

DOI: 10.7667/PSPC171368

特高压直流工程控制与保护系统内嵌式暂态数据录波方案

陈大鹏¹, 于海¹, 于锋², 胡欢¹, 李跃鹏¹, 董春晨¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 许继电源有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 提出了一种应用于特高压直流工程控制与保护系统中的内嵌式暂态数据录波方案。该方案包含一套暂态数据波形记录软件, 可以快速移植到任意一台控制保护设备中。具备该功能的设备不仅可以记录来自内部的系统运行数据, 也可以借助各种通信方式和通信协议记录来自设备外部的数据, 并按照国际标准生成 Comtrade 格式的波形文件。该方案具有配置灵活、功能全面、存储传输方式多样和使用方便的特点, 可以辅助工程调试人员快速定位系统故障部位, 评估系统实验结果, 分析系统联调中遇到的各种问题。

关键词: 特高压直流; 控制保护; 内嵌式; 暂态数据录波; 实验评估; 故障定位

Built-in transient data recording scheme for control and protection system in UHVDC project

CHEN Dapeng¹, YU Hai¹, YU Feng², HU Huan¹, LI Yuepeng¹, DONG Chunchen¹

(1. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 2. XJ POWER Co., Ltd, Xuchang 461000)

Abstract: This paper presents a built-in transient data recording scheme for control and protection system in UHVDC project. This scheme contains a set of transient data recording software, which can be ported to any control and protection equipment quickly. With this function, the device not only can record the operating data from the inside of the device, but also can record external data by way of using a variety of communication methods and communication protocols, and generate waveform files in Comtrade format according to international standards. This scheme has the characteristics of flexible configuration, comprehensive function, various forms of storage and transmission ways, easy to use, and can assist the engineering personnel to locate the system fault rapidly, evaluate the experimental results of the system, and analyze any problems encountered in the system joint debugging.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017000W).

Key words: UHVDC; control and protection; built-in; transient data recording; experimental evaluation; fault location

0 引言

近些年来, 特高压直流输电以其高电压、大容量、远距离的特点在我国得到迅速发展^[1]。直流输电的控制与保护是一个非常复杂的系统, 与交流输电二次控保部分相比, 它最显著的特点是, 其性能很大程度上依赖于它的控制保护系统, 需不间断地对两端换流阀快速调节, 控制直流线路输送功率的大小和方向, 以满足整个交直流系统的运行要求^[2]。因此, 直流输电控制与保护系统调试工作复杂繁琐,

以±800 kV 特高压直流工程为例, 控制系统包含空载加压、分接头控制、系统监视与切换、有功控制、阀组在线投退、无功控制和阀接口等六百多项实验, 保护系统功能包含保护性闭锁、阀组保护、极区保护、双极区保护、直流滤波器保护、直流线路保护等五百多项实验。工程从厂内组屏到现场投运需经过反反复复成千上万次实验, 调试人员需要有一种高效便捷的手段, 使工程设计、调试和验收人员能快速掌握整个控制与保护系统的工作状态和运行性能, 确保电网安全可靠的运行^[3-4]。

暂态数据录波作为电力系统运行状态和系统故障的一种重要分析手段, 广泛应用于交直流输电控制与保护系统中。目前, 国内外变电站和换流站一

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目(52094017000W)

一般都配备有故障录波设备或数字保护测试仪等专用暂态数据录波器，记录控制与保护系统的模拟量和状态量等信息，通常需要在控制保护设备中增加模拟量和状态量IO单元，将系统内部运行的关键数据传输到录波器进行采集和记录。专用暂态数据录波器的优点是接口丰富、采样频率高、存储空间大，不足之处在于需改变原有控制保护设备的硬件结构，增加或删除采集通道需要双方进行协调。因此，工程调试人员希望在控制保护设备内部集成暂态数据录波功能，直接记录来自设备内部的运行数据，必要时也可借助各种通信方式和通信协议接收和记录来自设备外部的数据，采集通道可以灵活配置，暂态波形文件可以随意获取。本文给出了一种控制与保护系统内嵌式暂态数据录波方案，也可以与专用暂态数据录波器配合使用。

