

DOI: 10.7667/PSPC171352

虚实结合的馈线自动化系统测试平台设计

吴栋琪¹, 杨涛¹, 黄晓明¹, 黄柳柳², 王林青², 陈玲³, 徐习东³

(1. 国网浙江省电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 杭州平旦科技有限公司, 浙江 杭州 310013;
3. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 馈线自动化的实现模式有多种, 不可能在真实配电网上进行实验验证。因此, 需要设计馈线自动化系统测试平台来对馈线自动化系统进行测试。分析了配电网的仿真需求, 采用 RTDS 搭建配电网模型并对故障进行模拟。提出了利用虚拟配电终端系统来模拟一组配电终端的运行。在虚拟配电终端系统结构设计中提出了基于 CIM 的拓扑分析技术来解决虚拟配电终端系统对内及对外的数据关联问题。提出了采用虚拟交换技术来解决多个虚拟终端共享一个网口进行数据交换的问题。在上述技术基础上, 设计了一套由 RTDS、虚拟配电终端系统、真实配电终端和主站系统组成的馈线自动化系统测试平台。最后在平台上进行测试实验, 验证了该测试平台的有效性。

关键词: 虚实结合; RTDS; 虚拟配电终端系统; 拓扑分析技术; 虚拟交换技术; 馈线自动化

Testing platform of feeder automation system with the combination of virtual and reality

WU Dongqi¹, YANG Tao¹, HUANG Xiaoming¹, HUANG Liuliu², WANG Linqing², CHEN Ling³, XU Xidong³

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;
2. Hangzhou Pingdan Technology Company, Hangzhou 310013, China;
3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: There are variety of implementations of feeder automation, which can't be verified on the real distribution network. Therefore, it is necessary to design a testing platform to test the feeder automation system. The simulation requirements of distribution network are analyzed, and RTDS is used to build the distribution network model and simulate the fault. A virtual distribution terminal system is proposed, which is used to simulate the operation of a group of distribution terminals. In the structural design process of the virtual distribution terminal system, a topology analysis technology based on CIM is proposed to solve the problem of internal and external data association, the using of virtual switching technology is proposed to solve the problem of data exchange when numerous virtual terminals share one network port. On the basis of the above technology, the testing platform of feeder automation system is designed, which is constituted by RTDS, the virtual distribution terminal system, real distribution terminals and master station system. Finally, the test experiment is carried out on the platform, which verifies the validity of the testing platform.

This work is supported by Science and Technology of State Grid Corporation of China (No. 5211DS16000A).

Key words: combination of virtual and reality; RTDS; virtual distribution terminal system; topology analysis technology; virtual switching technology; feeder automation

0 引言

馈线自动化(简称FA)系统作为配电网自动化的核心技术之一^[1-2], 具有故障诊断、定位、隔离、恢复非故障区域供电等功能。FA系统的实现模式有多种, 主要分为就地式^[3-4]、集中式^[5]和分布式^[6-7]。FA

在应用于实际配电网之前, 需要对馈线自动化系统的主站和配电终端进行性能测试, 对FA的控制策略算法进行正确性验证, 以确保FA系统在实际应用中能正常运行。为了验证馈线自动化的功能, 理论上需要频繁地在配电网上进行一系列的故障实验^[8-9], 但是在真实的配电网中进行故障实验较为困难, 且不利于配电网的安全运行。因此需要搭建馈线自动化系统测试平台来验证FA系统的正确性。

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5211DS16000A)

国内外就馈线自动化测试平台进行了相关的研究,文献[10]建立的智能分布式 FA 仿真测试系统利用 RTDS 搭建配电网模型再接入真实配电终端进行仿真测试,测试规模小,主要用于分布式 FA 配电终端的性能测试。文献[11]建立的 FA 仿真测试环境分别仿真了配电系统和馈线终端单元通信,但是该测试系统主要面向集中式 FA 的动作逻辑验证。而文献[12]搭建的 FA 功能测试平台主要用于集中式 FA 主站系统的测试。由上分析可知现有的这些 FA 测试平台都存在测试功能单一的缺点,因此建立一套功能完善、适用各种 FA 实现模式、满足各种测试需求的 FA 测试平台具有重要的意义。

