

DOI: 10.7667/PSPC170881

基于 CIM 的配电网模型到 RTDS 仿真模型的转换研究

陈玲¹, 吴栋其², 杨涛², 黄晓明², 王林青³, 徐习东¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;
3. 杭州平旦科技有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 利用配网管理系统中基于 CIM 的配电网配置信息直接在 RTDS 中生成仿真模型, 可以快速地构建配电网实时仿真模型并减少人为误差。在讨论 CIM 和 RTDS 模型的区别以及对应关系的基础上, 分析了基于 CIM 的配电网模型转换到 RTDS 仿真模型的若干关键技术。在拓扑转换过程中提出了基于生成树的坐标位置生成法, 在此基础上针对闭环多且集中的拓扑电路提出了基于最小独立闭环的方法, 并用连枝比和分散度两个评价指标来判断适用于后者的电路拓扑。最后开发了相应模型转换软件, 利用软件将一个真实的配电网转换到 RTDS 仿真系统中, 从而进行了有效性验证。

关键词: 配电网; CIM; RTDS; 拓扑转换; 生成树; 最小独立闭环

Model conversion from the CIM-based distribution network to RTDS

CHEN Ling¹, WU Dongqi², YANG Tao², HUANG Xiaoming², WANG Linqing³, XU Xidong¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 3. Hangzhou Pingdan Technology Company, Hangzhou 310000, China)

Abstract: In order to quickly construct the real-time simulation model of the distribution network and reduce the human error, it is necessary to study the method of converting the CIM-based distribution network, which comes from DMS, into RTDS simulation model. After discussing the difference and relationship between CIM and RTDS model, a number of key technologies of automatic conversion from the CIM-based distribution network to RTDS simulation model are proposed. In the process of topology transformation, a method of generating coordinate position based on spanning tree is proposed. On this basis, a method based on minimum independent closed loop is proposed for closed loop and concentrated topology circuit. And two evaluated indicators, i.e. the connection branch ratio and dispersion, are used to determine the circuit topology that applies to the latter method. Finally, a software about corresponding model conversion is developed. And a real distribution network is converted to RTDS simulation system by the software, which verifies the effectiveness of the software.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901300) and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Company (No. 5211DS15002R).

Key words: distribution network; CIM; RTDS; topology conversion; spanning tree; minimum independent closed loop

0 引言

随着配电网的复杂程度和自动化水平的提高^[1-2], 配网自动化设备需要进行大量测试验证^[3-5], 若直接采用真实的配电网, 可能会造成巨大的社会效益和经济效益损失, 因此可以利用数字仿真系统对配电网进行仿真模拟。配电网的暂态仿真分为实时仿真和非实时仿真, 当需要对配电网中

的各种控制、保护装置和智能终端等二次设备进行开发测试时, 对仿真计算时间要求很高, 需要进行实时仿真^[6-8]。RTDS(实时数字仿真系统)集合了数据采集、通信和故障检测等功能, 通过接口与外部实际设备连接构成数字-物理闭环回路, 实时地将模拟量输出到外部设备, 很好地满足了配电网的实时仿真需求^[9-12]。

RTDS 进行实时仿真时要先在仿真平台上搭建模型, 对于简单的配电网, 可以根据网络的拓扑结构和参数, 手动在 RTDS 中构建配电网模型进行仿真。但是对于复杂的配电网模型, 若手动

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0901300);
国网浙江省电力公司科技项目(5211DS15002R)

搭建工作量较大, 而且调试时间较长。

目前电力企业通常采用配网管理系统来对电网的运行过程进行监控和管理^[13-14], 配网管理系统内部用 CIM(公共信息模型)来对配电网进行标准化描述^[15-17]。CIM 是用于描述电力系统的抽象模型, 定义了电力系统中所有主要设备、连接关系和参数数据的描述^[18]。因此可以利用配网管理系统中基于 CIM 的配电网配置信息自动转换到 RTDS 仿真系统中, 从而快速地构建配电网实时仿真模型, 减少模型转换工作量。