1 设计依据

1.1 硬件与软件平台

高压直流输电控制保护设备的硬件平台一般由工控机或嵌入式设备构成。图 1 为一款嵌入式控制保护装置。它由一个基于 VME 背板总线的机箱和处理器、模拟量输入输出、开关量输入输出、触发脉冲、现场总线通信及以太网通信等十几种板卡构成。该装置的特点是机箱内处理器和所有 IO 板卡可以根据工程需要灵活组态，各处理器板卡可以分别控制不同的 IO 板卡，以实现特定的控制保护功能。处理器板卡之间可直接通过 VME 背板总线实现数据交互，实现多 CPU 并行处理功能。暂态数据录波通常使用 CPU 的空闲时间进行文件存储，以确保不会影响到系统的控制保护功能。当系统的 CPU 负荷较高时，留给波形文件存储的时间就少，因此设计需要考虑提高波形文件存储的效率。SATA 硬盘具有较大的存储空间和较快的读写速度，可作为工程应用的默认配置。图1装置中配置有一块 SATA 硬盘，可由插在第一个槽位的主处理器板卡访问和控制，用于存储暂态数据录波文件^[5]。当然，在一些对性能要求不高的特殊场合，也可使用处理器板卡的片上 FLASH 存储波形文件。

高压直流输电控制保护设备的软件平台一般采用多任务操作系统，所有任务可以配置优先级。暂态数据录波比较消耗系统资源，此功能可以放在低优先级任务中完成。如图 2 所示，装置软件的开发基于一个嵌入式实时操作系统的图形化编程工具软件，包含了算术、逻辑、控制、通信、故障诊断等几百个功能块，其内部由 C 代码编写，外部封装起来提供给应用开发人员编程使用。与当前国内外同

类控制保护装置的 SD 卡程序存储与串口调试相比，该平台支持网络实时监控、编辑、下载和调试工程应用程序，极大提高了工程现场的工作效率^[6]。该软件平台提供了 5 个周期任务和 8 个中断任务，可以在任务周期最短 0.1 ms 且采样频率最高 10 kHz 时完成对暂态数据的录波。用户可以根据应用程序的容量和执行时间要求选择程序运行的任务，合理配置任务运行的周期。

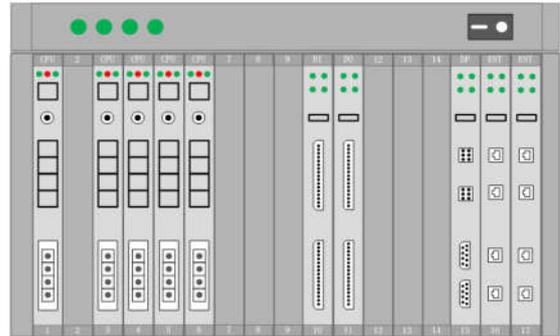


图 1 硬件平台结构图

Fig. 1 Structure diagram of the hardware platform

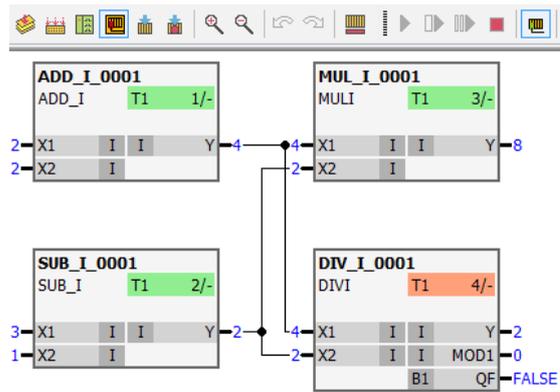


图 2 软件平台示意图

Fig. 2 Sketch map of the software platform

1.2 网络结构

在高压直流输电工程中，一般将换流站和输电线路的全部功能按照等级划分为若干层次，控制系统分为极控、阀控、直流站控、交流站控等，保护系统分为极保护、阀保护、交流滤波器保护等。在换流站中，控制保护设备根据功能分布在主控楼、低端阀厅控制楼、高端阀厅控制楼、交流滤波器保护小室等不同的区域，因此通过构建调试网络，工程师可在主控楼内实现对全站所有控制保护设备的维护。图 3 为换流站控制与保护系统调试网络结构图。红色线路表示控制保护设备与暂态数据录波器之间的专用通道，一般使用硬接线或光纤将各装置的原始数据输出至录波器采集并生成波形文件，间