本文设计了一套虚实结合的馈线自动化系统测试平台,该平台利用实时数字仿真系统(简称 RTDS)建立并运行配电网模型^[13-19],利用虚拟配电终端系统和真实配电终端共同实现配网数据采集和故障检测等功能,利用主站系统协调各个配电终端运行。虚拟配电终端系统可以同时模拟多个配电终端的运行,首先从主站获取基于 CIM 的配网结构数据,再通过基于 CIM 的拓扑分析技术解决虚拟配电终端系统对内及对外的数据关联问题,通过虚拟交换技术来解决多个虚拟终端共享一个网口进行数据交换的问题。对测试平台中各个设备之间进行了通信设计,整合了多种通信技术来实现 RTDS、虚拟配电终端系统、真实配电终端、配电自动化主站之间的高效通信。最后在测试平台中进行测试实验,验证了该测试平台的有效性。

1 测试平台整体构架

1.1 测试平台设计分析

配电网的暂态仿真分为实时仿真和非实时仿真,当利用配电网仿真模型对 FA 系统进行开发测试时,对仿真计算时间要求很高,需要进行实时仿真,因此可以采用 RTDS 来模拟配电网运行情况。

为了使馈线自动化系统测试平台能够适合各种 FA 实现模式,根据三种实现模式的特点,可以按照分布式 FA 对配电终端进行功能设计,按照集中式 FA 对主站系统进行功能设计,实际应用时根据需求仅选用测试平台的部分功能。

若测试平台全部采用真实配电终端,当测试规模很大时就需要大量配电终端,占用场地面积很大。由于场地限制和设备限制,需要设计一套能够同时对多个配电终端进行仿真模拟的虚拟配电终端系统。

为了实现对真实配电终端进行功能测试,设计馈线自动化系统测试平台时还需要考虑真实配电终

端的接入,将虚拟配电终端和真实配电终端进行结合。

1.2 测试平台整体构架

根据上述的分析,本文设计的馈线自动化系统测试平台整体构架如图 1 所示。

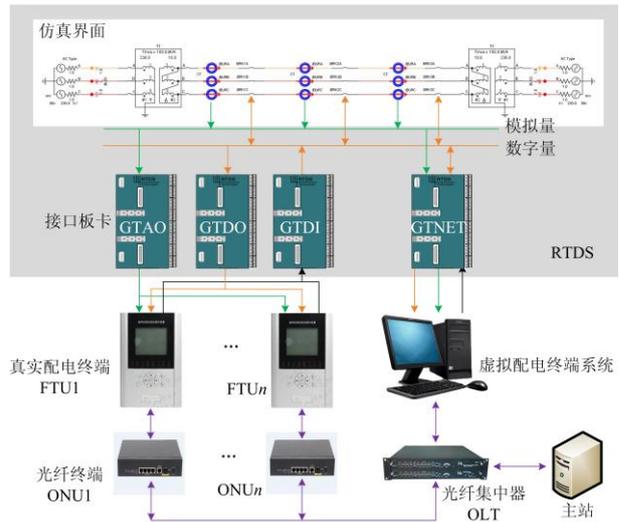


图 1 测试平台整体构架

Fig. 1 Overall design of testing platform

RTDS、虚拟配电终端系统、真实配电终端、配电自动化主站系统、通信通道共同构成了一个完备的测试平台。

1.2.1 RTDS

平台利用 RTDS 搭建配电网模型来仿真模拟真实配电网的运行,并用其中的故障模块来实现配电网的故障模拟。RTDS 仿真模型中配电终端需要监控的开关为测试平台的测点,测点数据包括开关状态和开关所处电流电压值。

RTDS 具有 GTDO(数字信号输出卡)、GTDI(数字信号输入卡)、GTAO(模拟信号输出卡)等 I/O 板卡,具有 GTNET(网络接口卡)等通信板卡^[20]。GTAO、GTDO 和 GTDI 板卡经过隔离放大环节与真实配电终端相连,用来测试简单的控制策略。GTNET 板卡将 RTDS 仿真系统中各个测点数据传送给虚拟配电终端系统,同时接收虚拟终端发送过来的开关控制信号,通过与真实终端和主站的配合测试复杂的控制策略。

