

## 区域层次化保护系统研究与设计

李俊刚<sup>1,2</sup>, 张爱民<sup>1</sup>, 彭华夏<sup>3</sup>, 张杭<sup>1</sup>, 孟乐<sup>2</sup>, 耿英三<sup>1</sup>, 陈颖<sup>4</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 3. 湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008; 4. 江苏省电力公司镇江供电公司, 江苏 镇江 212000)

**摘要:** 利用变电站采样信息, 提出了一种实现区域层次化继电保护的方式。系统主要由通信网络组成、变电站层, 区域保护层。通信系统将就地信息传送至区域保护, 实现区域信息共享。在获取变电站层的全景信息后, 区域保护系统根据电力系统运行方式、拓扑结构与各供电线路的故障类型与负荷发生变化, 和就地保护进行配合, 利用区域信息进行故障定位, 实现了面向系统的保护。

**关键词:** 变电站采样信息; 区域通信; 区域层次化保护

### Research and design of zone area hierarchical protection system

LI Jun-gang<sup>1,2</sup>, ZHANG Ai-min<sup>1</sup>, PENG Hua-xia<sup>3</sup>, ZHANG Hang<sup>1</sup>, MENG Le<sup>2</sup>, GENG Ying-san<sup>1</sup>, CHEN Ying<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Hunan Industry University, Zhuzhou 412008, China; 4. Zhenjiang Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Zhenjiang 212000, China)

**Abstract:** Using substation sampling information, this paper proposes a realization method for zone area hierarchical protection system. The system is mainly composed of communication network, substation regional protection level and zone area hierarchical protection level. The informations will be sent to the regional protection by communication system, which realizes regional information on sharing. Finally, after obtaining substation panoramic information, according to power system operation, typology structure, and the change of fault types and load of each power supply and distribution line, zone area hierarchical protection cooperates with the regional protection, uses regional information for fault location, and realizes the system oriented protection.

**Key words:** substation sample information; zone communication; zone area hierarchical protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)11-0034-07

## 0 引言

目前, 智能变电站保护技术仍停留在面向元件的层面上, 难以在系统层面上的故障自我恢复与自动优化。鉴于广域保护原理、高速通信网络技术的出现, 区域保护的研发已经付诸行动。人们期许区域(甚至广域)保护系统的实施能避免大停电的发生并提高电网的安全性和可靠性。

区域层次化保护是广域保护实现的基础, 广域保护的概念与实施在文献[1-4]中提及, 但是, 这些文献论述的广域保护均是从实现系统稳定控制的角度, 而非电气元件的广域继电保护。然而也有一些文献在讨论如何实现广域继电保护功能<sup>[5-7]</sup>, 在文献[8]中, 在广域保护中引入了继电保护的概念, 提出使用GPS信号进行精确的时间同步, 通过专用的光

纤信道传送多点电流信息, 构成广域电流差动后备保护。以及在文献[9-10]中, 也引入了广域继电保护的措施。但是上述广域继电保护实现方式, 具有不可忽视的缺点, 具体如下:

- 1) 有限的保护信息, 先进的保护算法无法应用;
- 2) 保护信息的实时性, 安全性较低, 无法实现快速主保护;
- 3) 与变电站内继电保护系统相隔离, 系统协调难度大;
- 4) 广域继电保护系统的实施需要另外的投资。

因此, 实施广域继电保护, 必须解决上述问题。目前, 智能变电站技术逐步走向成熟, 为区域层次化继电保护的实施提供了坚实的基础。其主要表现在以下几个方面: 变电站依据IEC61850标准进行建

模, 采样值与状态量等信息已实现共享<sup>[11]</sup>; 智能变电站一次设备智能化水平的提升, 测量、保护与控制功能就地实现, 弱化了变电站对间隔层和站控层的需求; 智能变电站集中式保护得到实施, 简化了站内保护与控制体系。同时, PTN网络通信技术为广域信息的实时、可靠传输提供了先决条件。

因此, 基于上述种种有利措施, 如何将智能变电站与区域保护系统融合, 利用智能变电站的全景信息实现面向电网的区域继电保护与控制, 具有较大的经济、学术和工程意义。

