

## 面向不对称察觉的低压配电网分相接线图自动成图

章坚民<sup>1</sup>, 夏 燕<sup>1</sup>, 倪琳娜<sup>2</sup>, 胡瑛俊<sup>2</sup>, 杨思洁<sup>2</sup>, 邱程峰<sup>1</sup>

(1. 杭州电子科技大学自动化学院, 浙江省杭州市 310018;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江省杭州市 310014)

**摘要:** 态势可视化是低压配电网现代化监管关键技术之一,为此提出配电变压器为中心低压配电网(TCDN)概念作为研究及工程应用的对象和目标。清晰美观的接线图自动生成是TCDN态势可视化的前提,接线不对称性和负荷不对称性是低压配电网的关键特点,因此提出2类适合态势感知的分相接线图布局设计。提出了TCDN分相接线图自动生成原理,基于该原理的接线图,既能确保三相四线主干线和三相用户的接线对称性,也能清晰识别出单相双线用户导致的接线不对称性。对于提出的虚拟全单相接线图形,基于其单线束扇形图形设计参数和排列顺序,提出了单线束初始布局以及缩放和旋转参数计算方法以生成初始图形,再进行基于力导的美化计算以得到较为美观的图形。基于提出的原理,得到的虚拟全单相接线图形可以分解组装得到分相接线图。案例验证了该方法的快速性和有效性,其电压态势时序图片可以很好地察觉含单相户用光伏、单相及三相负荷变化下的低压配电网动态运行特性。

**关键词:** 态势可视化; 配电变压器为中心低压配电网; 接线不对称性; 负荷不对称性; 分相接线图; 虚拟全单相接线图形; 自动生成

### 0 引言

低压配电网(low-voltage distribution network, LVDN),俗称台区,在中国一般是指10 kV中压配电变压器作为电源的380 V/220 V配电网<sup>[1-2]</sup>,是为广大低压用户服务的最直接电网,也是未来物联网的主要应用场景<sup>[3-4]</sup>。随着依靠智能电表的用户用电采集系统建立以及采集频度增高(目前一般15 min一次),智能电表除了实现电能计量计费的基本功能外,也可作为传感器<sup>[4-6]</sup>来实现对电能质量、供电可靠性、计量质量、防窃电以及其他异常、配电网综合经济运行水平等全面感知和态势可视化。本文的目的在于使得建立的低压配电网在线态势监视画面更为优化。

低压配电网量大面广,扩改接概率高,存在一定的布线隐蔽工程,变-线-户之间的拓扑关系不明确,缺乏电网拓扑及技术参数资料是国际国内普遍的现象<sup>[7-16]</sup>。为此,基于智能电表量测数据的低压配电网拓扑识别<sup>[7-8]</sup>、相别识别<sup>[9-10]</sup>、拓扑纠错<sup>[11-13]</sup>,

借助专用设备的阻抗测量<sup>[14]</sup>和拓扑自动识别<sup>[15-16]</sup>等技术不断出现,未来低压配电网拓扑以及电气参数会日益准确,为制作基于低压配电网分相单线图奠定了基础。

国内外配电网接线自动成图已有一些研究<sup>[17-20]</sup>,基于智能量测的中高压配电网态势感知已得到相对比较充分的研究<sup>[21-25]</sup>,但面向态势分析尤其是面向低压配电网的接线自动生成的研究很少。

低压配电网接线及运行特点与其他电压等级电网差异很大;低压配电网接线既具有三相四线主干线和三相用户的接线对称性,也具有单相用户以及其单相双线的接线不对称性;除了用户三相用电不平衡导致低压配电网三相不平衡的主因之外,三相接线不对称性也是另一个根本原因,因此自动生成的接线图应有能直接察觉出此类三相接线对称性和不对称性的能力。

无论接入多少分散式电源,负荷如何变化或不平衡,三相接线拓扑如何不平衡,主控低压配电网运行的仍为主电源即配电变压器,因此本文提出配电变压器为中心低压配电网(transformer-centralized low-voltage distribution network, TCDN)概念,并以此作为低压配电网态势感知可视化研究及工程应用的对象和目标,提出适合态势感知的2类配电网分

收稿日期: 2019-06-27; 修回日期: 2019-12-22。

上网日期: 2020-05-14。

国家自然科学基金资助项目(51677047);已申请国家发明专利(申请号:201910899725.1)。

相接线图设计以及自动生成方法。

## 1 面向态势可视化的 TCDN 接线图形建模

### 1.1 低压配电网布线特点

以单相两线或三相四线的架空或电缆线路为单相或三相用户供电,布线分为放射式、树干式或二者相结合 3 类;配电变压器最大容量为 1 250 kVA,低压最大出线为 16 回数,最大单回出线容量为 167 kVA<sup>[1-2]</sup>;单回出线供电半径一般不大于 250 m,树干分级一般不超过 4 级;10 kV 配电室(箱)低压出线后,采取直接至户表、楼内低压总配电室(柜)再至户表、低压配电箱再至户表 3 种方式接入末端用户<sup>[2,26]</sup>。因此,低压配电网单回线路以及整个台区的低压用户数是有限的。

