

DOI: 10.7667/PSPC151562

# 图库一体生成的配电自动化图元实时编码存显技术

屈志坚, 李立帆

(华东交通大学电气工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 针对配电自动化图形平台中图元及其配置库间关联的测量点多, 不仅配置繁杂, 而且图形业务数据难处理的问题, 提出了一种图库一体生成的图元实时编码及存显方法。在开源 OpenSCADA 监控平台基础上, 通过配电自动化图元结构分析, 给出典型变压器图元坐标系统的设计。以 Base64 对配电网图元进行编码存储, 利用 Java 语言实现了配电网图元的动态操作的编码处理过程。以北京东站 10 kV 配电网一个电气接线监控界面的生成为例, 进行图库一体生成的编码存储和显示测试。结果表明: 运用图库一体的图元编码技术设计监控系统图形界面, 可简化监控图形系统处理过程, 降低系统维护难度, 使图元设计及其存储一次完成, 具有重要的工程实用价值。

**关键词:** 配电自动化; 图库一体; 坐标系统; Base64 编码; 监控界面

## Distribution automation primitive real time encoding storage and display technology of graph-database integration generation

QU Zhijian, LI Lifan

(College of Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** There are many measurement points in graphic elements and configuration library in the distribution automation graphic system, which are not only complex to configure, but also difficult to process the graphic data. To solve the problem, a method of primitive real time encoding and storage is put forward. Based on the monitoring platform of OpenSCADA, through the analysis of the primitive structure, a transformer element coordinate system is designed. Base64 encoding is used to storage the primitive, and Java is employed to implement the dynamic processing of the primitive. Taking the monitoring interface of 10 kV distribution network of Beijing East Railway Station as an example, this paper proceeds with a test on the encoding storage and display. The results show that designing graphical interface of monitoring system by primitive encoding of the graph-database integration can simplify the processing of the monitor graphics system, and decrease the difficulty of system maintenance, and accomplish the graphic element design and storage at a time, which has the important value for practical project.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267005 and No. 51567008).

**Key words:** distribution automation; graph-database integration; coordinate system; Base64 code; monitoring interface

## 0 引言

随着智能电子设备向配电网的渗透, 配电自动化设备和系统的规模不断扩大, 电网节点与支路数量剧增, 拓扑结构也更为复杂, 使生成电力设备模型的图元和数据库的工作量也随之大增。为此, 具备图库一体的可视化生成模块<sup>[1-2]</sup>, 是配电主接线图

工程辅助生成的关键, 可大幅降低图形配置和监控系统维护代价。配电网库一体的可视化, 包含两层含义, 一是指电气设备图元和设备模型之间的映射, 即可以透过设备图元关联到设备的实体模型, 包括模型中的部分可视化的属性, 如变压器型号、容量等。另一层含义是由设备图元映射到数据库中的设备元组的各数据项, 由于配电自动化中以图形为中心的数据交换的瓶颈就是图片文件太大, 难以实时传输, 如果能对图元进行编码存储, 转换成二进制数据跨平台传输, 就能避免图片的直传, 很好地解决传输过程中编码转换的问题, 有利于提高传输效

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51267005, 51567008); 江西省自然科学基金资助项目 (20161BAB206156); 2016 年度江西省杰出青年人才资助计划

