

doi: 10.12052/gdutxb.210085

# 基于图模一体化技术的配电网可靠性评估

郑世明<sup>1</sup>, 林泽鑫<sup>2</sup>, 黄园芳<sup>1</sup>, 李旺军<sup>2</sup>, 彭显刚<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司 湛江供电局, 广东 湛江 524005; 2. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 数字电网发展对配电网规划提出了更高的要求, 一种基于图模一体化技术的配电网可靠性评估方法, 可在提高电网规划人员工作效率的同时, 增强配电网可靠性评估的可视化和提高精准化水平。该方法依托图模一体化技术, 以可缩放矢量图形(Scalable Vector Graphics, SVG)作为可视化交互对象, 将待规划馈线SVG模拟的规划内容映射至公共信息模型(Common Information Model, CIM)中, 再进行解析, 并构建配网拓扑数据模型。基于拓扑模型采用故障扩散遍历算法对规划态配电网的馈线和负荷点的可靠性指标进行求解。最后, 通过模拟某地区的配网馈线规划改造, 得出待规划馈线规划前后可靠性指标的变化, 证明方法的有效性与实用性。该方法能有效提高规划人员对各类配电网规划工程可靠性评估的效率, 为配电网分析、配电网规划方案评估、配电自愈工程建设的效益评价等工作提供重要的支持。

**关键词:** 图模一体化; 可视化; 可缩放矢量图形; 公共信息模型; 配电网可靠性

中图分类号: TM744

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2022)03-0063-07

## An Reliability Evaluation of Distribution Network Based on Graph Model Integration Technology

Zheng Shi-ming<sup>1</sup>, Lin Ze-xin<sup>2</sup>, Huang Yuan-fang<sup>1</sup>, Li Wang-jun<sup>2</sup>, Peng Xian-gang<sup>2</sup>

(1. Zhanjiang Power Supply Company, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhanjiang 524005, China; 2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The development of digital power grid puts forward higher requirements for distribution network planning. A distribution network reliability evaluation method based on graph-model integration technology is proposed, which can improve the efficiency of power network planners while improving the visualization and precision of distribution network reliability evaluation. This method is based on graph-mode integration technology, and a scalable vector graphics (SVG) map is proposed as a visual interactive object to map the planning content of the simulation on the feeder's SVG map to the common information model (CIM). Based on the CIM, the distribution network topological model is built, and the feeder and load point reliability index solved using the fault diffusion traversal algorithm. Finally, by simulating the feeder planning transformation of a certain area, the reliability index changes before and after the feeder planning are given, showing that this method is effective and practicable. This method can effectively improve the efficiency of reliability evaluation of various distribution network planning projects by planners and provide important support for distribution network analysis, distribution network planning scheme evaluation, benefit evaluation of distribution self-healing project construction and so on.

**Key words:** graph model integration; visualization; scalable vector graphics; common information model; reliability of distribution network

当前, 建设“数字中国”、发展“数字经济”成为了国家发展战略, 蓬勃发展的新兴数字技术加速推

动着数字经济的建设<sup>[1-2]</sup>。数字配电网是传统配电网融合新兴数字技术后, 在数字经济生态中的价值延

收稿日期: 2021-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61903091); 广东电网有限责任公司科技项目(030800KK52180032)

作者简介: 郑世明(1969-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网工程建设与管理

通信作者: 林泽鑫(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行分析、供电可靠性管理, E-mail: 326848867@qq.com

伸<sup>[3]</sup>。当前配电网正处于数字化系统建设阶段,逐步开始运用数据资源指导配电网运维工作<sup>[4]</sup>,传统的配电网规划流程,需要规划人员根据规划方案预先设计好配电网网架,然后在规划软件中对规划网架拓扑进行建模。繁琐的线路图绘制工作大大影响了规划人员对项目规划成效的评估效率,这与电网公司的数字化转型要求有着较大差距。因此,在数字电网转型背景下,研究一种可在现有配电网拓扑上进行可视化规划,并精准快速评估规划网架可靠性的方法,具有十分重要的意义。

