

基于 OPNET 的电网自动化系统建模与性能评价

席禹,蔡泽祥,陈炯聪,潘天亮

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要: 从建模仿真和定量分析这 2 个角度出发,提出电网自动化系统建模和性能评价方法,为电网自动化系统设计、运行以及规划提供分析手段与优化思路。首先分析了基于 OPNET 的电网自动化系统建模内容及结构,并分别从电网自动化系统设备模型、协议模型和信息调度模型三方面对其进行详细阐述。进一步,在分析电网自动化系统运行状态和当前系统性能评价方法局限性的基础上,提出电网自动化系统性能综合指标评价方法,并基于某地区电网自动化系统进行仿真与算例分析。结果表明,基于 OPNET 的电网自动化系统模型能够有效模拟系统各类运行场景,提出的电网自动化系统性能评价方法能够有效辨识系统运行状态。

关键词: OPNET; 电网自动化系统; 系统建模; 定量分析; 性能评价

中图分类号: TM 734

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.028

0 引言

随着电网规模的不断扩大与智能电网建设的日益推进,电网自动化系统逐渐暴露出子系统繁多、功能重复、互操作性差以及网络资源配置不合理等问题^[1-3]。造成当前现状的主要原因在于电网自动化系统的设计、规划和运行等各个阶段缺乏有效的自动化系统分析手段与性能评价方法,长期依靠经验的堆砌式设计运行方法,无法适应新形势下电网对自动化系统的可靠性和高效性要求^[4-5]。

针对电网自动化系统分析手段和性能评价方法的缺失,国内外学者进行了相关研究。文献[6]分析了自动化系统的组网现状,提出网络性能和兼容性的测试方法,从电网自动化设备(尤其是路由器)层面研究设备入网需求和性能测试模型,但文章着重研究设备单体测试模型,无法反映和评价自动化系统整体性能;文献[7]从业务角度分析电网自动化系统性能类型,并参照行业标准给出各类性能指标具体内容,但未研究各类指标的获取手段,也未形成自动化系统层面的评价方法;文献[8]采用网络演算理论建立系统传输延时分析模型,为验证基于业务缓存速率的改进加权动态带宽分配算法提供方法,但文章仅从延时角度对系统性能进行评估和优化,其结论无法全面反映系统性能和状态。针对电网自动化系统分析手段和整体性能评价方法的缺失,有必要做进一步研究。

本文从电网自动化系统建模出发,建立能够描述系统运行过程和细节的设备模型、协议模型和信息调度模型,形成基于 OPNET 的电网自动化系统性

能仿真分析方法。进一步地,本文在分析电网自动化系统评价方法局限性的基础上,提出基于路径的综合指标评价方法,该综合指标评价方法能够更为全面地反映系统性能,为电网自动化系统设计、运行以及规划提供依据。

1 基于 OPNET 的电网自动化系统建模

1.1 电网自动化系统建模内容

电网自动化系统是包含应用协议、二次设备以及通信网络的系统级概念,为真实反映电网自动化系统运行过程并获取性能指标,需要在 OPNET 中建立设备模型、协议模型和信息调度模型三部分内容^[9-10]。图 1 描述了电网自动化系统的建模结构以及各部分模型间的相互关系。各部分模型的主要描述如下。

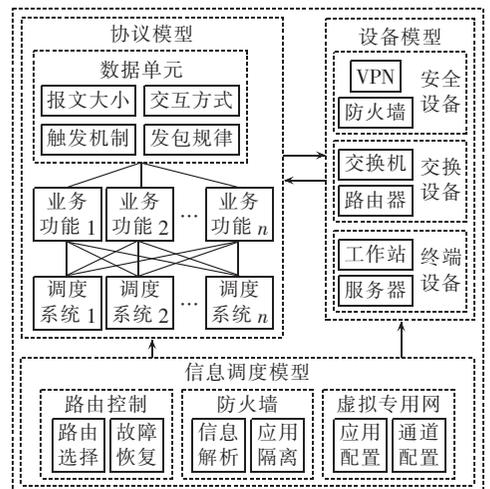


图 1 电网自动化系统建模内容及组织关系

Fig.1 Contents of power-grid automation system modeling and corresponding organizational relations

