

DOI: 10.7667/PSPC151756

# 基于数据源共享的广域智能保护及控制系统研究与应用

白加林<sup>1</sup>, 高昌培<sup>1</sup>, 王宇恩<sup>1</sup>, 赵武智<sup>1</sup>, 李继晟<sup>2</sup>

(1. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002;  
2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 基于“分层、分区、就地控制”系统方案, 构建了一种多层次的广域智能保护与控制系统。提出了基于协调世界时的时间同步方法和同步相量测量技术, 实现了区域内各站间信息的精准时间同步和实时交互。提出的广域电流差动保护和综合方向保护相结合的保护方法、广域自适应备用电源自动投切技术和智能集合式站域保护, 实现了区域电网多端多元件的故障智能判断、系统决策及电网的自愈控制。在贵州都匀和六盘水两个区域电网的成功应用, 证明了所研发系统的实用性和可靠性。

**关键词:** 广域保护; 自愈控制; 广域备自投; 智能电网; 继电保护

## Research and application of wide-area intelligent protection and control system based on the shared data source

BAI Jialin<sup>1</sup>, GAO Changpei<sup>1</sup>, WANG Yuen<sup>1</sup>, ZHAO Wuzhi<sup>1</sup>, LI Jisheng<sup>2</sup>

(1. Dispatching and Control Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;  
2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** Based on the "hierarchical, zoning, local control" system architecture, a multi-level wide-area intelligent protection and control system is constructed. Through the time synchronization method based on universal time coordinated and the synchronous phasor measurement technology, the precise time synchronization and real-time interaction of the information between the different substations in a region are realized. The protection method of wide-area current differential protection combined with comprehensive directional protection, wide-area adaptive backup automatic switchover technology and intelligent substation area protection technology are proposed. This system can realize the intelligent fault judgment, system decision and self-healing control of a regional power network. The successful application of two regional power grids in Duyun and Liupanshui of Guizhou province proves the practicality and reliability of the system.

**Key words:** wide-area protection; self-healing control; wide-area backup automatic switchover; smart grid; relay protection

## 0 引言

传统继电保护是分布式布置的, 主要利用局部信息构成继电保护判据, 反映的只是系统局部有限的运行状态, 对故障切除以后系统的运行情况不予反映。另外, 传统的二次安全自动装置与继电保护装置相互独立, 两者无法有效协同配合。随着智能电网建设的开展, 智能电网<sup>[1-2]</sup>特征带来的数据共享、分布式电源接入、微电网<sup>[3]</sup>运行等技术, 对继电保护提出了新的要求。基于本地和就近测量信息的常规保护在解决这些问题时面临较大困难和挑

战<sup>[4]</sup>, 需要更加深入地研究新一代继电保护系统。

基于电网多点电气量和状态量信息的广域保护, 近年来引起了国内外电力系统继电保护工作者的关注<sup>[5-14]</sup>。广域保护将紧密关联的若干变电站作为一个区域, 区域内的各保护装置基于数据同步、信息共享的数据平台, 根据网络动态的拓扑结构、实时运行状态, 实现故障点的快速定位, 快速、可靠、智能地隔离故障, 以及实施必要的有利于电网安全稳定、经济运行的预防控制措施。广域保护概念的提出, 为解决智能电网下的保护和控制问题提供了新的思路和方法。同国外的研究相比, 我国对

广域保护的研究多为一些概念介绍和理论研究<sup>[15]</sup>, 工程实际应用还比较少。

为此, 贵州电网公司历时两年组织研究开发了基于数据源共享的广域智能保护及控制系统, 构建了一种智能化的广域保护体系, 实现了区域电网多端多元件的故障智能判断、系统决策及电网自愈控制, 并在贵州的两个区域电网共计 11 个变电站开展了系统建设及应用。

### 1 系统架构及功能配置

#### 1.1 系统架构

广域智能保护及控制系统根据“分层、分区、就地控制”的原则, 按照智能设备层、站域保护层、广域保护层的三层结构进行构建, 如图 1 所示。

第一层为智能设备层, 主要实现各个变电站内电气量(电流、电压等)和开关量(刀闸、断路器状态信息等)的数据采集, 以及跳合闸等控制决策的执行。

第二层为站域保护层, 也可称为变电站中间层, 主要实现变电站范围内的主保护及后备保护功能, 并负责将这些中间测量结果向上层区域保护单元传送, 接受并执行区域保护的决策结果。

