

DOI: 10.7500/AEPS20130801001

# 基于拓扑分层的配电网电气接线图自动生成算法

廖凡钦<sup>1</sup>, 刘 东<sup>1</sup>, 闫红漫<sup>2</sup>, 于文鹏<sup>1</sup>, 黄玉辉<sup>1</sup>, 万顷波<sup>3</sup>

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海交通大学, 上海市 200240;

2. 东华大学计算机科学与技术学院, 上海市 201600; 3. 国网南昌供电公司, 江西省南昌市 330006)

**摘要:** 配电网电气接线图的自动生成是一个复杂的优化问题,其本质是在一个平面合理确定配电网拓扑中各设备间的相对坐标位置。文中提出一种基于拓扑分层的成图算法,该算法首先在原拓扑模型基础上构建 3 层不同程度简化的分层成图拓扑模型,在此基础上对应地将自动成图问题分解为初步布局、骨架布线和完整绘图这 3 个步骤求解。采用基于引力-斥力模型的布局算法完成初步布局,通过设备分类和比较电站出线的倾角大小实现电站成图,采用基于区分布线优先顺序的算法完成主干线的无重叠交叉布线,最终生成与原拓扑结构完全对应的配电网电气接线图。针对某市配电网的实例成图表明了所提算法的有效性。

**关键词:** 配电网; 电气接线图; 自动成图; 分层拓扑模型; 初步布局; 骨架布线

## 0 引言

配电网电气接线图以正交化的电气接线方式严格反映了电网实际的拓扑连接关系,是数据采集与监控(SCADA)系统展现配电网实时运行信息和配电网运行管理部门进行线路管理、故障、客户定位时不可或缺的图形资料<sup>[1-2]</sup>。电气接线图自动成图功能的实现,将为提升配电网业务部门的信息化管理水平和实现配电网的各种高级应用提供重要基础<sup>[2]</sup>。

目前,电网自动成图问题的研究主要集中在输电网潮流图的自动生成<sup>[3-8]</sup>、配电网馈线单线图的自动生成<sup>[9-13]</sup>和电站主接线图的自动生成<sup>[14-16]</sup>3 个方面。输电网潮流图的自动生成主要涉及电站的位置布局和输电线路的无交叉布线;馈线单线图的自动生成主要解决单条馈线中众多分支线路的合理布局问题;电站主接线图的自动成图则专注于实现有着复杂接线的变电站的主接线图的自动生成。以上文献为解决电网自动成图提出了很多有用的解决方案,并应用在了某些实际系统中。然而,这些研究主要是从梗概层面(如电网潮流图)、电网局部(如变电站主接线图)或是在较小规模范围内(如馈线单线图)来探讨电网的自动成图,并没有涉及如何自动生成与实际电网拓扑一一对应的完整的大规模电网电气接线图。对于大规模配电网,其本身大量的设备

数量、复杂的拓扑结构以及站内站外设备在成图时不同的布局特点为其接线图的自动生成带来了大量难题,现在对这方面的研究较少。

本文以 10 kV 中压配电网为研究对象,针对配电网本身的拓扑结构特点和现有成图思路在求解该问题时的不足,提出了基于拓扑分层的自动成图算法。该算法基于构建的配电网网络的 3 层分层成图拓扑模型,对应地将成图过程分解为初步布局、骨架布线和完整绘图这 3 个步骤。初步布局过程初步确定拓扑中电站和关键节点的坐标位置;骨架布线过程完成电站出线站内布局和站外主干线布线;完整绘图过程最终确定全网每个设备的具体成图坐标。

## 1 配电网分层拓扑模型

配电网具有设备数量大和拓扑结构复杂等特点,直接一次性求取所有设备在接线图中合理的坐标位置将导致此问题的求解过程高度复杂。本文将配电网网络拓扑抽象成一个层次结构,在分层模型的基础上成图将大大降低该问题的求解难度。

### 1.1 拓扑的简化

配电网电气接线图在严格遵循实际电网拓扑连接关系的前提下仅以图形方式展示拓扑中的主干设备,因此,在成图之前有必要对具体而完整包含所有设备的原拓扑进行简化。主要包含以下 3 个方面。

1) 删除不完整线路。原拓扑中不以负荷和配电变压器为末端的支路或出线不构成完整的功率传输线路,不必绘制在接线图中。

2) 合并串接导线设备。合并原拓扑中直接串接

收稿日期: 2013-08-01; 修回日期: 2013-12-27。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA050803)。

