

DOI: 10.7667/PSPC162021

就地化分布式变压器保护方案研究

邓茂军¹, 樊占峰¹, 倪传坤¹, 郝宝欣², 马和科¹, 姚东晓¹, 黄继东¹

(1. 国家电网许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 提出了一种适合就地化变压器保护的有主分布式环形网络及其同步方案, 按断路器配置保护子机, 变压器本体子机兼作保护主机, 直接采用常规采样、常规跳闸模式, 对外连接全部采用预制的航空插头。主变本体子机利用 IEEE 1588 网络对时协议实现各侧子机模拟量的同步采集, 各侧子机采样数据发送到主变本体子机, 由主变本体子机完成全部保护及 MMS 通信等功能。保护动作后, 主变本体子机发出 GOOSE 跳闸命令, 各侧子机收到 GOOSE 命令后跳开本侧开关。此方案可以使 110 kV 及以上电压等级变电站所有保护装置满足就地化安装的要求, 取消保护小室, 减少新建变电站占地面积。

关键词: 就地化; 分布式; 变压器保护; HSR; 采样同步; 即插即用

Research on scheme of outdoor installation distributed transformer protection

DENG Maojun¹, FAN Zhanfeng¹, NI Chuankun¹, HAO Baoxin², MA Heke¹, YAO Dongxiao¹, HUANG Jidong¹

(1. State Grid XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch Company, Nanjing 211100, China)

Abstract: This paper proposes a distributed network with master-slave structure and its synchronization scheme suitable for outdoor installation transformer protection, in which sub protection machines are configured with transformer breakers, transformer body sub machine is also used as the protection master, conventional sampling and tripping mode are adopted directly, and all of the external connections uses the prefabricated aviation plugs. The master transformer protection machine uses IEEE 1588 network synchronization protocol to realize the synchronous data sampling of each side sub protection machine, and with the data from other sub machines, the master protection machine achieves all of the protection functions and MMS communication. The master transformer protection machine sends out tripping GOOSE commands when the protection acts, and each side sub protection machine parses the receiving tripping command to cut the breaker of its side. This scheme allows all of the protection devices in the 110 kV and above voltage level substations to meet the requirements of outdoor installation, cancels protection's closet, and reduces the floor area of newly built substation.

This work is supported by Science and Technology of Headquarters of State Grid Corporation of China (No. SGJSJX00YJJS1601932).

Key words: outdoor installation; distributed; transformer protection; HSR; sampling synchronization; plug and play

0 引言

随着智能变电站建设的快速推进, 现场出现多起由于合并单元问题导致了保护不正确动作的事件^[1-2], 330 kV 及以上电压等级的智能变电站已经要求采用常规采样 GOOSE 跳闸模式。2015 年底,

国调中心提出了 220 kV 及以下电压等级间隔继电保护装置小型化、就地化无防护安装模式。保护的就地化分布式安装是目前研究的热门话题, 其基本出发点首先应是安全、可靠; 区内故障正确动作, 区外故障不误动应是首要目标^[3-6]。目前, 单间隔的就地化线路保护装置已经研制完成, 即将在中国电科院完成集中测试, 随后将在新疆、黑龙江、浙江、湖南等多个具有典型气候特征的省份投入试运行。变压器保护由于跨间隔和电压等级的特点, 一直以

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (SGJSJX00YJJS1601932)

来都采用集中式组屏安装,成为变电站内完全取消二次保护屏柜的一道障碍。

本文推荐的就地化分布式变压器保护方案,采用有主分布式环形网络,按断路器配置子机,变压器本体子机兼作保护主机,由保护主机完成所有保护功能。子机采用常规采样、常规跳闸模式,对外连接全部采用预制的航空插头,解决了就地化变压器保护分布式安装的问题。

1 保护网络结构

目前智能站变压器保护过程层网络普遍采用星型网络,由于就地化变压器保护取消了合并单元和智能终端,为了满足就地无防护安装的要求,需要采用分布式保护方案,网络连接方式可以采用星形网络或环形网络^[7-9]。

1.1 星形网络

星形网络的优点是技术上较为成熟,任意支路网络中断只影响本间隔,对其他间隔的通信没有影响;缺点是光口数量较多。采用星形网络实现保护功能分有主分布式和无主分布式两种方式。有主分布式配置独立的主变本体子机作为保护主机,各个子机通过星形网络连接到保护主机,由主机完成全部保护功能,网络结构如图1所示。无主分布式不配置独立的保护主机,中压侧和低压侧子机通过星形网络连接到高压侧子机,由高压侧子机完成全部保护功能。