一般低压配电网有以下特点:①三相用户供电方式为三相四线制,单相用户为单相双线制;②主干线以三相四线铺设,中间设置分线箱或分线盒,用以引出三相四线分支,或引出三相四线用户的进户线,或引出单相双线分支,或引出单相用户的进户线;③为用户统一位置抄表,一般在分线箱或分线盒处安装集中电表表箱。

### 1.2 低压配电网运行特点

低压配电网的最大运行特点,也是最需要关注的是其三相不平衡,因此分相低压配电网接线展示是必须的:一是存在单相线路导致的三相不平衡接线;二是即便三相线路接入户内,也存在户内三相的负载不平衡,尤其是单相户用光伏接入后导致可能的不平衡加剧。三相不平衡不仅危害到线路(尤其是中性线),也危害到配电变压器。本文的主要贡献在于该自动生成的分相单线图,既易于察觉接线拓扑的三相不平衡,也易于察觉负荷不平衡引起的配电网三相运行不平衡。

对于低压配电网来说,未来投入的重点治理手段如下:一是三相不平衡治理设备;二是无功补偿装置。前者用于改善三相不平衡程度,后者用于改善电压品质,两者对降低低压配电网损耗均有贡献。通过基于优秀的分相单线图上的电压、理论计算损耗等的在线渲染,不仅可以很好地监视低压配电网运行状态,发现三相不平衡突出的位置以及分析其产生的根本原因,从而指导三相线路整改、三相负荷接入调整、不平衡治理设备及无功补偿装置的规划和安装、单相光伏等单相分布式电源的接入位置及相线选择,还可以通过配电网运行状态的监视来监测治理设备运行效果,继而判断其配置是否合理以及运行是否正常。

### 1.3 图形组成

图形分为主干线、接户线 2 个部分:①主干线是指配电变压器和“分线箱”之间的连接线路,一般为三相四线制,分相主干线是指只用主干线其中的某相来绘制变压器和“分线箱”之间的连接关系;②接户线是指从“分线箱”引出一条或多条接到具体用户配电箱(盒)的线路,这些接户线可以是单相(双线)或三相(四线)。

### 1.4 接线图布局设计

1) 三相分相分块半扇面展示方式,如图 1 所示。

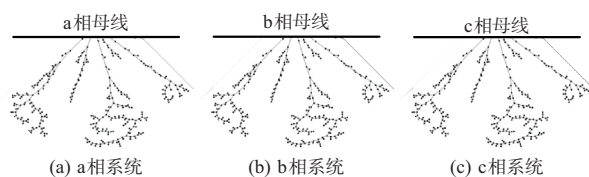


图 1 3 个半扇面的三相分相接线图布局

Fig. 1 Three-phase connection diagram layout in shape of three half-fans

2) 以配电变压器低压母线为圆心的三相分相 1/3 扇面展示方式,如图 2 所示。

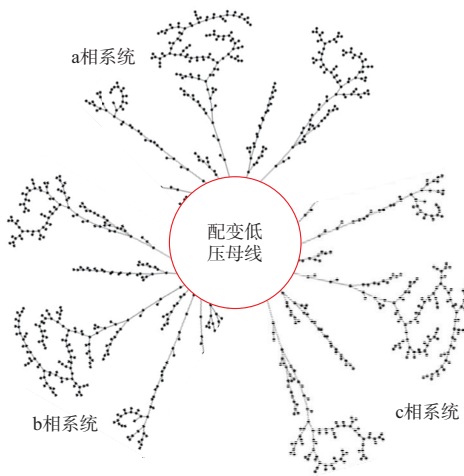


图 2 1/3 扇面的三相分相接线图布局

Fig. 2 Three-phase connection diagram layout in shape of 1/3 fans

可以发现,图 1、图 2 只是分相接线布局不同而已,因此问题的关键是分相接线图的自动生成。

## 2 TCDN 分相接线图自动生成原理

从配电变压器低压母线分出的三相四线主干线束(含分线箱引出的单相双线线束),称为低压出线束;假设有  $N$  束,用  $n$  标设其顺序,即  $n \in [1, N]$ ;对应  $n$  束出线,其分相图形标设为  $a_n, b_n, c_n$ ;显然对于三相用户集合而言,  $a_n, b_n, c_n$  存在着共同的三相四线线束