1.2 电网自动化系统设备模型

电网自动化系统设备模型是电网自动化系统信

收稿日期:2016-05-11;修回日期:2017-02-20

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2016A030313476)

Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province(2016A030313476)

息生产、传递、处理与应用的实体,反映信息生产到应用的全周期过程。本文将电网自动化设备按功能归纳为信源设备、交换设备和信宿设备 3 类。其中,信源设备承担信息生产与发送功能,交换设备承担信息传输与信息调度功能,信宿设备承担信息接收与处理功能。

为体现设备功能和信息处理过程,需要对各类设备按功能模块划分建模,如图 2 所示将信源、信宿设备模型分为应用层、传输层、网络层、数据链路层和物理层 5 个部分,其中每个功能模块对应一个协议模型。例如,应用层装载 IEC60870、IEC1344 等自定义协议,传输层、网络层和数据链路层则装载包括动态路由选择协议 RIP(Routing Information Protocol)、地址解析协议 ARP(Address Resolution Protocol)和资源预留协议 RSVP(Resource Reservation Protocol)等 OPNET 自带协议。设备模型中各功能模块间通过带箭头的连线来反映信息的处理过程。交换设备的模型与之相似,如图 3 所示。

1.3 电网自动化系统协议模型

本文所述的电网自动化系统协议,主要指开放系统链(OSI)七层模型中反映信息内容和交互方式的应用层协议^[11]。应用层协议需要根据自动化系统信息交互机制自定义建模,其他各层协议则采用 OPNET 中自带的协议模型。

事实上,当前电网自动化系统依照功能区分建立了诸多电网自动化子系统。不同功能的电网自动化子系统在业务内容、所用协议、重要程度以及组织结构等方面存在差异,各子系统依托不同标准规范,其表达方式、描述方法难以统一,给电网自动化系统协议建模仿真带来困难。

为解决电网自动化系统协议在 OPNET 中建模的困难,本文采用层次化建模方法通过归纳各类协议的基本组成单元和交互类型,建立基于 OPNET 的电网自动化系统协议模型。本文以 IEC60870-5-104 协议建模为例,具体阐述电网自动化系统协议建模过程。

图 4 所示的远动系统协议层次模型,将电网自动化系统应用层协议分为数据单元、报文模型和业务模型 3 个层次,并使用全局标号进行表述。图 4 所示为单点遥控 RC_SC(Remote Control_Single Character)、单点遥信 RM_SC(Remote Message_Single Character)和远方初始化(Init) 3 类业务的建模过程。协议层次模型中最小单元为数据单元模型,数据单元包含应用规约控制信息 APCI(Application Protocol Control Information)、数据单元标示符 DUI(Data Unit Identifier)、信息对象标示符 IOI(Information Object Identifier)和信息对象时标 TTOIO(Time Tag Of Information Object),由这 4 类数据单元按协议规定分布组合可形成具有功能实际意义的报文模型。

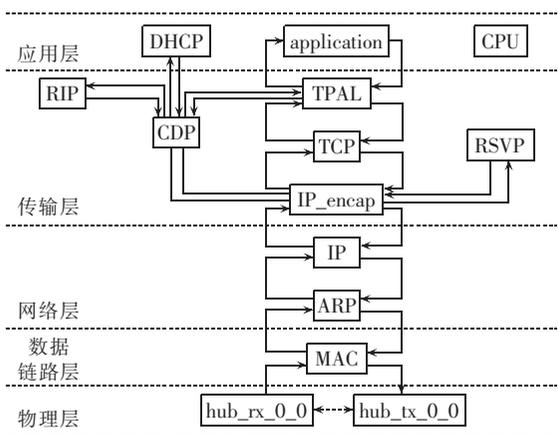


图 2 基于 OPNET 的信源、信宿设备模型
Fig.2 OPNET-based equipment models of information source and destination