第三层为广域保护层, 也可称为区域保护层, 主要依据通过同步数据网络共享的区域内各变电站的电流、电压、断路器状态、故障信息, 对信息进行综合分析做出相应的决策, 实现区域电网的保护与控制功能。

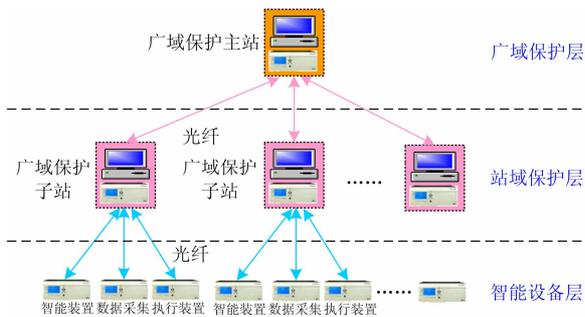


图 1 广域保护系统架构图

Fig. 1 Wide-area protection system architecture diagram

#### 1.2 主要功能配置

广域保护层通过系统主站实现广域保护与控制功能, 主要保护功能为广域电流差动保护、基于权重的综合方向保护、开关失灵远跳等; 主要控制功能为广域自适应备用电源自动投切、故障解列小电源、过载切负荷等功能。

站域保护层通过系统子站采用智能集合式保护

技术实现所在变电站范围内的主保护及后备保护功能, 主要保护功能为母线保护、变压器保护、冗余线路后备保护(如三段距离保护、四段式零序保护)等, 主要控制功能为就地低频低压减载等功能。

### 2 时间同步和实时数据交互技术

#### 2.1 基于协调世界时的时间同步技术

传统保护中对于时间同步有较高要求的主要是线路的电流差动保护, 因保护装置在线路两端成对布置, 故采用的时间同步方案也多为点对点同步方案。广域保护系统一般会涉及几个甚至几十个变电站, 所有站点的测量数据均要求相互间实现精确的时间同步, 传统保护对时方案已经无法满足要求。

广域智能保护及控制系统采用北斗、GPS 及地面网络传输的多源互备高可靠性同步授时技术, 实现了基于协调世界时(Universal Time Coordinated, UTC)<sup>[16]</sup>的精准时间同步, 时间同步精度达到了 $\pm 1 \mu s$ , 为区域内各变电站之间同步共享测量数据创造了先决条件。时间同步方案的实现如图 2 所示, 安装在多个不同地点的广域保护装置均接入以 UTC 为基准的对时信号, 广域保护装置内部的 A/D 采样脉冲与 UTC 基准时间保持绝对同步, 输出数据均附带 UTC 绝对时标。

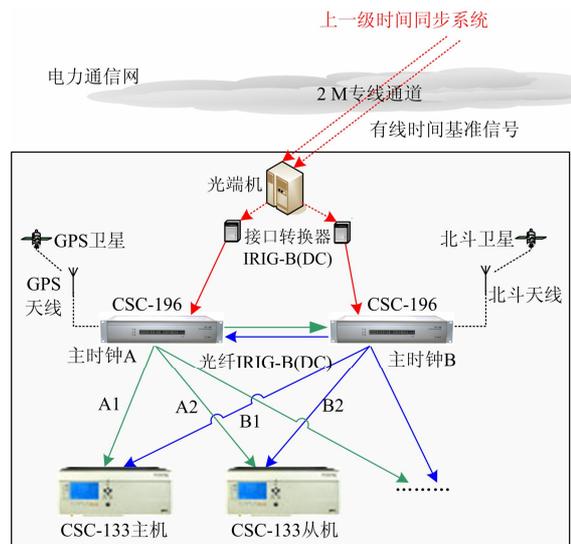


图 2 时间同步系统方案结构图

Fig. 2 Scheme of time synchronization system

方案中配置了两台主时钟, 分别连接两路不同的无线时间基准信号, 即 GPS 和北斗互为冗余备用。两台主时钟各自接收无线时间基准信号以及来自上一级时间同步系统的有线时间基准信号。时钟装置自动选取优先级最高且状态正常时间基准信