集合,假设为 $\Omega_3$ ;也存在着各自不同的单相双线线束,分别假设为 $\Omega_2^a, \Omega_2^b, \Omega_2^c$ ,即有

$$\begin{cases} \Omega_3 = \Omega_3^a \cup \Omega_3^b \cup \Omega_3^c \\ \Omega_3^b = r(\Omega_3^a, \theta) \\ \Omega_3^c = r(\Omega_3^a, 2\theta) \\ a_m = \Omega_3^a \cup \Omega_2^a \\ b_m = \Omega_3^b \cup \Omega_2^b \\ c_m = \Omega_3^c \cup \Omega_2^c \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Omega_3^a, \Omega_3^b, \Omega_3^c$ 为三相四线布线对应的分相线束; $\theta$ 为旋转角; $r(u, v)$ 表示对图形 $u$ 逆时针旋转 $v$ 的角度。

为清晰识别三相四线主干线和三相用户具有的接线对称性, $\Omega_3^a, \Omega_3^b, \Omega_3^c$ 在布局布线时将保持对称性, $\Omega_3^b$ 和 $\Omega_3^c$ 仅仅是 $\Omega_3^a$ 图形旋转 $\theta$ 和 $2\theta$ 角度。对于图1,有 $\theta = 0^\circ$ ;对于图2,有 $\theta = 120^\circ$ 。 $\Omega_2^a, \Omega_2^b, \Omega_2^c$ 的布局布线应体现出此类单相双线用户接线所导致的低压配电网接线的不对称性。

为此,设计一种虚拟全单相接线图形 $\Omega_T$ :

$$\Omega_T = \Omega_3^a \cup \Omega_2^a \cup \Omega_2^b \cup \Omega_2^c \quad (2)$$

它是一种把b相和c相上的单相双线分支和用户都画在a相上的虚拟接线图形,目的在于以单相的方式一并计算所有相线路和用户的布局布线参数。

对图 $\Omega_T$ 进行水平布置的扇面 $120^\circ$ 的自动生成,形成接线图 $\Omega_T^0$ :

$$\Omega_T^0 = \Omega_3^{a0} \cup \Omega_2^{a0} \cup \Omega_2^{b0} \cup \Omega_2^{c0} \quad (3)$$

式中: $\Omega_3^{a0}, \Omega_2^{a0}, \Omega_2^{b0}, \Omega_2^{c0}$ 分别为 $\Omega_3^a, \Omega_2^a, \Omega_2^b, \Omega_2^c$ 对应的接线图型。

对于图1的布局,分相接线图为:

$$\begin{cases} a_n = r(\Omega_3^{a0}, -90^\circ) \cup r(\Omega_2^{a0}, -90^\circ) \\ b_n = r(\Omega_3^{a0}, -90^\circ) \cup r(\Omega_2^{b0}, -90^\circ) \\ c_n = r(\Omega_3^{a0}, -90^\circ) \cup r(\Omega_2^{c0}, -90^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

对于图2的布局,分相接线图为:

$$\begin{cases} a_n = r(\Omega_3^{a0}, -90^\circ) \cup r(\Omega_2^{a0}, -90^\circ) \\ b_n = r(\Omega_3^{a0}, 30^\circ) \cup r(\Omega_2^{b0}, 30^\circ) \\ c_n = r(\Omega_3^{a0}, 150^\circ) \cup r(\Omega_2^{c0}, 150^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

因此,关键问题就转化为 $\Omega_T$ 的自动生成。应用文献[23-24]的基本原理,但由于低压配电网较中压配电网简单很多,自动生成方法有所简化。

### 3 TCDN分相接线图自动生成算法

#### 3.1 虚拟全单相接线图形初始布局

假设 $\Omega_T$ 从配电变压器低压母线出发存在 $N$ 束

线束,其第 $n$ 束线束为 $\Omega_{Tn}, n \in [1, N]$ ;对 $\Omega_{Tn}$ 进行静态拓扑分析,建立支线模型;其中选择最长的支线作为一级支线,生成其线路等级表与节点顺序表。

##### 1) 单线束初始布局

$\Omega_{Tn}$ 的接线图布局如图3所示,假设按以下规则计算得到的图形为 $\Omega_{Tn}^1$ 。

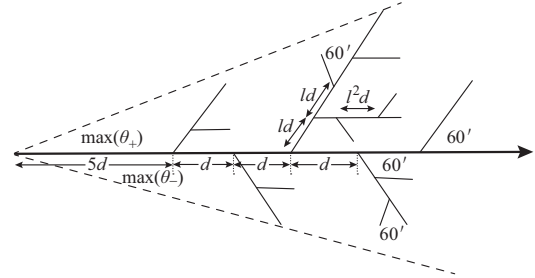


图3 虚拟全单相接线图形第 $i$ 束线束的初始水平扇面布局  
Fig. 3 Initial horizontal fan-shape layout of the  $i$ th line set for virtual single-phase connection diagram

