

DOI: 10.7667/PSPC151483

一种基于 DA 系统适应线路结构动态调整的 双向闭锁式保护方法

袁彦¹, 陈筱菁², 张仲夏², 俞小勇³, 周杨珺³, 薛永端²

(1. 广西电网有限责任公司柳州供电局, 广西 柳州 545000; 2. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580; 3. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530000)

摘要: 利用闭锁式保护可以确保配电线路多级保护间的选择性, 提高供电可靠性。但已提出的闭锁式保护方案均需要出口断路器参与, 未考虑含分支线路以及网络拓扑动态变化等问题。在配网自动化系统基础上提出一种双向闭锁的保护新方法, 主站通过查询线路拓扑结构区分线路中各馈线终端单元 FTU(Feeder Terminal Unit)角色, 重点判断与出口断路器相邻的 FTU 位于线路首端还是末端。感受到故障电流的各 FTU 分别向邻居 FTU 发送闭锁信号, 不同角色 FTU 对应不同判据判断故障区段并切除。该方法不需要出口保护配合, 能适应带有单联络与多联络的线路, 也能适应多端保护(主干线路与分支线路均配置保护)等复杂情况。通过静模试验分析验证了该算法的选择性与快速性。

关键词: 配电线路保护; 馈线终端单元; 配网自动化; 闭锁式保护; 双向闭锁

A bi-direction blocking protection method based on DA system adapting to the dynamic adjustment circuit structures

YUAN Yan¹, CHEN Xiaoru², ZHANG Zhongxia², YU Xiaoyong³, ZHOU Yangjun³, XUE Yongduan²

(1. Guangxi Liuzhou Power Supply Company, Liuzhou 545000, China; 2. College of Information and Control Engineer, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China; 3. Electric Power Research Institute, Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530000, China)

Abstract: Using the blocking protection guarantees the selectivity between multilevel protections of distribution line and improves the power distribution reliability. But the existing blocking protection methods need the cooperation of outlet circuit breakers, and are not suitable for the system with branch lines and network topology with dynamic change. A novel method of bi-direction blocking protection based on distribution automation system is proposed. In this method the master station identifies the position of every FTU (Feeder Terminal Unit) according to the network topology, and mainly determines the FTU adjacent to outlet circuit breakers whether locates at the head or the end of line. The FTU which recognizes the fault current sends blocking signal to their adjacent FTU, and then the FTU of different roles determines the fault location and clears the fault according to different criterions. This method can clear the fault of tie lines and branch lines rapidly and accurately. The selectivity and rapidity are verified by static model test analysis.

Key words: protection of distribution line; feeder terminal unit (FTU); distribution automation system; blocking protection; bi-direction blocking

0 引言

配电负荷数量日渐变大且沿线路分布不均匀, 为减小故障停电区域和停电时间, 需将线路划分为多个区段进行保护。配电线路较短, 电流保护只能通过时间级差(一般为 0.3 s)配合, 当保护级数过多

时(如三级或更多级), 将导致出口断路器保护动作过长(>1 s)。短路电流以及电压暂降长时间存在, 威胁配电网及设备安全、影响电压质量及敏感负荷的正常运行, 因此常规电流保护不能满足三级及以上保护配合的要求^[1]。

传统的单向闭锁式保护可有效解决多级保护

的快速配合问题, 但主要适用于单电源供电的辐射型线路^[1]。对于多联络多备供线路, 其仍只向上级(电源侧)保护发送闭锁信号, 当联络开关位置不确定时, 需要为每个保护安装 PT 以获得电压信号, 才能根据功率流向确定其上级, 实际应用中易受投资、安装空间(施工水平)等限制。

文献[2]提出基于过流元件的闭锁式速切保护和基于低电流、低电压元件的允许式速切保护; 并对速切保护所采用的通信方式进行了分析研究, 对利用中间继电器、数传电台和光纤三种通信方式进行保护信息交换的延时进行了实验室测试, 测试结果表明这三种通信均能满足现场通信需求。文献[3-5]分析了方向闭锁式过电流保护和方向允许式过电流保护的动作用原理, 提出了一种基于通信通道的配电网快速保护方法, 该方法可有选择性地快速切除故障, 实现瞬时动作隔离故障, 并具有完备的后备保护。上述方法均需要出口断路器保护参与闭锁信号的发送与接收, 现场一般不能满足该条件; 文献[3-5]所提出的方法也未考虑配电线路负荷转供引起的网络拓扑结构变化问题。上述方法均不适用于带分支的线路。