## 1 区域保护系统

为实现智能变电站与区域保护系统的融合, 对现行的智能变电站系统进行改造, 变电站内部取消间隔层与站控层, 仅部署过程层设备。按间隔部署综合智能设备, 实现信息采集与站内就地保护, 通过高速 PTN 网络与区域保护层通信, 并按照 IEC61850 标准构建一个全景数据平台, 为 EMS 等

高级应用提供数据支撑。

基于全景信息的区域保护系统体系结构分为四部分, 如图1所示, 系统主要由通信网络组成、变电站层, 区域保护层。通信系统在区域保护系统中起着重要的作用, 在通信中断的情况下, 区域保护系统的设计可以对通信系统检测并能容忍失败。

全景信息是指能展现电网运行关键环节和运行状态, 它主要包括重要间隔的电流、电压以及状态信息, 通过综合智能设备完成信息采集, 统一传送到区域保护以及调控中心, 形成基于统一断面的具有唯一性、一致性的电网基础信息, 并以统一标准的方式实现全网信息交互和信息共享。

当获取变电站层的全景信息后, 区域保护系统可以确定电力系统运行方式、拓扑结构与各供电线路的故障类型与负荷发生变化, 因此可以重新计算相应保护装置的整定值, 从而提高保护的灵敏性、选择性。并利用区域信息进行故障定位, 实现了面向系统的保护。