号, 确保时钟输出与 UTC 基准时间保持同步。对于 GPS 和北斗系统同时异常的极端特殊情况, 主时钟还可与源自上一级时间同步系统的有线时间基准信号保持同步, 仍可保证时间同步精度。当所有的输入时间基准信号都异常时, 时钟装置依靠内置的高精度晶振仍然可以继续维持时间信号输出, 守时误差小于  $55 \mu\text{s}/\text{h}$ 。

## 2.2 实时数据交互技术

广域智能保护及控制系统各变电站之间的协调控制等功能需要向主站传输信息, 由于站域保护功能完成了本地的就地控制, 协调控制功能不需要全部的信息, 而仅仅是广域保护及控制系统所关心的部分信息。因此, 由各系统子站完成对采样值的计算, 采用 PMU 通信技术专用规约向广域层传递电压、电流的相量信息以及开关量状态、逻辑状态等<sup>[17]</sup>, 通过 SDH<sup>[18]</sup>光纤环网实现各站间的实时数据交互。为保证信息的可靠传输, 采用软件上冗余处理和物理量校验相结合, 使任一个故障的判断和决策都采用多个不同的条件、多重闭锁机制决定系统的保护及控制动作行为, 以有效防止误动或拒动。另外, 在执行远方控制命令时, 采取必要的就地判据校验, 以及按照预定策略实现和本地保护配合。

## 3 多原理结合的广域保护技术

通过基于数据源共享的广域电流差动保护和基于权重的综合方向保护相结合的保护技术, 广域保护及控制系统主站可以实现主保护模式的自适应无缝切换, 避免广域保护功能对同步信号的过度依赖, 确保即使在失去同步信号的情况下, 区域电网范围内的所有线路故障仍可快速识别及隔离, 提高了广域保护的可靠性。

### 3.1 广域电流差动保护

广域电流差动保护主要依据通过同步数据网络共享的区域内各变电站的电流量、电压量、断路器状态等信息, 进行整个区域多端多元件的电流差动计算, 实现各变电站间联络线路的电流差动保护, 智能判断故障线路并快速动作切除故障。

为防止电流差动保护误动, 广域电流差动保护采用了正序、负序电压特征函数闭锁逻辑。首先根据电流差动元件检测故障线路, 在满足差动动作逻辑后, 继续检查相关母线的正序和负序电压, 仅当故障线路两端的正序、负序电压满足正负序特征函数后, 才动作跳闸。

### 3.2 基于权重的综合方向保护

广域分相电流差动保护需依靠通过同步数据网络共享的区域内各变电站的信息, 因此将会受到同

步信号的影响, 当线路两端任一侧同步信号异常, 需自动退出分相电流差动保护功能以防止保护误动。此时, 基于权重的综合方向保护作为广域主保护实现故障定位功能的另一个主要元件, 将自适应地作为快速保护实现故障线路的快速隔离。其原理是在同步信号异常, 分相差动保护失效时, 通过通道判明两侧保护均起动作且判为正向故障时, 判定故障为线路内部故障, 动作跳闸切除故障。

实现快速保护功能的关键是要快速判断出故障线路。基于权重的综合方向保护的原理是当区域电网某条线路发生故障时, 受故障影响的区域内的站域保护由启动元件启动, 通过计算启动后线路两端方向元件的方向, 如果同为正方向则认为为本线路区内故障, 保护瞬时动作切除故障, 否则认为是本线路区外故障, 保护不动作。