本文详细地对比分析了 CIM 和 RTDS 模型用于描述配电网时的差异, 分别讨论了基于 CIM 的配电网模型到 RTDS 仿真模型的转换过程中元件转换、参数转换和拓扑转换的相关技术。在拓扑转换过程中提出了基于生成树的坐标位置生成法, 在此基础上针对闭合环多且集中的拓扑电路, 提出了基于最小独立闭合环的方法, 并用连枝比和分散度两个评价指标来判断适用于后者的电路拓扑。最后开发了相应的模型转换软件, 用实际配电网数据进行验证。

1 CIM 和 RTDS 模型的对比分析

配电网 CIM 遵循 IEC 61970/IEC 61968 标准, 通过对对象类、对象属性以及相互之间的关系来描述配网系统中的各类对象。RTDS 利用可视化软件 RSCAD 来搭建模型, 通过元件、元件参数以及元件在仿真页面中的位置来描述配网系统中的各类对象, CIM 和 RTDS 模型的映射关系如图 1 所示。

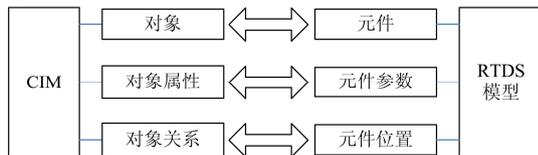


图 1 CIM 和 RTDS 模型的映射关系图

Fig. 1 Mapping diagram of CIM and RTDS model

1.1 规模差异

配电网的规模有大有小, 但是配网管理系统可以利用 CIM 搭建整个完整的配电网结构, 存储配电网的完整配置信息。

RTDS 通过分布参数线路解耦法进行并行计算从而实现实时仿真^[19], 而配电线路大多是短线路, 不适合用分布参数线路进行解耦。因此 RTDS 能够仿真的配网电路规模限制在一个仿真页面内, 每个页面限制的节点数与使用的板卡有关, 如表 1 所示。

表 1 节点限制数参考表

Table 1 Reference table of node limit number

板卡	GPC	PB5(单处理器)	PB5(双处理器)
节点数/个	66	72	144

1.2 CIM 对象与 RTDS 元件的差异

CIM 有很多对象类, 其中配电网涉及的所有电力系统资源类如图 2 所示^[20], 其中只有底层设备类才建立实体对象。

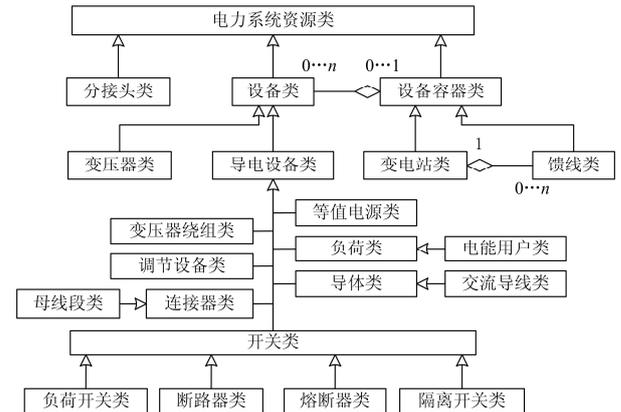


图 2 配电网 CIM 模型电力系统资源类

Fig. 2 All PSR in CIM of distribution network

在 RSCAD 的元件库中, 包含 π 型线路模型、变压器、断路器、动态负荷和导线等元件模型, 配电网仿真电路由上述元件组合构成, 其中导线元件可以用来作母线, 也可以用来作连接线。

1.3 CIM 对象属性与 RTDS 元件参数的差异

CIM 中每个对象都具有属性, 定义的属性全面描述了对对象特性。但是实际配网管理系统中应用 CIM 对配电网进行描述时选用的属性侧重于设备型号属性。

RTDS 中每个元件模型也需要设置参数用于仿真计算, 因此侧重于电气参数。

1.4 CIM 对象关系与 RTDS 元件位置的差异

CIM 通过对象的端点与连接节点的简单关联关系来表示网络的连接关系, 可以方便地转化成关联矩阵。

RTDS 模型通过 RSCAD 仿真页面中的电路图像来表示拓扑。电路图像由元件组成, 元件之间的端点重合表示连接, 元件图像不能有重叠区域。在内部配置文件中通过每个元件的中点坐标和方向属性来形成确定的电路图像。