1.2.2 配电终端

配电终端运行时要与 RTDS 通信采集测点数据或向 RTDS 发送开关控制信号,要与主站系统通信发送遥测、遥信信息或接收遥控信息,还要与其他配电终端通信交换相邻开关的开关状态信息和过流判断信息。

测试平台的配电终端由真实配电终端和虚拟配电终端系统共同构成。虚拟配电终端系统在一台计算机中同时实现多个虚拟终端的运行, 运行的数量限度由计算机的运行能力决定。实现分布式 FA 时要考虑虚拟终端、真实配电终端、主站之间的通信问题。

1.2.3 主站系统

测试平台引入主站系统来协调各个配电终端的运行, 需要实现接收配电终端的遥测、遥信信息、向配电终端下发遥控指令等功能。主站系统内采用公共信息模型(简称 CIM)^[21]来对配电网的结构和数据进行管理, 包括对配电终端及其监控开关的管理。主站系统不参与就地式 FA 的测试, 当应用于集中式 FA 时需要根据接收的遥测、遥信信息进行故障处理。

2 虚拟配电终端系统

虚拟配电终端系统是实现馈线自动化系统测试平台的重要组成部分。虚拟配电终端系统的硬件部分主要由计算机构成; 软件系统的结构如图 2 所示, 由系统配置模块、RTDS 通信模块、虚拟终端组模块、虚拟交换模块以及日志管理模块组成。

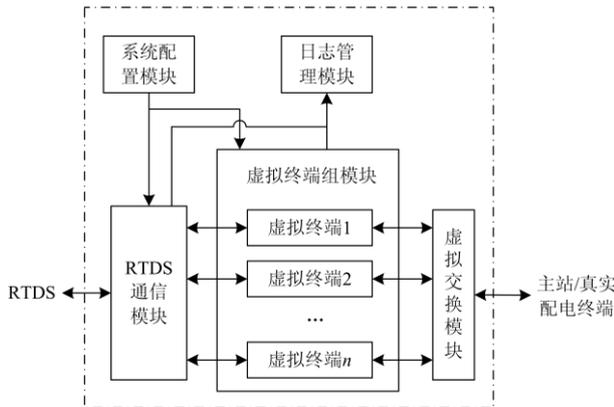


图 2 虚拟配电终端系统结构

Fig. 2 Structure of logic distribution terminal system

2.1 系统配置模块

配置模块实现配电网拓扑结构分析以及对虚拟配电终端系统的各种配置, 包括转发配置、算法载入配置、通信配置和数据格式配置。

虚拟配电终端系统对配电网的拓扑结构分析基于主站的配电网 CIM 数据。读取主站的 CIM/XML 文件^[22]后, 虚拟配电终端系统自动对文件进行解析, 识别判断各配电终端之间、配电终端与监控开关之间、监控开关之间、监控开关及其附属装置之间的关系等, 并将这些对象和相互之间的关系转换

成系统数据库内部的数据表和数据表之间的链接关系。

转发配置根据拓扑分析的结果对 RTDS 通信模块和虚拟终端组模块的转发功能进行配置; 算法载入配置用于载入就地式或分布式馈线自动化算法并对算法进行解析, 从而运行相应的算法策略; 通信配置对虚拟配电终端系统的通道、路径、数据组、测点等信息进行配置; 数据格式配置用于对数据在界面中呈现的格式进行设置。

2.2 RTDS 通信模块

RTDS 通信模块用于实现虚拟配电终端系统与 RTDS 之间的数据交换, 数据交换存在两个方向的数据流, 系统状态数据流为将集中收取的 RTDS 测点数据分发到相应的虚拟终端, 控制信号数据流为接收来自各个虚拟终端的控制信息转发到 RTDS 中。系统状态数据流的实现原理如图 3 所示。