可靠性评估方式主要采用马尔科夫模型<sup>[5]</sup>,学者们将模型与配电网特征相结合,提出了适用于配电网可靠性评估的各类算法,如蒙特卡洛法<sup>[6]</sup>、最小路法<sup>[7]</sup>、故障模式后果分析法<sup>[8]</sup>、故障扩散法<sup>[9]</sup>、网络等值法<sup>[10]</sup>等。配电网可靠性评估需要以详细的配电网拓扑结构和参数作为依托,当前我国大多数供电企业用公共信息模型(CIM)描述电网拓扑,用可缩放矢量图形(SVG)作为电力系统动态展示的工具<sup>[11]</sup>,通过图模一体化技术动态展示电网潮流<sup>[12]</sup>,实现电网信息实时监控<sup>[13]</sup>、实时合环决策分析<sup>[14]</sup>等功能。以上研究具有合理的理论基础并获得了一定的应用成果,但是仍然存在一些问题需要完善:(1)现行的基于图模一体化技术实现的配电系统可视化主要面向的场景为电力数据监控,虽然实现了运行参数的动态展示,但是不能与SVG中的电网拓扑进行互动操作,不适用于电网规划场景;(2)当前电力系统图模一体化技术的研究主要集中在基于CIM自动生成SVG(CIM映射至SVG),而配网的人机交互规划是从图形界面到模型建立的过程,已有图模一体化技术无法在规划过程中以SVG作为人机交互接口对CIM中的数据进行操作(SVG映射至CIM)。

针对上述问题,本文提出一种基于图模一体化技术的配电网供电可靠性评估的方法。首先用Vue.js框架、SVG.js工具包构建人机交互的架构,使用以响应式数据为核心的方式将配网SVG上模拟规划的内容映射至CIM中,结合CIM的拓扑数据简化算法和故障扩散可靠性评估算法,得出原网架以及规划态网架的可靠性指标。该方法实现了配网可视化规划及在线评估,规划人员可精准快速地对规划配网进行评估,并根据评估结果灵活调整规划方案。

## 1 实现图模一体化的可视化配网规划

电力系统图模一体化的核心思想是构建数据和

系统图形之间的联系,使得拓扑图形和电力数据之间一一对应<sup>[15]</sup>。配网的规划是在图层上进行的,而可靠性计算则需要拓扑数据支撑,要实现图模一体化的可视化配网可靠性评估,需要实现从SVG到CIM的数据交互。因此,本文结合配网规划的需求,提出了一种基于Vue.js和SVG.js的响应式图形界面交互方法,实现配网可视化规划。

### 1.1 基于Vue.js的SVG处理

Vue.js框架是一套构建用户界面的渐进式框架,通过API(Application Program Interface)绑定响应式数据和活动图层组件。首先使用Vue.js框架配合UI框架的Vuetify搭建页面样式,构建可视化窗口。使用Web端原生API Proxy,对数据以及函数调用进行劫持,并使用观察者模式,监听图层中各个元素数据的变换。当规划人员对配网SVG上的设备和数据进行修改或者增删时,则会触发封装好的mutation函数,对Web端原生函数多一层封装处理,并由Vuex将数据缓存管理,最后统一上传至后台进行更新,实现可视化页面展示数据与SVG源数据的联动变化。

### 1.2 实现SVG的可视化规划

配网可视化规划以实际中压配电网的拓扑SVG为基础,调用SVG.js工具包对SVG元素进行操作,可在SVG上增添或删除电力设备、电力线路。在操作SVG电力元件设备的过程中,通过调用Vue.js设定线路、变压器的基础参数和各类开关的运行状态等,形成规划电网完整的拓扑信息。