的各个导线设备可减少成图设备数量而不改变原拓扑连接结构和最后成图结果的准确性。

3)删除多余开关设备。原拓扑中相邻串接的各种开关设备在接线图中仅保留其中一个即可,保留开关设备的开断状态取为合并前几个串接开关设备开断状态的并集。

### 1.2 分层拓扑模型的构建

传统配电网模型中,一般将分支线路与主干线路的连接节点定义 T 形节点,按此定义的分支线路中仍可能含有次级分支线路。考虑到自动成图过程中处理次级分支线路所带来的复杂性,本文将所有 T 形节点和次级分支节点一起定义为拓扑的关键节点。关键节点的定义是构建分层拓扑模型的基础。

#### 1)成图拓扑模型

该层模型即为经拓扑简化后的配电网拓扑模型,它具体而完整地描述了配电网的拓扑结构,其中包含的所有设备与最终生成的电气接线图中的所有设备一一对应。

#### 2)骨架拓扑模型

在成图拓扑模型基础上按设备在拓扑结构中的连接位置的不同将配电网中的所有设备(母线除外)划分为电站出线、主干线和分支线 3 种设备类(见图 1),它们的定义分别如下。

者直接连接两条电站出线的电气通路(如 B1)。

③分支线(图 1 中以 C 表示):以关键节点为起点在不需要其他任何关键节点后直接以拓扑末端为终点的一段支路(如 C1,C2 和 C3)。

以上定义的 3 种设备类中都含有一个或多个设备,在成图过程中将它们当成一个整体处理将大大减少坐标计算对象的数量。忽略分支线设备类并将另外 2 种设备类处理成单个整体后,在保持原拓扑连接关系基础上所形成的拓扑模型即原拓扑的主干骨架拓扑模型。

#### 3)布局拓扑模型

在骨架拓扑模型的基础上,若继续将所有电站抽象为单个节点(在图 2 中用■表示),将主干线抽象为单个导线设备(在图 2 中用短线表示),此时形成的拓扑模型中所有节点都为电站抽象节点或关键节点,如图 2 所示。它们之间只通过一条短线直接相连。该层模型是对配电网拓扑模型的最终抽象,其中电站抽象节点的布局位置大致确定了整个电站内设备的坐标位置,关键节点则大致决定了所有站外设备的坐标位置。

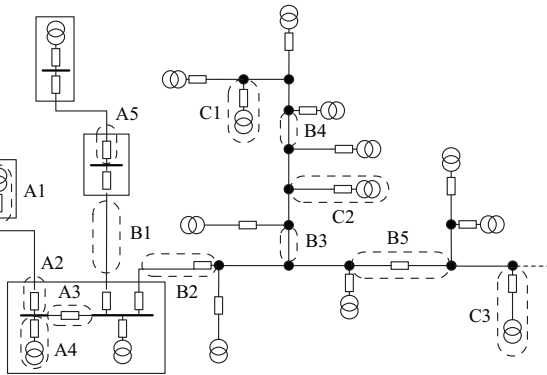


图 1 骨架拓扑模型中设备分类示意图  
Fig.1 Equipment classification diagram of the framework topology model

①电站出线(图 1 中以 A 表示):以母线为起点(不包含母线)沿着该出线至站外设备、站内末端或站内另一条母线为止的一段电气通路(如 A2,A4 和 A3);此外,若电站不含母线,则将该电站内整个电气通路定义为电站出线(如 A1)。所有电站出线类设备都是站内设备。

②主干线(图 1 中以 B 表示):以关键节点(图 1 中用●表示)为起点沿线路至另一个关键节点或一条电站出线的出线端端点为止的一段全部由站外设备串接而成一段电气通路(如 B3,B4,B5 和 B2);或

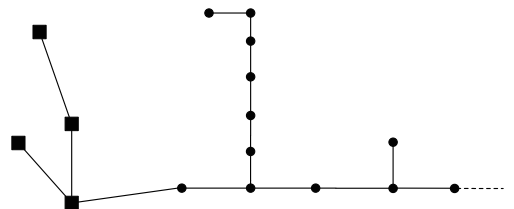


图 2 布局拓扑模型  
Fig.2 Topology model for layout

以上 3 层成图拓扑模型是在对配电网网络拓扑逐步抽象的过程中形成的,是一个逐步降低自动成图问题求解维度的过程。本文的成图过程与以上抽象过程相反,将依次应用布局、骨架和成图拓扑模型,逐步实现配电网电气接线图自动生成。它们之间的对应关系如图 3 所示。

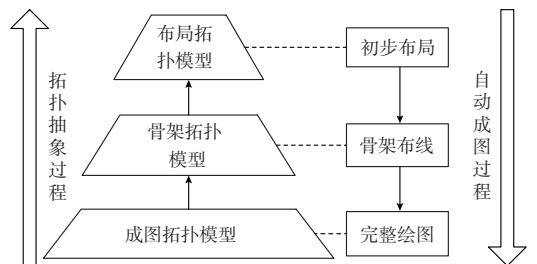


图 3 3 层拓扑模型在自动成图过程中的应用及其之间的对应关系  
Fig.3 Application of three layers topology model for automatic mapping and their corresponding relationships