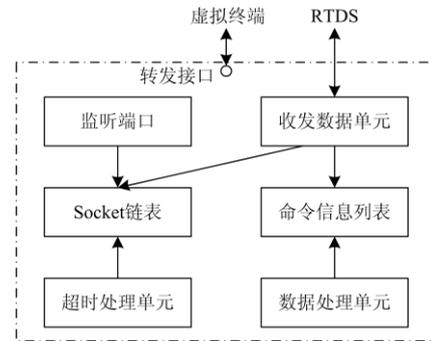


图 3 RTDS 通信模块实现原理

Fig. 3 Implementation principle of RTDS communication module

如图所示, 首先根据系统配置模块中的通道链接方式与协议, 与 RTDS 建立链接, 利用监听端口监听与 RTDS 之间的通道是否连接成功。通道连接上后利用 Socket 链表建立一个路径, 当路径长时间处于停止状态时超时, 处理单元会根据超时时间进行重连操作。当路径处于空闲状态时, 收发数据单元会通过 Socket 链表建立的路径向 RTDS 发送激活、召唤数据、对时等命令以及接收 RTDS 返回数据报文命令, 这些命令均存放在命令信息列表中。数据处理单元对报文进行解析识别测点数据, 然后根据系统配置模块中对数据顺序的规定和依据 CIM 模型建立的链接关系, 分别将数据通过转发接口转发给对应的虚拟终端单元。控制信号数据流的实现原理与上所述类似, 通过转发接口接收来自虚拟终端的控制信号, 对一定时间间隔内收到的信号进行报文封装, 再通过收发数据单元发送到 RTDS 中。

2.3 虚拟终端组模块

虚拟终端组模块用于同时构建多个配电终端。首先根据系统配置模块的配置信息确定所需的虚拟终端数量，构建对应数量的虚拟终端单元并对每个虚拟终端设定专属地址。然后利用多线程处理技术实现各个虚拟终端之间的并行运行，并用多通道技术实现每个虚拟终端与虚拟交换模块的独立通信。

每个虚拟终端的实现原理与图 3 相同，通过转发接口与 RTDS 通信模块传输数据，在收发数据单元与虚拟交换模块进行数据交互。数据处理单元要对与虚拟交换模块通信的数据进行报文封装或解析；要根据系统配置模块中的控制策略，对接收的 RTDS 测点数据和其他配电终端的开关信息进行逻辑判断实现故障定位，再生成控制指令转发到 RTDS 通信模块。

2.4 虚拟交换模块

若虚拟配电终端系统所在的硬件设备可以对每个虚拟终端分配一个网口，虚拟终端就可以通过交换机与主站或真实配电终端进行通信。但是如果硬件设备没有足够数量的网口，多个虚拟终端需要共享一个网口通信。为使每个虚拟终端能够独立通信，在虚拟配电终端系统内增加了一个虚拟交换模块，用于实现虚拟交换机的功能，从而进行虚拟终端之间、虚拟终端与主站之间、虚拟终端与真实配电终端之间的信息交互。

2.5 日志管理模块

日志管理模块包括日志处理与日志存储，用于对各模块在功能实现过程中产生的相关日志进行处理分析，并将处理生成后的事项进行存盘。

3 测试平台通信实施

根据测试平台的总体设计可知，通信设计是保障 RTDS、虚拟配电终端系统、真实配电终端以及配电自动化主站之间信息交互的关键。

3.1 RTDS 与虚拟配电终端系统通信设计

虚拟配电终端系统利用以太网与 RTDS 的 GTNET 板卡接口相连接，同时运用 RTDS 软件中的 104 模块和 IEC 60870-5-104 协议(以下简称 104 协议)实现相互之间开关运行信息和控制信号的传输。

3.2 虚拟配电终端系统、真实配电终端、主站之间通信设计

虚拟配电终端系统、真实配电终端、主站之间通过以太网和光纤集中器进行通信，同样采用标准 104 协议进行相互之间的信息传输。

虚拟配电终端系统为模拟多个配电终端同时与主站或真实配电终端之间的通信，设计了虚拟交换

模块。虚拟交换模块采用多通道通信技术，虚拟配电终端系统与其他每个设备之间均具有独立的一个或多个通道，且设备之间的 IP 地址和端口号可以不相同；采用双向处理技术，针对同一通道，虚拟配电终端系统可以向设备发信息也可以接收信息；采用时序控制技术，为实现数据实时同步，为每个通道建立一个进程，不同的通道可并行收发数据信息，同时，对于同一个通道中的收发时序进行处理，保障通信的高效有序运行；采用特征处理技术，根据不同的设备传输数据的连接方式、协议遵循规范的不一致，对各通道所使用的协议进行配置(各通道会按配置加载根据协议开发的 dll 文件)，对于同一协议不同特性如起始地址、采集数量等情况，也可通过配置解决。