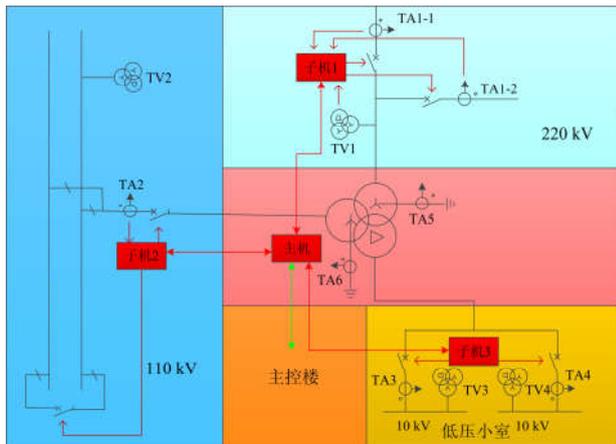


图1 就地化变压器保护星形网络结构

Fig. 1 Star network structure of the in outdoor installation transformer protection

有主分布式星形网络的优点是网络结构简单、清晰,方便检修及更换;缺点是增加了一台主变本体子机,硬件成本稍高。无主分布式星形网络的优点是不配置主变本体子机,硬件成本相对较低;缺

点是主变本体模拟量需要接入本侧子机,二次回路接线相对复杂。

1.2 环形网络

环形网络由双连接节点(DANH)组成,节点与节点之间通过以太网顺序首尾相连形成双向冗余环。高可用性无缝环网(HSR)是基于并行冗余技术的环形网络典型应用,进而在环形拓扑结构上实现网络通信高可靠性、无缝冗余,如图2所示。

环网内某一节点接收报文时,将会对此帧报文进行判定:若节点的两个端口第一次收到此帧报文,那么此帧报文中送应用层,同时,通过另一端口,继续沿着环网传送;若节点另一端口已经接收到此帧报文,那么本端口接收的此帧报文将会被丢弃,同时不再向环网转发。

基于上述处理,环网中单一链路故障时,仍然可以保证正常的网络通信,进而实现了通信冗余。分布式变压器保护每个子机作为环网中一个独立的节点,保护功能可以由单个子机完成,也可以分散在各个子机中完成。

1) 有主分布式:采用主变本体子机兼作保护主机。各个子机完成本侧采样及出口功能,并透明转发其他子机的模拟量及状态量信息,由主变本体子机完成全部保护功能。

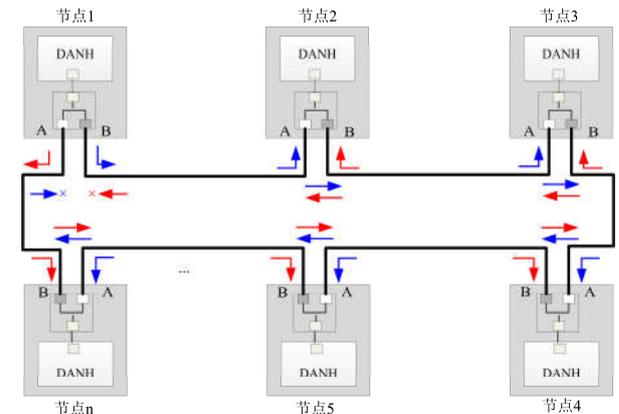


图2 双向冗余环网拓扑结构示意图

Fig. 2 Topology schematic diagram of the bidirectional redundancy ring network

2) 无主分布式:各个子机都作为一个独立的保护主机使用^[10],独自完成全部保护功能,同时接入过程层和站控层网络,保护动作后仅跳本侧开关。

无主分布式环形网络的缺点是变压器内部故障时,各个子机差动保护同时动作并将动作信息上送至站控层网络,将给后期的运行和维护带来不便。

1.3 星形网络和环形网络的优缺点

环形网络中保护主机的光口数量跟子机的个数

无关, 同一个数据源可通过两条互为冗余的路径到达数据接收点, 其中一条链路异常时不影响保护数据的正常接收, 与星形网络相比, 网络可靠性更高, 但网络结构相对复杂。星形网络和环形网络的优缺点如表 1 所示(表中 N 为除本体子机外的子机总个数)。