接由工程师工作站获取^[7]。绿色线路为控制与保护系统的调试局域网, 工程师工作站可接入该网来访问所有装置的处理板卡, 编辑、下载和监视应用

程序。因此, 在实现控制与保护系统内嵌式暂态数据录波功能后, 工程师工作站可经由绿色的调试网络, 直接获取所有装置的录波文件。

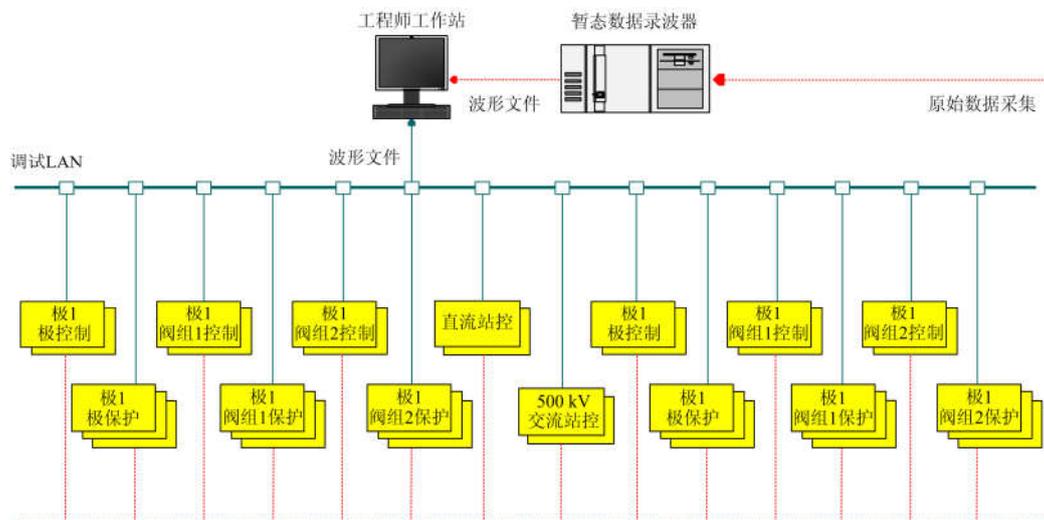


图3 控制与保护系统调试网络结构图

Fig. 3 Structure diagram of the debugging network of control and protection system

2 功能设计

2.1 基本功能设计

COMTRADE 是 IEEE 标准电力系统暂态数据交换通用格式^[8]。每个 COMTRADE 记录都有一组最多 4 个与其相关的文件, 分别是标题文件、配置文件、数据文件、信息文件。其中标题和信息文件并非必须文件, 在设计时只需将满足触发条件后系统记录的暂态数据生成配置文件和信息文件即可。配置文件为一种 ASCII 文本文件, 用于正确地说明数据文件的格式, 诠释数据文件所包含的采样速率、通道数量、频率、通道信息等信息, 并标识数据文件是以 ASCII 码还是以二进制的格式存储。数据文件记录中包含所有输入通道的采样值, 包括顺序号和每次采样的时间标志, 采样值除记录模拟量输入的数据之外, 也记录开关信号的状态量信息。

电力行业标准规定了暂态数据采集可分五个时段记录, 即数据记录可按等间隔采样, 也可按一定间隔内记录的有效值采样。鉴于当前的软件平台支持可配置的多任务应用编程模式, 用户可以选择使用中断任务或者周期任务模式, 其中周期任务最高可配置为 0.1 ms, 可实现 10 kHz 的采样频率^[10]。