4 馈线自动化仿真测试

4.1 仿真案例

配电网采用如图 4 所示某地区的“手拉手”型两端配电网结构。图中 S1、S2 为电源，A 和 B 为馈线出口断路器，K7 为联络开关，正常运行时处于分闸状态，K1、K2、K4、K5、K8、K11 为分段开关，K3、K6、K9、K12 为支路开关。

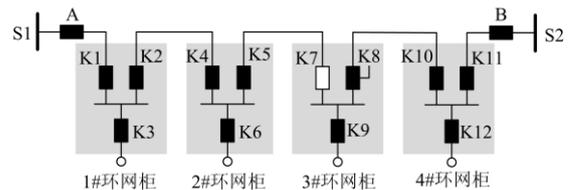


图 4 配电网拓扑图

Fig. 4 Distribution network topology

在测试平台中，利用 RTDS 建立拓扑图的配电网仿真模型，采用真实配电终端采集出口断路器 1#环网柜和 3#环网柜处的开关量；虚拟配电终端系统采集 2#环网柜和 4#环网柜处的开关量。对模型进行正常状态下的仿真运行，并分别在 K2 和 K4 之间线路上、K4 和 K5 之间母线上模拟短路故障。

采用分布式 FA 策略进行测试，该策略通过相邻配电终端相互通信交换相邻开关信息，进行逻辑判断实现故障定位，然后切断与故障位置相邻过流开关实现故障隔离。

4.2 仿真结果

将来自主站的配电网 CIM/XML 文档自动转换成 RTDS 电路图文件，加载到 RTDS 后运行控制界面如图 5 所示，可通过该界面观察各开关处的电流、电压和功率等信息，同时可进行故障模拟。

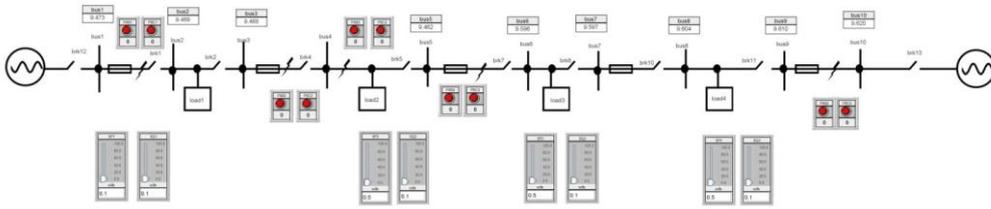


图 5 RTDS 运行控制界面

Fig. 5 Run and control interface of RTDS

在虚拟配电终端系统和真实配电终端分别加载分布式 FA 策略, 对整个测试平台进行所需的预配置后启动运行。RTDS 中仿真电路正常运行时, 分别在三个故障点投入 A、B 相间短路故障模块。第一个故障点 K2 和 K4 之间线路故障时分段开关 K2 和 K4 处 A 相电流波形图及其开关状态图分别如图 6(a)和 6(b)所示, 由图可知在 0.25 s 时系统发生故障, 配电终端故障处理下发控制命令实现 K2 断开用时约 183 ms 实现故障隔离, K4 不动作。第二个故障点 K4 和 K5 之间母线故障时分段开关 K4 和 K5 处 A 相电流波形图及其开关状态图分别如图 6(c)和 6(d)所示, K4 断开实现故障隔离, K5 不动作。