率。因此, 提出对配电自动化图元进行编码存显处理, 对工程应用具有重要意义。

图形界面是配电自动化系统的人机接口, 其辅助生成的易用性不仅影响工程开发成本, 更关系到实际应用时对配电设备的监控, 以及后期高效地进行系统的维护<sup>[3]</sup>。电力监控图形界面主要有三类实现方法。第一类为采用 DWG 等或自定义图形格式, 利用图形应用程序接口对监控画面进行图形编程<sup>[4-10]</sup>。在数据库中存储监控画面图的路径, 在每次数据变化时, 调用重绘接口刷新界面图, 这类方法对实时应用适应性不好, 容易闪屏。第二类为组态模式, 如 IFix、WinCC 等, 组态模式多提供跨石油、化工等领域的通用工具, 但往往仅提供基本电力设备模型、或仅支持有限的少数几个调度机节点, 使深度扩展和二次开发受到限制<sup>[11-16]</sup>。第三类是为监控画面中的图元建立配置库, 然后通过图元的表示 id 与配置库的 id 去一一对应, 通过庞大的配置库将图元与实时库进行关联, 实现复杂, 且配置库的一致性更新不易管理, 如一个图元 id 发生变化配置库的 id 必须一起修改, 但实际上, 如果能找到一种方法, 能将非结构化的各类图元映射为字符编码, 并将图元编码序列化存入数据库中处理, 在图元显示的时候就只需针对该图元做反序列化处理, 这样不但操作简化, 而且避免了从图元 id 到配置库的查询遍历过程。因此, 将图库融合一体, 考虑直接针对监控界面图元编码, 并将编码数据流存入数据库的方法, 目前尚少见文献报道。

配电网主接线的监控画面中的图元繁多, 但各图元都有一个特点, 即电力设备, 如断路器、隔离开关、变压器、电压互感器、电流互感器及电压模拟量、电流模拟量等电力参数<sup>[17-19]</sup>, 其图元尺寸都不大, 因此, 电力监控画面中图元的典型特点是图元种类和量测点多, 但图元尺寸都较小。Base64 是一种用于传输 8 位字节代码的编码, 对小尺寸图元编码后得到的字符串代码短, 因此, 若用 Base64 对实时监控中的每个图元编码为字符串, 就可将字符串同步序列化到数据库的记录中, 即在结构化的数据库记录中直接存储非结构化图元的编码序列, 若实时数据变化, 则修改存储的编码串, 并通过反序列化方法, 将实时变化显示在监控主接线画面中。

针对配电自动化图库一体的图形平台辅助生成问题, 利用开源 OpenSCADA 提供的 line、arcs 和 bezier curve 工具和组件库, 研究各类电力图元的属性和数据库的图元模块化存储法, 利用 Base64 编码技术对电力图元序列化<sup>[20-22]</sup>, 采用内存数据库

进行高效存储, 通过改变数据库参数, 使图元形态相应变化, 实现图库一体生成。以一个北京东地铁路配电调度电气主接线的监控画面图的一体生成作为算例, 验证了在图库一体生成基础上实现对图元的编码, 为提高配电主接线图的工程化辅助生成, 降低图形配置和监控系统的维护代价提供了一种新方法。

## 1 配电自动化监控界面及图元结构

配电自动化系统主要由配电主站、配电站、配电终端和通信通道等部分组成, 实现对配电网的运行监视和自动控制。其系统结构图如图 1 所示。

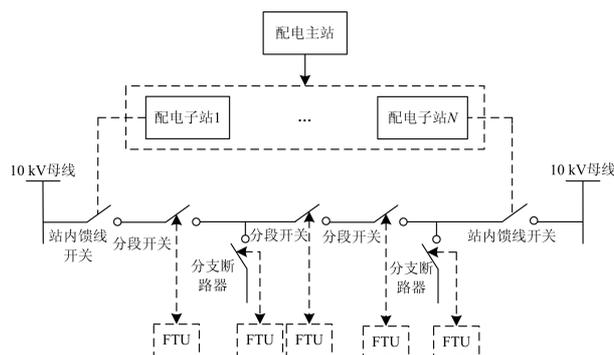


图 1 配电自动化系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of distribution automation system

配电终端包括 DTU、FTU 和 TTU 等, 用于柱上开关、负荷开关、配电变压器等设备信息采集和上传、接收和执行主站控制命令, 实现配电设备的监视和控制。由通信网络采用光纤、电缆等介质形式提供通道, 包括现场终端设备与主站系统之间、子站系统与主站系统之间的通信。配电主站系统的一般处理方式: 先存储终端设备采集的实时数据, 然后刷新至图形化界面, 对配电网实时运行状态监视和控制、配电网分析等。因此, 在配电自动化系统中, 电气主接线图形界面是实现配电网设备监控的人机接口。用图形界面显示配电网接线, 包括配电站和配电线路的接线图元、断路器状态图元和模拟量图元等实时信息, 还需进行告警显示并记录开关变位告警、电压越限告警和事故报警等。因此, 图元建模是配电自动化图形界面的基础。