首先,设置配电变压器的低压母线为一个点,其坐标为 $(0, 0)$ ,并设置 $d$ 为节点间初始距离,比如 $d=200$ ;接着,将一级支线固定在 $x$ 轴正方向;为使得馈线形成的扇面较小,从原点 $(0, 0)$ 出发,第1个节点离原点选择为 $5d$ ;其后的各节点横坐标按顺序依次累加 $d$ ,而纵坐标始终为0。

二级支线各节点坐标:从一级支线节点坐标取到第 $i$ 条二级支线起始节点坐标 $(x_i, y_i)$ ,第 $i$ 条二级支线第 $j$ 个节点的坐标为 $(x_{ij}, y_{ij})$ ,则有

$$\begin{cases} x_{ij} = x_{i(j-1)} + ld \cos\left(\frac{k\pi}{3}\right) \\ y_{ij} = y_{i(j-1)} + ld \sin\left(\frac{k\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $l$ 为分级支线线段长度的控制系数,假设为0.8; $k$ 为分支的方向系数,当 $i$ 为奇数时 $k$ 取1,当 $i$ 为偶数时 $k$ 取-1;分支与主干线夹角为 $\pi/3$ 。

三级及以上支路各节点坐标:从上一级支线节点坐标取得第 $i$ 条本级支线起始节点坐标 $(x_i, y_i)$ ,第 $i$ 条的二级支线第 $j$ 个节点的坐标为 $(x_{ij}, y_{ij})$ ,与式(6)类似, $l^2$ 使得分支线段变短:

$$\begin{cases} x_{ij} = x_{i(j-1)} + l^2 d \cos\left(\frac{k\pi}{3}\right) \\ y_{ij} = y_{i(j-1)} + l^2 d \sin\left(\frac{k\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (7)$$

##### 2) 单线束初始布局的扇形计算

所有线束按以上计算得到节点的笛卡尔坐标 $(x_j'', y_j'')$ ,将其转换为相应的极坐标 $(r_j'', \theta_j'')$ :

$$\begin{cases} (x_j^n, y_j^n) = r_j^n \angle \theta_j^n \\ r_j^n = \sqrt{(x_j^n)^2 + (y_j^n)^2} \\ \theta_j^n = \arctan\left(\frac{y_j^n}{x_j^n}\right) \end{cases} \quad (8)$$

如图3所示,第 $n$ 束线束形成的扇面最小和最大角度 $\theta_-^n$ 和 $\theta_+^n$ 、扇面角 $\vartheta^n$ 、扇面中心线 $L_{\text{ctr}}^n$ 的极角 $\theta_{\text{ctr}}^n$ 分别可计算如下:

$$\begin{cases} \theta_+^n = \max(\theta_{j+}^n) & \theta_{j+}^n > 0 \\ \theta_-^n = \min(\theta_{j-}^n) & \theta_{j-}^n < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\vartheta^n = \theta_+^n - \theta_-^n \quad (10)$$

$$\theta_{\text{ctr}}^n = \frac{1}{2}(\theta_+^n + \theta_-^n) \quad (11)$$

式中: $\theta_{j+}^n$ 和 $\theta_{j-}^n$ 分别为第一、四象限节点极角。

### 3) 虚拟全单相接线图形拼接

假设 $N$ 个线束扇面按照 $n$ 的顺序逆时针拼接,则按照以上的扇形计算,总扇面角为:

$$\vartheta^0 = \sum_{n=1}^N \vartheta^n \quad (12)$$

意味着原扇面角要按比例 $\delta^n$ 进行缩放,才能使拼接后的扇面角为 $120^\circ$ :

$$\gamma = \frac{120}{\vartheta^0} \quad (13)$$

对第 $n$ 束线束图形 $\Omega_{Tn}^1$ 进行以下操作,得到图形 $\Omega_{Tn}^2$ :原扇面保持极径不变,保持中心线极角不变,只对各节点进行极角更新;若更新后第 $n$ 束线束各节点的新极坐标为 $(r_j^{n'}, \theta_j^{n'})$ ,扇面角为 $\vartheta^{n'}$ 、扇面中心线极角为 $\theta_c^{n'}$ ,则有

$$r_j^{n'} = r_j^n \quad (14)$$

$$\theta_j^{n'} = \begin{cases} \theta_c^n + \gamma \theta_j^n & \theta_j^n - \theta_c^n \geq 0 \\ \theta_c^n - \gamma \theta_j^n & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

$$\vartheta^{n'} = \gamma \vartheta^n \quad (16)$$

$$\theta_c^{n'} = \theta_c^n \quad (17)$$

新的扇面最小、最大角度 $\theta_-^{n'}$ 和 $\theta_+^{n'}$ 分别为:

$$\theta_-^{n'} = \theta_c^n - \frac{\gamma}{2} \vartheta^n \quad (18)$$

$$\theta_+^{n'} = \theta_c^n + \frac{\gamma}{2} \vartheta^n \quad (19)$$

下面将计算第 $n$ 束线束各节点的新极坐标 $(r_j^{n'}, \theta_j^{n'})$ 下进行旋转,使得旋转后的虚拟全单相接线图形即 $120^\circ$ 的最后扇面的中心线极角为 $-90^\circ$ ,如图1中所有分相图形或图2的a相图形所示。