近年来, 数字化变电站技术^[6-8]和基于对等通信的分布式智能控制技术^[9-11]等配电网自动化技术的快速发展, 为从根本上提高和改善电力系统配电线路继电保护的性能提供了契机, 涌现大批闭锁式保护新方法^[12]。本文针对含有分支线拓扑结构可变且出线保护不参与闭锁的配电线路, 分析了不同位置的故障特征, 提出了一种基于主站识别各 FTU 角色的双向闭锁保护新方法, 给出了判据和实现流程。以配电自动化系统为平台, 采用故障测量数据、开关变位信息、闭锁信号和跳闸命令等保护信息与其他运行监控与管理数据(如“三遥”数据)混合传输的通信模式^[13-14], 开发了保护系统, 利用静模实验验证该方法的正确性与快速性。

1 基于 DA 系统适应线路结构动态调整的闭锁式保护原理

一个典型含有分支线路的手拉手闭环线路如图 1 所示, 由 A、B 双电源供电, QF_6 、 QF_7 为出口断路器, 采用传统保护方法(既不能发送闭锁信号, 也不能接受闭锁信号); 线路分段开关 $QF_1 \sim QF_5$ 为断路器; QF_5 为联络开关, 即区域 1~区域 4、区域 6 由 A 电源供电, 区域 5 由 B 电源供电。随着线路建设, 可增加分支线路, 也可在支线末端添加备电源 C。

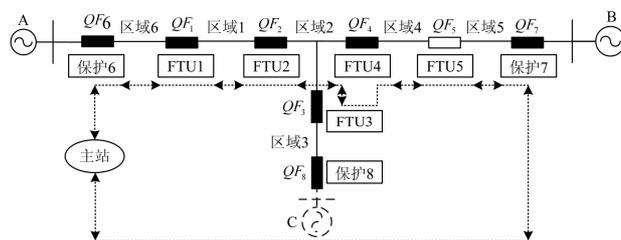


图 1 简单的配电线路结构图

Fig. 1 Sketch diagram of typical distribution line

如图 1 所示, FTU2、FTU3、FTU4 至少有两个邻居, 当主供电电源变化或者联络开关位置变换时, FTU 不能判断自身体上级。基于此, 当故障发生时, 感受到过流的 FTU 向所有邻居发送闭锁信号。由于各 FTU 的邻居数量不同, 导致各 FTU 收到闭锁信号的数量也不相等, 判断是否命令跳闸的判据也不同, 因此需要对不同位置的 FTU 进行区分。

对于与出口断路器相邻的 FTU1, 若 FTU1 下游非紧邻区域(区域 m , $m=2\sim 4$)故障, 应由 QF_m 动作切除故障, 此时 FTU1 感受到过电流且收到一个来自 FTU2 的闭锁信号, FTU1 应闭锁 QF_1 。如图 2(a)所示。若联络开关闭合, 出口断路器 QF_6 跳开, 整条线路由电源 B 供电, 如图 2(b)所示。若区域 6 故障, 应由 QF_1 动作切除故障, 但此时 FTU1 也收到一个来自 FTU2 的闭锁信号。所以当 FTU1 收到一个闭锁信号时, 有时需要 FTU1 闭锁跳闸, 有时需要 FTU1 命令跳闸。因此, 需要预先确定该条线路的主供电电源方向, 通过配网自动化系统主站查询线路结构信息, 预先判断处于边界位置的 FTU1 是否与主供电电源侧出口断路器相邻, 若相邻, 故障发生后, 当收闭锁信号时闭锁, 若不相邻, 故障发生后, 无论是否收闭锁信号都应动作。

