

基于自适应权重 Voronoi 图的配电网供电分区方法

唐小波¹, 刘笠¹, 张娟²

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042; 2. 金陵科技学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 在研究常规 Voronoi 图应用的基础上, 针对配电网负荷分布不均匀的情况, 提出了基于自适应权重 Voronoi 图的配电网供电分区方法。该方法按照道路、河流等自然障碍将供电区域划分成若干网格, 以变电站为生成元向四周扩散。考虑变电站的负载能力、供电距离、地理障碍和网格归属地等因素, 动态调整 V 图生成元在不同方向上的扩散速度, 使得供电分区的结果更加科学合理。为了保证分区结果与城市规划的协调性, 体现配电网发展的延续性, 引入了虚拟元的概念, 解决分区内无电源点问题。最后经实际算例验证, 表明该方法具有一定有效性和合理性。

关键词: 自适应权重; Voronoi 图; 虚拟生成元; 配电网; 分区

Method of power distribution network partition based on adaptive weighted Voronoi diagram

TANG Xiaobo¹, LIU Li¹, ZHANG Juan²

(1. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;

2. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211100, China)

Abstract: A distribution network partitioning method based on adaptive weighted Voronoi diagram is proposed for the uneven load distribution network after researching the application of conventional Voronoi diagram. According to the natural obstacles like roads, rivers, etc., this method divides the power supply regions into several grids and takes substation as the generator to spread around. The expansion speed represented as weight of generator in each direction is dynamically according to the substation load capacity, power supply distance, geographical barriers and management attribution to make the division more reasonable. The concept of virtual generator is introduced in order to achieve the coordination of the partition and urban planning and embody the continuity of distribution network development, and the problem of the partitions without power supply source is solved. An actual example is used to verify the validity and rationality of the proposed method.

Key words: adaptive weight; Voronoi diagram; virtual generator; power distribution network; partition

中图分类号: TM727

文章编号: 1674-3415(2015)19-0083-06

0 引言

配电网供电分区划分是配电网规划的一个关键问题, 其结果直接影响配电网运行的经济性和供电可靠性。针对这一大规模、非线性问题, 国内外已有一些学者进行了研究。传统的自由分区法、均一网格法和等负荷分区法没有考虑地块间的负荷差异等因素^[1-3]。文献[4]考虑了各地区经济发展、灾害分布和地理环境等因素的影响, 但该文献依旧采用的基于行政区划的分区方法。文献[5]提出了一种以各分区负荷最均匀为目标的启发式分区方法, 该方法的核心仍然是等负荷分区, 不能体现分区负荷密度

的差异和变电站容量的差异。文献[6]利用 Voronoi 图进行了变电站供电区域的划分, 但该方法是在假定负荷均匀分布的前提下提出的, 没有考虑负荷分布的不均匀和负荷对可靠性要求的差异。文献[7]从更好地实现配电网集中式差动保护的角度, 研究了配电网分区的方法。提出将配电网转化成带权的广义节点的网络, 然后根据各广义节点间的拓扑结构来进行分区。文献[8]从可靠性评估的角度提出了基于矩阵分析及运算的配电网分区方法。

本文在假设负荷分布不均匀, 且负荷对供电可靠性要求不同的前提下, 提出了一种基于自适应权重 Voronoi 图(以下简称“自适应 V 图”)的供电区

域划分方法, 根据单元地块的属性及变电站负载率自动调整权重因子, 较好地解决了区域功能定位、负荷密度、负荷类型、行政区划和地理环境等因素对配电网分区产生的影响。

1 配电网供电分区的原则

《城市中低压配电网改造技术导则》(以下简称“导则”)、《配电网规划设计技术实施细则》均对配电网分区有明确要求: 中压配电网应依托变电站布点, 划分为若干个相对独立的分区配电网, 分区配电网应有明确的供电范围, 不宜交错重叠。利用自适应 V 图进行配电网优化分区着重考虑以下几个问题。

(1) 合理的供电半径。各分区内变电站应该有明确的供电范围, 不宜跨区供电; 分区面积大小适中, 确保分区内变电站供电半径合理。

(2) 满足容载比要求。按照分区供电的原则, 各分区内变电容载比应满足《导则》要求, 并且在校核分区容载比时, 应当考虑到该分区负荷未来几年的增长速度。

(3) 考虑区域功能定位。配电网规划应当与城市规划相协调, 配电网分区应当充分考虑城市各区域的功能定位, 同一功能定位的各单元地块应尽可能划分为同一分区。

(4) 体现属地化管理。为了方便配电网的运行管理, 配电网供电分区应尽可能与各供电所的管辖范围一致, 同时兼顾道路、河流等地理因素。

2 自适应权重 Voronoi 图

2.1 基本 Voronoi 图

定义: 设欧式平面上的一个点集为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, 3 \leq n < \infty$, 则任意点的 Voronoi 图定义为

$$V(p_i) = \bigcap_{j \neq i} \{x | d(x, p_i) \leq d(x, p_j)\} \quad (1)$$

$(i, j = 1, 2, \dots, n)$

其中: $d(x, p_i)$ 表示点 x 与 p_i 间的欧式距离; x 为平面上的点。

区域 $V(p_i)$ 称为以 p_i 为生长点(或顶点)的 Voronoi 多边形(简称 V 多边形)。各个生长点的 V 多边形可以共同组成最近点意义下的 V 图, 如图 1 所示。