配电主接线中设备图元的建模, 需要配置复杂的业务属性, 如断路器、变压器、隔离开关和熔断器等图元, 需要设置 id 号、名称、路径和图元线形颜色等属性。监控界面图元结构如图 2 所示。

以图 2 配电网中母线的两路出线图元结构为例, 各图元具有不同的属性和属性值。其中断路器、

隔离开关和熔断器具有 id 号、名称、存储路径、线形宽度、线形颜色、线形样式和状态等属性；变压器具有 id 号、名称、存储路径、线形宽度、线形颜色、线形样式等属性；其他图元根据所具备的电力特性具有相应的属性。电力图元的属性值因其在监控界面中显示不同配电自动化设备的状况而各有差异，如断路器 1 具有 id 号为 DL<sub>1</sub>，名称为断路器 1，图元路径为电力图元库 / 断路器 1，线形宽度为 1，线形颜色为黑色，线形样式为实线，状态为断开等属性值；而 1<sup>#</sup>变压器具有 id 号为 T<sub>1</sub>，名称为 1<sup>#</sup>变压器，图元路径为电力图元库 / 1<sup>#</sup>变压器，线形宽度为 1，线形颜色为黑色，线形样式为实线等属性值。电力图元的属性值因设备状态的变化而发生变化，当操作隔离开关 1 闭合时，监控界面隔离开关图元会显示闭合，此外，该图元的状态属性值也会变成闭合。

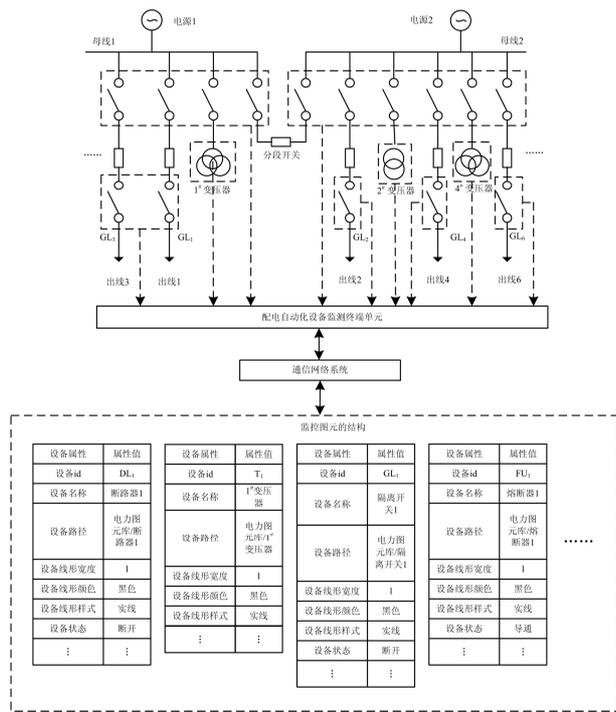


图 2 配电自动化图形系统结构图

Fig. 2 Structure of distribution automation graphics system

## 2 图元坐标的系统设计

配电网中的断路器、变压器、隔离开关和熔断器，它们的图元用直线、弧线和贝塞尔曲线等或它们的组合。在坐标系统中，直线、弧线和贝塞尔曲线的样式是通过坐标系中的点来控制。直线可以通过 2 个坐标点进行控制，弧线可以通过 5 个坐标点进行控制、贝塞尔曲线可以通过 4 个坐标点进行控制。

