

DOI: 10.7667/PSPC151097

# 一种馈线自动化仿真培训系统

高洪雨<sup>1,2</sup>, 陈青<sup>1</sup>, 徐丙垠<sup>3</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 宋卫平<sup>4</sup>

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061; 2. 国网技术学院, 山东 济南 250002;  
3. 山东理工大学智能电网研究中心, 山东 淄博 255049; 4. 国网山东省电力公司泰安供电公司, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 针对复杂配电自动化生产过程操作实验成本较高, 影响供电可靠性以及危险性较大等问题, 给出了一种馈线自动化仿真培训平台构建方法。利用该方法, 对配电主站、配电一次系统、EPON 通信系统组成的馈线自动化系统进行仿真, 实现了配电系统、EPON 系统故障模拟, 并对常见 EPON 系统故障进行了实测分析。理论分析与仿真案例表明, 基于 EPON 通信的馈线自动化仿真系统建模方法是可行和有效的。该模型能反映馈线自动化系统的实际运行特性, 从而提高仿真模型的精确性和仿真功能的多样性。

**关键词:** EPON 通信; 馈线自动化; 仿真培训; 故障模拟

## A simulation training platform for feeder automation

GAO Hongyu<sup>1,2</sup>, CHEN Qing<sup>1</sup>, XU Bingyin<sup>3</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>, SONG Weiping<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China; 2. State Grid of China Technology College, Jinan 250002, China; 3. Research Center for Smart Grid, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 4. Taian Power Supply Company, Shandong Electric Power Corporation, Taian 271000, China)

**Abstract:** A novel construction method of feeder automation simulation training platform based on EPON is proposed to reduce the experimental cost of distribution automation system, improve the reliability of power supply and escape from harm of high voltage operation. By this method, the micro-simulation system consists of distribution simulation networks and EPON communication links served with power station system. At the same time, this paper proposes the fault setting algorithm of distribution network and EPON system, analyzes measured fault data of the communication system. The theory and cases show that, the simulation method of feeder automation based on EPON is feasible and effective. The system modules can simulate the operation characteristics of feeder automation, and thus improve the accuracy and diversity of the simulation function.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407105).

**Key words:** EPON communication; feeder automation; simulation training; fault simulator

## 0 引言

配电网作为现代电力系统的末端, 既直接与用户相连, 又承载分布式电源、微电网、大规模储能装置等的接入, 其自动化水平是实现供电安全、优质、经济等要求的关键<sup>[1-3]</sup>。目前, 配电自动化及其仿真系统规模不一, 形式多样, 为了培训目的<sup>[4-5]</sup>或者运行、分析<sup>[6-10]</sup>, 可以实现配电自动化的某些功能或者大部分功能, 从而为分析和学习配电自动

化系统的组成、功能、高级应用提供了依据。

文献[4]的仿真系统基于电力系统网架, 针对供电可靠性测试和分析的目的而开发。文献[5]基于生产型配电自动化物理系统, 对不同类型馈线自动化系统(Feeder automation, FA)功能进行测试分析, 是专为培训和教学目的开发的。文献[6]用断路器和负荷开关将配电网主干线分段, 通过智能控制器配合减少出线断路器的跳闸, 在发生故障的架空线路中自动隔离故障区域, 缩短故障查找的时间, 迅速恢复非故障区域的供电。文献[7]将馈线自动化自下而上分为馈线层、馈线岛层和系统层三个层次, 在馈

线层和馈线岛层上, 根据单电源线路、馈线分支线等区域的不同特点实施不同的 FA 方案。文献[8]提出当配电网通信链路均畅通时, 主站利用集中式 FA 对配电网进行故障监测和处理; 当某子站监测到自身与主站之间的通信链路断开时, 该子站调用就地型馈线自动化方法, 提高了通信链路故障状态下的可靠性。文献[9-10]总结了配电自动化系统试验技术发展, 提出了用低压设备模拟高压输配电设备的配电自动化装置技术性能测试平台的方法。以上 FA 系统与方法, 有的面向配电网 FA 的功能改进, 有的是综合性的仿真系统, 以及专注于对某种仿真方法进行探索, 或者处置多发的通信故障的策略。

本文对配电网架和配电设备进行物理与数字仿真, 并基于配电自动化主站(子站)、以太网无源光网络(Ethernet Passive Optical Network, EPON)、配电自动化终端等构成馈线自动化系统。该系统实现了 FA 与一次系统的小型化, 通信网络、一次以及二次设备按照仿真对象集成, 可以仿真通信网络、配电网中不同地点、不同类型的故障, 为 FA 系统的测试、分析、培训提供了一种有效平台。