2 基于 CIM 的配电网模型转换到 RTDS 模型的关键技术

根据上述 CIM 和 RTDS 模型的差异, 分别讨论其在转换过程中的关键技术。

2.1 配电网转换规模的选择

由于 RSCAD 仿真界面电路规模的限制, 不能将整个完整的配电网转换到 RTDS 中, 需要根据研究的目的选取部分配电网络。选取的部分配电网络要满足节点限制, 可以是完整的一块区域, 也可以是分开多块区域。

然后将其余部分进行等效处理, 可以作电路等效, 也可以作传递函数等效。

2.2 CIM 对象到 RTDS 元件的转换

基于 CIM 的配电网对象到 RTDS 元件之间的转换对应关系如图 3 所示。一些配电网对象转换到 RTDS 中是同一种元件。

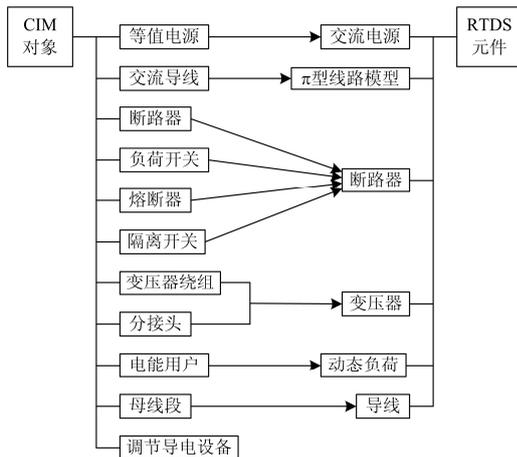


图 3 配电网 CIM 对象和 RTDS 元件转换对应关系图

Fig. 3 Conversion correspondence diagram of CIM objects and RTDS components for distribution network

2.3 CIM 对象属性到 RTDS 元件参数的转换

因为 CIM 对象属性和 RTDS 元件参数不完全匹配, RTDS 元件某些参数值可以通过 CIM 对象属性转换得到, 某些参数值需要在后期仿真时再设定。

引用 CIM 对象的属性分为直接引用和间接引用。直接引用时只需要将该属性值设定为与相应 CIM 对象属性相同的数值。不能直接引用时, 需要对 CIM 对象属性进行单位换算, 或根据属性查型号手册, 或利用公式进行计算等, 从而间接引用。

2.4 CIM 对象关系与 RTDS 元件位置的转换

虽然配网管理系统中的配电网 SVG 矢量图有对 CIM 对象位置的描述, 但是 SVG 图对配电网的描述不全面, 且对象之间的距离比例不合理, 难以直接把复杂的配电网络转换到 RTDS 仿真页面中。因此本文提出了以下的转换方法:

根据图论^[21], 可用关联矩阵 A 表示 CIM 中元件与连接节点的关联关系, 行代表元件, 列代表

两个元件相连。对应的简单无向图 $G = \langle V, E \rangle$ 中, 结点集 V 即为元件, 边集 E 表示元件相连。

在转换过程中先确定结点的相对坐标, 确定结点相对坐标即可确定元件的中点相对坐标, 再根据 RTDS 坐标系的范围确定元件中点在仿真页面中的坐标。在确定结点相对坐标时可以采用下面四种方式之一。方式①: 与上一结点保持纵坐标相同横坐标增加; 方式②: 与上一结点保持纵坐标相同横坐标减小; 方式③: 与上一结点保持横坐标相同纵坐标增加; 方式④: 与上一结点保持横坐标相同纵坐标减小。若元件与上一元件直接相连时坐标变化量为 ΔX_1 , 若通过导线相连时坐标变化量为 ΔX_2 , 同时确定相应长度的导线坐标。

$$\Delta X_1 = \frac{1}{2}(D_i + D_{i+1}) \quad (1)$$

$$\Delta X_2 = \frac{1}{2}(D_i + D_{i+1}) + L \quad (2)$$

式中: i 为第 i 个元件; D_i 为第 i 个元件的宽度; L 为两个元件之间的导线长度。

2.4.1 基于生成树的坐标位置生成法

采用深度优先搜索算法可以搜索整个网络, 构建网络的生成树^[22]。根据配电网特点, 无向图中一般会有度为 1 的结点, 表示电源或负荷。选择度为 1 的结点为起始结点进行搜索, 令该结点为坐标零点, 起始坐标生成方式为①。搜索过程中访问到邻接未访问结点时坐标生成方式与上一结点相同, 访问到不邻接未访问结点时坐标生成方式采用与该结点邻接已访问结点不同的坐标生成方式, 方式①和方式③交替进行。若一个结点表示母线元件, 在 RTDS 中还需要根据该结点的度来确定长度。确定生成树中所有结点位置之后, 依次用多条导线来表示所有的连枝。