对SVG进行可视化规划的步骤如下:(1)浏览器客户端使用ajax向图源服务器发送相应请求,服务器返回对应SVG图源的blob流及规划信息树的JSON;(2)浏览器客户端下载SVG图源并将数据转换成XML文件格式,以便在浏览器上正确展示;(3)使用JavaScript脚本语言在XML文件上绑定function,绑定各SVG元素、线段的点击与拖动,获取其对应信息;(4)使用SVG.js轻量DOM操作库,对各SVG元素的DOM操作进行封装,完成SVG元素树形数据结构的统一化操作;(5)在可视化界面通过点击SVG元素进行规划操作,在进行添加操作时,同步向图源服务器请求添加对应元素的id,并绑定在一起。在进行删除操作时,一并删除该元素的子元素,并将它们的id一并发送给服务器,保证数据的一致性;(6)SVG图源更新完成后,用户通过ajax上传最新SVG图源文件与更新后的规划信息树另存为的新迭代文件。实现可视化规划的流程如图1所示。

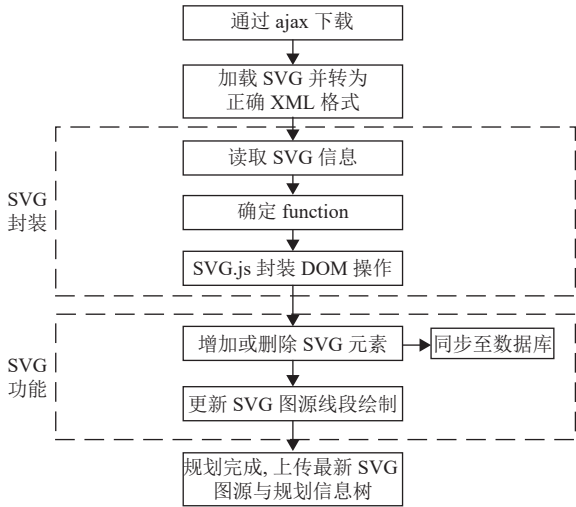


图1 可视化规划实现过程

Fig.1 Process of visualized planning

### 1.3 从SVG到CIM的图模数据映射

在SVG图上完成规划操作后,将更改后的拓扑信息以链表的形式映射给CIM,其中链表形式如表1所示。CIM接收到模型变更通知及拓扑信息链表后,在原CIM文件的基础上,按照设备类型,使用模板匹配的方法将设备的基本参数和拓扑信息追加到指定的XML标签、XML标签文本和XML标签属性上,把在SVG上进行的拓扑规划映射到CIM上,并另存新生成的CIM。

表1 拓扑信息传输链表

Table 1 Chain table of topology information

设备编号	设备ID	设备类型	入端设备ID	出端设备ID	设备型号	线路长度/m
1	Test_1xx	线路	Pole_xxx	Test_2xx	LGJ-50	180.21
2	Test_2xx	负荷开关	Test_1xx	Test_3xx	26T01	
3	Test_3xx	变压器	Test_2xx	Test_4xx	S11-M-100/10	

### 1.4 可视化界面馈线拓扑渲染

生成新的CIM后需要在可视化界面的地图上生成馈线拓扑直观图以供规划人员查看。在浏览器客户端上使用ajax向馈线数据服务器发送相应请求,服务器将返回对应馈线信息的JSON。浏览器客户端下载馈线信息后,调用yyMap.js和yy-map.vue里封装好的函数,将CIM中包含的设备类型、设备坐标、馈线id等数据转换成地图展示所需的各种数据格式,映射为对应的设备图元后,在浏览器的地图上渲染出馈线拓扑信息。

## 2 配电网CIM拓扑数据的处理

规划内容以链表的形式从SVG映射至CIM,储

存在XML文件中。基于CIM的XML文件解析的原始拓扑中包含许多在可靠性分析中无用的冗余设备。为了提高算法的计算效率,实现对复杂配电网精准快速的可靠性评估,需要对原始拓扑数据进行简化。

### 2.1 配电网CIM系统拓扑模型构建

CIM中定义了许多包和类,并通过关联、泛化、聚合等关系,连接各个类元素来详细描述电网。文件数据项内容包括各元件的设备编号、设备类型、设备两端节点编号等。

导电设备含有端子,不同类型的导电设备含有不同数量的端子,每个端子含有对应的连接节点编号,端子的连接节点作为中间媒介实现不同设备之间的连接。大部分导电设备具有2个端子,只有杆塔等设备有1个端子,端子和连接节点一一对应,这种表达模型描述了电网拓扑的连接关系,称为开关/节点模型<sup>[16]</sup>。