假设最后的第 $n$ 束线束图形为 $\Omega_{Tn}^3$ ,则有

$$\Omega_{Tn}^3 = r(\Omega_{Tn}^2, \beta_n) \quad (20)$$

其中旋转角 $\beta_n$ 计算如下:

$$\beta_n = \theta_-^{n'} + \sum_{k=1}^{n-1} \vartheta^{k'} - 150 \quad (21)$$

由于篇幅所限,式(20)和式(21)证明省略。

这样就可以得到虚拟全单相接线图形的极坐标,可以转换为笛卡尔坐标,具体见文献[24]。

## 3.2 虚拟全单相接线图形美化计算

对于图3所示的接线图,线段采取的是直接连接,美感度不强,为此采取力导法对生成的图形进行美化计算。

### 3.2.1 简单引力斥力计算

1) 节点 $V_i$ 的引力计算

$$f_r(V_i) = \sum_{j=1}^{m'-1} f_a(V_i, V_j) \quad (22)$$

$$f_a(V_i, V_j) = \begin{cases} 0 & d_{ij} \leq L \\ k_a(d_{ij} - L) & d_{ij} > L \end{cases} \quad (23)$$

式中: $m'$ 为图形的节点总数; $d_{ij}$ 为节点 $V_i$ 和 $V_j$ 之间的距离; $k_a$ 为其他节点对点 $V_i$ 的引力系数; $L$ 为支线理想长度。

2) 节点 $V_i$ 的斥力计算

$$f_r(V_i) = - \sum_{j=1}^{m'-1} \frac{k_r}{d_{ij}} \quad (24)$$

式中: $k_r$ 为其他节点对点 $V_i$ 的斥力权重。

### 3.2.2 复杂引力斥力计算

1) 引入点边、边边斥力及总斥力

引入点边回避、边边回避的斥力,以减少点边交叉、边边交叉的概率<sup>[22]</sup>。节点 $V_i$ 的总斥力计算公式如下:

$$f_r(V_i) = - \left( \sum_{j=0}^{m_1} \frac{k_{r,1}}{d_{ij}} + \sum_{j=0}^{n_1} \frac{k_{r,2}}{d_{ij}} + \sum_{j=0}^q \frac{k_{r,3}}{d_{ij}} \right) \quad (25)$$

式中: $m_1$ 为非本馈线的节点数; $n_1$ 和 $q$ 分别为本馈线当前节点上一级支路上的节点数和剩余节点数; $k_{r,1}$ 为其他馈线上的节点对点 $V_i$ 的斥力权重; $k_{r,2}$ 为点 $V_i$ 上一级支路上的节点对点 $V_i$ 的斥力权重; $k_{r,3}$ 为剩余节点对点 $V_i$ 的斥力权重。

2) 重力力作用及计算

仅采取以上引力斥力,容易使拓扑发散而远离中点,添加重力来牵引节点使拓扑收敛于图形重心 $(0,0)$ <sup>[22]</sup>。

任意节点 $V_i(x_i, y_i)$ 添加的重心力为:

$$\begin{cases} f_g(V_i) = k_g d_{V_i} \\ f_{gx}(V_i) = k_g x_i \\ f_{gy}(V_i) = k_g y_i \end{cases} \quad (26)$$

式中: $f_g, f_{gx}, f_{gy}$ 分别为重力大小及其在直角坐标上的分力; $d_{V_i}$ 为节点 $V_i$ 到重心的距离; $k_g$ 为重力



系数。

### 3.2.3 节点运动方程

接线图上的每个节点都受到4个力的作用,继而改进后的节点运动方程为:

$$x^{(k+1)}(P_i) = x^{(k)}(P_i) + f_x^{(k)}(P_i) - g_t \frac{x^{(k)}(P_i)}{d^{(k)}} \quad (27)$$

$$y^{(k+1)}(P_i) = y^{(k)}(P_i) + f_y^{(k)}(P_i) - g_t \frac{y^{(k)}(P_i)}{d^{(k)}} \quad (28)$$

$$f_x^{(k)}(P_i) = f_{x,a}^{(k)}(P_i) + f_{x,r}^{(k)}(P_i) \quad (29)$$

$$f_y^{(k)}(P_i) = f_{y,a}^{(k)}(P_i) + f_{y,r}^{(k)}(P_i) \quad (30)$$

$$d^{(k)} = \sqrt{x^{(k)}(P_i)^2 + y^{(k)}(P_i)^2} \quad (31)$$

式中: $k$ 为节点 $P_i$ 的迭代次数; $f_x^{(k)}(P_i)$ , $f_{x,a}^{(k)}(P_i)$ , $f_{x,r}^{(k)}(P_i)$ , $f_y^{(k)}(P_i)$ , $f_{y,a}^{(k)}(P_i)$ , $f_{y,r}^{(k)}(P_i)$ 分别为该节点所受引斥、合力、引力、斥力在 $x$ 轴或者 $y$ 轴上的投影; $d^{(k)}$ 为第 $k$ 步迭代该节点离中心点的距离; $g_t$ 为重力系数。