这种方法适用于配电网的无向图本身就是生成树或者没有很多闭合环的情况。当无向图有很多闭合环且闭合环比较集中时, 用这种方法可能会使最后确定位置的连枝排列混乱, 此时可以从闭合环的角度考虑坐标位置生成顺序。

2.4.2 基于最小独立闭合环的坐标位置生成法

采用网孔自动搜索算法^[23]搜索出无向图中所有的最小独立闭合环(以下简称“环”)。去掉原图中不构成环的边, 将每个连通部分表示为一个子图。

将每个子图在原图 G 中等效成一个结点, 形成新的树状图 G' , 用基于生成树的坐标位置生成法确定各个结点的相对位置。

搜索过程中访问到等效结点时先确定等效结点坐标, 则确定了子图结点中与上一结点相连的

结点的坐标。再遵循依次将每个环“矩形化”的原则确定对应子图内其余结点位置。“矩形化”过程即将环中的边按顺序分为四组, 分别用四种坐标生成方式来生成结点和导线从而得到矩形结构。当有与其他环相邻的边时将其分为同一组, 其余边从母线结点处划分, 不够划分成四组时将一条边分成多条。

确定该子图所有结点坐标后再访问 G' 中下一结点, 此时需要将该子图结点中与下一结点相连的结点坐标代替上一结点坐标, 且坐标生成方式不能沿用, 需要先判断接下来生成的结点是否会与子图重叠。

2.4.3 选择原则

由于基于最小独立闭合环的坐标位置生成法更适合闭合环多且集中的拓扑电路, 因此本文通过连枝比和分散度两个评价指标来判断电路拓扑的这种特性。

连枝比即为无向图中连枝数与支路数的比值, 其定义为

$$A = \frac{m}{b} = \frac{b-n+1}{b} \quad (3)$$

式中: m 为连枝数, 即最小独立闭合环数; b 为边数; n 为结点数。

分散度即为环的分散程度, 其定义为

$$B = \begin{cases} 0, & N = 0 \\ \frac{1}{N}, & N \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, N 为去掉不构成环的边后连通部分数量, 即基于最小独立闭合环的坐标位置生成法确定的子图数。

然后通过式(5)来综合判断网络拓扑的特点。当 R 越大时越适合用基于最小独立闭合环的坐标位置生成法。

$$R = \mu_1 A + \mu_2 B \quad (5)$$

式中, μ_1 和 μ_2 是两个指标的权重系数。

3 基于 CIM 的配电网模型转换到 RTDS 模型软件的开发与应用

3.1 基于 CIM 的配电网模型转换到 RTDS 模型软件的开发

CIM 在公共信息交换中利用 XML(可扩展标记语言)来作为系统描述工具^[24-25], 配网管理系统生成的 CIM/XML 文档包括了配电网的完整配置信息。而在 RSCAD 中搭建模型可以直接通过修改 DFT 格式文件来实现, 因此基于 CIM 的配电网模型到 RTDS 仿真模型转换的过程也就是

CIM/XML 文档向 DFT 格式文件转换的过程。

根据前文对基于 CIM 的配电网模型到 RTDS 模型转换过程的研究, 采用 Qt/C++ 软件实现 CIM/XML 文档向 DFT 格式文件的转换, 具体程序流程图如图 4 所示。