### 2.2 配电网CIM的拓扑简化处理

配电网可靠性指标受多种设备影响,包括变电站母线、网架线路、断路器、隔离开关、联络开关、配电变压器等。除了以上关键元件之外,配电网CIM中还包含了杆塔、设备故障指示器、电压互感器等对可靠性指标不产生影响的非关键元件。为了提高程序的检索效率,需要对CIM的原始拓扑作出简化,将非关键元件从模型中剔除,同时要保证剔除这些元件后配网系统仍保持连通性。

简化遵循以下规则<sup>[17]</sup>:(1)合并起点与分支点间、分支点与分支点间、分支点与终点间型号相同的相邻架空线路和电缆,省略避雷器和站房进出的电气连接线,实现非关键节点归一化处理;(2)保留必要的开关类,如断路器、熔断器等;(3)省略拓扑结构中没有电气属性的杆塔和电缆终端头。

图2为网馈线M的拓扑简化。图2中,圆圈中的号码代表设备编号,方框中的号码代表节点编号。馈线所包含的部分元件设备的数据如表2所示。

简化算法将非关键设备的入端节点和出端节点进行归一化处理,将其视作原入端节点,与本设备相连的入端节点改变为本设备的现出端节点,保证拓扑的连接关系;然后删除所有的非关键设备,对设备的入端节点和出端节点进行重新编号。

## 3 可靠性评估方法及流程

解析映射后的CIM得到规划配电网的拓扑数据,将其作为可靠性评估算法的入参,输入后对规划

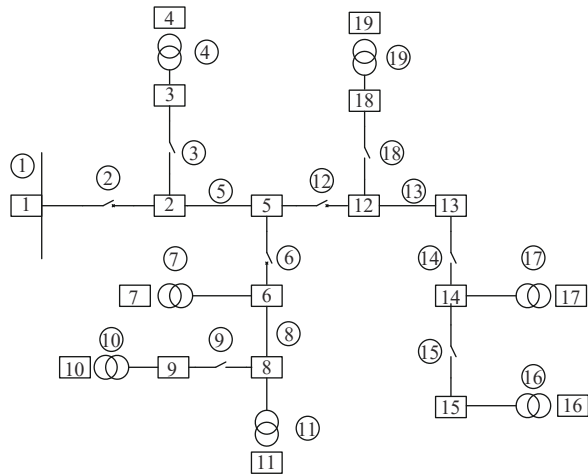


图2 配电网馈线拓扑简化图

Fig.2 Simplified topological graph of a distribution feeder

表2 配电网馈线主要元件

Table 2 Data sheet of elements in a distribution feeder

设备编号	设备类型	入端节点	出端节点
1	母线	0	1
2	断路器	1	2
3	隔离开关	2	3
4	变压器	3	4
5	架空线	2	5
13	电缆	12	13

网架进行可靠性分析。本文采用故障扩散遍历法<sup>[9]</sup>对配电网进行可靠性评估,该方法无需再进行元件的“合并”和“分解”,而且能够适应多分支线和带联络线路的馈线计算,在此基础上一次性获得各负荷点和馈线的可靠性指标。

### 3.1 节点分类

馈线节点按照受一阶故障影响的程度不同,分为4类。*A*类节点:元件故障发生后开关正确动作而不受故障影响;*B*类节点:元件故障发生后可由原供电母线恢复供电,停电时间为隔离开关操作时间 $t_b$ ;*C*类节点:元件故障发生后可通过联络线由转供线路恢复供电,停电时间为隔离开关操作时间 $t_b$ 与联络开关倒闸操作时间 $t_c$ 之和;*D*类节点:受到元件故障影响,停电时间为元件修复时间 $t_d$ 。

### 3.2 负荷点类型确定

故障扩散法以元件故障的隔离范围和影响范围来确定馈线各负荷点在本次故障影响下的分类。首先从元件*i*故障处逆潮流方向搜索第1个过流保护设备(断路器和熔断器),从该过流保护设备向下游遍历得到的节点集所代表的区域为故障的影响域 $S_i$ ,向