采样点数指在一个数据文件中最大存储录波数据的组数, 一组数据包含一次采样的所有模拟量和状态量的值。针对配置文件中的第一点数据时间和触发点数据时间, 引入了两个概念, 即前置录波点

数和后置录波点数。前置录波点数是指在暂态数据的触发逻辑满足条件时刻之前的预录波点数, 后置录波点数是指当暂态数据的触发逻辑满足条件时刻之后仍需要记录的点数。工程调试人员可通过比对触发时刻前后录波数据的差别, 评估系统运行的性能, 分析系统故障产生的原因。用户在配置录波通道的时候, 只需配置这两个点数, 第一点数据时间和触发点数据时间可由程序自动生成。

暂态数据触发通常分为边沿触发方式和电平触发方式。边沿触发方式是指当触发逻辑满足时, 系统的实际采样点数等于前置录波点数加上后置录波点数。电平触发方式是指当触发条件满足时, 系统的实际采样点数包含前置录波点数、触发电平持续时间记录的点数, 以及后置录波点数。另外, 当一个触发条件满足后, 如录波尚未完成, 又有新的触发条件到来, 一般有两种处理方式, 一种是继续完成第一个触发条件的录波, 忽略新的触发条件, 另外一种方式是保留第一个触发条件已记录的信息, 从新的触发条件开始, 重新启动后置录波点数的记录, 直到最后一个触发条件的后置录波点数录波完为止, 若录波过程中, 一直有新的触发条件, 当录波文件达到最大记录数据后, 强制录波完成。当前触发逻辑采用第二种处理方式^[11-13]。

2.2 数据缓存与录波功能设计

控制保护装置存储设备的效率是制约暂态数据录波性能的一个关键因素, 当 SATA 硬盘或 FLASH

的文件读写速度低于实时数据录入的速度时，就有可能出现录波死区的情况。为了解决该问题，这里设计了两级数据缓存结构，如图 4 所示。在 RAM 中同时开辟两片独立的数据缓存区，一片定义为实时数据缓存区，横向宽度为模拟量和状态量通道个数之和，纵向宽度为前置录波点数与后置录波点数之和，缓存区长度为横向与纵向宽度的乘积，用于实时存储和更新当前的数据；另一片定义为暂态数据缓存区，长度为实时数据缓存区的 N 倍，用于存放故障时刻前后记录的历史数据。两级数据缓存设计通过过去除大量无效的历史数据，仅保存触发时刻的有效数据，解决了存储设备读写速度与实时数据录入速度不匹配的问题。在系统触发录波时，需要完成一级缓存与二级缓存之间数据搬移的操作，在录波点数很多而录波频率很快的情况下，系统需要消耗较长的时间来完成数据搬移。以一个超高速线路保护的应用为例，需要在 $20 \mu\text{s}$ 内完成 50 000 点采样(最大 64 路模拟量、64 路状态量)，当触发条件满足时，在 1 s 内需要完成 13 MB 数据的搬移，而且数据搬移不能影响系统的正常采样。因此，需要将数据搬移的工作放在低优先级的任务中执行，或者采用处理器的 DMA 直接内存存取方式，在不占用 CPU 负荷的同时快速完成源地址到目的地址数据的拷贝。

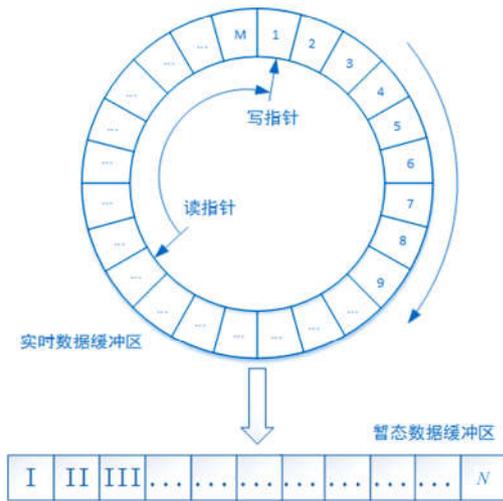


图 4 实时数据与暂态数据缓存示意图

Fig. 4 Buffer chart of the real-time and transient data

暂态数据录波工作流程如图 5 所示。在初始化模式下，创建历史数据存储区、配置信息存储区和录波数据内存池，同时根据用户的配置将站名称、设备名称等配置信息写入配置信息存储区中。在循环模式下，实时更新历史数据，同时判断是否满足