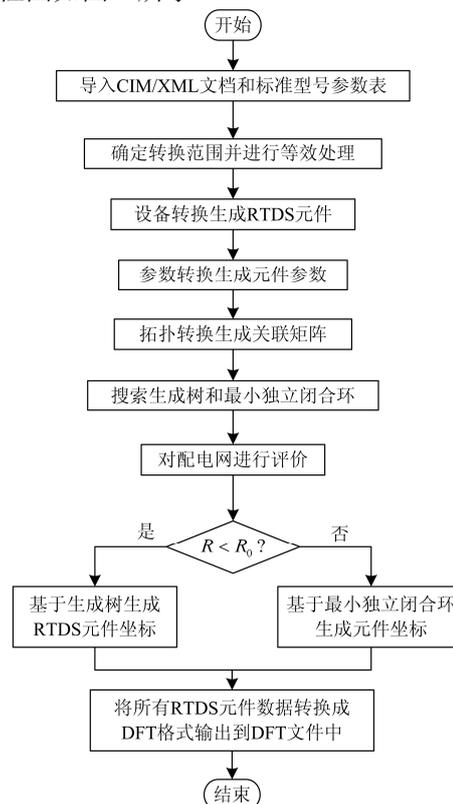


图 4 程序流程图

Fig. 4 Program flow chart

3.2 基于 CIM 的配电网模型转换到 RTDS 模型软件的应用

将开发的模型转换软件应用于实际配电网中从而对其有效性进行验证。导入某市配网管理系统中两个 10 kV 变电站之间的配电网 CIM/XML 文档和各种标准型号参数表。选取其中的“香溢站”配电区域电路, 转换过程中忽略了 CIM 中的隔离开关, 将配电母线上的进线等效为电源, 出线等效为负荷。转换过程中经判断选择了基于最小独立闭合环的坐标位置生成法, 将转换结果生成的 DFT 文档导入到 RSCAD 软件界面中显示如图 5 所示, 图中仅出示了主电路的单线图, 而忽略了控制元件。参照配网管理系统根据 CIM/XML 文档生成的配电网接线 SVG 矢量图, 可知转换前后配电网结构是一致的。选取馈线“江一 8117 线”进行转换, 转换过程中经判断选择了基于生成树的坐标位置生成法, 转换结果如图 6 所示。图 5

和图6分别验证了两种坐标位置生成法的正确性，验证了模型拓扑转换的有效性。

用馈线“江一 8117 线”对模型参数转换的有效性进行验证。该馈线的主干线路型号均为 YJV22-8.5/15 3×300，转换后得到线路的正序阻抗和零序阻抗如表 2 所示。将等效电源的内阻设置为最小值 $10^{-6} \Omega$ ，断路器的闭合电阻设为 0.0001Ω ，动态负荷元件中的负荷初始有功和无功功率设置为 1 MW 和 0.5 Mvar，交流电源的初始有功和无功功率设置为 7 MW 和 3.5 Mvar。将交流电源处节点设置为平衡节点，其余节点都设置为 PQ 节点，在 RSCAD 软件界面中进行潮流运算，结果如表 3 所示，验证了模型参数转换的有效性。

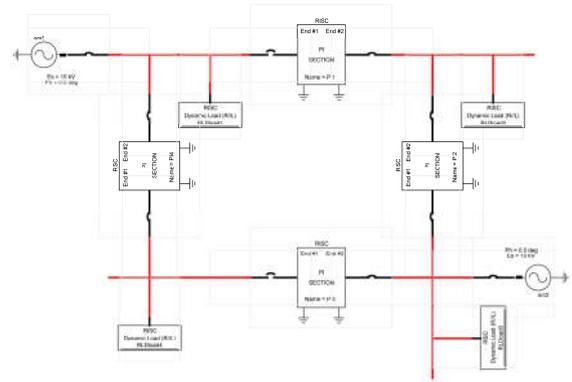


图 5 “香溢站”配电区域转换结果图

Fig. 5 Conversion result graph of XiangYi Distribution Area

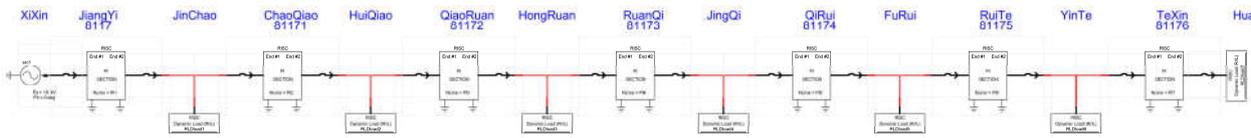


图 6 馈线“江一 8117 线”转换结果图

Fig. 6 Conversion result graph of JiangYi8117 Feeder

表 2 线路的正序阻抗和零序阻抗参数表

Table 2 Parameter table of positive and zero sequence impedance in PI-section model