## 2 自动成图初步布局

### 2.1 基于引力-斥力模型的布局算法

基于引力-斥力模型的布局算法的原理是在将布局对象抽象为节点-边模型后,对其中各个节点间引入斥力使所有节点相互分离,同时,对每对由边连接的2个节点间赋予引力又使彼此不至于完全分开,当所有节点的受力都达到平衡时布局结束<sup>[17]</sup>。布局算法的基本计算流程如下。

步骤1:将布局对象描述为节点-边模型,为节点赋予初始坐标值,为边赋予理想长度值,为每个节点的初始移动距离值赋值为零。

步骤2:根据每个节点沿X轴和Y轴方向上的移动距离值更新所有节点的坐标位置,并将每个节点的移动距离值置零。

步骤3:以所有节点现在所在的坐标位置为基础,分析所有边的两端节点所受的引力,计算每个节点在引力作用下沿X轴和Y轴方向上的移动距离。

步骤4:以所有节点现在所在的坐标位置为基础,计算每个节点在其他所有节点的斥力作用沿X轴和Y轴方向上的移动距离。

步骤5:叠加每个节点在引力和斥力分别作用下沿X轴和Y轴方向上的移动距离,确定每个节点在合力作用下的移动距离。

步骤6:根据节点的最大移动距离判断本次计算是否满足迭代终止条件,若是,布局过程结束;若不是,根据设定的每个节点每次移动距离的上限值修订某些节点沿X轴和Y轴方向上的移动距离,并跳至步骤2,开始下一次迭代计算。

### 2.2 节点坐标移动距离的计算

#### 1) 引力作用下移动距离的计算

布局时需首先为连接某个节点的边(即主干线)赋予一理想长度值 $L_0$ :

$$L_0 = k_1(n_1L_1 + n_2L_2 + n_3L_3) \quad (1)$$

式中: $n_1, n_2, n_3$ 分别为该边在所对应的原配电网拓扑中的导线设备数、配电变压器设备数和开关设备数; $L_1, L_2, L_3$ 分别为导线设备、配电变压器设备和开关设备在成图时设定的长度值; $k_1$ 为比例系数,取经验值 $k_1 = 2.5$ 。

边所连接的2个端节点间的引力 $F_g$ 为:

$$F_g = k_g(rL_0 - L) \quad (2)$$

式中: $k_g$ 为引力比例系数,它的大小决定了边的长度在布局时增长的快慢,一般取经验值 $k_g = 1.5$ ;  $L$ 为该边的实际长度值; $r$ 为在计算引力的过程中为避免将边的理想长度 $L_0$ 直接代入计算,导致边的长度值在迭代过程中迅速增加使得各边相互交叉而

引入的变量,其取值按式(3)计算。

$$r = \begin{cases} 0.1 \times \left(1 + \frac{n}{50}\right) & n < 450 \\ 1 & n \geq 450 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $n$ 为本次循环的次数,该式表示每迭代50次 $r$ 的值增加0.1,迭代450次后才直接将理想长度值代入计算引力。该参数的设置在实现各节点的合理布局过程中起着重要的作用。

该边两端的节点在引力 $F_g$ 的作用下移动距离的计算式如下。

$$\begin{cases} d_{x-g} = F_g \frac{V_i(x) - V_j(x)}{L} \\ d_{y-g} = F_g \frac{V_i(y) - V_j(y)}{L} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $d_{x-g}$ 和 $d_{y-g}$ 分别为节点 $V_i$ 在引力 $F_g$ 作用下分别沿X轴和Y轴的移动距离; $V_i(x)$ 和 $V_i(y)$ 分别为节点 $V_i$ 的横纵坐标。对于节点 $V_j$ 的移动距离计算与节点 $V_i$ 类似。

#### 2) 斥力作用下移动距离的计算

任意两个节点间斥力的大小与2个节点的度数和节点间的距离有关。斥力 $F_r$ 的计算公式如下:

$$F_r = k_r - \frac{m_i m_j}{L_{ij}^2} \quad (5)$$

式中: $k_r$ 为斥力比例系数,它的大小决定各节点间分散的速度,取 $k_r = 20$ ;  $m_i$ 和 $m_j$ 分别为节点 $V_i$ 和节点 $V_j$ 的度数; $L_{ij}$ 为节点 $V_i$ 和节点 $V_j$ 间的实际距离。