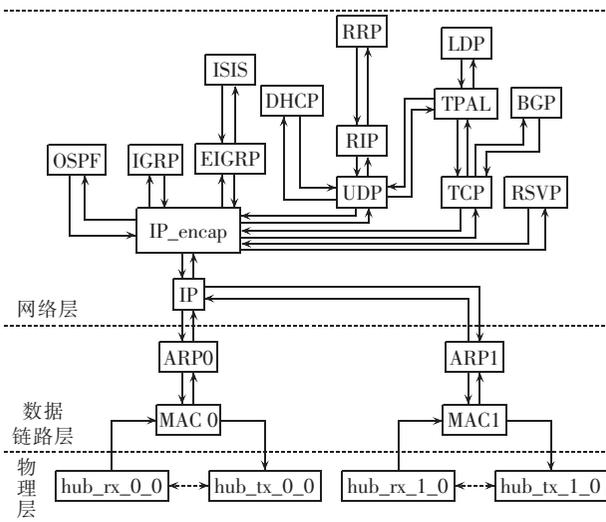


图 3 基于 OPNET 的交换设备模型
Fig.3 OPNET-based equipment models of switch

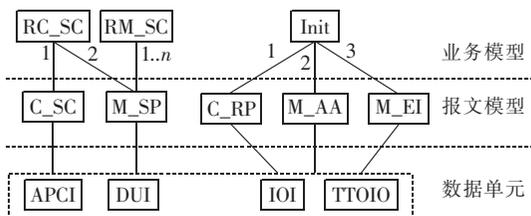


图 4 远动系统协议层次模型

Fig.4 Protocol layer model of tele-control system

IEC60870-5-104 共定义了 27 种报文类型,图 4 中由数据单元组合形成单点命令 C_SC(Command_Single Character)、单点信息 M_SP(Message_Single Point)、复位进程命令 C_RP(Command_Reset Process)、可用的应用层 M_AA(Monitoring_Application layer is Available)、初始化结束 M_EI(Monitoring_End of Initialization)这 5 种报文模型。最终由报文模型按连接线上的序号排列组合形成 RC_SC、RM_SC、Init 业务模型。

1.4 电网自动化系统信息调度模型

电网自动化系统信息调度模型是描述自动化系统信息调度过程和方法的模型。当前电网自动化系统中的信息调度方法主要包括路由、VPN、防火墙 3 种,OPNET 中提供的信息调度模型与电网自动化系统具有较好的适应性。本文选用 OPNET 中已有的信息调度模型,并对相关参数进行配置。表 1 列出了信息调度模型和配置参数。

表 1 电网自动化系统调度模型
Table 1 Information dispatch model of power-grid automation system

对象	选用模型	配置参数
路由	RIP_V3, IGRP, EIGRP, OSPF_V2, ISIS, BGP	VLAN 配置、信息优先级配置、路由选择方式
VPN	IP_VPN_config	通道位置、性能要求
防火墙	ethernet2_slip8_firewall_adv	隔离信息内容

2 电网自动化系统性能仿真与评价

2.1 运行状态与仿真场景

与一次系统相似,电网自动化系统由于接入信息、设备的内容与状态变化,存在多种运行状态。本文将电网自动化系统运行状态归纳为稳定态、事件态和故障态 3 种状态。其中,稳定态描述一次、二次系统无故障、无操作情况下的电网自动化系统运行状态;事件态描述一次系统、二次系统正常动作情况下自动化系统运行情况,如一次系统开关变位、二次系统远程操作等;故障态描述调度数据网故障情况下自动化系统运行情况,如二次系统设备损坏、节点拥塞等,表 2 列出了各运行状态的状态特征与 OPNET 仿真设置。

表 2 电网自动化系统运行状态
Table 2 Operating conditions of power-grid automation system

状态	状态特征	OPNET 仿真设置
稳定态	周期性运行	对应业务周期性触发
事件态	允许范围内突发变化	对应业务随机触发
故障态	状态恶化,存在系统失效风险	网络设备随机失效或添加扰动信息

2.2 系统性能综合指标评价方法

系统性能评价是表征和量化系统信息传输质量的方法。电网自动化系统对信息传输实时性和可靠性具有较高要求,运行过程中主要测量和统计系统传输延时、丢包率和可用带宽 3 类指标。然而实际运行中电网自动化系统的整体性能却难以描述,主要原因在于:测得指标无相对性,难以从测量值上直观反映该方面性能;指标间无强关联性,某一类指标的恶化并不等于系统整体性能的恶化,系统性能边界难以划分。