这种混合仿真既反映真实设备的原理及实现过程, 又能复现配电网一次、二次系统及通信系统故障, 因此不仅能够用于运行操作人员的培训, 而且能进行维护、检修及继电保护人员的培训。

### 1 FA 系统工作原理与基本组成

按照故障处理方式的不同, 馈线自动化系统分为自动化开关相互配合 FA 与集中智能 FA 两种类型。前者只能在故障发生时起作用, 不需要主站参与即可进行故障处理, 处理过程按照事先的整定进行; 后者需构建通信网络, 监视馈线的运行状况, 在主站作用下, 及时发现线路故障, 迅速定位故障区域并实施隔离, 快速恢复对非故障区域的供电。为协同国家电网公司配电自动化应用提升进程<sup>[11]</sup>, 本文仿真对象为集中智能型 FA。

#### 1.1 集中智能型 FA 的组成

集中智能型 FA 系统是配电自动化系统的一个子系统, 由一次设备、控制主站/子站、配电终端和通信通道组成, 如图 1 所示。

图 1 中主站实现数据采集、处理与存储、人机联系及各种应用功能; 子站是主站与终端之间的中间设备层, 一般用于通信汇集, 也可根据需要进行区域监控; 配电终端是安装在一次设备现场的装置, 负责采集处理反映配电网与配电设备运行工况的实时数据与故障信息并上传配电主站, 以及接收主站指令, 对配电设备进行控制与调节, 分为馈线终端

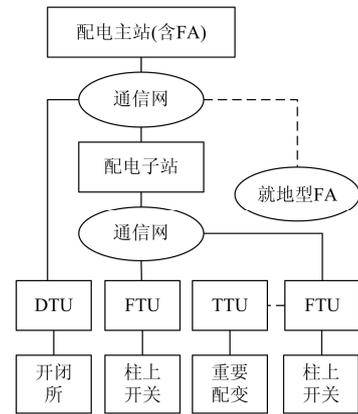


图 1 含 FA 的小型配电自动化系统

Fig. 1 Distribution automation system include FA

(Feeder terminal unit, FTU)、站所终端(Distribution terminal unit, DTU)、配变终端(Transformer terminal unit, TTU)等三大类<sup>[12]</sup>; 通信通道是连接配电主站(子站)、配电终端, 实现信息传输的通信网络, 典型实现方式包括基于以太网方式的无源光网络(Ethernet passive optical network, EPON)+中压载波通信、EPON+无线通信等混合组网技术<sup>[13-14]</sup>。

#### 1.2 集中智能型 FA 的工作原理

集中智能型 FA 由控制主站/子站通过通信系统收集各馈线终端(FTU)的故障检测信息, 根据系统拓扑结构和预设算法进行故障定位, 并通过遥控或者手工方式实现故障的自动定位、隔离与健全区域的恢复供电(Fault location, isolation and service restoration, FLISR)。

该型 FA 的控制主站分为两类, 一类是 FA 软件安装在配网自动化主站中, 另一类是设置配电子站, 实现附近供电区域的集中控制, 如图 1 所示。

典型的架空线路环网 FA 系统如图 2 所示, 图中电源 1、2 出口装设具有测控与通信功能的馈线保护装置(Relay)。当 F 点发生故障时, QF<sub>1</sub> 跳闸切断故障电流, 经一定延时, QF<sub>1</sub> 重合, 若重合成功则判定 F 点为瞬时性故障; 若重合失败则判定为永久性故障, 主站收到 FTU 的故障检测信息, 启动故

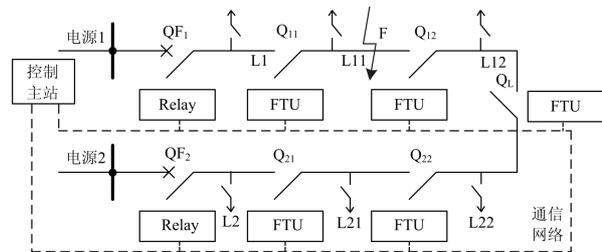


图 2 架空线路环网 FA 系统

Fig. 2 FA system of overhead distribution line

障处理程序。 $Q_{11}$  的 FTU 检测到故障电流, 而  $Q_{12}$  的 FTU 未检测到故障电流, 主站判定故障处于  $Q_{11}$  与  $Q_{12}$  之间, 配调人员手动或者系统自动遥控  $Q_{11}$ 、 $Q_{12}$  跳闸, 然后合上  $QF_1$  以及联络开关  $Q_L$ , 实现对负荷  $L_1$ 、 $L_{12}$  恢复供电。