线路	R_p/Ω	X_p/Ω	$X_{cp}/M\Omega$	R_z/Ω	X_z/Ω	$X_{cz}/M\Omega$
JiangYi 8117	0.024 04	0.035 92	0.003 36	0.240 40	0.125 72	0.003 36
ChaoQiao 81171	0.061 60	0.092 05	0.008 61	0.616 03	0.322 16	0.008 61
QiaoRuan 81172	0.060 70	0.090 70	0.008 48	0.607 01	0.317 44	0.008 48
RuanQi 81173	0.007 81	0.011 67	0.001 1	0.078 13	0.040 86	0.001 1
QiRui 81174	0.036 06	0.053 88	0.005 04	0.360 60	0.188 58	0.005 04
RuiTe 81175	0.030 89	0.046 16	0.004 32	0.308 91	0.161 55	0.004 32
TeXin 81176	0.038 58	0.057 64	0.005 39	0.385 76	0.201 74	0.005 39

表 3 潮流运算结果表

Table 3 Table of trend results

节点	电压/p.u.	相角/deg
JinChao	0.997 07	-0.098 70
HuiQiao	0.990 65	-0.317 75
HongRuan	0.985 39	-0.500 33
JingQi	0.984 84	-0.519 15
FuRui	0.982 97	-0.583 87
YinTe	0.981 86	-0.620 86
HuaXin	0.981 18	-0.643 88

4 结语

本文分析了 CIM 和 RTDS 模型的区别并提出了模型转换的若干关键技术，根据规模差异先对配电网模型进行选取和等效，再根据电气设备差异分别

进行电气设备转换、参数转换和拓扑结构转换。在拓扑转换过程中利用图论的相关知识提出了基于生成树的坐标位置生成法，在此基础上针对闭环环多且集中的拓扑电路提出了基于最小独立闭合环的方法，并用连枝比和分散度两个评价指标来判断适用于后者的电路拓扑。开发了基于 CIM 的配电网模型到 RTDS 仿真模型的自动转换软件，最后将一个真实的配电网模型载入到 RTDS 仿真系统中。转换结果表明，该转换软件能方便地将配电网的局部电路转换到 RTDS 中并形成合理直观的仿真电路，从而实现了配电网局部电路的快速实时仿真。

参考文献

[1] 陶顺, 陈鹏伟, 肖湘宁, 等. 智能配电网不确定性建模与供电特征优化技术综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 77-91.