每新建一个图元，都需要为这个图元设置一个 id 号和一个名字，当需要参与运算处理时，都是以其 id 号代表这个图元的参数来参与运算，进行图元的变换。对于配电主接线图中的导线可以通过两个控制点的直线进行描述，按(导线：第一个点的坐标：第二个点的坐标：导线宽度：导线颜色：导线边界宽度：导线边界颜色：样式)这种方式定义；对于配电主接线图中的电流互感器绕组可以通过五个控制点的闭合的弧线进行描述，按(弧线：第一个点的坐标：第二个点的坐标：第三个点的坐标：第四个点的坐标：第五个点的坐标：弧线宽度：弧线颜色：弧线边界宽度：弧线边界颜色：样式)这种方式定义；对于配电网接线图中无规则的复杂的图元可以通过直线、弧线和贝塞尔曲线的组合来进行描述，按(贝塞尔曲线：第一个点的坐标：第二个点的坐标：第三个点的坐标：第四个点的坐标：贝塞尔曲线宽度：贝塞尔曲线颜色：贝塞尔曲线边界宽度：贝塞尔曲线边界颜色：样式)这种方式定义。导线、绕组和无规则图元中的样式描述有实线、虚线和圆点线三种，分别用“0”、“1”和“2”进行定义。

以变压器的原边绕组图元为例，就可以用封闭状态的弧线进行设计，在弧线坐标的五个属性定义中，原边绕组图元的几何定义有三个属性是相同的，另两个属性定义是不同的，如图 3(a)所示。

即  $arc: (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), (x_4, y_4), (x_5, y_5)$ ；其中  $x_1=x_2=x_5, y_1=y_2=y_5; (x_3, y_3)$  为图元圆心坐标,  $(x_5, y_5)$  为图元圆线上任一点坐标。原边绕组图元半径  $r$  和其中两个点的属性坐标值存在一定的几何关系，用计算公式描述为

$$\begin{cases} (y_3 - y_1)^2 = r^2 - (x_3 - x_1)^2 \\ (y_3 - y_4)^2 = r^2 - (x_3 - x_4)^2 \end{cases} \quad (1)$$

配电网中双绕组变压器图元，可以看作是由两个原边绕组组合而成，其设计步骤如下。

**Step1:** 根据图元的半径和圆心点坐标由上述公式计算出其他三个点的坐标位置，在属性栏中输入这五个点坐标画出原边绕组图元。

**Step2:** 由原边绕组图元的半径和圆心点坐标根据两图元半径相同且圆心在同一直线上的特点，确定次边绕组图元的半径和圆心点坐标。

**Step3:** 根据次边绕组图元的半径和圆心点坐标由公式计算出其他三个点的坐标位置，在属性栏中再输入这五个点坐标画出双绕组变压器图元。

以绘制半径  $r=15$  的双绕组变压器图元为例，先设定原边绕组图元圆心坐标  $(x_3, y_3)=(50, 30)$ ，可根据上述公式(1)依次求出  $(x_1, y_1)=(41, 18)$ ， $(x_2, y_2)=(41, 18)$ ，

$(x_4, y_4)=(38,21)$ ,  $(x_5, y_5)=(41,18)$ 。即在属性栏中输入  $arc: (41,18), (41,18), (50,30), (38,21), (41,18)$ , 可在画布中设计出圆心为 $(50,30)$ , 半径  $r=15$  的原边绕组图元; 再由原边绕组图元的圆心点坐标, 根据两圆心  $y$  轴坐标间距一个半径的长度且  $x$  轴坐标相等, 确定出次边绕组图元圆心点的坐标  $(x'_3, y'_3)=(50,45)$ , 再根据式(1)可以确定其他四个点的坐标。即在属性栏中输入原边绕组图元和次边绕组图元的坐标为

$arc: (41,18), (41,18), (50,30), (38,21), (41,18)$ ;

$arc: (59,57), (59,57), (50,45), (41,33), (59,57)$

设计出的双绕组变压器图元如图 3(b)所示。在配电自动化图形系统中, 还包括三绕组变压器图元, 可看成是由三个弧形组合而成, 图元设计步骤与双绕组变压器图元相似。三绕组变压器图元如图 3(c)所示。在属性栏中输入的对应的坐标点为