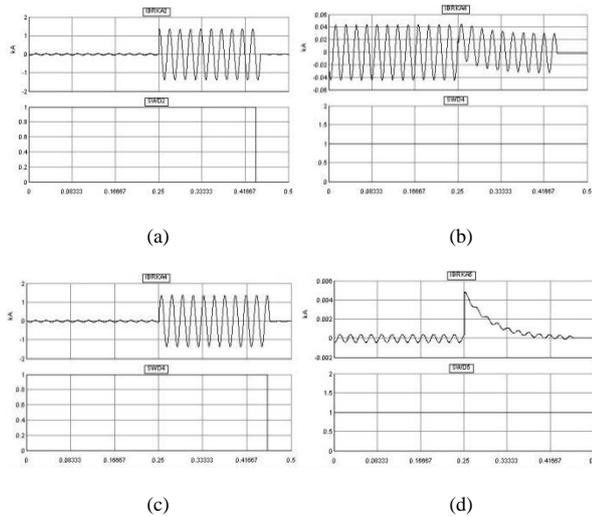


图 6 故障波形图

Fig. 6 Fault waveform

根据测试结果可知:

(1) RTDS 仿真平台能很好地模拟配电网的正常运行和故障运行;

(2) 虚拟配电终端能够实时获取 RTDS 中开关信息数据, 并向 RTDS 传送控制指令; 能够同时模拟多个配电终端实现并行数据处理; 模拟的每个配电终端能够独立与主站通信传送遥测、遥信数据或接收遥控指令; 能够运行适用于真实配电终端的控制策略进行故障处理;

(3) 真实配电终端与虚拟配电终端系统能够达到信息交互功能, 应用于分布式 FA 时能够相互配合实现故障定位;

(4) 主站能够实时接收到配电终端上传的遥测值和遥信值。

5 结语

本文设计的馈线自动化系统测试平台, 采用 RTDS 来建立配电网模型, 相对于其他仿真系统, RTDS 能实时模拟配电网的正常运行和故障运行, 而且与外界设备的数据交互能力更强。设计了适用于该测试平台的虚拟配电终端系统, 能够同时模拟多台配电终端, 并且能与真实配电终端协同使用。提出的基于 CIM 的拓扑分析技术和虚拟交换技术有效地提高了本测试平台的自动化水平。对测试平台各设备进行的通信设计实现了 RTDS、虚拟配电终端系统、真实配电终端、配电自动化主站之间的高效通信。

根据在测试平台中对馈线自动化的完整运行以及故障处理过程模拟的结果可以发现, 本测试平台能够实现 RTDS、虚拟配电终端系统、真实配电终端、主站之间的相互配合和数据交互, 有效地对馈线自动化系统进行测试。并且本测试平台操作简单, 界面简洁, 具有交互性、可扩展性和实用性等特点。

参考文献

- [1] 赵月, 何丽娟, 姜海涛, 等. 配电网馈线自动化系统分析及技术实施要点[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 65-68.
ZHAO Yue, HE Lijuan, JIANG Haitao, et al. Distribution feeder automation system and its implementation essentials[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 65-68.
- [2] 王良. 智能配电网自动化应用实践的几点探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 12-16.
WANG Liang. Discussion on application practice of distribution automation[J]. Power System Protection and