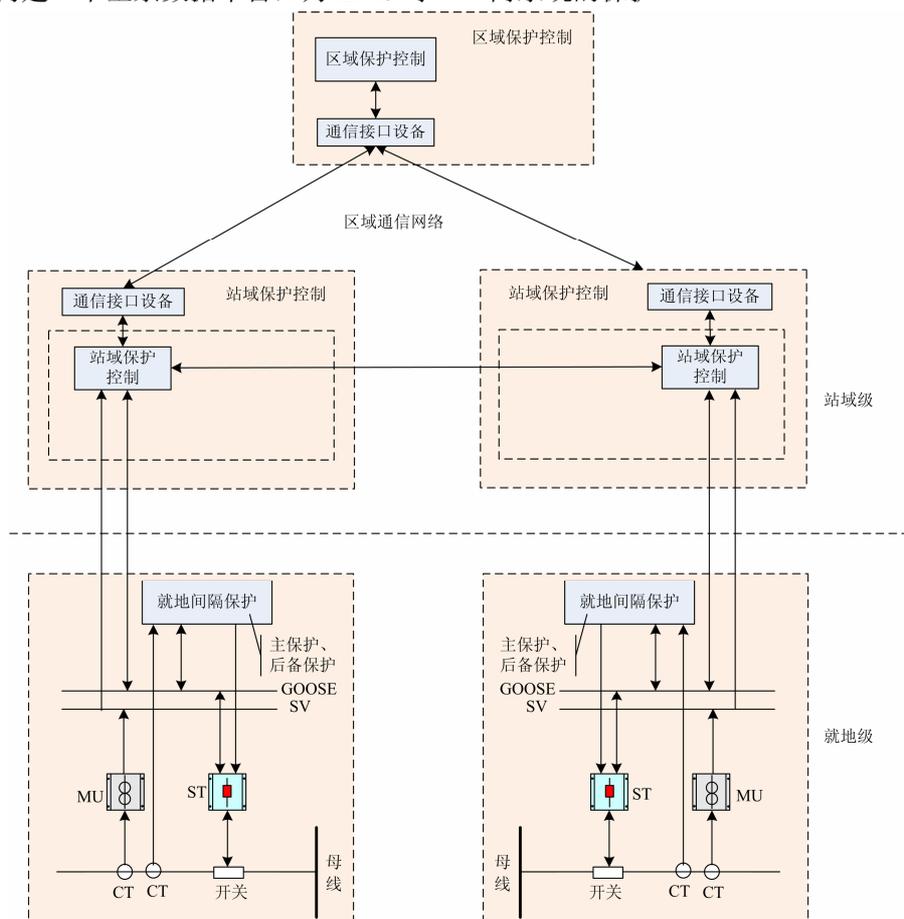


图 1 区域保护系统结构图

Fig. 1 Wide area protection system structure

## 2 区域保护原理与机制

本文所述区域继电保护系统,获得的信息量多,在保护信息满足的前提下,可以将电网整体视为保护对象,利用区域电网信息实现区域保护<sup>[12-13]</sup>。区域保护采用层次化保护体系,变电站内就地保护部署快速保护,如快速距离保护。区域部署基于差动原理的主保护、区域断路器失灵保护、扩大性差动保护以及其他后备保护。实现纵深保护结构,保证系统保护的完备性。

在层次化保护框架的前提下,就地保护其主要配置基于本间隔参数的、不受系统运行方式影响的快速保护,如线路间隔配置动作速度非常快的基于元件参数识别的快速距离保护,可保护线路长度的90%。线路自动重合闸功能应部署在就地,根据位置或者跳闸命令启动,接收到闭锁命令时放电。

而在就地保护的基础上配置基于差动的区域保护系统和其他后备保护系统。利用一次设备端口信息和相关系统信息构成基于差动原理的区域主保护;区域主保护通过 PTN 网络接受就地综合智能设备发送的小矢量采样值信息,进行电流差动运算。

区域后备保护系统基于区域电网的实时电压信息、电流信息、断路器状态信息,以及主保护动作等信息,判别本区域电网范围内的元件(母线、输电线路、变压器等)故障,当主保护拒动或断路器失灵等情况下按最优的跳闸策略进行故障隔离的保护。通过相邻保护之间简单的时序配合关系实现保护正确动作。

保护系统运行流程如图 2 所示,区域保护中心感知故障并判断出故障元件,根据故障元件所处位置识别故障模式。中心站集中决策模块根据故障模式选择合适的保护,即时发送区域主保护指令给相应变电站。变电站在接收区域保护命令的同时,判断是否满足站内就地保护启动条件,根据本站运行方式、接线方式形成动作策略。并反馈状态信息给区域保护中心。

## 3 变电站层

为实现系统的融合,变电站需要进行改造,将变电站间隔层功能和站控层功能与过程层功能相融合,或者向区域保护中心转移。变电站内按间隔配置综合智能设备。设备主要完成变电站全景数据的采集及上送,同时接收区域保护设备层下发的控制命令并完成执行。具体功能实现如下。

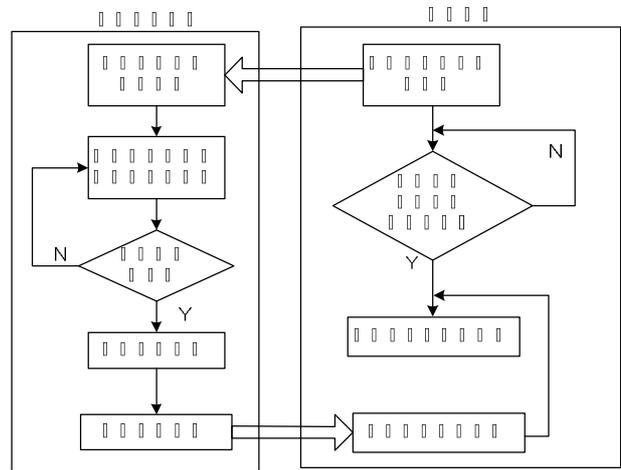


图 2 区域保护机制

Fig. 2 Wide area protection system mechanism

**合并器功能:** 实现一个间隔的数字化的互感器数据的合并功能,并与时钟系统同步;把采样值上送至PTN网络供区域保护使用。

**智能接口功能:** 实现一个间隔的开关量采集、采集结果可通过GOOSE上送至网络;可接收网络上的GOOSE命令,实现一个间隔断路器和刀闸的控制功能;具备完整的操作回路,可实现一个断路器的分合操作及分合闭锁功能。

**就地保护功能:** 由于通信系统不可避免的丢失,保护系统必须设计成能容忍通信系统失败的情况。其主要配置为基于元件参数识别的快速距离保护,快速距离保护采用工频变化量阻抗继电器,由于工频变化量阻抗继电器有很强的保护过渡电阻和区外短路不存在稳态超越的优点,对应非串补线路其保护误差仅来自暂态非周期分量带来的测量误差。所以理论上整定范围可为线路全长的95%,即躲过保护定值误差。对应有串联补偿的线路,由于快速距离保护采取了相应的措施,按线路全长的0.8~0.85倍整定,保护不会误动。同时在综合智能单元中配置线路重合闸功能,根据位置或者跳闸命令启动,接收到闭锁命令时放电。