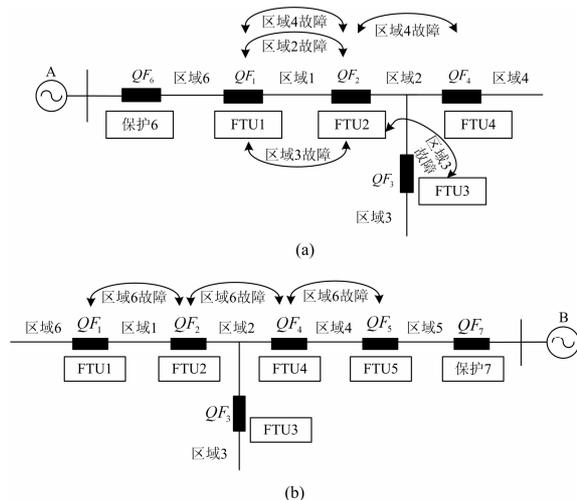


图 2 原理分析示意图

Fig. 2 Principle diagram

对于有三个邻居的 FTU2, 至多有两个邻居可以同时感受到过流。如图 2(a)所示, 若 FTU2 下游非紧邻区域(区域 $n, n=3、4$)故障, FTU2 收到来自上游 FTU1 和下游 FTU n 的两个闭锁信号, 此时, FTU2 应闭锁 QF_2 。若 FTU2 下游紧邻区域(区域 2)故障, FTU2 仅收到一个来自上游 FTU1 的闭锁信号, 此时 FTU2 应命令 QF_2 跳闸。对于此类 FTU, 主站查询到该 FTU 有至少两个邻居, 故障后感受到过电流后, 若收到两个闭锁信号命令闭锁, 收到一个闭锁信号命令跳闸。

对于位于分支线路末端 FTU3 和紧邻联络开关 FTU4, 若下游紧邻区域故障, 应由其命令对应断路器动作跳闸, 此时其仅收到来自其上游 FTU 发送的一个闭锁信号。对于此类位于线路末端的 FTU, 只要感受到过电流就应命令跳闸, 与其是否收到闭锁信号和收到多少闭锁信号无关。

其余典型的的不同主供方不同位置故障发生时, 各 FTU 动作情况如下表 1~3, 此处不再详述判断过程。表 1 分析了图 1 所示线路各区域发生故障时各 FTU 接收闭锁信号数量及动作情况。表 2 分析了图 1 所示线路中联络开关闭合, QF_2 作为联络开关, 电源 A、B 分别供电时各区域发生故障的情况, 各保护装置接收闭锁信号数量及动作情况。表 3 分析了联络开关闭合, QF_6 跳开, 区域 1~6 全部由 B 电源供电时, 各区域发生故障时, 各保护装置接收闭锁信号数量及动作情况。

表 1 电源 A 主供方不同位置故障时各保护动作情况

Table 1 Tripping condition of power A supply of different fault location

保护 装置	不同区域故障时, 各保护收到闭锁信号数量/动作情况				
	6	1	2	3	4
保护 6	0/T	0/H	0/H	0/H	0/H
FTU 1	-	0/T	1/B	1/B	1/B
FTU 2	-	-	1/T	2/B	2/B
FTU 3	-	-	-	1/T	-
FTU 4	-	-	-	-	1/T

表 2 电源 A、B 主供方不同位置故障时各保护动作情况

Table 2 Tripping condition of power A or B supply of different fault location

保护 装置	不同区域故障时, 各保护收到闭锁信号数量/动作情况					
	6	1	5	4	2	3
保护 6	0/T	0/H	-	-	-	-
FTU 1	-	0/T	-	-	-	-
保护 7	-	-	0/H	0/H	0/H	0/H
FTU 5	-	-	-	0/T	1/B	1/B
FTU 4	-	-	-	-	1/T	2/B
FTU 3	-	-	-	-	-	1/T

表 3 电源 B 主供方不同位置故障时各保护动作情况

Table 3 Tripping condition of power B supply of different fault location

保护 装置	不同区域故障时, 各保护收到闭锁信号数量/动作情况					
	5	4	2	3	1	6
保护 7	0/T	0/H	0/H	0/H	0/H	0/H
FTU 5	-	0/T	1/B	1/B	1/B	1/B
FTU 4	-	-	1/T	2/B	2/B	2/B
FTU 3	-	-	-	1/T	-	-
FTU 2	-	-	-	-	1/T	2/B
FTU 1	-	-	-	-	-	1/T

表 1~3 中, “B” 表示闭锁, “T” 表示跳闸, “H” 表示后备保护, “-” 表示未感受到过流。

与出口断路器相邻的 FTU 区别于其他, 若主站判断该 FTU 在主供电源侧, 其感受到过电流后, 收到单个闭锁信号则闭锁, 未收到闭锁信号则动作, 将这类终端命名为首端 FTU, 若主站判断该 FTU 在线路末端, 则其感受到过电流就应立即动作跳闸, 将这类终端命名为末端 FTU。如图 1 所示线路结构中 FTU1 属于首端 FTU, FTU3、FTU4 属于末端 FTU。对于 FTU2, 其感受到过电流且收到双侧闭锁信号则闭锁, 如感受到过电流且收到一侧闭锁信号或没有收到闭锁信号则动作, 命名为中间 FTU。