上游遍历获得的节点集所代表的区域则不受本次故障影响,表示为正常域 $Y_i$ 。然后,从故障元件处开始遍历,遇到保护设备(断路器、隔离开关、熔断器)或搜索至线路末端则停止该方向搜索,遍历所获得的节点集所代表的区域为故障域 $G_i$ 。从故障域 $G_i$ 的边界节点开始对影响域内、故障域外的区域进行遍历,获得*j*个分块子系统 $S_{i,j}$ ,若该分块子系统内含有电源点,剔除正常域部分后,区域内的节点即属于*B*类节点;若分块子系统内不含电源点但有联络开关,则该子系统内的节点属于*C*类节点;若分块子系统内既不含电源点,也没有联络开关,则该子系统内节点属于*D*类节点。以上规则可由式(1)表示。

$$\begin{cases} A_i = Y_i \\ B_i = (S_{i,j})_{p \in S_{i,j}} \\ C_i = (S_{i,j})_{p \notin S_{i,j}, s \in S_{i,j}} \\ D_i = G_i + S_i - B_i - C_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ 、 $D_i$ 表示元件*i*故障影响下的*A*、*B*、*C*、*D*类节点的集合; $p$ 表示电源点; $s$ 表示联络开关。

此时馈线的所有节点均分属于*A*、*B*、*C*、*D*类节点集,通过识别负荷节点所属类别即可获知该负荷点受本次元件*i*故障影响的停电时长。

### 3.3 可靠性指标计算

配电网可靠性定义为供电系统对用电用户持续供电的能力,本文选取以下4个配电系统的供电可靠性指标作为评估标准:系统平均停电频率SAIFI;系统平均停电持续时间SAIDI;用户平均停电持续时间CAIDI;用户供电可用率ASAI。由式(2)~(5)得到系统的可靠性指标。

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (2)$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \quad (3)$$

$$CAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum \lambda_i N_i} \quad (4)$$

$$ASAI = \frac{\sum U_i \times 8760 - \sum U_i N_i}{\sum U_i \times 8760} \quad (5)$$

式中: $\lambda_i$ 为元件*i*故障对该负荷点故障率的影响; $U_i$ 为该负荷点的年平均停电时长; $N_i$ 为第*i*个负荷点的接入用户数。

### 3.4 评估基本流程

基于图模一体化技术的配电网可靠性评估的主要流程如下:(1)选定待规划的线路,载入SVG和CIM;(2)根据业扩报装报表或配电网网络规划方案,在配网SVG上进行交互式可视化规划,并设定电气元件的基本参数和技术参数;(3)完成规划后,上传新的图源与新的规划树信息至后台保存;(4)在后台通过链表,将可视化规划结果的拓扑及电力元器件信息映射至CIM;(5)下载保存了规划结果的CIM模型文件,利用简化算法解析模型文件,获取简化的配网拓扑数据表;(6)将解析获得的配网拓扑数据输入可靠性计算模块,计算规划态配电网的可靠性指标。

## 4 应用实例

现以广东电网某供电局10 kV调顺线的配电网为例进行可视化规划,然后再进行可靠性评估。调顺线线路总长度为33.215 km,其中电缆长度为14.581 km,架空线长18.634 km,该馈线下接入变压器数量为63台,其中专用变压器56台,公用变压器7台,总计接入用户796户。目前调顺线所在供电区域分属B类地区,根据电网规划导则,B类地区供电可靠性要求达到99.96%以上,然而调顺线当前接线模式为“单辐射”,馈线供电可靠性低,不满足导则对该地区的供电要求。为了改善调顺线下用户的用电体验,提出了在馈线线路末端新建联络线路的规划方案。

根据统计数据,当地配网设备可靠性参数如表3所示,设定可靠性计算规则时,设置馈线的隔离开关倒闸操作时间和联络开关转供电操作时间参数为0.5 h,同时设定断路器、隔离开关、负荷开关和熔断器在故障发生后能100%可靠动作。