任意一个节点在一次迭代过程中移动的距离是在所有节点斥力作用下移动距离的叠加,即

$$\begin{cases} d_{x-r} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{N-1} F_r \frac{V_i(x) - V_j(x)}{L_{ij}} \\ d_{y-r} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{N-1} F_r \frac{V_i(y) - V_j(y)}{L_{ij}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $d_{x-r}$ 和 $d_{y-r}$ 分别为节点 $V_i$ 在所有节点斥力的合力作用下沿X轴和Y轴的移动距离; $N$ 为该系统的节点总数。

#### 3) 节点最终移动距离的计算

节点在引力和斥力共同作用下移动的距离即为该节点在一次迭代过程中移动的距离。为了避免节点在移动过程中由于某次的移动距离过大导致边之间不必要的交叉,本文在节点的每次移动过程中设定其移动距离极限值 $d$ ,取值为 $d = 5$ 。节点在一次迭代过程中的移动距离如式(7)所示。

$$\begin{cases} d_x = \max\{-d, \min\{d, (d_{x-g} + d_{x-r})\}\} \\ d_y = \max\{-d, \min\{d, (d_{y-g} + d_{y-r})\}\} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $d_x$  和  $d_y$  分别为节点在合力作用下沿 X 轴和 Y 轴的移动距离。

### 2.3 布局结束条件

设  $d_m$  表示节点在每次迭代过程中沿 X 轴方向和 Y 轴方向的最大移动距离。当  $d_m$  小于一定值时,表示所有节点都处于相对稳定的状态,初步布局过程结束。

## 3 自动成图骨架布线

### 3.1 电站出线的站内布局

初步布局确定的各节点初始坐标是计算电站出线在站内相对位置的基础。如图 4 所示,左侧图为某一电站 S 和与之有直接拓扑连接关系的主干线的初步布局图,右侧图为该电站最后的站内布局结果。

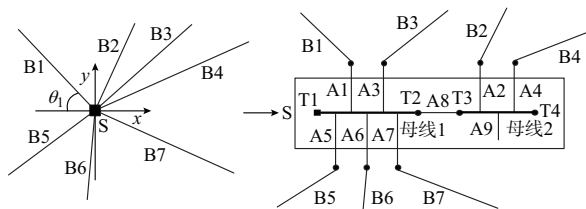


图 4 电站内各电站出线的位置布局  
Fig.4 Position layout of outlet line in the power plant

确定电站出线在站内布局的步骤如下。

步骤 1:分析电站站内拓扑。遍历电站抽象节点代表的电站在具体成图拓扑模型中的拓扑结构,确定该电站含有的母线、每条母线关联的电站出线以及各电站出线与相应主干线间的拓扑连接关系。

步骤 2:对电站出线分组。对关联于同一条母线且与主干线有拓扑连接关系的所有电站出线,将它们按其所关联的主干线位于电站抽象节点的上侧还是下侧划分为上下 2 组。电站出线所在的分组确定了其在站内布局时的方向。

步骤 3:对每组电站出线排序。在以电站抽象节点为坐标原点建立的直接坐标系中,按各电站出线所关联的主干线与 X 轴负半轴间的夹角大小(从小到大)依次将每组电站出线排序(从左到右)。夹角  $\theta$  的计算公式如下:

$$\theta = \begin{cases} \arctan \frac{|y_1 - y_0|}{|x_1 - x_0|} & x_1 < x_0 \\ \pi - \arctan \frac{|y_1 - y_0|}{|x_1 - x_0|} & x_1 > x_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:坐标  $(x_0, y_0)$  为电站抽象节点的坐标;坐标  $(x_1, y_1)$  为电站出线所关联主干线另一端点的坐标。如图 4 中主干线 B1 对应的夹角即为  $\theta_1$ 。

步骤 4:添加其他类型的电站出线到分组。将没关联有主干线的电站出线(从母联开关抽象而来

的电站出线除外,如 A8)添加到电站出线数少的那一分组中,并将其排于该组的最右端。

步骤 5:确定母线长度值和各电站出线的位置。由每条母线上上下两组中电站出线数大的那一组中的电站出线数量和成图时设定的电站出线间的间距值确定每条母线的长度;按各母线所关联电站出线所在的分组及其在分组中的排序位置,依次确定各电站出线在站内的布局方向和位置。