## 2 集中智能型 FA 仿真系统的组成

所述集中智能型 FA 仿真系统是将 FA 的组成部分分别进行处理, 个别部分进行模块化设计, 然后按照 FA 的构成顺序组合成一体。设计该仿真系统不仅可以观察 FLISR 动作结果, 验证 FA 功能, 也可以比较方便地观察到系统各中间环节在仿真过程中的动作状况, 为进一步的分析判断提供依据。

集中智能型 FA 仿真是按照工程型的能量流、监控处理过程进行设计, 也可以叫做“微 FA 系统”, 其结构如图 3 所示, 由 3 部分组成, 分别是基于 KH8000 的主站模块、EPON 组网模块、配电终端模块和一次系统仿真模块。

其各组成部分的执行顺序如下: 首先, 选择一次系统物理仿真或者数字仿真方式, 设置故障, FTU 部分监测到状态数据或者暂态仿真结果, 通过通信系统后向主(子)站上报故障信息, 主(子)站立即启动 FA 进行故障定位、隔离及故障恢复。一次系统物理仿真方式下, 可以顺序观察到一次、二次系统各中间环节在运行过程中的动作状况; 数字仿真方式下, 可以在主(子)站顺序观察到一次、二次系统的动作状况。

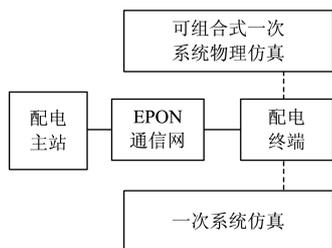


图 3 微 FA 仿真系统

Fig. 3 FA micro-system simulation diagram

### 2.1 控制主站与配电终端模块

本系统主站采用生产厂家的 KH8000T 系统, 具有公共平台服务、配电 SCADA、馈线故障处理等基本功能及馈线自动化仿真功能, 可单机运行。

配电终端负责采集处理配电网与配电设备运行工况的实时数据与故障信息并上传控制主站; 接收主站命令, 对配电设备进行控制与调节。本系统采用馈线终端 FTU<sup>[12]</sup>。

### 2.2 EPON 组网模块

EPON 采用点到多点结构的单纤数据双向传输

光纤通信技术, 已经成为配电自动化通信的主要方式。EPON 设备由 3 部分组成, 分别是线路侧设备 (Optical line terminal, OLT)、中间分光设备 (Optical distribution network, ODN)、用户侧设备 (Optical network unit, ONU)。与配电网的拓扑结构相适应, EPON 系统组网, 常接成单电源辐射网、手拉手环网、双电源双 T 网等。图 2 所示配电网, 可以组成如图 4 所示单链级联结构或者图 5 所示手拉手环网通信拓扑<sup>[15]</sup>。

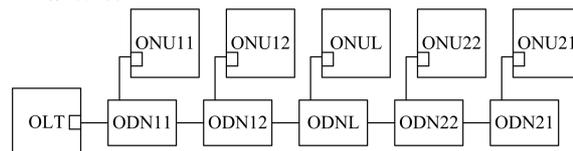


图 4 单链(级联)结构

Fig. 4 Topology of single link (cascaded)

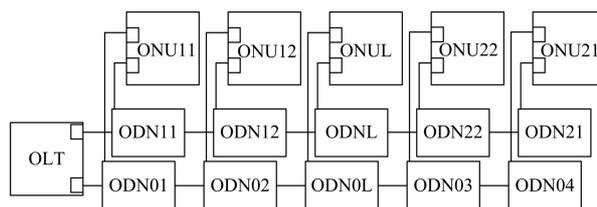


图 5 EPON 手拉手拓扑结构

Fig. 5 Topology of EPON ‘hand in hand’ type bus

#### 2.2.1 网络拓扑结构

本仿真系统中, 通信系统采用物理仿真, 由网元管理单元、OLT、ODN、ONU 组成, 网络拓扑结构可以灵活接成单链结构、手拉手全保护结构等。以手拉手全保护结构为例, 在这种结构中, OLT 既可以如图 5 所示, 位于同一个变电站, 利用 OLT 的 2 个 PON 口构成环形方式, 又可以规划 OLT 位于 2 个不同的变电站, 相互保护的 2 个 PON 口位于不同的 OLT 设备上, PON 口倒换需要在 2 台 OLT 之间进行, 每个 ONU 的 2 个 PON 口可以互为主备, 配置数据到不同的 OLT。手拉手全保护方案不但可以实现环网结构中单节点失效保护, 还可以实现 OLT 的 PON 口或整个 OLT 失效时的网络保护。