表3 馈线设备可靠性参数

Table 3 Reliability parameter of some equipment

设备类型	故障率	故障修复时间/(h·次 <sup>-1</sup> )
母线	0.01 次/a	2
电缆	0.01 次/(km·a)	10
架空线	0.08 次/(km·a)	6
变压器	0.05 次/a	5.5

解析调顺线的原始CIM拓扑数据,将线路的拓扑模型渲染上地图后,对调顺线当前配电网架的可靠性进行评估,系统评估结果如表4所示。表4的规划

前指标说明了前文所提的馈线供电可靠性不达标问题。在SVG中定位至主干线末端,根据规划方案的要求,选择在线路末端架设联络线路,与F13金调线形成联络以改善供电可靠性,规划后的配电网接线模式从“单辐射”变为“单联络”。

表4 调顺线可靠性指标规划前后对比

Table 4 Comparison of reliability indices

系统可靠性指标	SAIFI/ (次·(户·a) <sup>-1</sup> )	SAIDI/ (h·(户·a) <sup>-1</sup> )	CAIDI/ (h·(户·次) <sup>-1</sup> )	ASAI/%
规划前	0.993 9	4.708 2	4.737 3	99.946 2
规划后	0.993 9	3.079 5	3.098 6	99.964 8

在可视化平台加载调顺线SVG后,在主干线路的线路末端70号杆塔处架设联络线路,新增联络开关,规划后的SVG如图3所示。完成操作后,将图源与新的规划树信息上传给后台Vuex,并进行数据缓存,上传SVG后,通过链表的形式自动将规划内容映射至CIM的模型文件,并将规划态线路在地图上渲染。可视化界面的地图采用第三方软件BIGEMAP调用谷歌地图展示,规划后调顺线馈线组在地图上的展示如图4所示。

通过对比表4规划前后的馈线可靠性指标,可发现规划后系统的SAIDI、CAIDI有所改善,均提高了34.59%,ASAI从99.946 2%提升至99.964 8%,供电可靠性达到了B类地区要求。运用本文方法,规划人员可快速地对实施配电网规划方案后的规划态配电网进行精准评估,从而估计规划改造项目的成效。通过此实例验证了本文所提图模一体化的规划态配电网可靠性评估方法的有效性。

## 5 结语

在电网企业建设数字电网的背景下,基于图模一体化技术,提出了基于Vue.js和SVG.js的响应式图形界面交互方法和SVG/CIM数据交互技术方案,并结合CIM拓扑解析简化法和故障扩散可靠性评估算法,实现了基于图模一体化技术的配电网可靠性评估。通过JavaScript关联后,规划人员可直接在可视化界面对配网拓扑进行可视化规划操作。本方法可快速计算获得供电馈线和负荷台区的可靠性指标,有效提高规划人员对各类配网规划工程可靠性评估的效率,为配电网分析、配电网规划方案评估、配电自愈工程建设的效益评价等工作提供重要的支持。