各终端单元之间以及与主站间通过以太网^[1,16]相连, 互相通讯。主站每隔 10s 查询并更新线路结构, 下发各 FTU 角色。不同角色 FTU 在感受到过电流后, 通过自身受到闭锁信号个数判断是动作还是闭锁。

基于 DA 系统适应线路结构动态调整的闭锁式保护方法作为配电线路的主保护, 需一个延时 Δt 的过流保护作为后备保护, 构成完整的馈线快速保护系统。(1) 图 1 中区域 6 故障, 线路中各 FTU 均无法检测到过电流, 故无法切除故障, 必须由出线断路器 QF_6 动作跳闸; (2) 其他区域故障, 经 Δt 延时后, 若线路中仍存在过电流, 这表明双向闭锁保护失效, 可由出线断路器 QF_6 动作跳闸切除故障。

随着线路建设, 可在不同区域增加支线, 或在支线末端添加备供电源(如图 1 中虚线所示的电源 C), 本文所提出的方法仍能满足保护要求。

2 保护判据

由于首末端 FTU 与中间 FTU 动作判据不同, 故分别给出相应判据。

1) 对于首端 FTU, 其感受到过电流, 并接收到一侧闭锁信号, 相应断路器闭锁, 不动作; 感受到过电流, 但未接收到闭锁信号, 相应断路器动作。

2) 对于末端 FTU, 感受到过电流, 相应断路器动作。

3) 对于中间 FTU, 感受到过电流并接收到两侧闭锁信号, 相应断路器闭锁, 不动作; 感受到过电流, 且只收到一侧闭锁信号或没有收到闭锁信号, 相应断路器动作。

4) 在故障后经过一个 Δt 的延时, 若仍存在过电流, 则出口断路器动作。

3 模拟系统验证

3.1 试验综述

在配电自动化系统的基础上, 开发了双向闭锁式保护应用软件。系统采用光纤以太网通信, 故障测量数据、开关变位信息、闭锁信号和跳闸命令等保护信息与管理数据(如“三遥”数据)混合传输。

利用配电网静态模拟实验屏模拟如图 1 所示含分支线的配电架空线路, 所有保护装置均配置重合闸。采用故障录波器记录试验波形分析测试结果, 故障录波器配置如表 4 所示。

在 $QF_1 \sim QF_6$ 分别作为联络开关的动态拓扑结构下, 模拟区段 1~区段 6 不同区段发生永久性故障和瞬时性故障, 每种情况模拟 3 次。结果显示, 所有故障系统均正确动作, 动作时间最大约为 190 ms。说明本文提出的双向闭锁式保护算法在技术上

是可行的, 装置实时性也满足要求。

表 4 故障录波器配置表

Table 4 Configuration table of the fault recorder

模拟量通道	1	5	6	7	8
	电源母线侧电压	FTU1-A	FTU2-A	FTU3-A	FTU4-A
开关量通道	1-01	1-02	1-03	1-04	
	QF_1 开关状态	QF_2 开关状态	QF_4 开关状态	QF_3 开关状态	

以下仅列举两种典型情况进行分析, 其余不在赘述。

3.2 实例一

图 1 中, QF_5 为联络开关, 主站查询线路拓扑结构, FTU1 为首端 FTU, FTU2 为中间 FTU, FTU3、FTU4 为末端 FTU。

当区域 3 在 0 ms 发生永久性故障时, FTU1~3 感受到过电流, 如图 4 中模拟量 5、6、8。187.20 ms 时 QF_3 动作切除故障, 如图 4 中开关量 1-04 所示, 开关状态细线表示开关合, 粗线表示开关分。符合表 1 中第四行第四列期望动作情况。1245.60 ms 时 QF_3 重合到故障, 1433.80 ms 时 QF_3 再次跳开故障, 动作仍然正确。