为了防止单一方向元件不可靠, 提高故障方向元件的可靠性, 基于权重的综合方向保护采用综合方向元件判断故障方向。综合方向的定义如式(1)所示, 其中  $DIR$  为综合方向,  $D_1$  为阻抗方向,  $D_2$  为负序方向,  $D_0$  为零序方向, 正方向时  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_0$  的数值为 1, 非正方向时为 0。因为  $D_1$  和运行方式无关, 而  $D_2$  和  $D_0$  反映的是保护安装处背后系统阻抗和系统运行方式有关系, 故增大  $D_1$  的权重, 取值为 2。当  $DIR$  大于等于 2 时, 则确认为正方向故障, 否则认为是反方向故障。

$$DIR = 2D_1 + D_2 + D_0 \quad (1)$$

## 4 广域自适应备用电源自动投切

传统备自投基于就地的信息, 可解决处于开环点的变电站备用电源自动投入问题, 但无法适应运行方式的变化, 解决复杂系统、复杂控制问题。另外, 由于信息的局限, 传统备自投控制策略无法实现与安全自动控制装置、保护的配合, 以及不同备自投间的优化协调。

基于网络拓扑分析的广域自适应备自投(简称广域备自投)与传统就地备自投不同, 广域备自投系统不是应用于单个变电站, 而是基于广域信息进行网络拓扑分析, 综合判断失电母线(失电区域), 智能判断最优备自投策略, 发出控制序列命令, 实现区域电网的自愈控制<sup>[19]</sup>。与传统备自投相比, 广域备自投通过综合电网多点信息, 协同故障解列小电源、过载联切负荷技术, 可适应运行方式的变化, 实现多变电站备自投功能的相互配合, 解决远方备用电源自动投入, 单电源串行供电、双端供电情况下供电恢复等问题, 并有效避免非预期的电磁合环运行及非同期合闸对小电源的冲击等问题。

如图 3 所示区域电网, 正常运行时断路器 B4 开口, 传统备自投因缺少广域信息只能实现变电站 S3 的进线备投, 线路 L1 故障时, 变电站 S2 将失压。广域备自投则可通过先跳断路器 B2、B3, 再合断路器 B3、B4, 恢复变电站 S2 的供电, 实现区域电网供电快速恢复。

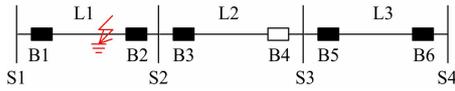


图 3 广域备自投工作原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wide-area backup automatic switchover

广域备自投的控制逻辑如图 4 所示, 实现如下控制功能:

- (1) 运行方式识别(即网络拓扑分析)。基于区域电网的广域信息, 自动识别区域电网的运行方式, 增强对运行方式的适应性。
- (2) 区域故障识别。当发生故障后, 依据故障前、后电网拓扑比对和电气量的辅助判断, 识别故障区域(跳闸开关)和对应的失电区域(失压母线), 进而确定备自投模式(备用电源线路、操作相关开关)。
- (3) 对“故障电源线路”, 搜索相应的“备用电源线路”, 校验备用电源线路是否过载。若过载, 确