平面上的 Voronoi 图可以看成是点集 P 中每个顶点 $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 以相同的速度向外扩张, 直到彼此相遇为止而在平面上形成的图形。这一描述与供电区域划分具有极大的相似性, 可以反映变电站位于负荷中心及其空间影响范围。

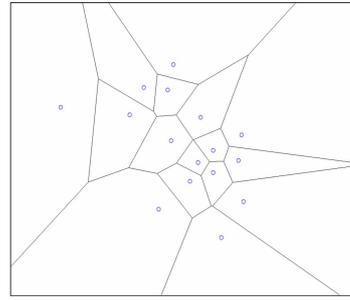


图 1 常规 Voronoi 图

Fig. 1 Basic Voronoi diagram

2.2 常规加权 Voronoi 图

常规加权 Voronoi 图是基本 Voronoi 图的一种扩展形式。欧式平面上的点集 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 对每个顶点 $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 分别赋以非负实数权重 $w_i (i = 1, 2, \dots, n)$, 称 $D(x, p_i)$ 为点 x 和 p_i 之间的加权距离, $d(x, p_i)$ 为点 x 与 p_i 之间的欧式距离, 则 $D(x, p_i) = d(x, p_i) / w_i$, 点 p_i 在权重为 w_i 时的 Voronoi 区域为

$$V_m(p_i, w_i) = \bigcap_{j \neq i} \{x | D(x, p_i) < D(x, p_j)\} \quad (2)$$

$(i, j = 1, 2, \dots, n)$

同样, 常规加权 Voronoi 图也适用于空间剖分, 位于常规加权 Voronoi 图的某 V 曲边形中的每个点到该曲边形发生元的距离, 与该点到其他曲边形发生元的距离之比小于两个发生元的权重之比。常规加权 Voronoi 图用于各发生元权重有较明显差别情况下的空间剖分。这一特性表明, 可以利用权重来反映负荷分布不均匀、各变电站额定容量不同对供电区域划分的影响。

2.3 自适应权重

常规加权 Voronoi 图应用于供电分区划分时, 各发生元的权重是固定的, 即假定在同一个分区内各地块的负荷密度相同。实际上因为各地块的功能定位不同, 在同一分区内, 位于发生元不同方向上的地块负荷情况可能差异较大。另外, 常规加权 V 图也不能准确反映归属地及地理因素对供电分区划分的影响。考虑以上因素, 将供电区域按照街道、河流划分为若干地块单元, 自适应权重 V 图发生元在扩散过程中, 根据各单元地块具体情况及变电站负载情况动态调整发生元的权重, 发生元在各个方向上的扩散速度将不再固定。

自适应权重主要考虑的是变电站带负载能力、供电半径、归属地、及地理障碍对供电分区划分的影响。变电站主变容量不同, 当前负载率不同, 向

周边负荷供电的能力也就不同。为了减少电网投资和网络损耗, 负荷点至变电站的距离应最短, 同时线路路径应尽量避免跨越河流、山川、高速、铁路等屏障。因此, 可以根据变电站主变负载率、负荷密度、供电距离及其路径条件和归属地情况构造自适应权重 w_i 。

$$w_i = ar_{Mi} + br_{Li} + cr_{Di} + dr_{Bi} + er_{Pi} \quad (3)$$

其中, r_{Mi} 为负荷密度系数, 设地块 i 的负荷密度为 ρ_i , 取该地区的平均负荷密度 $\bar{\rho}$ 作为基准值, 则地块 i 方向的负荷密度系数为 $r_{Mi} = \bar{\rho}/\rho_i$; r_{Li} 为主变负载率系数, 设变电站 i 主变容量 S_i , 当前负荷 L_i , 则变电站 i 的负载率系数为 $r_{Li} = 1 - L_i/S_i$; r_{Di} 为供电距离系数, 设负荷点至变电站的供电距离为 D_i , 则 $r_{Di} = (\bar{D} - D_i)/\bar{D}$, \bar{D} 为基准值, 城镇取 2 km, 农村取 10 km; r_{Bi} 为考虑自然地理屏障的修正系数, 根据跨越难度确定, 难度越大数值越小, 取值范围 0~1; r_{Pi} 为归属地系数, 负荷点与变电站在同一管理区域取 1, 分属不同区域取 0; a 、 b 、 c 、 d 、 e 为加权系数, $a+b+c+d+e+f=1$, 为简化起见, 此处令 $a=b=c=d=e=0.2$ 。

