺陷^[17]。综合来看，采用基于小波包理论的压缩方法是一种很好的选择。此外，对音频和视频的编码压缩，可分别选用 MP3 和 H.264 技术。当然，压缩比越高，其所需压缩/解压时间也越长；因此，在实际操作中，还应具体权衡

运行时间与存储空间的关系。

每个分布式录波采集单元可设计为仅负责一个电气间隔的录波。考虑采样通道数为 15 路, SV 报文数据头部长度为 64 字节左右、PCAP 部占 16 个字节, 每个通道的长度为 8 字节, 采样频率为 4k Hz; 由于 GOOSE 报文一般每隔 5 s 才发送一次, 且仅在开关量变位时有所增加, 相对而言, 其数据大小可忽略不计。此外, 假设一个电气间隔平均配有 2 路摄像机, 其码率固定为 2M bps; 4 个声音采集器, 其采样频率为 44.1k Hz, 采样位数为 16, 单声道。则 1 h 内连续录波数据所需的存储容量约为

$$(16 + 64 + 8 \times 15) \times 4000 \times 3600 \text{B} (\text{采样量}) + \\ 2 \times 3600 \times \frac{2 \times 1024 \times 1024}{8} \text{B} (\text{视频量}) + \\ 4 \times 3600 \times \frac{44.1 \times 1000 \times 16}{8} \text{B} (\text{音频量}) = 5.62 \text{ GB}$$

根据已有数据压缩研究结果, 对采样值量、视频量和音频量的压缩比分别取 1:8^[17]、1:30^[18]、1:12^[19], 则 1 h 内一个电气间隔的全息录波数据容量为 0.61GB。考虑到正常稳态情况下, 电气量以及视频、音频信号波动性较小, 压缩比会很高, 需要存储的数据量将会很低。

若进一步开发新的数据压缩存储技术, 将压缩比提升到 1:50 左右, 则每个间隔每小时的存储量仅有 0.1GB 左右。这样可大幅压缩存储量, 从而保障较长时间的数据存储需求。

3.3 基于大数据的录波信息综合分析方法

当有了各种记录信息后, 如何更科学的进行故障分析也是全息录波系统的另一难点。本文提出如图 4 所示的基于事件驱动的波形、视频、音频、环

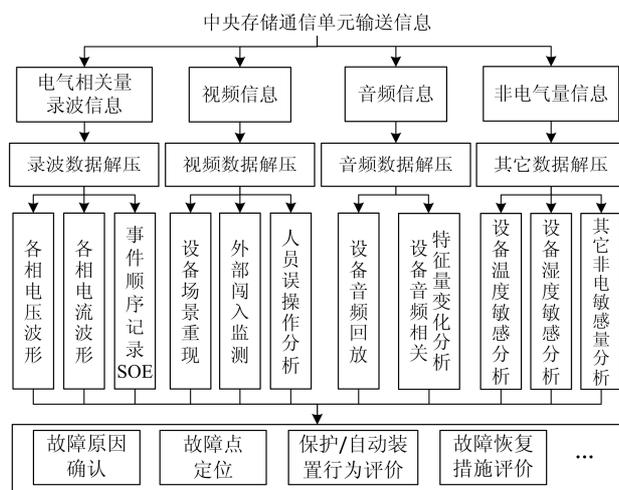


图 4 多源联动故障综合分析示例

Fig. 4 Example for multi-source fault comprehensive analysis

境等多源大数据联动的故障综合分析方法, 可有效完成故障原因和种类分析、故障点定位、保护/自动装置行为评价、故障恢复措施效果评价等工作。

4 结语

随着现代化电网的快速发展, 电力系统的结构与故障特性日趋复杂。同时, 由于电网规模的扩大和电气设备运维、操作工作的增多, 因外部冲击和内部人员误操作而引发故障的情况难以避免。故障原因与特性的复杂化, 使得仅依靠电流电压波形记录的故障分析难以智能化。因此, 本文提出了一种新型发电厂变电站全息录波架构。通过进一步引入厂站内设备的视频、音频以及重要非电气量的记录信息, 并采用全景、全时录波方式, 可为故障源确认与定位、故障过程重现、故障处置效果检验等故障事件分析提供完整的、多方面的数据信息, 能够更好地适应智能电网背景下故障暂态大数据分析的新需求。分析表明, 实现厂站全息录波的关键是数据压缩存储与高速网络传输技术。