## 4 区域通信系统

为满足不同的需求,通信网络应设计成为快速、鲁棒和可靠操作的,在诸多的因素中网络类型和拓扑、通信协议和介质,这些因素起着重要的作用。区域通信的实有多种传送协议可供选择,PMU 与 IEC61850 是其中较为合适的,两者相比,IEC61850 模型完整,但在区域网通信上需要预防网络GOOSE、采样值等信息过于频繁,而 PMU 报文,又可能导致先进保护功能的信息缺失,为了实现先

进的保护, 本项目采用 IEC61850 标准。

#### 4.1 业务分析

在区域保护系统中IED信息的交换是一点对多点, 快速的数据的交换可能不带确认, 即单方向进行, 因此采用MCAA模型。规定系统的采样频率, 并对输入信号进行采样。通信信息主要包括: 采样值、状态信息、IEEE1588时钟同步报文、区域保护下发的控制命令、遥测、遥信等命令等。具体的性能要求如表1所示。

表 1 变电站通信数据分析

Table 1 Substation communication data analysis

方向	类型	流量	实时性	优先级	备注
上行	SV	<20 mbps 恒定	高	高	会造成闭锁保护 不允许频繁丢失
	GOOSE	<100 kbps 变化小	高	高	不允许频繁出现丢失
	MMS	<100 kbps 变化小	低	低	不允许频繁丢失
	IEEE1588	<5 kbps 基本恒定	较高	较高	会造成设备无法同步 不允许频繁出现数据丢失
下行	GOOSE	<10 kbps 突发	高	高	命令会丢失 不允许
	MMS	<10 kbps 突发	低	低	命令会丢失 允许个别丢失
	IEEE1588	<10 kbps 基本恒定	较高	较高	允许个别丢失

#### 4.2 网络技术

目前, 电力调度数据网主要采用SDH/MSTP技

术构建, 该技术以时分复用(TDM)的虚电路(VC)交换方式为主, 实现电力数据传输。但从业务需求可知, 本系统区域保护数据传输主要采用IP技术, 而采用分组交换方式PTN技术, 直接面向IP业务传送, 非常适合IP数据传输业务。为了满足区域通信实时性、可靠性等方面的要求。因此采用PTN技术构建通信网络。采用PTN(分组传送网, Packet Transport Network)变电站内各间隔的综合智能设备通过光纤连接至PTN设备; PTN设备通过光纤连接至双重冗余高速PTN网。

PTN在IP业务和底层光传输媒质之间设置一个层面, 以分组业务为核心并支持多业务提供, 具有较低成本, 并具有光传输的优势。拥有优点如下: 采用PWE3封装, 实现虚专线方式; 完善的OAM故障管理和性能管理功能; 网络保护机制应用于各个网络分层和各种网络拓扑; 基于标签进行分组转发。

如图3所示, 基于PTN的网络传送, 可以实现不同业务类别在网络上的虚通路端到端安全传送, 并能够在设备端口上提供平衡。本系统通过PTN网络平台, 可以为各变电站各间隔内的智能综合装置提供SV、GOOSE、IEEE1588、mms等业务通道, 尤其是对上下行SV业务和下行GOOSE业务, PTN网络可以提供端到端的伪线(PW), 实现不同业务的安全隔离, 并能够提供不同的QOS服务等级, 保证高优先级业务的高质安全传送。各种业务在网络传送过程中不会互相干扰。