- Control, 2016, 44(20): 12-16.
- [3] 齐郑, 高玉华, 孙海新, 等. 基于电压-时间型重合器的配电网单相接地故障自动隔离技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 32-36.
QI Zheng, GAO Yuhua, SUN Haixin, et al. Technology research of fault automatic isolation in distributed single-phase-to-ground based on voltage-time type recloser[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 32-36.
- [4] 刘健, 张伟, 程红丽. 重合器和电压-时间型分段器配合的馈线自动化系统的参数整定[J]. 电网技术, 2006, 30(16): 45-49.
LIU Jian, ZHANG Wei, CHENG Hongli. The parameter setting of feeder automation system based on mutual coordination of recloser with voltage-time type of sectionalizers[J]. Power System Technology, 2006, 30(16): 45-49.
- [5] 商海涛, 吴林, 赵渊, 等. 计及集中式馈线自动化的配电网可靠性评估模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 129-135.
SHANG Haitao, WU Lin, ZHAO Yuan, et al. Reliability evaluation model of distribution network incorporating centralized feeder automation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 129-135.
- [6] CRAIG D, BEFUS C. Implementation of a distributed control system for electric distribution circuit reconfiguration[C] // Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES, May 21-24, 2006, Dallas, USA: 342-347.
- [7] 杜东威, 叶志锋, 许永军. 基于 GOOSE 的综合型智能分布式馈线自动化方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 183-190.
DU Dongwei, YE Zhifeng, XU Yongjun. A solution of integrated intelligent distributed feeder automation based on GOOSE[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 183-190.
- [8] 高洪雨, 陈青, 徐丙垠, 等. 一种馈线自动化仿真培训系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 131-136.
GAO Hongyu, CHEN Qing, XU Bingyin, et al. A simulation training platform for feeder automation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 131-136.
- [9] 吴俊华, 温彦军, 赵月, 等. 配电网自动化在线仿真系统技术论述[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 50-53.
WU Junhua, WEN Yanjun, ZHAO Yue, et al. Technology of on-line simulation system for distribution automation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 50-53.
- [10] 杨超. 基于 RTDS 平台的智能分布式馈线自动化仿真测试[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2568-2572.
YANG Chao. Simulation testing of intelligent distributed feeder automation based on RTDS environment[J]. East China Electric Power, 2014, 42(12): 2568-2572.
- [11] 翁之浩, 刘东, 柳劲松, 等. 基于并行计算的馈线自动化仿真测试环境[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 43-46.
WENG Zhihao, LIU Dong, LIU Jinsong, et al. A feeder automation simulation test environment based on parallel computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 43-46.
- [12] GUAN S, FAN W, LEI H, et al. Realization of a simulation test method for feeder automation of power distribution automation system[C] // International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, November 26-29, 2015, Changsha, China: 2710-2714.
- [13] 苏丽萍, 陈侃, 李国杰, 等. 基于 RTDS 的光伏并网系统实时仿真平台研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 110-115.
SU Liping, CHEN Kan, LI Guojie, et al. Real-time simulation study of photovoltaic grid-connected system by RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 110-115.
- [14] 于力, 许爱东, 郭晓斌, 等. 基于 RTDS 的有源配电网暂态实时仿真与分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(4): 18-25.
YU Li, XU Aidong, GUO Xiaobin, et al. Real-time transient simulation and analysis of active distribution based on RTDS[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(4): 18-25.
- [15] 杨新伟, 郭彩霞. 基于主频零序功率的配电网故障选线新方法[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 33-37.
YANG Xinwei, GUO Caixia. New method for fault line selection of distribution network based on main frequency zero sequence power[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 33-37.
- [16] 陈妍君. 电阻型超导限流器和 10 kV 配电网继电保护相配合的仿真分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 53-59.
CHENG Yanjun. Simulation analysis of resisting

- superconducting current limiter and relay protection of 10 kV distribution network[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2016, 44(5): 53-59.
- [17] 赵文杰, 张楷. 基于互信息变量选择的 SCR 烟气脱硝系统非线性自回归神经网络建模[J]. 热力发电, 2018, 47(9): 22-26.
- ZHAO Wenjie, ZHANG Kai. NARX neural network modeling of SCR denitration system based on mutual information variables selection[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(9): 22-26.
- [18] 杨新民. 智能控制技术在火电厂应用研究现状与展望[J]. 热力发电, 2018, 47(7): 1-9.
- YANG Xinmin. Application status and prospect of intelligent control technology in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(7): 1-9.
- [19] ZHAO Jinqun, ZHANG Yujie, ZHANG Pan, et al. Development of a WAMS based test platform for power system real time transient stability detection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 37-47. DOI: 10.1186/s41601-016-0013-1.
- [20] RTDS Technologies Inc. RTDS handbook[R]. Manitoba: RTDS Technologies Inc., 2007.
- [21] 汪华. 基于公共信息模型的电网建模[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊 2): 186-188.
- WANG Hua. Power network model based on CIM[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 186-188.
- [22] 潘毅, 周京阳, 吴杏平, 等. 基于电力系统公共信息模型的互操作试验[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 25-28.
- PAN Yi, ZHOU Jingyang, WU Xingping, et al. Interoperability test based on common information model[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 25-28.

收稿日期: 2017-09-11

作者简介:

吴栋萁(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: 13957121373@139.com

杨涛(1978—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: 13588423768@139.com

黄晓明(1969—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。E-mail: 13605717725@139.com

(编辑 葛艳娜)