基于星形网络和环形网络技术经济性的比较, 无主分布式星形网络和环形网络都会增加现场调试和运维人员的工作量, 易用性都不理想, 为了满足装置小型化、无防护安装的要求, 当子机数量不超过 4 个时, 推荐采用有主分布式星形网络, 当子机数量大于 4 个时, 推荐采用有主分布式环形网络。

表 1 星形网络和环形网络的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of the star network and ring network

比较类别	星型网络		环形网络	
	有主式	无主式	有主式	无主式
技术成熟度	较成熟		需开发	
网络可靠性	低, 任一链路异常闭锁保护		高, 任一链路异常不影响保护	
网络光口数量	N	$N-1$	2	2
适合安装子机数量	不宜超过 4 个		4 个以上	
成本	较高	较低	较高	较高
易用性	好	一般	好	差
技术经济性	好	一般	好	差

2 保护网络方案

按照国家电网公司就地化保护总体方案的主要精神, 从减少就地化保护的子机个数考虑, 线路和主变间隔的子机宜集成本间隔的合并单元及智能终端功能, 站域保护、各自投、稳控等不单独配置子机, 直接从过程层网络获取采样数据并作用于跳闸, 故变压器保护子机应将对应的 SV 及 GOOSE 信息

上送至过程层网络。

由于变压器各侧子机需要集成本间隔的合并单元及智能终端功能, 变压器带分支时宜按断路器或者各侧电流和电压的最小化模块配置子机, 不同电压等级变压器的子机配置如表 2 所示。

表 2 不同电压等级变压器的子机配置

Table 2 Configuration of the sub machine with transformers of different voltage levels

子机数量		按断路器配置/个	按最小化模块配置/个
750 kV 变压器	高压侧	2	3
	中压侧	2	3
	低压侧	2	2
	本体	1	1
	总数	7	9
500 kV 变压器	高压侧	2	3
	中压侧	1	1
	低压侧	1	1
	总数	5	6
220 kV 变压器	高压侧	2	3
	中压侧	1	1
	低压侧	2	5
	本体	1	1
	总数	6	10

各种电压等级的变压器不管是按断路器配置子机还是按最小化模块配置子机, 子机数量最小为 5 个, 最大为 10 个, 当子机数量大于 4 个时, 宜采用有主分布式环形网络。由于按断路器配置子机数量少, 成本较低, 就地化变压器保护推荐按断路器配置子机。以 750 kV 变压器为例, 网络结构示意图如图 3 所示。

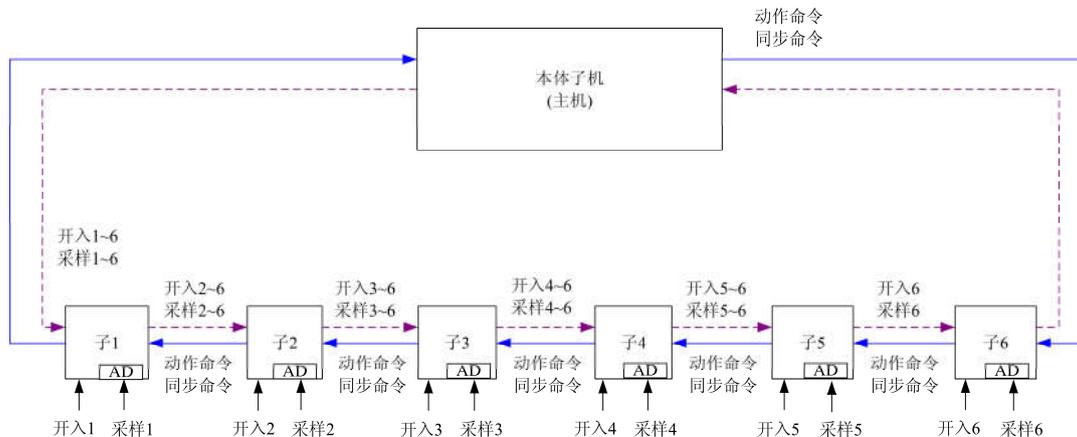


图 3 有主分布式环网结构示意图

Fig. 3 Transmission diagram of distributed ring network including host and sub machine

就地化变压器保护采用有主分布式环形网络时不单独配置保护主机，采用主变本体子机兼作保护主机，保护主机和各侧子机之间采用手拉手的方式形成双向冗余环网。子机完成本侧采样及出口功能，并透明转发其他子机的采样及 GOOSE 信息。保护主机完成主变本体模拟量的采集、保护功能、过程层 GOOSE 信息收发、人机交互及 MMS 通信等功能。保护动作后，保护主机通过环形网络给各侧子机发送 GOOSE 跳闸命令，子机收到 GOOSE 命令后跳开本侧开关。