#### 4.3 通信信息流可靠性

通信系统的故障有多种方式, 诸如系统设备故障和信息延时, 目前对基于硬件的通信系统可靠性分析进行了研究。然后, 丢包和报文时间延时超长反而是系统所面临的重要问题, 无论通信故障的表现形式上, 都可以认为是信息流问题。

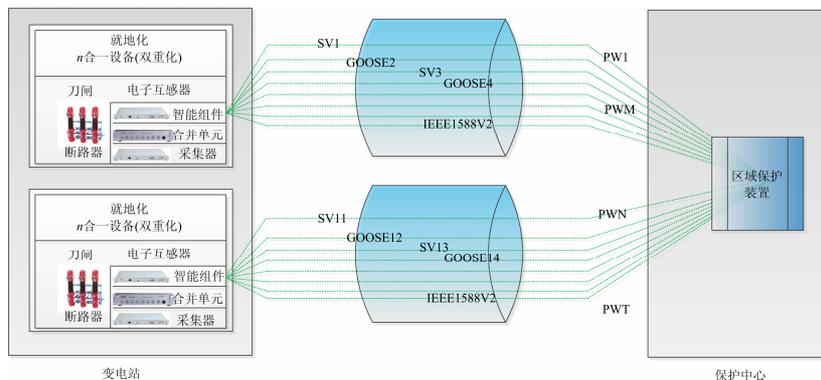


图 3 PTN通信技术

Fig. 3 Pseudo wire technology

在区域层次化保护系统中，需要考虑两种类型的信息流，(1) 变电站采样数据信息流，区域保护需要的原始数据发送到区域保护进行处理。(2) 保护命令信息流，区域保护接收到的原始数据，经过处理、判定，相关的命令被发送至对应的执行单元。

在保护系统的层次结构中。变电站部分采样数据通过区域网络上传到区域保护装置，并依据时标分成不同的数据集。一旦一个时间标记的数据集完成，或者处理时间超出区域保护设置的等待时间，采样数据集发送至对应保护程序。

以保护命令信息流可靠性为例，进行可靠性分析，可以使用以下方法进行。单个数据包的控制命令的可用度为

$$A_0 = 1 - P(T_C) \quad (1)$$

其中： $P(T_C)$ 表示在某个超时参数情况下，保护命令数据包丢失的概率； $T_C$ 表示执行单元的等待时间，这是为确保可靠控制功能情况下的最大延时。

一般地，单一的控制命令数据包不能确保可靠的控制功能。然而，控制命令发送引入了重传机制。某次重发机制下，如图4所示，保护命令数据包的可用度可以为

用度可以为

$$A_i = 1 - P(T_C - iT_p) \quad (2)$$

式中： $T_p$ 表示保护命令在重传机制下的时间间隔； $i$ 表示该保护命令重传次数。通过分析控制机制，保护命令传输相应的FTA可靠性模型如图4所示。保护信息流可用度为式(3)所示。

$$A_{dir} = 1 - P(T_C)P(T_C - T_p) \cdots P(T_C - iT_p) \quad (3)$$

因此，保护命令经过GOOSE重发机制，可靠性能得到较大提高。因此，在系统设计时，需要做以下处理：一，区域通信系统双环网，一主一备，内外环光纤同时放送数据，单网故障时，可以在50 ms进行通信切换，保证数据的畅通。二、在本文保护装置的设计时，如果在规定时间内未收到算法需要的采样数据集，立即闭锁保护。直到收到正常的数据集时，才重新进行保护计算，同样在保护命令发送时，启动GOOSE重发机制。

### 5 系统实验

运用数字实时仿真系统对区域保护系统能够进行实验，电网模型以中国山东德州电网简化网络结构为参考，如图5所示。试验主接线由5条220 kV线路，2台220 kV变压器，2个双母线组成。图中PN1, PM1, MP1, NP1等表示断路器，而K1等表示位置信息。

#### 5.1 系统部署

RTDS输出的各间隔模拟量信号接入电流采集单元，转换后送入综合智能设备，综合智能设备按全网时钟同步信息进行同步采样，同步后的数字量电流、电压信息(SV)经光纤送入PTN数据传输