$arc: (41,18), (41,18), (50,30), (38,21), (41,18)$ ;

$arc: (32,2), (32,2), (41,15), (53,5), (32,2)$ ;

$arc: (49,3), (49,3), (58,15), (70,6), (49,3)$ ;

在图元坐标系统设计中不但可以使简单的基本图元组合成复合图元, 还可对图元进行颜色填充和图片加载, 构成更为形象和丰富的图形界面, 填充属性可描述为,  $fill: \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ , 填充颜色, 填充图片。属性参数中  $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$  为封闭图元支持点坐标。

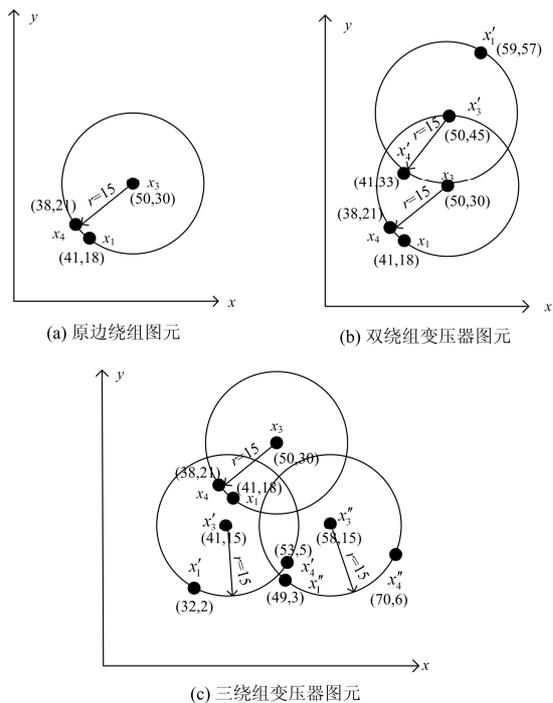


图 3 变压器图元

Fig. 3 Transformer element

### 3 图元的编码存储

为了提高监控图元数据的快速存显, 使用内存数据库对各种电力图元对应的信息进行存储、处理和管理, 本文采用 SQLite 内存数据库存储图元, 不仅可以获得内存快速读写的性能, 而且具备了通用 SQL 的标准操作接口。

在存储图元数据中定义不同类型的表结构, 如表 1 所示。

表 1 图元存储表的结构形式

表结构	表结构描述
{DB_TBL}	组件表"LibWidgets"
{DB_TBL}_io	组件和容器的工作属性表"LibWidgetIO"
{DB_TBL}_uio	组件和容器的用户属性表"LibWidgetUserIO"
{DB_TBL}_incl	组件容器的嵌入表
{DB_TBL}_mime	组件的资源表"LibWidgetMime"
{DB_TBL}_ses	数据存储表"PrjSesIO"

在图元数据的存储方式上, 用编码短、算法高效和安全性高的 Base64 编码形式。Base64 编码是 MIME 规定的一种编码格式, 通过 64 个 ASCII 字符码对二进制数据进行编码组合, 按照 RFC2045 定义, Base64 内容传送编码被设计用于把任意序列的 8 位字节描述为不易识别的形式, 因此, 具有一定加密性。编码原理为: 将每个由 3 个 8 位字节组成的字符串依次存入 24 位的缓冲区, 在缓冲区中缺字符的位置补零, 再将缓冲区划分成 4 个 6 位字节形式, 并在每个 6 位字节前面置两个高位 0, 再将其转换成 10 进制, 码表如表 2 所示。

表 2 Base64 编码转换表

索引	编码	索引	编码	索引	编码	索引	编码
0	A	16	Q	32	g	48	w
1	B	17	R	33	h	49	x
2	C	18	S	34	i	50	y
3	D	19	T	35	j	51	z
4	E	20	U	36	k	52	0
5	F	21	V	37	l	53	1
6	G	22	W	38	m	54	2
7	H	23	X	39	n	55	3
8	I	24	Y	40	o	56	4
9	J	25	Z	41	p	57	5
10	K	26	a	42	q	58	6
11	L	27	b	43	r	59	7
12	M	28	c	44	s	60	8
13	N	29	d	45	t	61	9
14	O	30	e	46	u	62	+
15	P	31	f	47	v	63	/