- TAO Shun, CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, et al. Review on uncertainty modeling and power supply characteristics optimization technology in smart distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 77-91.
- [2] 董文杰, 田廓. 考虑电动汽车接入的智能配电网投资规划模型[J]. 陕西电力, 2016, 44(9): 32-36.
- DONG Wenjie, TIAN Kuo. Smart distribution investment planning model considering the integration of electric vehicles[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(9): 32-36.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 林霞, 时永, 李强, 等. 基于 DG 接入的配网自动化系统保护策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 137-144.
- LIN Xia, SHI Yong, LI Qiang, et al. Research on the protection strategy of distribution automation system based on DG access[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 137-144.
- [6] 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 network based on RTDS[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(4): 18-25.
- [7] 欧开健, 张树卿, 童陆园, 等. 基于并行计算机/RTDS 的混合实时仿真不对称故障接口交互与实现[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 178-185.
- OU Kaijian, ZHANG Shuqing, TONG Luyuan, et al. Interface method and implementation for asymmetric fault simulation on parallel computer/RTDS-based hybrid simulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 178-185.
- [8] 崔亚辉, 张俊杰, 孙鹏, 等. 某 1000 MW 机组轴系次同步振荡仿真研究[J]. 热力发电, 2016, 45(11): 19-24.
- CUI Yahui, ZHANG Junjie, SUN Peng, et al. Simulation of subsynchronous oscillation caused by fault in converter station of a 1000 MW unit shafting[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(11): 19-24.
- [9] LOF A, REPO S, PIKKARAINEN M, et al. Low voltage network monitoring in RTDS environment[C] // Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4th IEEE/PES, October 6-9, 2013, Lyngby, Denmark: 1-5.
- [10] LEE S R, YOON J Y, KIM J H, et al. Protective relay tests of hybrid SFCLs in a Korean distribution power system using RTDS[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 2188-2192.
- [11] 范宏, 朱牧之, 沈冰, 等. 线路保护实时仿真自动测试平台设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 123-129.
- FAN Hong, ZHU Muzhi, SHEN Bing, et al. Research on automatic testing system of line protection based on real time simulation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 123-129.
- [12] 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.
- [13] 刘海涛, 赵江河, 苏剑. 基于 ESB 的配电网自动化及管理系统信息集成[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 47-51.
- LIU Haitao, ZHAO Jianghe, SU Jian. ESB based information integration of distribution automation and management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 47-51.
- [14] 李传健, 陈炯聪, 郑文杰, 等. 基于 IEC61968 的配电网管理系统信息集成消息设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(24): 44-48.
- LI Chuanjian, CHEN Jiongcong, ZHENG Wenjie, et al. Design and implementation of information integration message for distribution network management systems based on IEC61968[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 44-48.
- [15] 陈清鹤, 刘东, 李荔芳. 基于 CIM 建模的配电网三相潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 49-53.
- CHEN Qinghe, LIU Dong, LI Lifang. CIM based three-phase power flow for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 49-53.

[16] 罗庆, 吴良良, 寿挺, 等. 基于 CIM 的电网规划管理决策辅助系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 111-117.
LUO Qing, WU Liangliang, SHOU Ting, et al. Decision support system for power grid planning and management based on CIM[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 111-117.

[17] 王军, 武文广, 李逸驰, 等. 支撑互动用电的用电信息采集系统基本构成与关键技术[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 1-5.
WANG Jun, WU Wenguang, LI Yichi, et al. Basic structure and key technology of power utilization information acquisition system for supporting interactive service[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(4): 1-5.

[18] Energy management system application program interface (EMS-API), part 301 common information model (CIM): IEC 61970[S].

[19] RTDS Technologies Inc. RTDS handbook[R]. Manitoba: RTDS Technologies Inc, 2007.

[20] 高研, 杨琰冲, 张胜利. 基于公共信息模型的配电网供电路径分析[J]. 电工电气, 2011(11): 49-52.
GAO Yan, YANG Yanchong, ZHANG Shengli. Analysis to distribution network power supply path based on common information model[J]. Electrotechnics Electric, 2011(11): 49-52.

[21] 张清华. 图论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 34-54, 70-76.

[22] 张民, 贺仁睦, 许津津, 等. 图论在 BPA 模型向 PSCAD 模型自动转换中的应用[J]. 电网技术, 2012, 36(6): 163-169.
ZHANG Min, HE Renmu, XU Jinjin, et al. Application of graph theory in approach for automatically converting BPA models into PSCAD/EMTDC models[J]. Power System Technology, 2012, 36(6): 163-169.

[23] 赵海, 李占旭, 宋纯贺, 等. 网孔自动搜索算法在水电仿真中的设计与实现[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(9): 1253-1256.
ZHAO Hai, LI Zhanxu, SONG Chunhe, et al. Design and implementation of the algorithm to search mesh in hydropower simulation[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2008, 29(9): 1253-1256.

[24] 章坚民, 徐爱春, 李海翔, 等. 基于 SVG/XML/CIM 的变电站自动化工程配置系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 54-57.
ZHANG Jianmin, XU Aichun, LI Haixiang, et al. An automatic engineering configuration system for substation automation based on SVG/XML/CIM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 54-57.

[25] 丁银, 丁明, 毕锐, 等. 微电网系统 CIM/XML 模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 37-42.
DING Yin, DING Ming, BI Rui, et al. Research on CIM/XML model of microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 37-42.

收稿日期: 2017-06-13; 修回日期: 2017-08-17

作者简介:

陈 玲(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: chenling166@163.com

吴栋萁(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: 40278855@qq.com

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

(编辑 魏小丽)