3 配电网供电分区的划分

3.1 应用自适应 V 图划分供电分区的基本步骤

根据已知变电站容量、位置和供电区域内负荷分布, 应用自适应 V 图划分供电分区的流程如图 2 所示, 其中 n 为生成元数量, 每个生成元沿 m 个方向扩散, 具体步骤如下。

(1) 首先根据街道或自然障碍将供电区域划分成若干小地块, 根据各地块的面积、用地属性和发展前景计算各个地块的用电负荷。

(2) 将供电区域内的变电站抽象为元点, 即 V 图生成元。

(3) 以生成元为圆心, 应用搜索策略向各个方向扩散, 计算各个方向上地块的负载率系数 r_{Li} , 供电距离系数 r_{Di} , 屏障修正系数 r_{Bi} 归属地系数 r_{Pi} 和负荷密度系数 r_{Mi} , 从而得到生成元在该方向上的权重, 动态调整生成元在不同方向上的扩散速度。

(4) 判断变电站负载率是否已到安全负载率上限, 如变电站 i 已达到安全上限, 则该变电站退出地块搜索, 若所有变电站负载率均已达安全上限, 结束地块搜索, 转步骤(7); 如未达到, 执行步骤(5)。

(5) 判断生成元各扩散方向分区边界是否与相邻分区相遇, 如相遇, 中止这两个分区在该方向上的扩散。

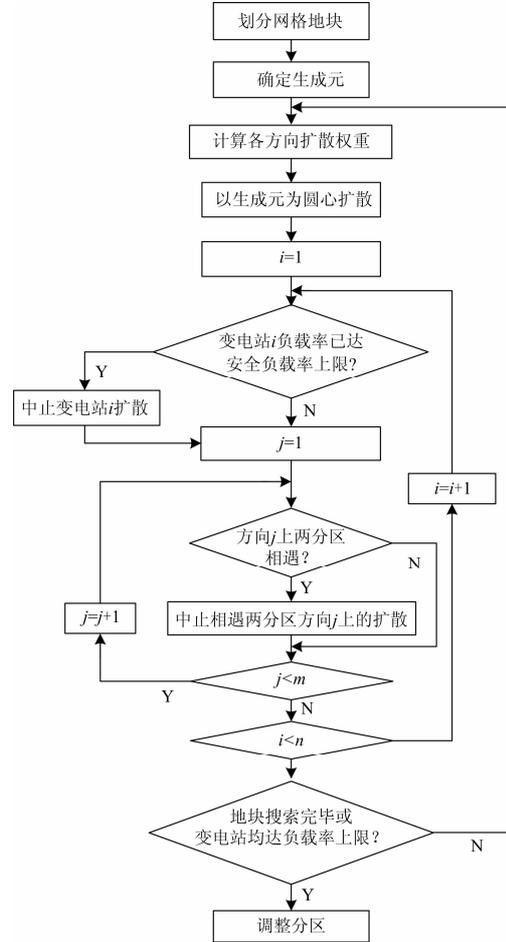


图 2 基于自适应权重 V 图配电网分区流程

Fig. 2 Distribution network partition process based on the adaptive weighted Voronoi diagram

(6) 如果所有地块搜索均完毕或所有变电站负载率均已达安全上限, 则结束搜索, 各生成元形成的多边形 Voronoi 区域就是变电站的供电区域; 否则转步骤(3)。

(7) 以变电站为生成元划分的供电区域不宜直接作为配电网供电分区的结果, 需要进行适当调整。

这是因为在城市高负荷区域可能集中分布有多座变电站, 应用 V 图得到的分区面积就会偏小, 且这类地区常常有一级重要负荷需双电源点供电, 这样就不能直接按变电站的供电范围划分供电分区。可以根据城市规划中区域功能定位、各变电站供电区域的面积及归属地, 适当合并变电站供电区域, 最终确定配电网分区。此时可能会出现同一分区内存在 2~3 座变电站的情况。