步骤 6:确定电站边框大小。根据该电站两侧母线的位置和上下两侧电站出线的终点位置确定电站边框的坐标位置,如图 4 右侧图的矩形框所示。

以上步骤都是在假设该电站含有母线的前提下进行的,若该电站中没有母线,此时该电站内必只含有一条电站出线,这种情况相对简单,可直接确定该电站中电站出线的站内布局。

### 3.2 主干线布线

主干线布线是将在布局过程中用线段表示的主干线做横平竖直处理。在布线过程中需避免各主干线间布线重合,并尽量减少线路之间的相交。

#### 1) 主干线分类和布线优先级划分

为避免采用迷宫算法、粒子群算法等智能算法在布线过程导致线路多次弯折、计算复杂与耗时长等缺点,本文采用基于区分布线优先顺序的经验算法来完成主干线的布线。为此,首先将所有主干线分类,具体如图 5 所示。

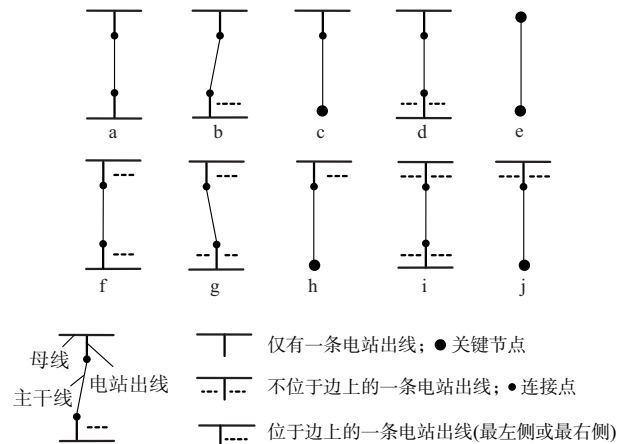


图 5 主干线分类  
Fig.5 Classification of main line

图 5 中,按主干线两端的连接情况将所有主干线划分为标号为从 a 至 j 的 10 种类型。划分主干线布线顺序的基本原则如下。

1) 先对与电站出线直接关联的主干线布线(a, b, d, f, g, i),再对与关键节点关联的主干线布线(c, e, h, j)。

2) 先对与边上电站出线关联的主干线布线(a,

b, c, f, h), 再对与位于中间电站出线关联的主干线布线(d, g, i, j)。

相对于将所有主干线不加区分而按随机顺序布线, 按以上原则划分的布线顺序布线可将主干线按与周围拓扑的不同连接特点进行分别处理, 优先将某些主干线布线于相应位置上, 使得自动布线效果更接近于手工绘制电气接线图中的布线效果。基于以上原则, 本文采用的布线顺序为 a-b-f-d-g-i-c-h-j-e。

2) 布线基本方法

对于各种不同类型的主干线, 布线的�基本方法主要有以下 2 种。

方法 1: 取主干线 2 个端点中某点的纵坐标值为基准, 将其布线为首尾连接的 2 条竖线和 1 条横线。下面以图 6 所示的主干线 B1 为例说明该方法的布线过程。

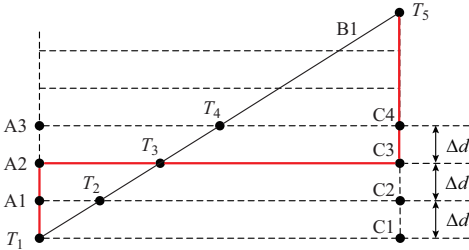


图 6 主干线布线方法 1  
Fig.6 The first routing method of main line

以主干线 B1 的一端  $T_1$  节点为起始端, 沿着另一端点  $T_2$  方向以设定值  $\Delta d$  为单位距离依次取点  $T_1, T_2, T_3, T_4, \dots$  为可能的布线折点。按序依次试取各折点确定的折线为布线线路(如  $T_3$  折点确定的布线线路  $T_1-A_2-C_3-T_5$ )。若该线路不与其他已布线线路相交或重合, 则为布线线路, 布线结束; 否则, 取下一折点所确定的布线线路再试。若所有可能布线折点都不满足布线要求, 则在允许线路间相交后再按序依次进行一轮布线。一般来说, 第 2 轮布线一定存在满足要求的布线线路; 若仍不存在, 可通过平移该主干线某个端点的初始坐标位置来使得布线线路存在。

通过按不同布线要求进行先后两轮布线, 完全避免了所有布线之间的重合, 且最大限度减少了线路之间的相交。

方法 2: 通过平移主干线某一端点位置或直接取其中点为布线折点完成布线。该布线方法只应用于两端都与关键节点连接的主干线, 如图 7 所示。

图 7 中, 以主干线一端点为坐标原点建立直角坐标系。若主干线位于坐标轴两侧  $30^\circ$  弧形范围内(图中的阴影区域), 则将主干线的另一端点就近平