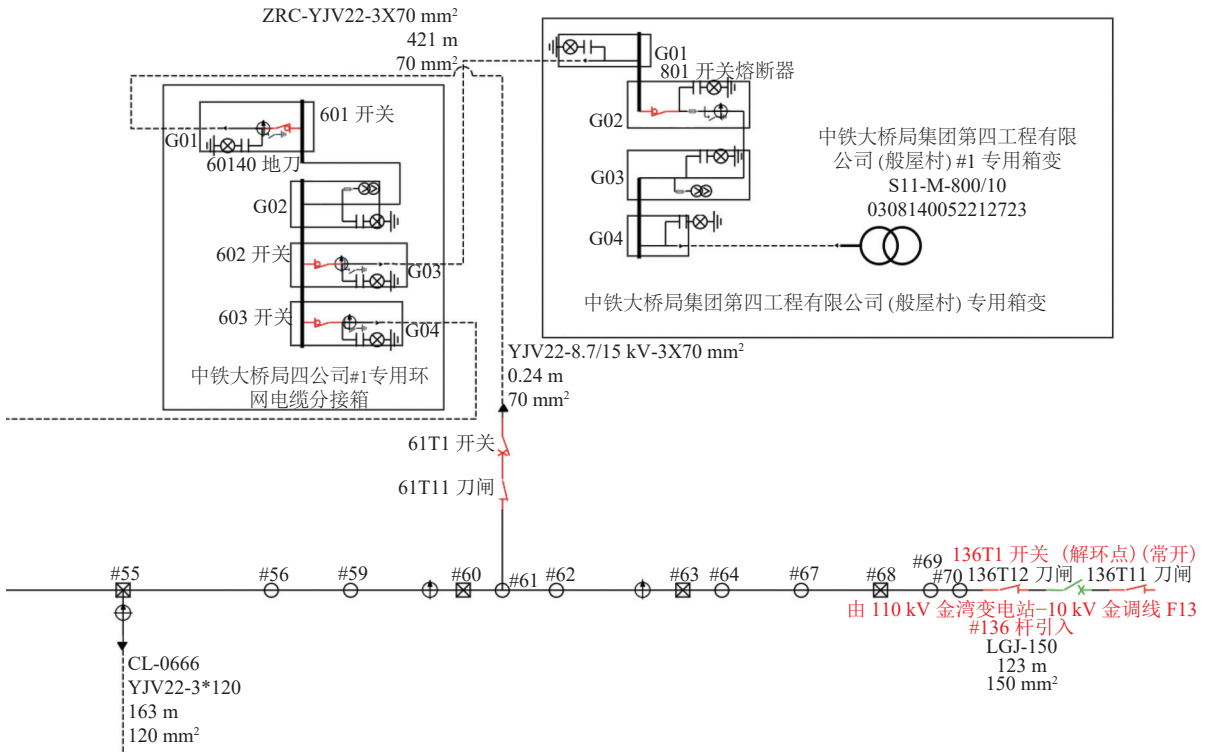


图3 调顺线规划后SVG局部图

Fig.3 Partial map of planned Tiaoshun line's SVG map



图4 调顺线规划后馈线组

Fig.4 Feeder group of planned Tiaoshun line

## 参考文献:

- [1] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.
- ZENG M, YANG Y Q, LIU D N, *et al.* “Generation-Grid-Load-Storage” coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies [J]. *Power System Technology*, 2016, 40(1): 114-124.
- [2] 中国南方电网责任有限公司. 数字电网白皮书[R]. 广州: 南方电网责任有限公司, 2020.
- [3] ABE R, TAOKA H, MCQUILKIN D. Digital grid: communicative electric grids of the future [J]. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2011, 2(2): 399-410.
- [4] 白浩, 周长城, 袁智勇, 等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考[J]. 南方电网技术, 2020, 14(8): 18-24.
- BAI H, ZHOU C C, YUAN Z Y, *et al.* Prospect and thinking of digital power grid based on digital twin [J]. *Southern Power System Technology*, 2020, 14(8): 18-24.
- [5] 李永亮, 周雷, 晏浩然, 等. 基于模糊算法的智能变电站继电保护可靠性评估[J]. 广东工业大学学报, 2017, 34(4): 65-71.
- LI Y L, ZHOU L, YAN H R, *et al.* A reliability analysis of intelligent substation relay protection based on fuzzy algorithm [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2017, 34(4): 65-71.
- [6] 雷敏, 魏务卿, 曾进辉, 等. 考虑需求响应的负荷控制对供电可靠性影响分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 53-59.
- LEI M, WEI W Q, ZENG J H, *et al.* Effect of load control on power supply reliability considering demand response [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(10): 53-59.
- [7] 熊小萍, 杨露, 李宁, 等. 基于仿射最小路法的含分布式电源配电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 43-50.
- XIONG X P, YANG L, LI N, *et al.* Reliability analysis of distribution network with distribution generators based on affine minimal path method [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(17): 43-50.
- [8] 伍梓超, 岑耀扬, 袁秋实, 等. 考虑元件故障率曲线的配电网可靠性评估方法[J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(8): 2061-2065.
- WU Z C, CEN Y Y, YUAN Q S, *et al.* Distribution network

reliability evaluation method considering component failure rate curve [J]. *Computer and Digital Engineering*, 2019, 47(8): 2061-2065.