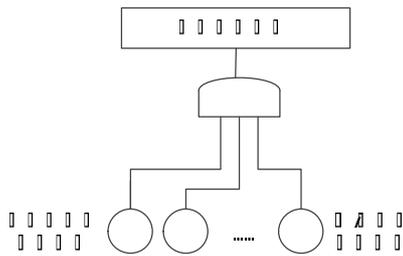


图4 命令数据信息流FTA模型  
Fig. 4 FTA model of control demand information flow

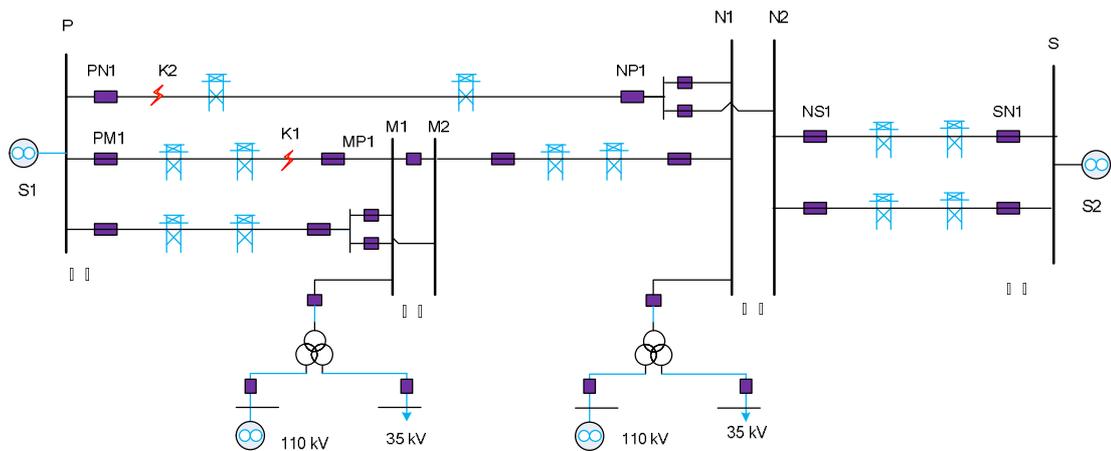


图5 实验用德州电网主接线结构图  
Fig. 5 Main connection line of Dezhou city grid

设备。综合智能设备接收 RTDS 输出的状态信号后, 以 GOOSE 的传输方式经光纤送入 PTN 数据传输设备。并接收区域保护下发的 GOOSE 跳闸命令, 并将其送入 RTDS。区域保护装置接入由 PTN 数据传输设备构成的通信网络。主钟接入区域保护层的 PTN 数据传输设备。采用 IEEE1588 的方式实现变电站层设备的时钟同步。

## 5.2 实验结果分析

实验以区域线路保护为例, 实验数据如表 2 所示。

表 2 简单金属性故障  
Table 2 Simple metallic fault result

故障类型	动作元件	动作时间
K6BN	MP1	TB 10.95 ms
	PM1	TB 10.48 ms
K6BCN	MP1	TA 11.43 ms TB 11.43 ms TC 10.48 ms
	PM1	TA 11.90 ms TB 11.90 ms TC 10.95 ms
K6BC	MP1	TA 11.43 ms TB 11.90 ms TC 10.95 ms
	PM1	TA 12.38 ms TB 11.43 ms TC 10.43 ms
K6ABC	MP1	TA 18.10 ms TB 17.14 ms TC 16.67 ms
	PM1	TA 17.62 ms TB 17.62 ms TC 17.62 ms

1) 简单金属性故障, 模拟 K6 点金属性瞬时短路故障。TA, TB, TC, 表示跳开 A, B, C 相。

2) 永久性故障

分别模拟 K6 点金属性永久短路故障。表 3 为动模试验永久性故障: 断路器跳闸固有时间 40 ms, 合闸固有时间 60 ms, 保护单相重合闸时间 0.5 s。

表 3 永久性故障  
Table 3 Permanent fault result

故障类型	动作元件	动作时间
K6AN 永久	MP1	TA 11.43 ms TA 654.29 ms TB 653.33 ms TC 652.86 ms
		PM1