移到该端点在临近坐标轴上的投影点处, 从而使该主干线布线为完全水平或竖直的方式, 如图 7 中主干线 B2 所示; 若主干线不处于  $30^\circ$  弧形范围内, 则取该主干线的中点为布线折点, 以该中点的纵坐标为基准完成布线, 如图 7 中的主干线 B1 所示。一般来说, 应用此类方法布线的主干线周围都有足够的空间来布线, 不会造成布线重叠和交叉。

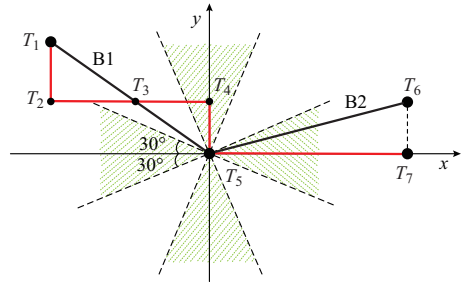


图 7 主干线布线方法 2  
Fig.7 The second routing method of main line

4 自动成图完整绘图

4.1 电站出线的完整绘图

电站出线的完整绘图即根据电站出线在骨架布线过程中确定的成图位置和它在原拓扑中对应的设备及各设备间的拓扑连接顺序具体地确定其中每个设备的坐标位置。图 4 示例中电站 S 中各电站出线的完整绘图结果如图 8 所示。

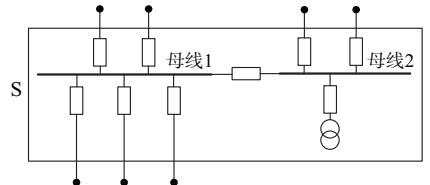


图 8 电站出线的完整绘图  
Fig.8 Complete drawing of outlet line

4.2 主干线的完整绘图

根据骨架成图拓扑模型中对主干线的定义, 主干线只可能对应于以下 4 种线路, 如表 1 所示。

表 1 4 种主干线模型  
Table 1 4 kinds of main line model

主干线类型	包含的设备	拓扑连接示意图
①	1 条导线, 0 个开关	
②	1 条导线, 1 个开关	
③	2 条导线, 1 个开关	
④	3 条导线, 2 个开关	

对应表 1 所示主干线的 4 种拓扑连接情况和主干线的布线结果, 在特别考虑布线弯折处设备绘制的情况下, 计算出其中每个设备的具体坐标位置。

### 4.3 分支线的完整绘图

根据前文定义,分支线在原拓扑中对应的设备数量少,在成图时占据的空间小,因此可将其直接绘制在某一个方向上。分支线都直接连接于关键节点上,以该关键节点所在的坐标可确定出分支线中各个设备的具体坐标位置。具体步骤如下。

步骤 1:获取分支线所连接关键节点的坐标位置,确定出以该节点为中心的 4 个水平或竖直方向中还没有布线的方向。

步骤 2:按分支线中所包含的设备数量和设备类型确定其成图时需要占据的空间大小。从步骤 1 确定的还没有布线的方向中选定一个能够不与已有布线相交的方向作为该分支线的成图方向。

步骤 3:根据分支线中各设备间的拓扑连接顺序和成图方向依次确定该分支线中各设备所在的坐标位置,完成分支线的完整绘图。

## 5 算例分析

考虑到现实中以电缆线为主的配电网和以架空线为主的配电网成图时,在分支线数量方面存在着巨大差异,为有效说明该算法对自动生成各类配电网电气接线图的有效性,本文选取以下 2 个算例来分别进行验证说明。

1)电缆线类。该拓扑为上海地区某 35 kV 电站下 2 条 10 kV 馈线构成的供电区域,其拓扑由电缆线路和相应开关站组成。直接将简化前拓扑以及 3 层分层拓扑直接用于成图时,初始拓扑、成图拓扑、骨架拓扑、布局拓扑需计算坐标的对象数量分别为 669,430,151,38。

可以看出,拓扑的简化和分层过程大大减少了成图时计算坐标对象的数量,降低了电气接线图自动生成的难度。应用基于引力-斥力模型的布局算法对该布局拓扑的布局结果如图 9 所示。

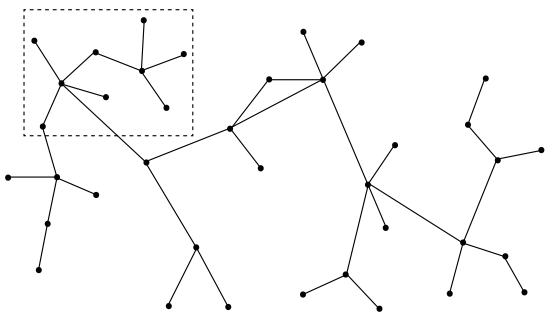


图 9 主干骨架结构布局效果

Fig.9 Layout result of framework structure

图 9 中,各代表电站的节点分散较开,且度数大的节点间距离更大,为下一步电站的完整绘图和线路布线预留了足够空间,说明了基于引力-斥力模

型的布局算法的有效性。图 9 中虚线矩形框区域的最终成图结果如图 10 所示。图 10 所示的成图结果中,布线简单明了,电站成图清晰,准确完整地表示了该区域配电网的拓扑结构。图 10 所对应的全局成图结果见附录 A 图 A1。