触发条件，若满足则将故障点时间信息等写入配置信息存储区中，保证配置信息存储区中配置信息的完整性，以便直接进行 Comtrade 文件格式转换，同时将实时数据拷贝到暂态数据缓冲区中。当录波完成时，启动 Comtrade 格式转换任务，将暂态数据缓冲区中的数据转换成 Comtrade 波形文件，并保存到 SATA 硬盘中。

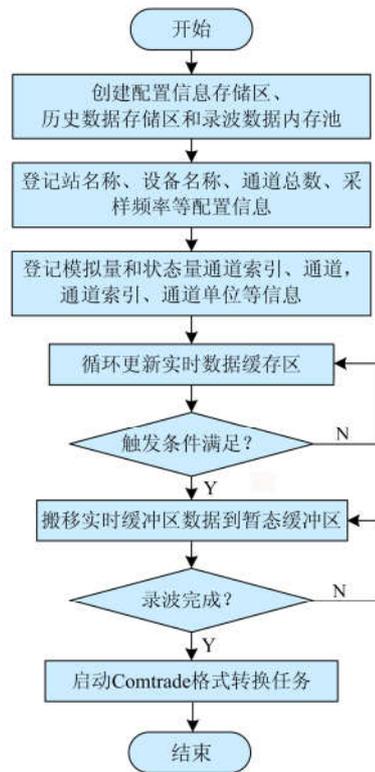


图 5 暂态数据录波工作流程图

Fig. 5 Working flow chart of the transient data recording

2.3 自适应变比

在 IEEE 的 COMTRADE 格式中，ASCII 码格式的数据文件中模拟量通道数值范围是(-99 999, 99 999)，BINARY 格式的数值范围是(-32 767, 32 767)，另外标准定义了模拟量通道增益和偏移变比因子，可由用户自由配置，用户可以根据实际采集数据的大概范围，通过 $ax+b$ 方程估算出增益和偏移因子。合理的配置可以扩大实际模拟量的采集范围，提高采集的精度，反之则会造成录波丢点、重点、削波的现象。但是，实际工程中增益和偏移因子的估算需要耗费大量的时间，而且也不能要求每个工程调试人员熟悉和估算出合理的配置范围。

因此，在本设计中不对原始录入数据进行变比换算。当原始数据录入结束后，统计每个模拟量通道录入的最大值和最小值，并由此计算出中间值，

然后, 根据 ASCII 码或者 BINARY 格式的数值范围定义最大值、最小值和中间值, 最后由 $ax+b$ 方程计算出最佳变比因子, 并对原始录入数据进行换算。

3 应用设计

3.1 内嵌式暂态数据录波模块

基于以上设计原理开发的内嵌式暂态数据录波功能模块如图 6 所示。其中 TCH 为虚拟录波器初始化模块, 调用一个 TCH 模块即可模拟一个录波装置, 单个 TCH 模块可以挂载最多 64 个 ARC 模拟量采集模块和 64 个状态量采集模块。即一个虚拟录波器最多可以记录 64 路模拟量和 64 路状态量数据。虚拟录波功能可以复用, 在一个处理器内可以配置多组暂态数据录波模块, 每组录波模块在满足触发条件后会单独生成一组录波文件。因此, 针对厂家和业主关注的不同数据, 可以将复用数据灵活组合, 并分别配置到不同的虚拟录波器进行记录^[14-16]。