对于架空多分段单联络、多分段多联络线路, ODN 可以按照手拉手全保护结构设计, 如图 5 所示。

#### 2.2.2 EPON 系统常见故障

EPON 系统常见故障分类<sup>[16]</sup>如下。

器件或者链路异常、故障: 包括各个器件故障; OLT 与 ONU 链路之间光纤链接的法兰盘松动; 光纤损伤等。以上原因导致链路损耗增大, 传输速度下降, 运行异常。

分光器串联,导致衰耗增大,ONU的输入光功率过小,无法进行注册。

ONU与OLT之间的距离超出最大限度:根据IEEE802.3ah,ONU到ODN的距离与ODN到OLT之间的距离之和,不能超过20km。如果ODN、OLT之间距离为18km,则ODN的运行半径最大为2km。

协议及配置故障:102、104协议故障,导致OLT与上层设备对接异常;系统配置或者算法设置导致的ONU掉线等现场常见故障。

在本仿真系统中,用可调光衰耗器、特制光纤等实现链路故障仿真;用通信协议仿真器,达到协议故障的效果。

### 2.3 一次系统仿真

配电网的典型网架结构主要有辐射状架空网、“手拉手”环状架空网、多分段多联络网等。一次设备的实际构成很复杂,但不同结构都是由基本元件组成,可以先将这些元件模块化,即可以形成模型库,然后利用模型库,搭“积木”联接出不同的网架结构,灵活实现各种网架仿真。

物理仿真方法如下:以0.38kV三相五线交流供电系统仿真10kV供电系统;以交流接触器代替配电开关,其主触点、辅助触点表示配电开关的断口及开关状态;简化掉TA、TV,一次回路的电压、电流直接接入电源的出口点保护以及各个FTU,在FTU的参数配置中实现变压比、变流比以及保护策略;线路及各个分支线的负荷,用三相电阻、电容混合负载箱代替,单组 $3 \times 100\text{W} + 3 \times 15.2\text{var}$ 。

对于单相接地故障与相间短路故障进行模式化处理,某相负载由100W变化为经15.2va接零线,其余两相电压升高为线电压,视为配电网架空线路或者电力电缆单相接地短路;某两相负载同时由100W突增为300W,视为配电网架空线路或者三相统包电力电缆相间短路。

限于篇幅,数字化仿真系统不再详述。

## 3 仿真实例

以图2所示馈线FA系统为例来说明所发明的仿真方法及系统功能。

### 3.1 一次系统网架故障

电源点出口保护整定为一次重合闸,重合闸时间整定为2s。投入接地开关<sup>[17]</sup>,并设定接地保持时间为60s,使图2所示L11处A相、B相负载同时由100W突增为300W,馈线保护装置动作于QF<sub>1</sub>跳闸,经2s后QF<sub>1</sub>重合失败,则判定为永久性故障;主站收到各个FTU的故障检测信息,启动故障处理程序:判定故障处于Q<sub>11</sub>与Q<sub>12</sub>之间,系统自动遥

控Q<sub>11</sub>、Q<sub>12</sub>跳闸,然后合上QF<sub>1</sub>以及联络开关Q<sub>L</sub>,L1、L12恢复供电,实现FLISR。

本系统也可以基于对等通信网络的广域测控系统(WAMCS)平台,实现不依赖主站,进行故障定位、隔离与恢复供电控制,使供电恢复时间缩短到几秒之内<sup>[18-19]</sup>。如上故障设置,当馈线保护装置动作于QF<sub>1</sub>跳闸后,检测到短路电流的Q<sub>11</sub>对应FTU启动,并与相邻Q<sub>12</sub>对应FTU交换短路电流检测结果。Q<sub>11</sub>-FTU检测到短路电流,而Q<sub>12</sub>-FTU则没有,因此,Q<sub>11</sub>-FTU、Q<sub>12</sub>-FTU分别判断出故障在两者之间的区段上,则控制Q<sub>11</sub>和Q<sub>12</sub>跳闸隔离故障,然后发出启动供电恢复命令,Q<sub>11</sub>-FTU、Q<sub>12</sub>-FTU分别控制QF<sub>1</sub>与Q<sub>L</sub>合闸。