表 3 比较了通信领域 3 种网络性能评价方法。

由表可见,单一指标的评价方法无法评估系统整体性能,而综合指标和神经网络 2 种方法均需要人为确定权值和训练样本。综合考虑两者应用范围和收敛速度,本文选用综合指标对电网自动化系统进行性能评估。

表 3 网络性能评价方法比较
Table 3 Comparison of performance among network evaluation methods

评价方法	收敛速度	评价颗粒度	缺点
单一指标	快	系统单方面性能	无法反映系统整体性能
综合指标	快	路径、系统性能	根据需求确定权值
神经网络	一般	系统性能	需大量训练样本

首先采用式(1)、(2)对测量指标进行处理,计算测量指标值的相对数,即功效分数。功效分数的计算要确定满意值和不允许值,满意值是指该项指标在测量中可能达到的最好值,不允许值则是该项指标在测量中不应该出现的最坏值,以满意值为上限,以不允许值为下限。功效分数无量纲,其值在[0,1]范围内,用于体现评价指标的优劣程度。将测量指标进行无量纲化处理的过程,也是将测量指标实际值转化为评价指标值的过程。

$$d_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^s}{x_i^h - x_i^s} \quad i=1,2,\dots,k; j=1,2,\dots,n \quad (1)$$

$$d'_{ij} = \frac{x_i^h - x_{ij}}{x_i^h - x_i^s} \quad i=1,2,\dots,k; j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

其中,假设被评价系统共有 k 个,系统路径共 n 条; x_{ij} 为第 j 条路径第 i 项指标值; x_i^h 为第 i 项指标的满意值; x_i^s 为第 i 项指标的不允许值; d_{ij} 为第 j 条路径的第 i 项正指标的功效分数,正指标为数值大小与性能高低一致的指标,其指标数值越大则系统在此方面性能越好; d'_{ij} 为第 j 条路径的第 i 项逆指标的功效分数,逆指标为数值大小与性能高低相反的指标,其指标数值越大则系统在此方面性能越差。

进一步地,采用由路径性能评价拓展的网络综合性能评价方法^[12],建立目标路径和网络运行状况的评价方法,式(3)、(4)为系统性能评价公式。

$$P_{L_j} = \left(\sum_{i=1}^h W_i d_{ij} + \sum_{i=h+1}^{k-1} W_i d'_{ij} \right) / \sum_{i=1}^k W_i \quad (3)$$

$$P_N = \sum_{i=1}^n P_{L_i} w_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (4)$$

其中, P_{L_j} 为第 j 条路径性能评价指标; k 为选取的分析指标的总个数; h 为选取的分析指标中正指标个数; n 为参加评价路径的条数; W_i 为第 i 项分析指标权值; P_N 为系统性能综合指标; w_i 为各路径的性能指标权值。

式(3)中各权值需要根据实际经验和目标系统实际需求灵活选取。例如,位于生产控制大区的远动系统对系统延时、丢包率具有较高要求,权重也偏向于这 2 类测量指标;而位于非生产控制大区的保信和

智能远传系统,对系统带宽要求较高而对实时性要求较低,其权重设置偏向于可用带宽。不同权值的设置保证了综合指标评价方法在同一系统或不同系统间进行性能对比时的灵活性和合理性。

表 4 给出一种远动系统综合指标评价参数。表 4 中考虑到远动系统对报文延时、丢包率具有较高要求,而对可用带宽要求较低,分别设定端到端延时和丢包率的指标权值为 0.4,设置可用带宽指标权值为 0.2。进一步地,根据循环远动规约(CDT)中对电网自动化系统各类性能指标的要求,整定各分析指标的满意值和不允许值,具体参数如表 4 所示。

表 4 远动系统综合指标评价参数
Table 4 Comprehensive evaluation indexes of tele-control system

分析指标	指标类型	指标权值	满意值	不允许值
端到端延时	逆指标	0.4	1 s	4 s
丢包率	逆指标	0.4	0	0.01 %
可用带宽	正指标	0.2	1.6 Mbit/s	1 Mbit/s