环网中各个子机都需要转发其他子机的信息，由于数据量的叠加效应，当环网内子机个数较多时，就会带来较大的网络通信压力。以单个子机的数据流量为 8 M 计算，子机个数小于 8 个时采用 100 M 光纤以太网，超过 8 个时宜采用 1000 M 光纤以太网。变压器保护按断路器配置时子机个数不超过 7 个，因此可以直接采用 100 M 光纤以太网进行通信。

3 保护同步方案

按照 HSR 环网数据传输方式分析，每个子机采集的模拟量数据通过下一级子机，然后逐步传递到保护主机，主机接收到各个子机的数据均会出现不同程度的延时。必须对各个子机的采样数据进行同步处理，消除传输延时后用于差动保护运算，环网采样数据的同步方案有两种：

- 1) 子机自由采样，主机通过修正采样延时后进行插值同步。
- 2) 主机发同步采样命令(不依赖外部对时)，子机收到同步命令后同步采样，主机根据采样序号进行同步，采样同步方案如图 4 所示。

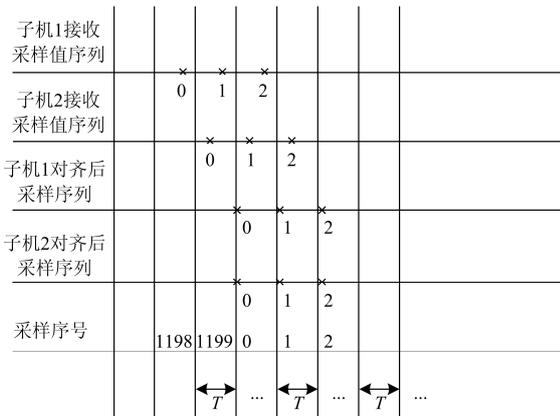


图 4 采样同步方案

Fig. 4 Synchronization scheme of sampling

第一种方案采用目前智能站点对点采样的同步方案，由于要进行插值同步，对子机的采样率要求

较高，通常为 80 点/周，因此环网中的数据流量大；第二种方案采用智能站网络采样的同步方案，采样同步脉冲直接采用主机的同步时钟，不依赖外部对时，子机的采样率为 24 点/周，环网中的数据流量少，网络带宽大大降低，优先采用第二种方案，网络对时采用成熟的 IEEE1588 对时方案。

IEEE1588 的全称是“网络测量和控制系统的精密时钟同步协议标准”，属于 PTP(精确时钟同步协议)的一种^[11-13]，IEEE1588 对时原理如图 5 所示。IEEE1588 对时基本原理为在每个接点之间的收发延时一致情况下，利用乒乓算法计算两个接点之间的传输延时，最后在从端进行修正。

IEEE1588 对时精度主要依赖于时间戳的生成位置^[14-15]，一般应用层软件实现时间戳受操作系统机制等多种因素影响，精度大概在 1 ms 以上。网络驱动层时间戳通常受到中断响应方式、中断精度、中断优先级等因素影响，精度大概在 1~500 μs 之间。而硬件回路生成时间戳，精度可以高达亚微妙，在就地化变压器保护装置上利用支持 IEEE1588 对时的硬件模块实现精确网络对时是比较理想的选择。

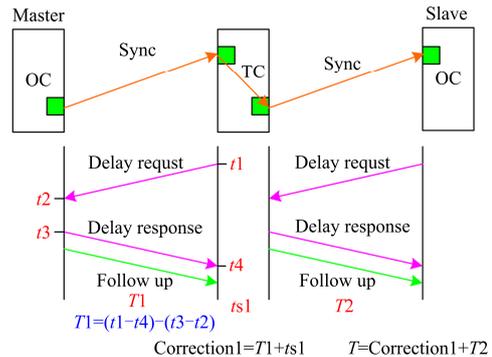


图 5 IEEE1588 对时原理

Fig. 5 Timing principle of IEEE1588

4 就地化分布式变压器保护整体方案

就地化变压器保护子机采用全封闭机箱，就地无液晶显示，通过安装在控制室的智能管理单元进行集中式管理，实现保护装置的远程界面功能。就地化变压器保护子机不集成操作回路，各侧开关跳闸需要配置单独的就地化操作箱。