结果表明, 在区域保护系统中, 变电站全景信息通过 PTN 网络通信, 实现区域保护完全可行, 区域保护动作时间和灵敏度符合区域保护的要求。能在区域范围内实现面向系统的保护。同时采用扩大化差动保护, 能实现基于区域信息的保护, 实现避免连锁跳闸的发生。并且, 在 PTN 网络意外故障的时候, 变电站内就地保护可以在规定的时间内启动, 保证电网系统的安全运行。

## 6 结语

本文尝试从系统融合的途径, 提高变电站信息的利用率, 实现电网系统区域保护, 增加系统的安全性, 降低投资成本。并在国家继电保护及自动化设备质量监督检验中心顺利通过系统试验, 试验表明此种方法实现的区域继电保护系统, 区域信息实时性、可靠性和充足性满足保护要求, 同时本文所述区域保护系统并将在试点工程中应用, 本系统的实施能够进一步促进电网保护系统融合, 保障电网安全运行, 避免大停电事故的发生。

在所述的系统试验基础上, 由于 PTN 网络通信效果较好, 本项目下一步将在通信实验的基础上, 加大 PTN 带宽, 考虑采用 SV, 直接发送采样值, 构建满足电网调控需求的信息平台。因此本文的工作会对今后开展智能电网建设有极大的参考意义。

## 参考文献

- [1] BERTSCH J. Wide-area protection and power system utilization[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 1006-1011.
- [2] 朱林, 段献忠, 苏盛. 基于证据理论的数字化变电站继电保护容错方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 154-161.  
ZHU Lin, DUAN Xian-zhong, SU Sheng. Evidence theory based fault-tolerant method for protective relays in digital substations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 154-161.
- [3] TERZIJA V, VALVERDE G, CAI Deyu, et al. Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 80-93.
- [4] 李振兴, 尹项根. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 179-186.  
LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 179-186.
- [5] 马静, 曾惠敏, 林小华. 基于广域信息多端高压输电区域后备保护[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 61-69.  
MA Jing, ZENG Hui-min, LIN Xiao-hua. A novel wide area backup protection for multi-terminal transmission lines system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 61-69.

- [6] 陈朝晖, 赵曼勇, 周红阳. 基于广域一体化理念的网络保护系统研究与实施[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 106-108.  
CHEN Zhao-hui, ZHAO Man-yong, ZHOU Hong-yang. Research and implementation of network protection system based on integrated and wide area information[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 106-108.
- [7] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于多 Agent 的广域保护系统体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 71-75.  
LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Hierarchy of wide area protection system based on multi-Agent[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 71-75.
- [8] 姜宪国, 王增平. 区域自治式后备保护分区方案[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 234-241.  
JIANG Xian-guo, WANG Zeng-ping. Zoning scheme of regional autonomy backup protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 234-241.
- [9] ZHU Kun, CHENINE M, NORDSTRÖM L. ICT architecture impact on wide area monitoring and control systems' reliability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(4): 2801-2808.
- [10] QIU Mei-kang, GAO Wen-zhong, CHEN Min, et al. Energy efficient security algorithm for power grid wide area monitoring system[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2(4): 715-723.
- [11] 殷玮珺, 袁丁, 李俊刚. 基于 SDH 网络的广域保护系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 120-127.  
YIN Wei-jun, YUAN Ding, LI Jun-gang. Research on wide-area protection system based on SDH network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 120-127.
- [12] TAN J C, CROSSLEY P A, MCLARE P G Application of a wide area backup protection expert system to prevent cascading outages[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2): 375-380.
- [13] 汪咏, 尹项根, 张哲, 等. 基于遗传信息融合技术的广域继电保护[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 174-179.  
WANG Yang, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Wide area protection based on genetic information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 174-179.

收稿日期: 2013-01-31; 修回日期: 2013-09-02

作者简介:

李俊刚 (1981-), 男, 博士生, 研究方向为智能化变电站系统以及智能电网相关产品研发; E-mail: aogusdu@gmail.com

张爱民 (1963-), 女, 博士, 教授, 研究方向为智能电网系统设计与方案研究。