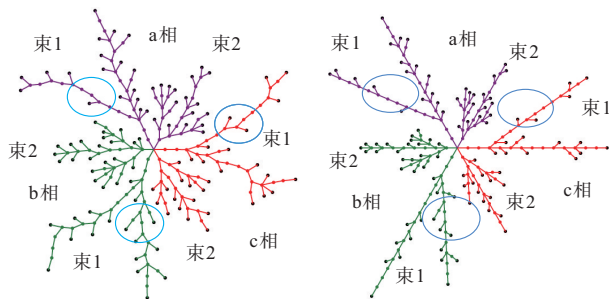
计算过程中检测当前的交叉点数量,若其是0,则结束算法,输出最优接线图及最优作用力参数;反之重复计算式(27)至式(31),一直到交叉点变为0,或按照给定的最大计算步数为止。

### 3.3 虚拟全单相接线图形分拆为单相接线图

得到图形 $\Omega_T$ 后,按照式(5)的合成原理,分解获取相应的三相对称图形和各相的单相不对称部分,并按照式(6)和式(7)进行相应的组装,最后获取图1、图2的分相接线图。

## 4 案例分析

图4(a)和(b)给出了某一台区配电网自动生成的分相接线图初始图形和美化图形。该网主干拓扑基本一致,分为2束,束1较长,束2较短;图4(b)蓝色圈出的地方为局部接线不对称区域,所连接的用户不一致,导致三相拓扑不对称、三相参数不对称、三相负荷不对称;在具体应用中,单相用户及其单相双线的接线可以采取特殊颜色标识。



(a) 按直线连接的TCDN分相接线图 (b) 美化结算后的TCDN分相接线图

图4 TCDN分相接线图

Fig. 4 TCDN phase based connection diagrams

图5(a)至(c)为该TCDN配电网在01:45, 14:15, 21:00时刻的电压分布图。可以看出,图5(a)的电压分布具有一定的对称性,而图5(b)则由于户用光伏发电,装接户用光伏的节点周围电压呈现高电压;而21:00时刻的c相束2的负荷普遍小于其他两相,因此其电压要高于其他两相。

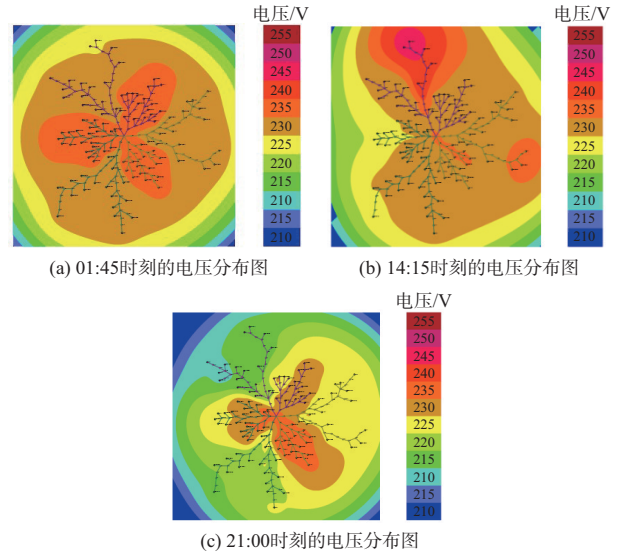


图5 TCDN电压态势图

Fig. 5 Voltage profile situation diagrams of TCDN

本案例使用机器为Lenovo普通笔记本,接线图计算时间小于2 min。

## 5 结语

本文提出了低压配电网的2类适合态势可视化的接线图方式,并提出了考虑低压配电网三相四线、单相双线混合接线的对称性和不对称性区别的分相接线图自动生成算法,计算快速,最终的图形美观,为下一步基于智能电表量测值进行态势可视化渲染提供了良好的接线图底图;案例的时序电压态势图表明,可以很好地察觉低压配电网的三相负荷动态运行特性。本文的研究成果已得到一定的实际应用验证;不能大面积推广的主要障碍还在于目前大部分台区缺乏准确和详实的低压配电网拓扑信息,而只依托智能电表采集数据难以全面完成低压配电网电气拓扑识别,需要增加低压回路检测终端<sup>[4]</sup>以及人工实地踏勘复核,工程量和工作量均较大。