以配电自动化系统主接线图中的二次侧电流的动态图元 3.96 A 为例，其编码过程如图 4 所示。

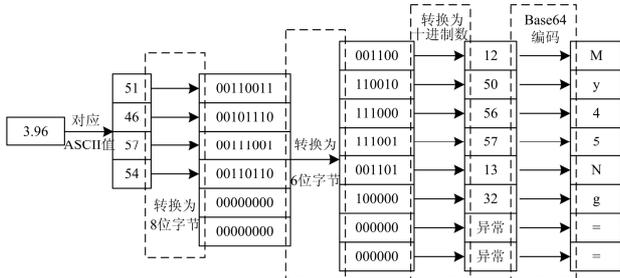


图 4 Base64编码过程图

Fig. 4 Process diagram of Base64 encoding

数字3.96含四个数字符号，按三个一组放入缓冲区，第二组的后两个空位用零补齐，转换成十进制时，因不能按常规的Base64编码表处理，本文按此进行了扩展，将其相应编码为“=”。因此，对应的改进Base64编码为：My45Ng==。

如图4所示的变压器图元的Base64编码信息存储在组件表中，相应的属性定义为：

LibWidgets(ID, ICO, PARENT, PROC, PROC\_PER, USER, GRP, PERMIT, ATTRS)。

在电力设备图元组件库中，特定ID号的图元存储的属性定义描述为

- ID: 图元标识号;
- ICO: 图元按Base64方式编码的信息;
- PARENT: 组件的归属;
- PROC: 图元的动态处理方法;
- PROC\_PER: 图元动态处理运行的频率;
- ATTRS: 图元的静态属性列表。

编码存储作为一种新的电力图元存储和处理方式，使图元存储和显示处理全部在内存中进行，可增强电力图形系统的动态处理能力。

### 4 动态图元逻辑显示控制

动态图元，是指参与程序的逻辑运算，使其状态发生相应的变化，直观地表达设备运行状况的图形显示。如典型的系统导线的描述方式如下。

(1) 电力导线的描述

line: (1, 2, w<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, w<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, s<sub>1</sub>)。

- 1: 第一个点坐标;
- 2: 第二个点坐标;
- w<sub>1</sub>: 第一条线的宽度;
- w<sub>2</sub>: 第二条线的宽度;
- c<sub>1</sub>: 第一个图形组件的颜色;
- c<sub>2</sub>: 第二个图形组件的颜色。

(2) 图元颜色的填充

fill: (1, 2, 3, ..., c<sub>1</sub>, i<sub>1</sub>)。

- 1: 第一个点坐标;
- 2: 第二个点坐标;
- 3: 第三个点坐标;
- c<sub>1</sub>: 第一个组件填充的颜色;
- i<sub>1</sub>: 第一个组件填充的图片。

通过对各类配电网元进行动态属性描述，再利用开源 SCADA 提供的底层组件库，用 Java 语言编程，就可以实现图元逻辑的动态显示，如图 5 所示为一个由线构成的典型电动隔离开关图元。