采用综合指标评价电网自动化系统性能,获取测量指标功效分数,并按路径计算系统性能评估值,其意义在于:从系统层面对电网自动化系统进行评价,保证了评价结果的全面性、直观性和实用性;量化的性能综合指标利于系统性能边界划分,在系统规划设计初期为系统提供分析方法和评估手段,直观地评价结果有益于多种方案的比较和优化;性能综合指标在系统投产运行期间能够作为系统监测对象和诊断依据,为系统运维人员提供辅助。

3 算例分析

本文选择某地区的电网自动化系统为研究对象进行设计,组织架构如图 5 所示,系统包括 1 个国网节点、1 个备调节点、21 个地网节点、11 个 500 kV 变电站节点、11 个直调电厂节点、21 个地调节点以及多个省网核心节点,每个地调及变电站通过 2 Mbit/s 光纤出口接受远动、PMU、保信等电网自动化子系统

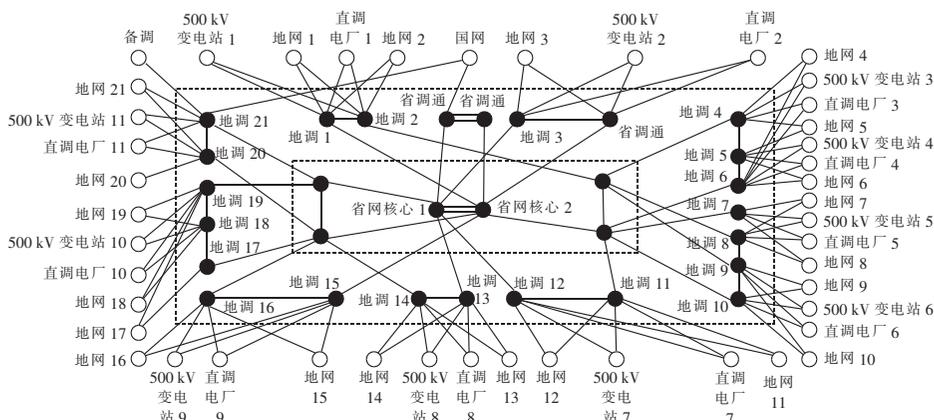


图 5 电网自动化系统仿真及性能评估案例

Fig.5 Case of power-grid automation system simulation and performance evaluation

业务信息。假设系统中的每个地调及变电站采用相同的模型,配置 323 个遥测点、1226 个遥信点,同时规定 EMS、保信系统召唤周期为 15 min,WAMS 数据传输周期为 50 s。

采用 OPNET 网络仿真软件,应用本文建立的电网自动化系统设备、协议和信息调度模型,并通过设置运行稳定态、事件态和故障态 3 种仿真场景获取系统评价指标参数,仿真结果如下。

场景 1:稳定态与事件态。统计电网自动化系统在稳定运行和一次系统出现故障情况下的系统上送流量,其中地调 1 的路由器出口流量仿真结果如图 6 所示,相应的数据包平均传输延时为 0.96 s。由图 6 可见:安全区 I 和安全区 II 在经过初期约 3 s 的网络收敛过程后进入稳定态,安全区 I、II 的流量分别为 0.365 Mbit/s 和 0 Mbit/s,安全区 II 不存在稳定流量是由于本文将保信系统中的周期性上传业务划分在安全区 I,安全区 II 内无周期性上传信息;同时,设置事件态随机触发,安全区 I、II 由于突发事件操作而出现流量波动,安全区 I 最大流量为 0.4 Mbit/s,安全区 II 最大流量为 0.065 Mbit/s。

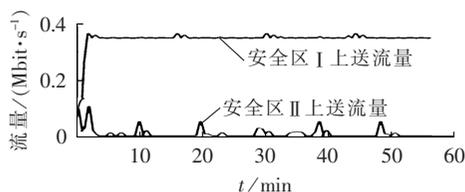


图 6 稳定态与事件态系统流量仿真结果

Fig.6 Simulative result of normal operations

场景 2:故障态。本案例通过仿真二次系统 N-1 故障情况,即二次系统出现故障导致 1 个节点退出运行情况,来验证二次系统故障运行时电网自动化系统的运行特性。假设调度数据网中与地调 2 连接的接入层路由器出现故障,则地调 2 上的数据将以地调 1 为备用上传到主站,此时地调 1 上传流量的仿真结果如图 7 所示,该情况下地调 1 上传到主站的数据包平均传输延时为 1.52 s。由图 7 可见,故障态