本文方法适用于公变和专变台区低压线路及含分布式电源的用户态势监视,主要面向电气运行监视,包括电气量、电能量分布,以及电能质量、一次网络损耗等关键指标的态势可视化。本方法原则上不是面向电气设备的,而是面向电气量测的。低压配电网中低压分支箱、表箱等电气设备具有物理空间

集中的特点,而按照本文的分相单线图,显然这些电气设备将虚拟到各单相的节点上,从而也说明了对于低压配电网,面向电气设备的单线图难以作为电气态势底图。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 低压配电设计规范: GB 50054—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of low voltage electrical installations: GB 50054—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [2] 国家电网公司. 380/220 V 配电网工程典型设计(2018年版)[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.  
State Grid Corporation of China. Typical design of distribution network engineering (2018 edition) [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [3] 应俊, 蔡月明, 刘明祥, 等. 适用于配电物联网的低压智能终端自适应接入方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 22-27.  
YING Jun, CAI Yueming, LIU Mingxiang, et al. Adaptive access method of low voltage intelligent terminal for distribution Internet of Things [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 22-27.
- [4] 聂峥, 章坚民, 傅华渭. 配变终端边缘节点化及容器化的关键技术和应用场景设计[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 154-161.  
NIE Zheng, ZHANG Jianmin, FU Huawei. Key technologies and application scenario designs for making distribution transformer terminal unit being a containerized edge node [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 154-161.
- [5] 栾文鹏, 王兵, 周宁, 等. 基于量测数据的低压配电网精确建模[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3141-3146.  
LUAN Wenpeng, WANG Bing, ZHOU Ning, et al. Modeling of LV distribution network based on metering data [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3141-3146.
- [6] 栾文鹏, 余贻鑫, 王兵. AMI数据分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 29-36.  
LUAN Wenpeng, YU Yixin, WANG Bing. AMI data analytics [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 29-36.
- [7] DEGHANPOUR K, WANG Zhaoyu, WANG Jianhui, et al. A survey on state estimation techniques and challenges in smart distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2312-2322.
- [8] PAPPUS J, BHATT N, PASUMARTY R, et al. Identifying topology of low voltage distribution networks based on smart meter data [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5113-5122.
- [9] WATSON J D, WELCH J, WATSON N R. Use of smart-meter data to determine distribution system topology [J]. The Journal of Engineering, 2016, 5: 94-101.
- [10] SHORT T A. Advanced metering for phase identification, transformer identification, and secondary modeling [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 651-658.
- [11] OLIVIER F, SUTERA A, GEURTS P, et al. Phase identification of smart meters by clustering voltage measurements [C]// Power Systems Computation Conference (PSCC), June 11-15, 2018, Dublin, Ireland: 1-8.
- [12] LUAN Wenpeng, PENG J, MIRJANA M, et al. Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1964-1971.
- [13] LUAN Wenpeng, PENG Joshua, MARAS M, et al. Distribution network topology error correction using smart meter data analytics [C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 21-25, 2013, Vancouver, Canada: 1-6.
- [14] SHEN Zhiyu, JAKSIC M, MATTAVELLI P, et al. Three-phase AC system impedance measurement unit (IMU) using chirp signal injection [C]// 2013 Twenty-eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 13-17, 2013, Long Beach, USA: 2666-2673.
- [15] MARRON L, OSORIO X, LIANO A, et al. Low voltage feeder identification for smart grids with standard narrowband PLC smart meters [C]// 2013 IEEE 17th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, March 24-27, 2013, Johannesburg, South Africa: 120-125.
- [16] 李明维, 张传远, 马晓昆, 等. 低压配电台区网络拓扑和相别自动辨识技术研究[J]. 电气时代, 2018, 10: 62-63.  
LI Mingwei, ZHANG Chuanyuan, MA Xiaokun, et al. Identification technology study for topography and phase of low voltage distribution networks [J]. Electric Age, 2018, 10: 62-63.
- [17] 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.
- [18] 廖凡钦, 刘东, 闫红漫, 等. 基于拓扑分层的配电网电气接线图自动生成算法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 174-181.  
LIAO Fanqin, LIU Dong, YAN Hongman, et al. An automatic electrical diagram generation method for distribution networks based on hierarchical topology model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 174-181.
- [19] 周昊程, 孟进, 朱红明. 基于GIS坐标布局的配电单线图自动生成技术[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 145-150.  
ZHOU Haocheng, MENG Jin, ZHU Hongming. Automatic generation technology of single line diagram for distribution networks based on GIS coordinates [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 145-150.
- [20] 李学平, 宋国彬, 卢志刚. 基于改进引力-斥力算法的配电网馈线单线图分块布局[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 117-122.  
LI Xueping, SONG Guobin, LU Zhigang. Partitioned automatic layout of single-line diagrams for distribution network feeders based on improved repulsion-tension algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 117-122.
- [21] 章坚民, 陈昊, 陈建, 等. 智能电网态势图建模及态势感知可视化的概念设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 168-176.  
ZHANG Jianmin, CHEN Hao, CHEN Jian, et al. Smart grid situation awareness diagram modeling and conceptual design of situation awareness visualization [J]. Automation of Electric