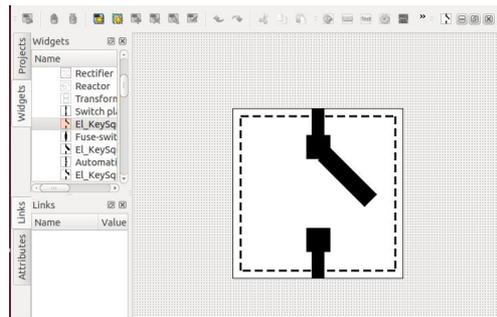


图 5 开源 SCADA 中的动态开关图元界面

Fig. 5 Dynamic switching element interface of OpenSCADA

隔离开关图元的动作流程如图 6 所示。

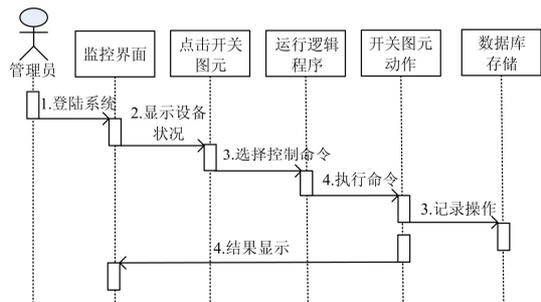


图 6 开关图元动作流程图

Fig. 6 Dynamic graphics primitives action flow chart

调度管理员用户对监控界面的隔离开关进行操作时，通过点击开关图元选择控制命令，监控系统调运行动态图元逻辑处理程序，执行控制命令，将运行结果显示在监控界面，同时在内存图元数据库中存储图元的变化。

### 5 算例实现

以北京供电段管内的 10 kV 电力远动调度监控系统一个北京东站配电接线主接线图的生成作为算例，其两路 10 kV/380 V 电力线分别接入 1#信号电源和 2#信号电源。该配电系统图形界面由电力接线图元、断路器图元和双绕组变压器图元等电力图

元构成。

首先, 用电力图库绘制电力线和双绕组变压器等静态图元, 然后设计断路器等动态图元, 再将图元库的电力图元添加到图形界面的坐标系统, 最后在监控界面接线图中连接电气接线图, 得到的电气接线监控界面如图7所示。



图7 界面接线图

Fig. 7 Interface of wiring diagram

图形界面提供相关电流、电压和功率等电力参数显示图元, 该图元的参数值也按照Base64编码存入内存数据库, 每设计一个电力图元, 数据库中便以序列化方式同步存储该图元, 同时, 在数据库中修改电力图元属性参数时, 则通过反序列化使该电力图元的显示状态随之相应改变, 达到图库一体生成的目的。

## 6 结论

1) 研究了开源 OpenSCADA 监控平台及基于组件库的配电自动化监控图元存显技术, 得到了一种实现图库一体生成的实时编码存显新方法, 可解决传统监控图形系统实时刷新易闪屏、组态软件的节点限制和图形配置库 id 关联繁杂易出错的问题。

2) 以北京东站一个配电接线图为例, 对其配电自动化系统的主接线界面进行图库一体化实现, 测试结果表明, 采用 Base64 编码存显的方法, 能有效对电力图元进行实时存储和显示, 在内存数据库中修改的电力图元, 可以在监控界面上立即显示更新, 达到图库一体的目的。

## 参考文献

- [1] 李惠玲, 盛万兴, 孟晓丽, 等. 基于图模库一体化的配电网线损管理系统的研制[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(6): 89-92.  
LI Huiling, SHENG Wanxing, MENG Xiaoli, et al. Flying capacitor converter suitable for direct-drive wind power generator system[J]. Electric Power Automation

Equipment, 2008, 28(6): 89-92.

- [2] 张瑞鹏, 姚建国. DMS 网络建模与图模库一体化[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 49-52.  
ZHANG Ruipeng, YAO Jianguo. Integration of distribution management system modeling and graphic database[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 49-52.
- [3] 周超, 熊易, 杨俊杰, 等. 电力系统故障模拟的图形化建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 32-37.  
ZHOU Chao, XIONG Yi, YANG Junjie, et al. Graphical modeling method of fault simulation in power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(17): 32-37.
- [4] 王金丽, 盛万兴, 王金玉, 等. 中低压配电网统一数据采集与监控系统设计和实现[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 72-81.  
WANG Jinli, SHENG Wanxing, WANG Jinyu, et al. Design and implementation of a centralized data acquisition and supervisory system for medium-low voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 72-81.
- [5] 白牧可, 唐巍, 张璐, 等. 基于机会约束规划的 DG 与配电网架多目标协调规划[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 346-354.  
BAI Muke, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network incorporating distributed generation based on chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 346-354.
- [6] 蒲天骄, 刘克文, 李焱, 等. 基于多代理系统的主动配电网自治协同控制及其仿真[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1864-1874.  
PU Tianjiao, LIU Kewen, LI Ye, et al. Multi-agent system based simulation verification for autonomy-cooperative optimization control on active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1864-1874.
- [7] 张逸, 林焱, 吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 138-147.  
ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Current status and development trend of power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 138-147.
- [8] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.