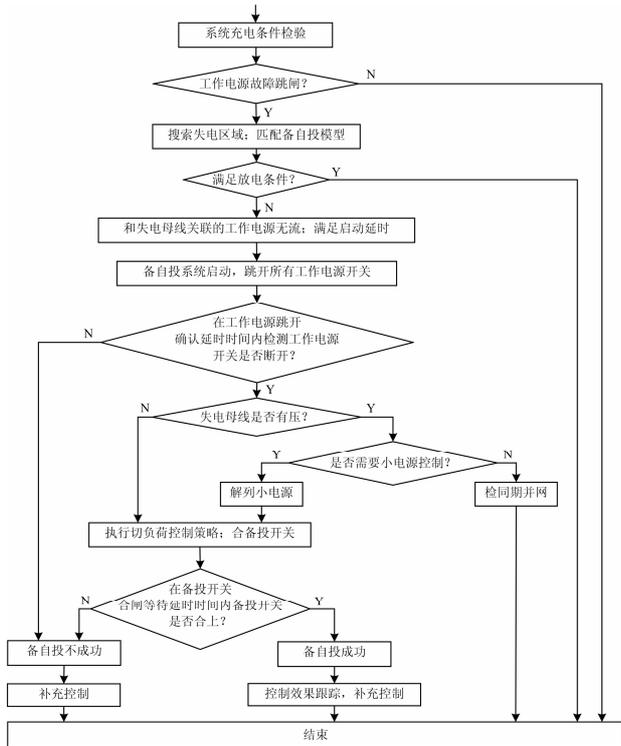


图 4 广域备自投控制逻辑图

Fig. 4 Logic diagram of wide-area backup automatic switchover

定过载量, 延过载方向, 确定切负荷控制方案。

(4) 实现和现有安全稳定控制装置/系统、后备保护的配合。

(5) 跟踪备自投和切负荷控制后控制效果, 必要时实施补救控制。

### 5 智能集合式站域保护

集合式站域保护<sup>[20]</sup>是基于变电站的数据共享特征, 引入集合概念, 利用变电站的全局信息, 形成基于实时共享信息的具有自适应能力的变电站整体保护。广域智能保护及控制系统子站采用智能集合式站域保护技术, 实现了变电站范围内的母线保护、变压器保护、线路后备保护(如距离保护)以及就地低频低压减载等功能, 简化传统后备保护配合, 避免由于保护失配造成的后备保护无选择动作而扩大事故范围。

智能集合式站域保护的集合概念包括两方面: 一是物理集合, 即变电站内所有保护的集合, 二是概念集合, 即与被保护设备相关的保护集合。物理集合是集合保护的实现基础, 概念集合才是集合保护的实质。图 5 所示的网络中包含多种电网结构, 比较容易确定物理集合, 即 A、B、...、G、H 站各装有一套站域保护, 如 B 站的物理集合为 {8, 9, 11}。按照电网结构确定概念集合(假设各变电站的电力信息网络都连通), 以保护 11 为例, 其概念集合为 {11, 12, 16, 10, 8, 9, 7}, 包含的子集合有: 本身 {11}, 对端保护子集 {12}, 下级保护子集 {10, 16}, 背侧保护子集 {8, 9}, 上级保护子集 {7, 10}, 有重要影响的保护子集 {9, 10}。

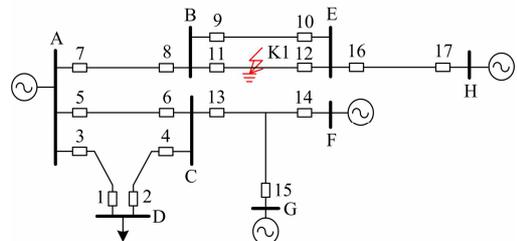


图 5 区域电网示意图

Fig. 5 Schematic diagram of regional power grid

### 6 工程应用与实践

#### 6.1 工程应用实例

广域智能保护及控制系统在贵州都匀和六盘水两个区域电网共计 11 个变电站投入实际运行, 其中 1 个 110 kV 变电站为数字化变电站。两个区域电网各有特点并具有代表性。都匀电网工程位于贵州省都匀地区南部, 由两个 220 kV 变电站、5 个 110 kV

变电站组成, 采用挂灯笼式的串行供电方式, 站点多并存在小水电上网, 使得保护整定、动作配合困难, 原分散布置的就地备自投无法协调, 不能同保护装置、安全稳定控制装置等配合, 无法实现远方恢复供电; 六盘水电网工程位于贵州省六盘水地区, 由 1 个 220 kV 变电站和 3 个 110 kV 变电站形成四角环网运行, 其中 110 kV 杉树林变为数字化变电站, 存在运行方式灵活多变, 供电线路较短、保护整定配合困难、小电源上网、分散布置的备自投不能实现远方恢复供电等问题。

广域保护及控制系统在两个区域电网的建设及应用不仅解决了所在电网面临的问题及困难, 且不对变电站原有的就地保护进行改动, 两者可形成对电气设备的保护“双重化”配置关系, 互为备用。以都匀区域电网的广域保护及控制系统为例, 其配置方案如图 6 所示, 系统主站设在 220 kV 都匀变, 7 个变电站均配置系统子站。系统主站采用双套配置, 子站采用单套配置。两套主站与各子站之间的通信通道分别采用地区光传输 A 网和 B 网, 使得通信通道及通信设备完全独立, 实现了通道的双重化, 并要求通道使用固定路由, 禁止自愈环功能以避免网络延时的变化对保护造成影响。