以 220 kV 自耦变压器为例，高压侧为内桥接线，中压侧为双母线接线，低压侧带分支，就地化变压器保护配置高压 1 侧、高压 2 侧、中压侧、低压 1 侧、低压 2 侧、主变本体共 6 个子机，子机之间采用环形网络连接，主变本体子机兼作保护主机，完成全部保护功能、过程层 GOOSE 信息收发、人机交互及 MMS 通信等功能，网络接线如图 6 所示。

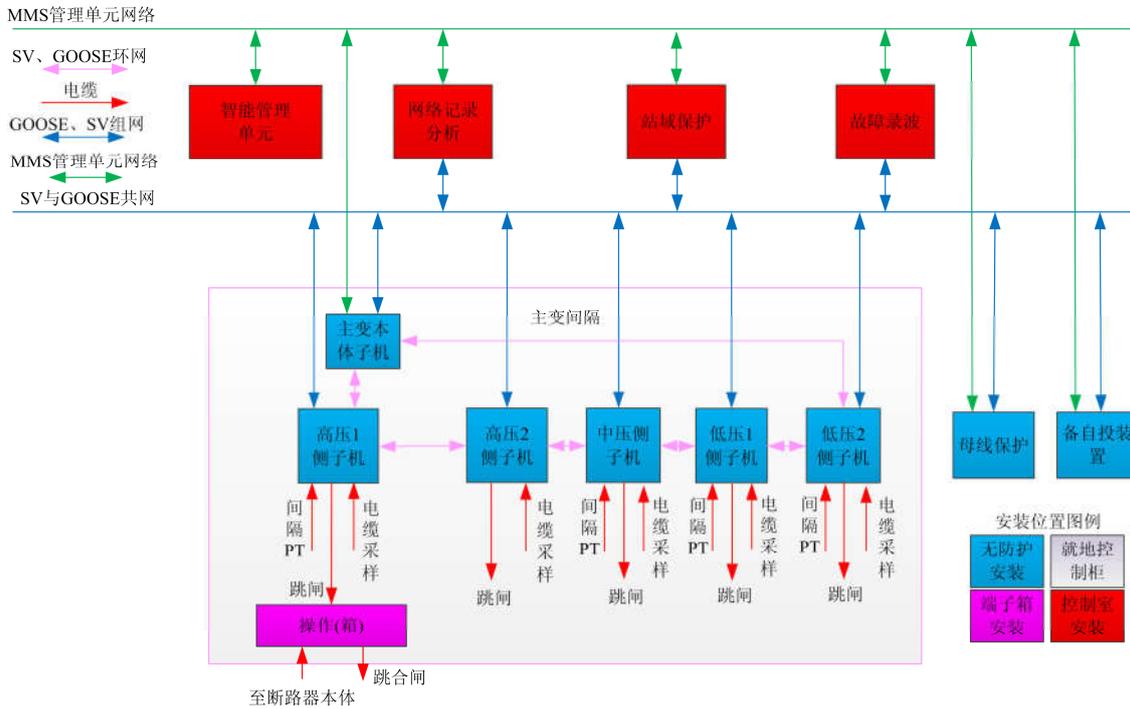


图 6 220 kV 主变就地化保护网络接线图

Fig. 6 Network wiring diagram for the outdoor installation protection of 220 kV transformer

各个子机就地安装在端子箱附近, 所有子机同时接入过程层网络, 上送对应的 SV 及 GOOSE 信息, SV、GOOSE 信息采用共口技术, 减少了子机用于信息交互的光口数量。为了减少中间环节, 子机直接采用常规采样、常规跳闸, 提高保护装置的整组动作时间。另外, 为了简化二次回路, 降低运维及检修的工作量, 子机全部采用预制电缆和预制光缆, 对外连接全部采用航空插头, 保护装置故障后采用整机更换模式, 将检修中心调试好的保护装置直接替换故障设备, 并通过智能管理单元实现所有备份文件的一键下装, 保护装置只需简单验证后就能投入运行, 大大节约了变电站的检修时间及停电时间, 实现保护装置的即插即用和更换式检修。

保护主机采用 IEEE1588 对时方案实现各侧子机的同步采样, 然后再根据采样序号进行同步。保护主机将各侧采样值同步后进行保护逻辑判别, 保护动作后将 GOOSE 跳闸命令通过环形网络发送到各侧子机, 各侧子机收到跳闸命令后跳本侧开关; 通过 GOOSE 网络接收失灵联跳信号, 实现失灵联跳变压器各侧断路器功能; 保护动作后闭锁备自投、启动失灵等联闭锁信息采用 GOOSE 网络传输。