延时 Δt , 线路中检测不到过电流, 其它保护装置复归。

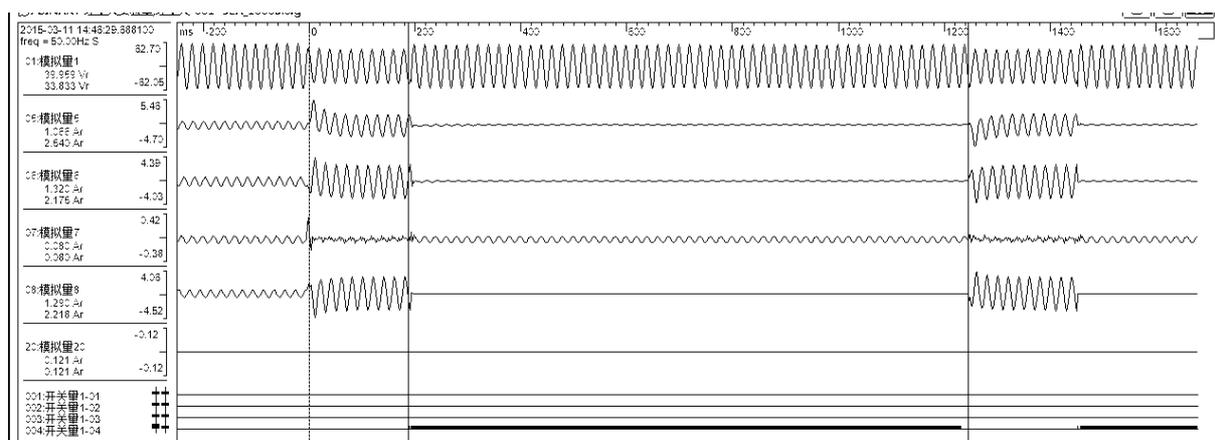


图 4 实例 3.2 录波波形图

Fig. 4 Record the oscillograph of example 3.2

3.3 实例二

图 1 中, QF_2 为联络开关, QF_3 闭合。区域 2~4 由 B 电源供电, 如图 5 所示。主站查询线路拓扑结构, FTU1、FTU5 为首端 FTU, FTU3 为末端 FTU, FTU4 为中间 FTU。下面详细分析(1)区域 1 故障, (2)区域 2 故障, 两种情况。

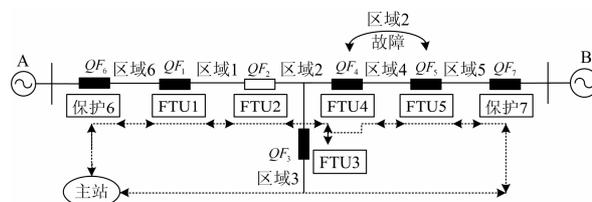


图 5 区域 2~4 由 B 电源转供结构图

Fig. 5 Supply structure chart of power B instead of A for area 2 to 4

(1) 当区域 1 在 0 ms 发生永久性故障时, 仅首端 FTU1 感受到过电流, 205.40 ms 时 QF_1 动作切除故障, 符合表 2 中第二行第二列期望动作情况。1258.40 ms 时 QF_1 重合到故障, 1463.80 ms 时 QF_1 再次跳开故障, 动作仍然正确。

延时 Δt , 线路中检测不到过电流, 其它保护装置复归。

(2) 当区域 2 在 0 ms 发生永久性故障时, 首端 FTU5、中间 FTU4 感受到过电流, 208.00 ms 时 QF_4 动作切除故障, 符合表 2 中第五行第五列期望动作情况。1244.80 ms 时 QF_4 重合到故障, 1455.80 ms 时 QF_4 再次跳开故障, 2489.40 ms 时 QF_4 二次重合到故障, 2691.60 ms 时 QF_4 再次跳开故障。

延时 Δt , 线路中检测不到过电流, 各 FTU 复归。

4 结论

一种基于 DA 系统适应线路结构动态调整的闭锁式保护方法, 在配网自动化基础上, 利用主站查询线路拓扑结构, 判断线路上各 FTU 角色, 若为首端 FTU, 其感受到过电流, 未接收到闭锁信号, 相应断路器动作; 若为末端 FTU, 感受到过电流, 相应断路器动作; 若为中间 FTU, 感受到过电流, 且只收到一侧闭锁信号或没有收到闭锁信号, 相应断路器动作。故障发生后, 感受到过电流的不同角色的 FTU 通过自身接收到的闭锁信号数量来判断故障区段位置并动作。此方法无需出口断路器参与闭锁, 且更好的适合于含有分支线的、多备电源的复杂线路, 有效地解决了配电线路的快速故障隔离和系统重构, 在保护失败后, 仍有完备的后备保护施加补救。

参考文献

[1] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[2] 丛伟, 潘贞存, 郑罡, 等. 配电线路继电保护系统中全线速切技术的应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 91-95.
CONG Wei, PAN Zhencun, ZHENG Gang, et al. Fast relaying protection technology for distribution line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 91-95.