### 3.2 EPON系统故障

通信系统规约测试正常后,在链路故障场景中,光链路的主干线、分支线都可以设置故障。既可设置单点(个)故障,也可设置多点(个)故障同时发生。以图2所示馈线系统配以图4所示的单链结构EPON系统为例来说明所进行的仿真及发展的方法。

EPON系统送电后,OLT告警,接收到的操作维护管理系统(Operation Administration and Maintenance, OAM)及主站警报信号为:EPON系统M段及N段链路异常;“遥测”异常,“遥信”异常。经手动及电动操作试验,断路器及分段开关“就地操作”正常,“远动操作”无结果。

观察OAM,查看EPON系统告警状态。对照网络结构图,检查各光纤接口无误插,网络拓扑结构未发生异构。检查配电站、ONU配置正确,检查端口业务状态,发现ONU21注册不上。

对故障区域的定位,用光功率计测量连接损耗,评价光端设备的性能并检验连续性,帮助评估光纤链路传输质量。

图4所示的单链结构EPON系统,顺次将光功率计接入OLT、ODN11至ODN21的下行端口,可以测得各个端口下行方向光功率。下行方向各段光功率的测量值见表1。

表1 EPON系统链路衰耗测试值

Table 1 High optical-declining test value in EPON system				
设备/损耗 dbm	下行/干线	下行/支线	计算值/ 干线	计算值/ 支线
OLT	4.40			
ODN11	3.80	-5.51	3.65	-6.41
ODN12	2.89	-6.54	2.90	-7.16
ODNL	1.83	-6.88	2.15	-7.91
ODN22	0.92	-7.52	1.40	-8.66
ODN21	-25.84	-9.75	0.65	-9.41

试验系统中 OLT 输出光功率为 4.4 mW, 下行方向(1490 nm)最大光链路损耗 29 dB, 上行方向(1310 nm)最大光链路损耗 29.5 dB, 使用的 1:2 光分路器分光比 90%: 10%, ODN 链路干线、支线的插入损耗、分光损耗和附加损耗和分别为 0.75 dB 和 10.81 dB, 光纤长度、熔接点、法兰损耗忽略不计。由表 1 测量结果及分析计算可知, 存在主干线、支线 2 个故障区域 M 段及 N 段如图 6 所示, 分别位于 ODN22 与 ODN21 之间以及 ODN21 与 ONU21 之间。又由于故障区域元件的单一性, 定位 1 个光衰减器为故障器件, 一段尾纤损伤, 其光功率分别为 25、1.5 dB。故障定位结果与所设置的故障相符。调整光衰减器至 2.5 dB, 更换故障尾纤, 通电测试, 系统恢复正常。

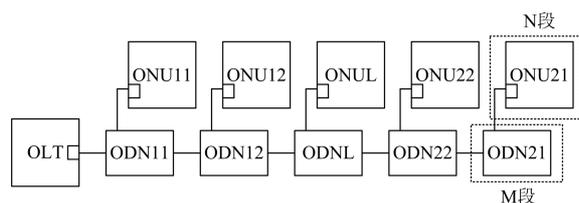


图 6 EPON 系统故障区域示意

Fig. 6 An illustration of EPON system fault areas

分析可见, 若采用图 5 所示的手拉手拓扑结构, 即使 ODN22 及其下行方向光纤同时发生故障, ONU21 仍然可以运行在 ODN04 链路, 可靠性较高。

## 4 结论

随着配电自动化应用提升的进程, 配电网自动化建设、改造、运行维护工作增多。配电网规模扩大和自动化程度的不断提高, 对工作人员的技术水平要求相应增强, 传统的仿真和培训模式已经不能满足要求, 新型、多功能的培训和测试系统, 尤其结构明晰、功能丰富、故障典型的物理仿真系统成为发展的必然趋势。基于数字与物理仿真相结合的混合仿真系统将在技术人员培训中发挥日益重要的作用, 逐步成为智能配电网安全运行和技术发展不可缺少的有机组成。

## 参考文献

- [1] 柳春芳. 主动配电网的一体化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 49-55.
- LIU Chunfang. An integrated design method of active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 49-55.
- [2] 刘健, 林涛, 赵江河, 等. 面向供电可靠性的配电自动化系统规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014,

42(11): 52-60.