- [9] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 面向最大供电能力提升的配电网主动重构策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 137-147.  
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. An active reconfiguration strategy for distribution network based on maximum power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 137-147.
- [10] 尹亮. 基于图形化主接线图的电气连通性分析和研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 65-74.  
YIN Liang. Study and improved arithmetic about electrical connectedness of main electrical scheme[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 65-74.
- [11] 范新桥, 朱永利, 尹金良. 图形化输电线路故障定位系统的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 127-132.  
FAN Xinqiao, ZHU Yongli, YIN Jinliang. Development of graphical fault location system for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 127-132.
- [12] 江文东, 苏忠阳. 10 kV 架空线配电自动化系统的初步实施[J]. 继电器, 2002, 30(8): 55-60.  
JIANG Wendong, SU Zhongyang. Primary realization of DAS (distribution automation system) in the 10 kV overhead distribution lines[J]. Relay, 2002, 30(8): 55-60.
- [13] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [14] 郝思鹏, 楚成彪, 方泉. 基于 SG-CIM 的配电网数据平台及应用开发[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 138-142.  
HAO Sipeng, CHU Chengbiao, FANG Quan. Distribution grid data platform and application development based on SG-CIM[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 138-142.
- [15] 郝广涛, 韩学山, 梁军, 等. 多代理系统和黑板模型结合的全景电网拓扑分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 200-210.  
HAO Guangtao, HAN Xueshan, LIANG Jun, et al. Panorama power system topology analysis based on multi-agent system and blackboard model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 200-210.
- [16] 刘健, 刘超, 张小庆, 等. 配电网多级继电保护配合的关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 35-41.  
LIU Jian, LIU Chao, ZHANG Xiaoqing, et al. Coordination of relay protection for power distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 35-41.
- [17] 田果, 黄小莉, 邓强, 等. 基于图论的智能配电网馈线保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 95-99.  
TIAN Guo, HUANG Xiaoli, DENG Qiang, et al. Feeder protection based on graph theory in smart distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 95-99.
- [18] 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.
- [19] 郭建成, 钱静, 陈光, 等. 智能配电网调度控制系统技术方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 206-212.  
GUO Jiancheng, QIAN Jing, CHEN Guang, et al. Technical scheme of smart distribution grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 206-212.
- [20] 刘艺, 聂一雄, 王星华, 等. 基于 GPRS 的低压配电网监控系统下行控制信号通信研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 147-150.  
LIU Yi, NIE Yixiong, WANG Xinghua, et al. Research on the down communication of remote control signal of low voltage distribution supervisory and control system based on GPRS[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 147-150.
- [21] 简清明, 叶晓彤. 一种基于 XML 和 Base64 编码的数据资源统一存储方法[J]. 计算机系统应用, 2009(11): 198-200.  
JIAN Qingming, YE Xiaotong. A method for data united storage based on XML and Base64[J]. Application of Computer System, 2009(11): 198-200.
- [22] 陈雅芳, 徐从富. 基于 Base64 编码的垃圾图片过滤方法[J]. 计算机工程, 2011, 37(8): 194-196.  
CHEN Yafang, XU Congfu. Image spam filtering method based on Base64 encoding[J]. Computer Engineering, 2011, 37(8): 194-196.

收稿日期: 2015-09-04; 修回日期: 2015-12-11

作者简介:

屈志坚(1978-), 男, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为智能监控理论与信息处理技术; E-mail: 08117324@bjtu.edu.cn

李立帆(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统调度自动化。E-mail: 2816789651@qq.com

(编辑 周金梅)