- Power Systems, 2014, 38(9): 168-176.
- [22] 章坚民,陈昊,周明磊,等.配电网均匀接线图自动生成及态势图察觉度计算[J].电力系统自动化,2014,38(13):166-173.  
ZHANG Jianmin, CHEN Hao, ZHOU Minglei, et al. Generation of uniformly-distributed distribution network connection diagram and perception measurement for situation awareness diagram[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 166-173.
- [23] 章坚民,章剑光,陈士云,等.变电站为中心配电网单线图:(一)基于广义开闭所的图数模型[J].电力系统自动化,2019,43(18):102-110.  
ZHANG Jianmin, ZHANG Jianguang, CHEN Shiyun, et al. Single-line diagram of substation centralized medium voltage distribution network: Part one diagram-data model based on generic switching station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 102-110.
- [24] 章坚民,邱程峰,王华锋,等.变电站为中心配电网单线图:(二)初始自动布局[J].电力系统自动化,2019,43(19):124-131.  
ZHANG Jianmin, QIU Chengfeng, WANG Huafeng, et al. Single-line diagram of substation centralized distribution network: Part two initial auto layout [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 124-131.
- [25] 邱程峰,章坚民,刘理峰,等.变电站为中心配电网单线图:(三)美化布局计算[J].电力系统自动化,2019,43(20):170-175.  
QIU Chengfeng, ZHANG Jianmin, LIU Lifeng, et al. Single-line diagram of substation centralized distribution network: Part three beautified layout calculation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 170-175.
- [26] 国家电网公司.低压计量箱技术规范:QGDW 11008—2013[S].北京:中国电力出版社,2014.  
State Grid Corporation of China. Technical specification for low-voltage metering cabinet: QGDW 11008—2013 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- 章坚民(1962—),男,通信作者,硕士,教授,博士生导师,主要研究方向:态势感知及可视化、信息物理系统集成建模及信息安全防护、电网优化规划与运行等。E-mail: zhangjmhzc@hdu.edu.cn
- 夏燕(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向:智能电网信息物理系统建模与态势感知可视化。E-mail: 578042033@qq.com
- 倪琳娜(1985—),女,博士,工程师,主要研究方向:电能计量、电力需求响应等。E-mail: nilinna918@163.com
- (编辑 孔丽蓓)

## Auto-generation of Phase-separated Connection Diagram for Asymmetry Perceptible Low-voltage Distribution Network

ZHANG Jianmin<sup>1</sup>, XIA Yan<sup>1</sup>, NI Linna<sup>2</sup>, HU Yingjun<sup>2</sup>, YANG Sijie<sup>2</sup>, QIU Chengfeng<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** Situation visualization is a core technology for monitoring and management of low-voltage distribution network (LVDN). Therefore, a new concept of transformer centralized low-voltage distribution network (TCDN) is suggested as an object and target to guide corresponding research and engineering application. Auto-generation of a clear and beautiful phase-separated connection diagram becomes a pre-condition for situation visualization. For wiring asymmetry and load asymmetry being core characteristics of LVDN, two types of situation-oriented connection diagrams are designed. An auto-generation principle is proposed for phase-separated connection diagram of TCDN, so that not only the connection symmetry of three-phase four-wire main branches and the connected three-phase customers is guaranteed, but also the connection asymmetry caused by single-phase two-wire customers can be clearly perceived. For the proposed whole phase virtual connection diagram, based on the provided parameters of fan-shape layout and the arrangement order of each wiring harness, the initial layout and routing methods for each wiring harness by in-out zooming and rotating algorithm are proposed to yield an initial diagram, followed by further force-direction based beautifying algorithm to generate a nice connection diagram. The generated whole phase virtual connection diagram will be finally disassembled into the phase-separated connection diagrams according to the proposed auto-generation principle. The case study verifies the efficiency and effectivity of the proposed algorithm. Moreover, the time sequence pictures of voltage profile based on the generated phase-separated connection diagram show a very good perceptible understanding of dynamic operation characteristics of TCDN caused by variations of power outputs from single-phase household photovoltaics and power assumptions from single-phase and three-phase load.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677047).

**Key words:** situation visualization; transformer centralized low-voltage distribution network; wiring asymmetry; load asymmetry; phase-separated connection diagram; whole phase virtual connection diagram; auto-generation