- [9] 咎贵龙, 赵华, 吴延琳, 等. 考虑容量及电压约束的配电网可靠性评估前推故障扩散法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(7): 61-67.

ZAN G L, ZHAO H, WU Y L, *et al.* Forward failure diffusion algorithm for reliability evaluation of distribution network considering capacity and voltage constraints [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(7): 61-67.

- [10] 夏勇军, 肖繁. 考虑电力二次系统影响的智能配电网综合可靠性评估方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(23): 165-172.

XIA Y J, XIAO F. Comprehensive reliability evaluation method for smart distribution network considering influence of secondary power system [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(23): 165-172.

- [11] 黄科维. 基于多源数据融合的配电网规划方法研究与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.

- [12] 章锐, 陈树勇, 刘道伟, 等. 基于Echart的电网Web可视化研究及应用[J]. *电测与仪表*, 2017, 54(19): 59-66.

ZHANG R, CHEN S Y, LIU D W, *et al.* Research and application of grid Web visualization based on EChart [J]. *Electrical Measurement and Instrument*, 2017, 54(19): 59-66.

- [13] 赖晓文, 陈启鑫, 夏清, 等. 基于SVG技术的电力系统可视化平台集成与方法库开发[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(16): 76-81.

LAI X W, CHEN Q X, XIA Q, *et al.* Development of power system visualization platform and methods library based on SVG technology [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(16): 76-81.

- [14] 俞嘉, 夏友斌, 董月, 等. 基于CIM/SVG的主配一体化在线实时合环分析决策系统[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 42(4): 157-163.

YU J, XIA Y B, DONG Y, *et al.* Online real-time loop closing analysis system for main distribution network integration based on CIM/SVG [J]. *Power Capacitor and Reactive Power Compensation*, 2020, 42(4): 157-163.

- [15] 赵天宇. 基于SVG的电力系统图模一体化的研究与实现[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.

- [16] 陈连杰, 韩冰, 赵家庆, 等. 利用自动成图的配电网模型拓扑校核技术及实现[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(2): 160-164.

CHEN L J, HAN B, ZHAO J Q, *et al.* Automatic graphing based verification techniques for model topology of distribution network and its implementation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(2): 160-164.

- [17] 陈雪, 罗毅初, 黄科维, 等. 基于GIS系统拓扑数据的配电网改进最小路可靠性算法[J]. *南方电网技术*, 2017, 11(1): 80-86.

CHEN X, LUO Y C, HUANG K W, *et al.* GIS data based improved minimal path method for distribution network reliability [J]. *Southern Power System Technology*, 2017, 11(1): 80-86.

(责任编辑: 张玮欣)



(上接第54页)

- [16] XU D, YU X, SUN Y, *et al.* Resource allocation for secure IRS-assisted multiuser MISO systems[C]// 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Hawaii: IEEE, 2019: 1-6.

- [17] ZHANG Z, LYU L, WU Q, *et al.* Robust and secure communications in intelligent reflecting surface assisted NOMA networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(3): 739-743.

- [18] DONG L, WANG H. Secure MIMO transmission via intelligent reflecting surface [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(6): 787-790.

- [19] YANG G, XU X Y, LIANG Y C. Intelligent reflecting surface assisted non-orthogonal multiple access[EB/OL]. (201-

12-30)[2021-05-07]. <https://arxiv.org/abs/1907.03133v2>.

- [20] ZENG M, YADAV A, DOBRE O, *et al.* Energy-efficient joint user-RB association and power allocation for uplink hybrid NOMA-OMA [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(3): 5119-5131.

- [21] LYU L, DING Z, NI Q, *et al.* Secure MISO-NOMA transmission with artificial noise [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(7): 6700-6705.

- [22] ZHAN C, ZENG Y. Completion time minimization for multi-UAV enabled data collection [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(10): 4859-4872.

- [23] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization[M]. UK: Cambridge University Press, 2009.

(责任编辑: 张玮欣)