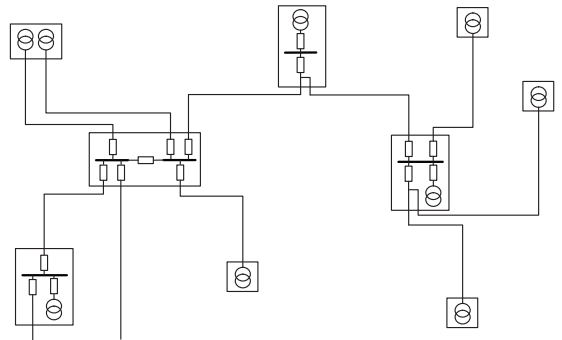


图 10 局部成图结果

Fig.10 Part of automatic mapping result

2)架空线类。该拓扑为上海地区某 35 kV 电站下 1 条 10 kV 馈线构成的供电区域,其线路几乎都为架空线,含有大量分支线。其最终成图效果如附录 A 图 A2 所示。

应用该算法自动生成电气接线图相对于手工画图在成图速度和效率上都有很大提高。一般来说,对于一般规模(由几条馈线构成)的供电区域,其成图时间约 20 s,总成图耗费时间与成图规模正相关,且其中绝大部分时间是耗费在初步布局过程中。以上文 2 条馈线的电缆线路成图算例为例,其主干骨架布局过程时间为 9.6 s,迭代次数为 643 次,而从主干骨架布局结果到全局具体成图时间不足 1 s。因此,该成图算法完全适用于一定规模的配电网电气接线图的自动生成。

## 6 结语

本文针对配电网本身设备数量大和拓扑结构复杂的特点提出了一种基于拓扑分层的自动成图算法。该算法首先在原拓扑模型基础上构建出 3 层不同程度简化的分层成图拓扑模型,然后对应地分 3 步通过采用不同算法实现电气接线图的自动成图。该分层分步、逐步细化的成图思路有效降低了求解自动成图问题的难度,很好地实现了配电网电气接线图的自动生成,并以不同的实际算例验证了该算法的有效性。

当配电网规模进一步增大时,从中抽象出来的骨架拓扑模型可能会存在很多环以及环之间相互跨越交叉的情况,现有的布局算法还不能对其进行有效的平面化布局。因此,如何解决更大规模配电网网络骨架模型的合理布局,以实现其电气接线图的