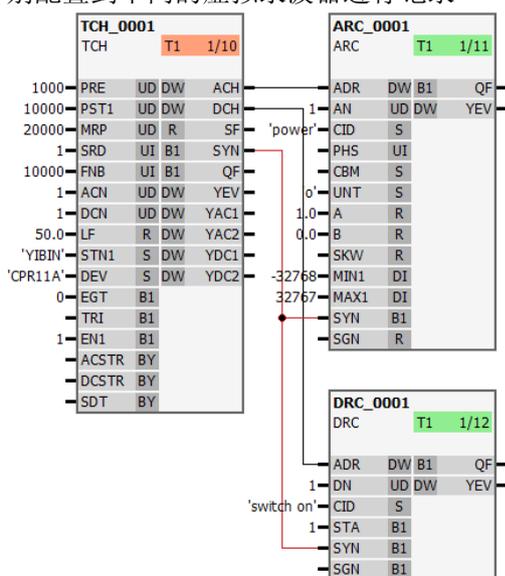


图 6 暂态数据录波应用样例

Fig. 6 Application example of transient data recording

3.3 录波文件获取方式

内嵌式暂态数据录波功能提供了两种录波文件获取方式, 分别是主动召唤方式和自动上送方式。主动召唤方式实现的方法是在控制保护装置系统内创建一个 FTP 服务器, 工程师工作站可以 FTP 客户端的方式登录每个控制保护装置, 获取录波文件列表信息, 选择需要下载的波形文件, 并保存在指定的工作站目录中^[17-18]。主动召唤方式的优点是应用简便, 特别适用于小规模系统调试。自动上送方式实现的方法是在每个控制保护装置中创建一个 FTP 客户端, 在工作站上建立一个服务器, 当系统触发暂

态数据录波后, 控制保护装置主动登录工作站的服务器, 将新触发的录波文件上传至服务器指定的目录保存, 文件上传结束后退出服务器。文件上传考虑续传机制, 无论出现任何情况, 包括工程师工作站重启、交换机重启、插拔网线、FTP 服务器软件关闭重启, 只要装置运行正常, 录波文件应该能够继续上传到工作站。在整个文件上传的过程中, 所有跟文件发送以及 FTP 登录相关的操作均在低优先级的任务中运行, 确保不影响控制保护关键应用所在的任务^[19-20]。主动召唤方式适用于大规模系统联调, 针对上百套控制保护装置, 调试人员无需在每个实验节点依次获取每台装置的录波文件。

4 结论

在早期的工程系统联调时, 厂家和业主都比较看重外置录波装置记录的数据。随着控制保护设备硬件性能的不提高和软件功能的持续完善, 工程调试和验收人员发现内嵌式录波的使用更加灵活, 记录的数据也非常准确, 能够满足大多数工程调试的需要。因此, 内嵌式暂态数据录波已逐渐成为高压直流工程调试和问题分析的一种主流手段, 可以为系统早期缺陷分析提供更加可靠的依据, 从而保障电网的长期稳定运行。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 333-339.
- [2] 于海, 曾丽丽, 杨亚璞, 等. 基于图论的特高压直流工程最后断路器自适应判断策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 121-126.
YU Hai, ZENG Lili, YANG Yapu, et al. Adaptive strategy for the last breaker in UHVDC project based on graph theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 121-126.
- [3] RAHMAN M H, XU L, YAO L Z. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [4] PEREZ J. A guide to digital fault recording event analysis[C] // Conference for Protective Relay Engineers, March 29 – April 1, 2010, College Station, USA: 1-17.
- [5] 孙月琴. 全面实现微机故障录波器远传的几个问题[J]. 继电器, 1997, 25(4): 58-59.
SUN Yueqin. Several problems of remote transmission of fault recorder data[J]. Relay, 1997, 25(4): 58-59.
- [6] 王立新, 郭登峰, 张小川. 微机保护和故障录波器联网系统[J]. 继电器, 2000, 28(4): 46-49.
WANG Lixin, GUO Dengfeng, ZHANG Xiaochuan. A networking system of microprocessor-based protections