随着数据压缩技术、大容量存储技术、计算机网络技术等的蓬勃发展, 本文所提的全息录波方法是完全可行的。

参考文献

- [1] 陈昊琳, 张国庆, 郭志忠. 故障录波器发展历程及现状分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 148-152. CHEN Haolin, ZHANG Guoqing, GUO Zhizhong. Development and present situation analysis of fault recorder[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 148-152.
- [2] 骆健, 丁网林, 唐涛. 国内外故障录波器的比较[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(7): 27-31. LUO Jian, DING Wanglin, TANG Tao. Comparison of domestic and foreign fault recorders[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(7): 27-31.
- [3] 高赫, 邵琴. 故障录波器在电力系统中的应用[J]. 江苏电机工程, 2009, 28(4): 22-24. GAO He, SHAO Qin. Application of fault recorder in power system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2009, 28(4): 22-24.
- [4] 郭振华, 江亚群, 杨帅雄, 等. 故障录波器后台分析软件关键问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 73-78. GUO Zhenhua, JIANG Yaquin, YANG Shuaixiong, et al. Research on key technique of fault recorder background analysis software[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 73-78.

- [5] 关猛. 新型故障录波器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
GUAN Meng. Study of a new type fault recorder[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [6] 张颖, 张哲, 杨军. 变电站微机故障录波与分析装置[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(9): 52-54.
ZHANG Ying, ZHANG Zhe, YANG Jun. Development of fault recorder and analysis system for substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(9): 52-54.
- [7] 翟铁久, 董杰, 董志平, 等. 分布式牵引供电故障录波系统的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 123-127.
ZHAI Tiejie, DONG Jie, DONG Zhiping, et al. Distributed fault recorder design of traction power supply system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 123-127.
- [8] GB/T 14598.301—2010 微机型发电机变压器故障录波装置技术要求[S].
GB/T 14598.301—2010 general specification of transformer fault oscillograph equipment for microprocessor-based generator[S].
- [9] 骆健, 丁网林, 王汉林, 等. 一种新型故障录波系统的实现[J]. 电网技术, 2003, 27(3): 78-82.
LUO Jian, DING Wanglin, WANG Hanlin, et al. Implementation of a new kind of fault recording system[J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 78-82.
- [10] 刘建华, 李天玉, 付娟娟, 等. 基于 BP 和 Elman 神经网络的智能变电站录波启动判据算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 110-115.
LIU Jianhua, LI Tianyu, FU Juanjuan, et al. Criteria algorithm for smart substation recorder starting based on BP & Elman neural network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 110-115.
- [11] DL/T 553-94 220~500 kV 电力系统故障动态记录技术准则[S].
DL/T 553-94 technology rule for fault dynamic record in 220~500 kV power system[S].
- [12] 侯思祖, 田新成, 陆旭, 等. 变电站视频监控系统设计研究[J]. 继电器, 2007, 35(9): 60-64.
HOU Sizu, TIAN Xincheng, LU Xu, et al. Design and research of video supervisory control system of the substation[J]. Relay, 2007, 35(9): 60-64.
- [13] 杜世斌. 基于音频特征的电气设备故障监测算法研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
DU Shibin. Research on electric equipment fault detection based on audio feature[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [14] 杨永标, 丁孝华, 黄国方, 等. 基于 IEC61850 的数字
化故障录波器的研制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 58-61.
YANG Yongbiao, DING Xiaohua, HUANG Guofang, et al. Development of a digital fault recorder based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 58-61.
- [15] 夏飞, 蒋德钧, 熊劲. 影响非易失性内存系统性能的因素分析[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(增刊): 25-31.
XIA Fei, JIANG Dejun, XIONG Jing. Evaluating and analyzing the performance of nonvolatile memory system[J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(S): 25-31.
- [16] 黄纯, 杨帅雄, 梁勇超, 等. 电力系统故障录波数据实用压缩方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 162-167.
HUANG Chun, YANG Shuaixiong, LIANG Yongchao, et al. Practical data compression method for power system fault records[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 162-167.
- [17] 王超. 先进电力录波系统信息处理与数据压缩技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
WANG Chao. Investigation into information processing and data compression technology of advanced power system recorder[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [18] 钱方远. 基于 H.264 的视频压缩技术及其在网络视频监控中的应用研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
QIAN Fangyuan. Research on video compression technology based on the H.264 and its application in the network video monitoring system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008.
- [19] 寻伟. 基于定点 DSP 的 MP3 实时编码器设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
XUN Wei. Real-time MP3 encoder design and realization based on fixed-point DSP[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007.

收稿日期: 2015-04-30

作者简介:

熊小伏(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事智能电网、电力系统保护与控制相关研究; E-mail: cqxxf@vip.sina.com.

陈星田(1971-), 男, 博士研究生, 主要从事智能变电站 IEC61850 相关研究; E-mail: 30160954@qq.com.

翁世杰(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事电网安全风险
分析相关研究. E-mail: cqwsj@foxmail.com

(编辑 张爱琴)