[3] 周念成, 贾延海, 赵渊. 一种新的配电网快速保护方案[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 68-73.
ZHOU Niancheng, JIA Haiyan, ZHAO Yuan. A new

high-speed protection scheme for distribution network[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 68-73.

[4] 肖永, 邹庆, 周念成. 配电线路快速保护原理及分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004, 27(11): 30-33.
XIAO Yong, ZOU Qing, ZHOU Niancheng. Principle and analysis of rapid feeder protection system for distribution network[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2004, 27(11): 30-33.

[5] 王建辉. 电网配电线路快速保护工作原理探讨[J]. 科技与企业, 2011(9): 125-126.
WANG Jianhui. Approach the operating principle of rapid feeder protection system for distribution network[J]. Technology and Business, 2011(9): 125-126.

[6] 窦晓波. 基于 IEC61850 的新型数字化变电站通信网络的研究与实践[D]. 南京: 东南大学, 2006.
DOU Xiaobo. Research and practice of communication networks in digital substations based on IEC61850[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.

[7] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67-87.
GAO Xiang, ZHANG Peichao. Main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-87.

[8] 李先妹, 黄家栋, 唐宝锋. 数字化变电站继电保护测试技术的分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 105-108.
LI Xianmei, HUANG Jiadong, TANG Baofeng. Research on testing technology of relay protection for digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 105-108.

[9] 徐丙垠, 薛永端, 李天友, 等. 智能配电网广域测控系统及其保护控制应用技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 2-9.
XU Bingyin, XUE Yongduan, LI Tianyou, et al. A wide area measurement and control system for smart distribution grids and its protection and control applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 2-9.

[10] 蒋建国, 夏娜. 基于 MAS 的分布式智能控制初探[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005, 28(9): 1085-1088.
JIANG Jianguo, XIA Na. Research on the MAS based intelligent distributed control system[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition),

- 2005, 28(9): 1085-1088.
- [11] 张晓虎, 罗隆福, 李勇, 等. 基于光纤以太网通信的大功率工业整流系统多点测量与能效分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 111-121.
ZHANG Xiaohu, LUO Longfu, LI Yong, et al. Energy efficiency analysis and multi-point measurement of high power industrial rectifier system based on optic fiber ethernet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 111-121.
- [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] 李响, 李彦, 刘革新. 光纤纵联保护通道故障在线诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 147-150.
LI Xiang, LI Yan, LIU Geming. A channel fault diagnosis method for fiber pilot relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 147-150.
- [14] 伊洋, 刘育权, 陈宇强, 等. 基于信息综合判断的智能变电站网络通信故障定位技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 135-140.
YI Yang, LIU Yuquan, CHEN Yuqiang, et al. Research of network communication fault location technique in smart substation based on comprehensive information judgment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 135-140.
- [15] 齐昕, 张育臣, 唐喜. 基于 IEC61850 的配网成套开关状态监测系统研制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 109-114.
QI Xin, ZHANG Yuchen, TANG Xi. Development of distribution network switchgear condition monitoring system based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 109-114.
- [16] 范开俊, 徐丙垠, 陈羽. 配电网分布式控制实时数据的 GOOSE over UDP 传输方式[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 115-120.
FAN Kaijun, XU Bingyin, CHEN Yu. GOOSE over UDP transmission mode for real-time data of distributed control applications in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 115-120.

收稿日期: 2015-09-01; 修回日期: 2016-04-09

作者简介:

袁彦(1981-), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为智能电网及配电自动化技术; E-mail: yuan_y.lzg@gx.csg.cn

陈筱菁(1990-), 通讯作者, 女, 研究生, 主要研究方向为配电自动化及配网保护; E-mail: chenxiaoru1990@163.com

张仲夏(1990-), 男, 研究生, 主要研究方向为配电网保护及配电自动化技术。E-mail: zhangzhongxia2015@foxmail.com

(编辑 张爱琴)