下地调1流量与图6相比明显增加,安全区I的周期性流量达到0.675 Mbit/s,安全区II的周期性流量仍为0 Mbit/s,安全区I的突发流量最大值达到0.705 Mbit/s,而安全区II突发流量最大值达到0.117 Mbit/s。

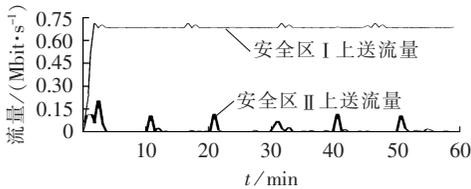


图7 故障态系统流量仿真结果

Fig.7 Simulative result of abnormal operation

根据电网自动化系统各运行场景下的仿真结果,选取网络初始化时刻(t_1)、场景最活跃时刻(t_2)以及场景稳定运行时刻(t_3)3个典型运行时刻,使用式(1)—(4)分别研究这3个时刻下的系统性能,其分析结果如表5所示。

表5 电网自动化系统性能评价结果
Table 5 Results of power-grid automation system performance evaluation

场景	时刻	性能评价指标
稳定态、事件态	t_1	1.20
	t_2	1.22
	t_3	1.21
故障态	t_1	-398.97
	t_2	1.04
	t_3	1.03

由表5可知:

a. 网络在稳定态和事件态下的综合性能指标评价结果相对稳定,电网自动化系统突发事件对系统性能评价造成的影响较小;

b. 稳定态与事件态的性能评价均高于故障态运行情况,综合指标的系统性能评价方法对系统故障具有较高识别度;

c. 故障态运行初期由于网络路由重新规划,在路由收敛过程中带来最高10%的丢包率,故障态下网络性能在 t_1 时刻极度恶化成为负值,突变的性能评价指标有助于运维人员早期的系统故障诊断。

通过采用OPNET建立电网自动化系统模型,模拟仿真电网自动化系统运行状态,并使用本文提出的综合指标评价方法对系统性能进行评估,弥补了电网自动化系统性能分析手段和评价方法的不足。其中,基于OPNET的电网自动化系统仿真模型能够基于系统运行实际情况有效地仿真各种运行状态下的主要指标,与现场试验和模型演算方法相比具有更高的灵活性和实用性,在投入成本上也更具优势。同样地,系统性能综合指标评价方法则因其在评价结果更为直观和全面而具有更广的应用范围。

4 结语

本文针对电网自动化系统定量分析方法评价手

段缺失的现状,分别提出了基于OPNET的电网自动化系统模型与基于综合指标的电网自动化系统性能评价方法。进一步地,本文基于某地区电网自动化系统构建并验证了所提模型和方法的有效性,算例结果表明:基于OPNET的电网自动化系统模型能够真实反映系统中信息生产、处理和应用过程,能够仿真各运行场景下的网络指标;基于综合指标的电网自动化系统性能评价方法能够有效辨识系统状态,性能评价结果有助于设计规划阶段的系统性能比对和运行阶段中的系统监测与故障预警。

参考文献:

- [1] 王保义,邱素改,张少敏. 电力调度自动化系统中基于可信度的访问控制模型[J]. 电力系统自动化,2012,36(12):76-81,115.
WANG Baoyi, QIU Sugai, ZHANG Shaomin. A credibility-based access control model dispatching automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(12): 76-81, 115.
- [2] 韩国政,徐丙垠,张海台. IEC61850在高级配网自动化中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(5):99-102.
HAN Guozheng, XU Bingyin, ZHANG Haitai. Application of IEC61850 in advanced distribution automation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 99-102.
- [3] 冯树海,姚建国,杨胜春,等. “物理分布、逻辑集中”架构下调度系统一体化分析中心总体设计[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):138-144.
FENG Shuhai, YAO Jianguo, YANG Shengchun, et al. Overall design of integrated analysis centre for physically-distributed and logically-integrated dispatch system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 138-144.
- [4] 周华锋,李鹏,胡荣,等. 南方电网调度智能化关键技术研究[J]. 南方电网技术,2011,5(1):14-17.
ZHOU Huafeng, LI Peng, HU Rong, et al. Research on the key technologies of intelligent dispatching system for China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1): 14-17.
- [5] 高亚静,温柏坚,吴文传,等. 智能电网环境下的省级EMS设计与关键技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(8):135-140.
GAO Yajing, WEN Bojian, WU Wenchuan, et al. Provincial EMS in smart grid and its key technologies[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 135-140.
- [6] 李芹,卢长燕,霍雪松,等. 电力调度数据网测试模型[J]. 电力系统自动化,2015,39(1):187-193,212.
LI Qin, LU Changyan, HUO Xuesong, et al. Test models of electric power dispatching data network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 187-193, 212.
- [7] 赵振东,高勇. 调度自动化对电力通信网传输性能的需求分析[J]. 电力系统通信,2010,31(6):58-60.
ZHAO Zhendong, GAO Yong. Analysis on the demand for transmission performance of power communication network in dispatching automation system[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(6): 58-60.
- [8] 肖繁,张哲,尹项根. 智能配电网EPON系统改进加权动态带宽分配算法及时延特性研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(12):3037-3046.
XIAO Fan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. Study on an improved

- weighted IPACT algorithm and delay characteristics for EPONs in smart distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE,2015, 35(12):3037-3046.
- [9] 秦川红,王宁,任宏达,等. 采用虚拟局域网的数字化变电站数据通信仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(2):126-131. QIN Chuanhong,WANG Ning,REN Hongda,et al. Simulation and study on data communication in digital substation based on virtual local area network[J]. Power System Protection and Control, 2013,41(2):126-131.
- [10] 黄明辉,邵向潮,张弛,等. 基于 OPNET 的智能变电站继电保护建模与仿真[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):144-149. HUANG Minghui,SHAO Xiangchao,ZHANG Chi,et al. Modeling and simulation of relay protection for intelligent substation based on OPNET[J]. Electric Power Automation Equipment,2013, 33(5):144-149.
- [11] 杜凤青,盛戈皞,徐剑,等. 基于 IEC61850 的 GIS 智能监测信息建模及信息交互系统设计[J]. 电力自动化设备,2013,33(6): 163-167. DU Fengqing,SHENG Gehao,XU Jian,et al. Information modeling for GIS smart monitoring based on IEC61850 and development of information interaction system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(6):163-167.
- [12] 张冬艳,胡铭曾,张宏莉. 基于测量的网络性能评价方法研究[J]. 通信学报,2006,27(10):74-79,85. ZHANG Dongyan,HU Mingzeng,ZHANG Hongli. Study on network performance evaluation method based on measurement [J]. Journal on Communications,2006,27(10):74-79,85.

作者简介:



席 禹

席 禹(1992—),男,江苏泗阳人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护、控制与自动化(**E-mail**:stxiyu@foxmail.com);

蔡泽祥(1960—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统继电保护、电力系统稳定分析与控制(**E-mail**: epzxc@scut.edu.cn);

陈炯聪(1979—),男,广西梧州人,博士研究生,从事电力系统分析与控制以及配电网保护研究工作(**E-mail**:cjcforever@sina.com);

潘天亮(1992—),男,广东清远人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护、控制与自动化(**E-mail**:254985593@qq.com)。

OPNET-based power-grid automation system modeling and system performance evaluation

XI Yu, CAI Zexiang, CHEN Jiongcong, PAN Tianliang

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A method of power-grid automation system modeling and system performance evaluation is proposed to provide analysis means and optimization ideas in the aspects of modeling simulation and quantitative analysis for the design, operation and planning of power-grid automation system. The contents and structure of OPNET-based power-grid automation system modeling are analyzed and elaborated respectively in three aspects: equipment model, protocol model and information dispatch model of power-grid automation system. The operational conditions of power-grid automation system and the limitations of present system performance evaluation methods are analyzed, and a system performance evaluation method based on the comprehensive indexes is proposed. Simulation and calculation are carried out for a regional power-grid automation system and results show that, the OPNET-based power-grid automation system model can simulate different operational scenarios precisely and the proposed system performance evaluation method can identify the operating conditions effectively.

Key words: OPNET; power-grid automation system; system modeling; quantitative analysis; performance evaluation