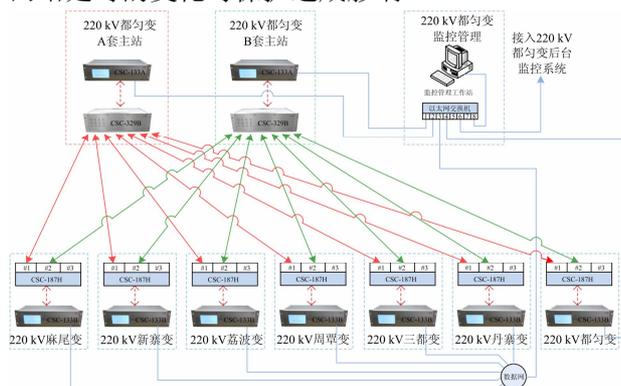


图 6 都匀广域保护系统配置方案

Fig. 6 Configuration scheme of Duyun wide-area protection system

## 6.2 故障实例

两个试点系统自建成投入实际运行以来, 经受了多次电网故障考验, 均可靠动作切除故障, 有力保障了电网的安全稳定运行。例如 110 kV 荔周线曾发生三相故障, 广域保护及控制系统正确动作快速切除故障。根据图 7 所示故障时周覃变的电流和电压录波数据, 从故障发生到切除, 包括断路器动作时间, 仅历时 90 ms。此次故障点位于荔周线线路末端, 若依靠原有的就地保护切除故障, 则需通过距离 II 段保护经较长延时才能动作切除故障。

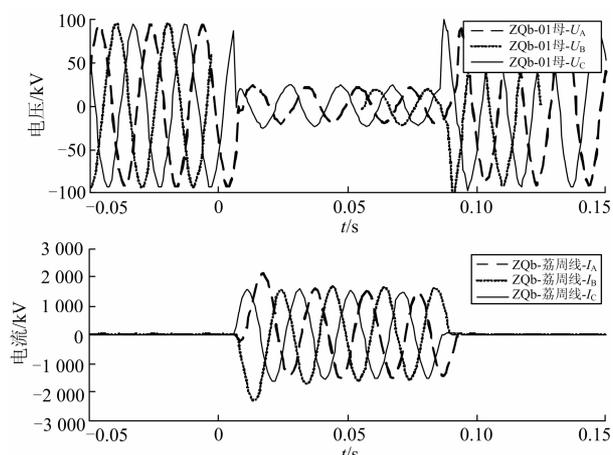


图 7 故障录波数据

Fig. 7 Fault recording data

## 7 结论

目前, 贵州电网建有 110 kV 变电站 400 余座, 多为链式供电, 多级串供方式, 传统备自投无法适应, 且大部分未配置快速保护。在全国范围内的 110 kV 变电站也存在类似问题。本文所提出的广域智能保护及控制系统不仅可以有效解决以上问题, 实现电网的自愈控制及区域电网范围内的故障快速隔离, 进一步推动三道防线的有机配合, 提高电网的安全运行水平, 对防止变电站失压, 保障重要用户供电亦起着重要意义。

广域智能保护及控制系统在两个区域电网的成功应用, 也为新形势智能电网下“保护装置”时代向“保护系统”时代的发展提供了重要的实践经验, 推广应用前景十分广阔。

## 参考文献

- [1] 毕天姝, 刘素梅, HUANG Zhengyu, 等. 智能电网含义及共性技术探讨[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2011, 38(2): 1-9.  
BI Tianshu, LIU Sumei, HUANG Zhengyu, et al. The implications and implementations of smart grid in different countries[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2011, 38(2): 1-9.
- [2] 高志远, 姚建国, 曹阳, 等. 智能电网发展机理研究初探[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 116-121.  
GAO Zhiyuan, YAO Jianguo, CAO Yang, et al. Primary study on the development mechanism of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 116-121.
- [3] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.  
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key

- technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [4] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 13-18.  
WANG Zengping, JIANG Xianguo, ZHANG Zhichao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 13-18.
- [5] BERTIL I, PER-OLOF L, DANIEL K, et al. Wide area protection against voltage collapse[J]. IEEE Computer Application in Power, 1997, 10(4): 30-35.
- [6] Technical Brochure No. 187, CIGRE. System protection schemes in power networks[R]. 2001.
- [7] 易俊, 周孝信. 电力系统广域保护与控制综述[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 7-12, 30.  
YI Jun, ZHOU Xiaoxin. A survey on power system wide-area protection and control[J]. Power System Technology, 2006, 30(8): 7-12, 30.
- [8] ADAMIAK M G, APOSTOLOV A P, BEGOVIC M M, et al. Wide area protection-technology and infrastructures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 601-609.
- [9] 尹项根, 汪旸, 张哲. 适应智能电网的有限广域继电保护分区与跳闸策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 1-7.  
YIN Xianggen, WANG Yang, ZHANG Zhe. Zone-division and tripping strategy for limited wide area protection adapting to smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 1-7.
- [10] 马静, 李金晖, 李金龙, 等. 快速适应电网结构变化的广域后备保护新方法[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 214-221.  
MA Jing, LI Jinhui, LI Jinlong, et al. A novel wide area backup protection method fast adapting to variation of network configuration[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 214-221.
- [11] 张新昌, 张项安. 层次化保护控制系统及其网络通信技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 129-133.  
ZHANG Xinchang, ZHANG Xiangan. Research of hierarchical protection & control system and its communication technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 129-133.
- [12] 张兆云, 陈卫, 张哲, 等. 一种广域差动保护实现方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 297-303.  
ZHANG Zhaoyun, CHEN Wei, ZHANG Zhe, et al. A method of wide-area differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 297-303.
- [13] 余文辉, 王少荣, 柳斐, 等. 基于在线自组织同步MAS的电网广域保护系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 69-76.  
YU Wenhui, WANG Shaorong, LIU Fei, et al. A wide-area protection system based on synchronized MAS self-organizing online for power grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 69-76.
- [14] 马静, 裴迅, 马伟, 等. 基于方向权重的广域后备保护跳闸策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 107-114.  
MA Jing, PEI Xun, MA Wei, et al. Tripping strategy based on directional weight for wide-area backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 107-114.
- [15] 丁伟, 何奔腾, 王慧芳, 等. 广域继电保护系统研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 145-155.  
DING Wei, HE Benteng, WANG Huifang, et al. Overview of wide-area relaying protection system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 145-155.
- [16] 董绍武. 守时中的若干重要技术问题研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(国家授时中心), 2007.  
DONG Shaowu. Study on several important technical issues in time-keeping[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center), 2007.
- [17] 杨东, 许君德, 吴京涛. 电力系统广域测量系统高密度时间序列数据的压缩处理方法: 中国, ZL 2010 1 0034265.5[P]. 2010-08-04.
- [18] 殷玮珺, 袁丁, 李俊刚, 等. 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): 120-123, 127.  
YIN Weijun, YUAN Ding, LI Jungang, et al. Research on wide-area protection system based on SDH network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 120-123, 127.
- [19] 高昌培, 王宇恩, 戴宇, 等. 一种基于同步相量测量的广域自适应备自投方法: 中国, ZL 2012 1 0359469.5[P]. 2013-01-30.
- [20] 陈磊, 张侃君, 夏勇军, 等. 智能变电站站域保护研究综述[J]. 华东电力, 2013, 41(5): 947-953.  
CHEN Lei, ZHANG Kanjun, XIA Yongjun, et al. Research overview of substation area protection in intelligent substation[J]. East China Electric Power, 2013, 41(5): 947-953.

收稿日期: 2015-09-30; 修回日期: 2015-11-25

作者简介:

白加林(1984-), 男, 硕士, 工程师, 现从事电力系统继电保护运行方面的工作; E-mail: baibjl@163.com

高昌培(1956-), 男, 教授级高工, 主要从事为电力系统继电保护管理方面的工作;

王宇恩(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护管理方面的工作。

(编辑 魏小丽)