- LIU Jian, LIN Tao, ZHAO Jianghe, et al. Specific planning of distribution automation systems based on the requirement of service reliability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 52-60.
- [3] 袁文广, 周文俊, 李春建, 等. 配电自动化系统的实时 SOA 架构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 150-155.
- YUAN Wenguang, ZHOU Wenjun, LI Chunjian, et al. Study on real-time SOA for distribution automation system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 150-155.
- [4] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813-821.
- [5] 高洪雨, 陈青, 李文进, 等. 配电网自愈测试系统设计与实现[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(7): 65-73.
- GAO Hongyu, CHEN Qing, LI Wenjin, et al. Design and realization of distribution network self-healing test system[J]. Experimental Technology and Management, 2014, 31(7): 65-73.
- [6] 张延辉, 郑栋梁, 熊伟, 等. 10 kV 馈线自动化解决方案探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 150-156.
- ZHANG Yanhui, ZHENG Dongliang, XIONG Wei, et al. Discussion of 10 kV feeder automation solutions[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 150-156.
- [7] 周文俊, 李春建, 王良, 等. 分层分区的馈线自动化配置方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 71-76.
- ZHOU Wenjun, LI Chunjian, WANG Liang, et al. Study on hierarchical and divisional configuration scheme of feeder automation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 71-76.
- [8] 黄俊辉, 高山, 孙建龙, 等. 一种配电网的馈线自动化方法及系统: 中国, ZL201220493680.1[P]. 2014-09-26.
- [9] 廖学静, 唐中伟, 蔡华, 等. 配电自动化装置技术性能测试平台: 中国, CN201510057024.5[P]. 2015-02-04.
- [10] 刘东, 闫红漫. 配电自动化系统试验技术及其进展[J]. 电工技术, 2004(7): 34-37.
- LIU Dong, YAN Hongman. System test technology and its develop trends on distribution automation[J]. Electrotechnical Journal, 2004(7): 34-37.
- [11] 刘健, 赵树仁, 张小庆. 中国配电自动化的进展及若干建议[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 6-10.
- LIU Jian, ZHAO Shuren, ZHANG Xiaoqing. Development

- of distribution automation in China and some suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 6-10.
- [12] 袁龙, 滕欢. 基于 IEC61850 的馈线终端的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 126-145.  
YUAN Long, TENG Huan. The research of FTU based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 126-145.
- [13] 杨乐详. PON 技术在配网自动化通信系统中的应用[J]. 电力系统通信, 2010, 31(209): 26-30.  
YANG Lexiang. Application of PON in communication system of power distribution automation line[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(209): 26-30.
- [14] 殷志锋, 周雅, 张元敏. 基于 EPON 的电力自动化信息传送平台[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 111-115.  
YIN Zhifeng, ZHOU Ya, ZHANG Yuanmin. Electric power automation information transmission platform based on EPON[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 111-115.
- [15] 李祥珍, 何清素, 孙寄生. 智能配电网通信组网技术研究及应用[J]. 中国电力, 2011, 44(12): 78-81.  
LI Xiangzhen, HE Qingsu, SUN Jisheng. Research and application on communication technology in smart distribution and utilization grid[J]. Electric Power, 2011, 44(12): 78-81.
- [16] 王磊, 付松波, 姜峰. EPON 网络故障原因分析及处理[J]. 中国有线电视, 2011(1): 74-75.  
WANG Lei, FU Songbo, JIANG Feng. Analysis and treatment of EPON network fault[J]. China Digital Cable TV, 2011(1): 74-75.
- [17] 高洪雨, 徐丙垠, 陈青, 等. 一种配电网单相接地试验装置: 中国, ZL201220493680.1[P]. 2013-04-24.
- [18] 葛亮, 谭志海, 赵凤青, 等. 一种改进型馈线自愈控制方案及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 61-67.  
GE Liang, TAN Zhihai, ZHAO Fengqing, et al. An improved feeder self-healing control scheme and its realization[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 61-67.
- [19] 刘育权, 华煌圣, 李力, 等. 多层次的广域保护控制体系架构研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 112-122.  
LIU Yuquan, HUA Huangsheng, LI Li, et al. Research and application of multi-level wide-area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 112-122.

收稿日期: 2015-07-01; 修回日期: 2015-09-14

作者简介:

高洪雨(1967-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配电网故障检测; E-mail: gaohongyu098@sina.com

陈青(1963-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置的研究和教学工作; E-mail: qchen@sdu.edu.cn

徐丙垠(1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统故障检测、配电网自动化、智能配电网。E-mail: xuby@china.com

(编辑 姜新丽)