5 结论

本文通过对就地化变压器保护的网路结构进行

分析, 提出了一种适合就地化变压器保护的有主分布式环形网络及其同步方案, 按断路器配置子机, 变压器本体子机兼作保护主机, 由主机完成所有保护功能。方案整体结构清晰、简洁, 功能完整、可靠性高, 能够满足就地化变压器保护分布式安装的要求。

参考文献

- [1] 刘颖. 提高智能变电站采样可靠性的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 150-156.
LIU Ying. Research on improvement of sampling reliability in smart substation and application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 150-156.
- [2] 吴通华, 蒋雷海, 李友军. 电力系统电气量异常采样值实时辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 95-98.
WU Tonghua, JIANG Leihai, LI Youjun. Real time identification of abnormal sampling data of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 95-98.
- [3] 国家技术监督局. GB/T 14285-2006 继电保护和安全自动装置技术规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [4] 裘愉涛, 王德林, 胡晨, 等. 无防护安装就地化保护应用与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 1-5.
QIU Yutao, WANG Delin, HU Chen, et al. Application and practice of unprotected outdoor installation protection[J].

- Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 1-5.
- [5] 秦红霞, 武芳瑛, 彭世宽, 等. 智能电网二次设备运维新技术研讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 35-40.
QIN Hongxia, WU Fangying, PENG Shikuan, et al. New technology research on secondary equipment operation maintenance for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 35-40.
- [6] 李岩军, 艾淑云, 王兴国, 等. 继电保护就地化及测试研究[J]. 智能电网, 2014, 2(3): 16-21.
LI Yanjun, AI Shuyun, WANG Xingguo, et al. Locally installed mode and test research of relay protection[J]. Smart Grid, 2014, 2(3): 16-21.
- [7] 李瑞生, 李燕斌, 周逢权. 智能变电站功能架构及设计原则[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 38(21): 24-27.
LI Ruisheng, LI Yanbin, ZHOU Fengquan. The functional frame and design principles of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 38(21): 24-27.
- [8] 曹楠, 李刚, 王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 63-68.
CAO Nan, LI Gang, WANG Dongqing. Key technologies and construction methods of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 63-68.
- [9] 薄志谦, 张保会, 董新洲, 等. 保护智能化的发展与智能继电器网络[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 1-12.
BO Zhiqian, ZHANG Baohui, DONG Xinzhou, et al. Intelligent relay network for the development of protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 1-12.
- [10] 周小波, 汪思满, 吴正学, 等. 环网分布式母线保护装置就地化实现探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 104-108.
ZHOU Xiaobo, WANG Siman, WU Zhengxue, et al. Local placing implementation research of distributed HSR busbar protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 104-108.
- [11] 国家电网公司. 智能变电站继电保护技术规范[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [12] 王攀峰, 张克元, 文明浩. 应用于数字化变电站的分布式母线保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 68-71.
WANG Panfeng, ZHANG Keyuan, WEN Minghao. Research on distributed busbar protection applied to digital transformer substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 68-71.
- [13] 操丰梅, 宋小舟, 秦应力. 基于数字化变电站过程层的分布式母线保护的研制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 69-72.
CAO Fengmei, SONG Xiaozhou, QIN Yingli. Research on distributed busbar protection based on digital substation process level[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 69-72.
- [14] 赵上林, 胡敏强, 窦晓波. 基于 IEEE 1588 的数字化变电站时钟同步技术研究[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 97-102.
ZHAO Shanglin, HU Minqiang, DOU Xiaobo. Research of time synchronization in digital substation based on IEEE 1588[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 97-102.
- [15] 于鹏飞, 喻强, 邓辉. IEEE 1588 精确时间同步协议的应用方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 99-103.
YU Pengfei, YU Qiang, DENG Hui. The research of precision time protocol IEEE 1588[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 99-103.

收稿日期: 2016-12-09; 修回日期: 2017-03-05

作者简介:

邓茂军(1975-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事继电保护产品研发工作; E-mail: xjtc_dengmaojun@126.com

樊占峰(1974-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事电力系统继电保护产品研发工作;

倪传坤(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护产品研发工作。

(编辑 姜新丽)