- and fault recorders[J]. Relay, 2000, 28(4): 46-49.
- [7] 王黎, 孙云莲. 浅析微机故障录波器通信网络的设计[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 89-91.
WANG Li, SUN Yunlian. Design of communication on network for microprocessor based fault recorder[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 89-91.
- [8] IEEE Standards Board. Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power system: IEEE C37.111-1999[S]. 1999.
- [9] 陈小林, 罗毅, 王伟平, 等. 基于故障录波数据的保护特性分析方法及其实现[J]. 电网技术, 2005, 29(18): 70-74.
CHEN Xiaolin, LUO Yi, WANG Weiping, et al. Protection characteristic analysis method based on recorder fault data and its implementation[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 70-74.
- [10] 桂勋. 基于递推算法的海量 COMTRADE 数据计算并行化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 86-91.
GUI Xun. Calculation parallelization for massive COMTRADE data based on recursive algorithms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 86-91.
- [11] 张逸, 杨洪耕, 叶茂青. 基于分布式文件系统的海量电能质量监督数据管理方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 102-108.
ZHANG Yi, YANG Honggeng, YE Maoqing. A data management scheme for massive power quality monitoring data based on distributed file system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 102-108.
- [12] 孙月琴. 全面实现微机故障录波器远传的几个问题[J]. 继电器, 1997, 25(4): 58-59.
SUN Yueqin. Several problems of remote transmission of fault recorder data[J]. Relay, 1997, 25(4): 58-59.
- [13] 贾轩涛, 史博伦, 胡锦涛, 等. 永富直流三种功率输送方式在线转换直流过电压仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 131-138.
JIA Xuantao, SHI Bolun, HU Jingen, et al. DC overvoltage simulation for online-switching of three power transmission modes in Yongfu HVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 131-138.
- [14] 李兆伟, 刘福锁, 崔晓丹, 等. 计及电力安全事故风险的电网动态分区与切负荷协调控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 35-40.
LI Zhaowei, LIU Fusuo, CUI Xiaodan, et al. Coordinate control study for dynamic division and load shedding considering electrical security accident risk[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 35-40.
- [15] 李妍, 车勇, 单强, 等. 智能变电站二次系统在线监测评估的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 66-70.
LI Yan, CHE Yong, SHAN Qiang, et al. Research on secondary system on-line monitoring and evaluation in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 66-70.
- [16] 陈仕龙, 谢佳伟, 毕贵红, 等. 一种特高压直流输电线路神经网络双端故障测距新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 257-264.
CHEN Shilong, XIE Jiawei, BI Guihong, et al. A novel two terminal fault location method used ANN for UHVDC transmission Line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 257-264.
- [17] 高本峰, 张学伟, 刘辛晔, 等. 高压直流输电保护定值整定流程的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 400-407.
GAO Benfeng, ZHANG Xuewei, LIU Xinye, et al. Research of HVDC protection value setting process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 400-407.
- [18] 付艳, 黄金海, 吴庆范, 等. 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 133-139.
FU Yan, HUANG Jinhai, WU Qingfan, et al. Key technologies based on multi-terminal MMC-HVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 133-139.
- [19] 关红兵, 黄立滨, 周鹏鹏, 等. 基于 RTDS 的高压直流控制系统锁相环仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 128-132.
GUAN Hongbing, HUANG Libin, ZHOU Pengpeng, et al. Application of improved PLL for HVDC transmission system based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 128-132.
- [20] 于海, 富银芳, 于锋, 等. 计及母联开关的高压直流工程最后断路器智能判断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 152-158.
YU Hai, FU Yinfang, YU Feng, et al. Intelligent judgment method for the last breaker in HVDC project including bus-tie switch[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 152-158.

收稿日期: 2017-09-12; 修回日期: 2017-12-18

作者简介:

陈大鹏(1970—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电控制保护设备软件平台研发; E-mail: chendapengc@sohu.com

于海(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为高压直流输电控制保护设备软件平台研发; E-mail: yuhai_xj@163.com

于锋(1979—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为大功率储能充电电池均衡系统。

(编辑 张爱琴)