自动生成还有待于进一步深入研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

### 参考文献

- [1] 刘建, 吴媛, 刘玖权. 配电馈线地理图到电气接线图的转换[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 73-77.  
LIU Jian, WU Yuan, LIU Gongquan. Conversion from GIS based feeder maps to electric diagrams [J]. Automation of Electrical Power Systems, 2005, 29(14): 73-77.
- [2] 方正云. 城市配电网络电气系统接线图自动成图研究[J]. 电子世界, 2012(15): 40-42.  
FANG Zhengyun. Research on automatic generation of wiring diagram for city distribution network [J]. Electronics World, 2012(15): 40-42.
- [3] 沈伟, 吴文传, 张伯明, 等. 能量管理系统中电网潮流单线图自动生成算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 48-52.  
SHEN Wei, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A power grid one-line diagram automatic generation method in the EMS [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 48-52.
- [4] 章坚民, 叶琳, 孙维真, 等. 基于地理相对位置的省级输电网均匀接线图自动生成[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(24): 55-59.  
ZHANG Jianmin, YE Lin, SUN Weizhen, et al. Automatic generation of the uniformly-distributed provincial transmission power grid diagram based on relative geographical location information [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(24): 55-59.
- [5] 章坚民, 王云, 谷炜, 等. 调度大屏输电网潮流图自动生成: (一) 自动布局[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 43-47.  
ZHANG Jianmin, WANG Yun, GU Wei, et al. Automatic generation of transmission network single-line power flow diagram for dispatching large screen display: Part one automatic layout [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 43-47.
- [6] 章坚民, 方文道, 胡冰. 基于分区和变电站内外模型的区域电网单线图自动生成[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 72-76.  
ZHANG Jianmin, FANG Wendao, HU Bing. Regional power grid system single-line diagram automatic generation using grid dividing and internal/external substation models [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 72-76.
- [7] 章坚民, 叶义, 陈立跃. 基于新型力导算法的省级输电网均匀接线图自动布局[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 107-112.  
ZHANG Jianmin, YE Yi, CHEN Liyue. A novel force-direction algorithm and its application in automatic generation of uniformly-distributed provincial transmission power grid diagram [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 107-112.
- [8] 赵冬梅, 龚群, 张旭. 基于组合图元的输电网单线图自动布局方法[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2979-2984.  
ZHAO Dongmei, GONG Qun, ZHANG Xu. A grouped primitives based approach to automatic layout for single-line diagram of power transmission network [J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2979-2984.
- [9] 邢佳磊, 杨洪耕, 何亚平. 地区电网运行单线图的智能自动布局[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 59-64.  
XING Jialei, YANG Honggeng, HE Yaping. Intelligent automatic layout of single-line diagrams for the regional network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 59-64.
- [10] ONG Y S, GOOI H B, CHAN C K. Algorithms for automatic generation of one-line diagrams [J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(5): 292-298.
- [11] 何永佳. 10 kV 配网单线图自动成图研究[J]. 机电信息, 2011, 33: 19-20.  
HE Yongjia. Research on automatic generation of one-line diagram for 10 kV feeder [J]. Mechanical and Electrical Information, 2011, 33: 19-20.
- [12] ZHU Yongli, MALIK O P. Intelligent automatic generation of graphical one-line substation arrangement diagrams [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 729-735.
- [13] 章坚民, 楼坚. 基于 CIM/SVG 和面向对象的配电单线图自动生成[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 61-65.  
ZHANG Jianmin, LOU Jian. Automatic generation of single-line diagram for distribution feeder systems based on CIM/SVG and object orientation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 61-65.
- [14] 周博曦, 孟昭勇, 王志臣. 基于 CIM 的变电站与配电馈线一次接线图自动绘制算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 77-81.  
ZHOU Boxi, MENG Zhaoyong, WANG Zhichen. Automatic graphing algorithm for primary electric wiring diagram of substation and distribution feeder based on CIM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 77-81.
- [15] 沙树名, 林峰. 一种基于 CIM 的厂站接线图自动生成技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 68-71.  
SHA Shuming, LIN Feng. A technique of automatic generation of substation wiring diagram based on CIM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(21): 68-71.
- [16] 章坚民, 叶义, 徐冠华. 变电站单线图模数图一致性设计与自动成图[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 84-90.  
ZHANG Jianmin, YE Yi, XU Guanhua. Consistency design of mode, data, diagram of substation one-line diagram and its auto-generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 84-90.
- [17] 程远, 严伟, 李晓明. 基于斥力-张力模型的网络拓扑图布局算法[J]. 计算机工程, 2004, 30(3): 104-105.  
CHENG Yuan, YAN Wei, LI Xiaoming. Network topology auto layout algorithm based on repulsion-tension model [J]. Computer Engineering, 2004, 30(3): 104-105.

廖凡钦(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统及其自动化。E-mail: liaofanqin@sjtu.edu.com

刘东(1968—), 男, 通信作者, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 智能电网、主动配电网、电网物理信息融合系统。E-mail: dongliu@sjtu.edu.cn

闫红漫(1968—), 女, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向: 信息集成、计算机实时监控。

(编辑 杨松迎 章黎)

## An Automatic Electrical Diagram Generation Method for Distribution Networks Based on Hierarchical Topology Model

LIAO Fanqin<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>1</sup>, YAN Hongman<sup>2</sup>, YU Wenpeng<sup>1</sup>, HUANG Yuhui<sup>1</sup>, WAN Qingbo<sup>3</sup>

- (1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Computer Science and Technology Institute, Donghua University, Shanghai 201600, China;
3. State Grid Nanchang Power Supply Company, Nanchang 330006, China)

**Abstract:** The automatic generation of the electrical diagram for a distribution network is a complex optimization problem. The nature of this process is to determine the relative positions of equipment of the distribution network in a 2-D plane. Based on a simplified hierarchical model, an automatic drawing algorithm is proposed to automatically generate the electrical diagram. The algorithm solves this problem by decomposing it into three steps, namely, preliminary layout, framework routing and complete drawing. The preliminary layout is obtained with gravitation-repulsion model. The power station drawing is completed through equipment classification and comparison of each outlet line's dip angle. The routing priority is used to ensure there is no overlapping and crossing of routing. The overall automatic generation of the electrical diagram can then be obtained with respect to its original integrated topology structure. Finally, a practical case study of a city's distribution network is given to show the effectiveness of the method and the automatic layout algorithm.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA050803).

**Key words:** distribution network; electrical diagram; automatic diagram deneration; hierarchical topology model; preliminary layout; framework routing