3.2 虚拟生成元

在以变电站为生成元, 应用 V 图分区时, 当某些乡镇(或新建开发区)内无变电站时, 该乡镇(或开发区)就会被分割后, 划分到周边相邻分区中。这一

结果往往与实际运行管理的情况不相符,还有可能造成部分分区过大,达不到配电网分区指导配电网规划、建设和运行的目的。

针对这一情况,本文引入了“虚拟生成元”的概念,即一个虚拟的变电站。该虚拟生成元的容量和位置确定,可以分为以下几种情况。

(1) 该区域内有在建或规划建设的变电站;以该变电站的容量和位置作为虚拟生成元即可。

(2) 该区域由区外紧邻的变电站供电;按照该变电站供电容量分配拆分变电站,即虚拟生成元的容量为向该区域供电的容量,虚拟生成元的位置为该区域的负荷中心。

(3) 该区域内暂时无新建变电站规划,且供电变电站相聚较远:根据该区域负荷预测的结果,按照容载比要求,确定虚拟生成元容量,并将虚拟生成元布置在负荷中心。

4 算例

某市城区的供电区域总面积为 52.61 km²,包括城区(中干河以东、新 328 国道以北)、经济开发区(中干河以西)和桥头镇(中干河以东、新 328 国道以南)三个行政单位。根据城市规划,城市空间布局分为 5 个居住组团(旧城、城北、城西、城南、城东)和 4 个工业组团(开发区北、开发区南组团、石黄-梁徐工业组团、民营产业中心组团),如图 3 所示。

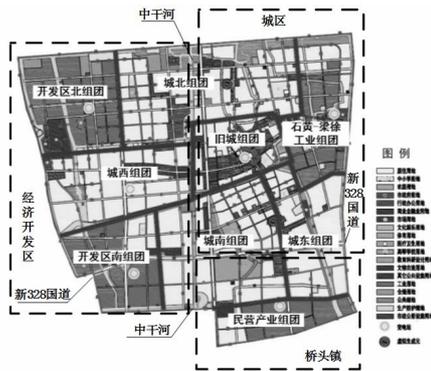


图 3 某市城区空间布局示意图

Fig. 3 Diagram of a city spatial distribution

目前区域内共有 6 座变电站,分别为 110 kV 官庄变(63 MVA), 110 kV 太字变(63+50 MVA), 110 kV 姜堰变(80 MVA), 110 kV 中干河变(50 MVA), 110 kV 城西变(50+40 MVA)和 110 kV 黄村变(50 MVA)。

采用基本 V 图划分配电网供电分区结果如图 4 和表 1 所示。本文采用的基本 V 图考虑了变电站容量因素,因此各分区变电站的负载率均在合理范围之内,且变电站基本处于分区中心位置。但因为未

考虑地理障碍及行政归属地影响,所以分区结果存在跨越大河(中干河)、交通快速路(新 328 国道,同时为景观道路)、及跨行政区域、跨功能组团的现象。

图 5 和表 2 是基于自适应 V 图(无虚拟元)配网分区的结果。显而易见,与基本 V 图相比,自适应 V 图可以很好地处理地理障碍和行政归属地与配网分区的关系。图 6 以分区 6 为例说明了自适应 V 图生成元的扩散过程,具体参数如表 3 所示(因篇幅所限本文仅列出了前 2 步的数据)。



图 4 基于基本 V 图某市城区供电分区

Fig. 4 Power supply partition based on basic Voronoi diagram

表 1 基于基本 V 图的分区结果

Table 1 Results of partitions based on the basic V diagram

分区	面积/ km ²	供电半 径/km	负荷/ MW	变电容 量/MVA	负载 率/%	归属地
1	8.9	1.68	47.28	90	53	开发区
2	8.1	1.67	20.6	50	41	开发区、 城区
3	6.4	1.43	28.88	50	58	开发区、 城区
4	7.9	1.55	40.82	80	51	开发区、 城区
5	7.1	1.5	36.75	63	58	城区
6	14.21	2.4	54.09	113	48	城区、桥头、 开发区

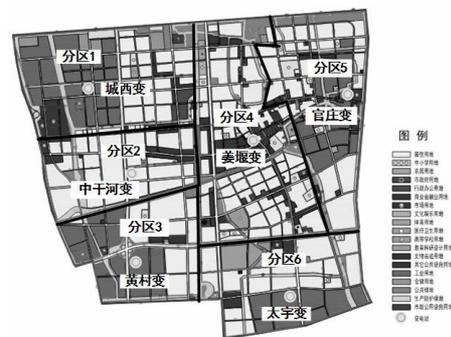


图 5 基于自适应 V 图(无虚拟元)某市城区供电分区

Fig. 5 Power supply partition based on adaptive weighted Voronoi diagram without virtual generator

表 2 基于自适应 V 图(无虚拟元)的分区结果

Table 2 Results of partitions based on the adaptive weighted V diagram without virtual generator

分区	面积/ km ²	供电半 径/km	负荷/ MW	变电容量/ MVA	负载 率/%	归属地
1	9.85	1.7	56.76	90	63	开发区
2	6.61	1.4	20.1	50	40	开发区
3	6.77	1.46	28.46	50	57	开发区
4	11.14	1.82	44.1	80	55	城区
5	10.73	1.78	41.4	63	66	城区
6	7.51	1.58	37.6	113	33	桥头

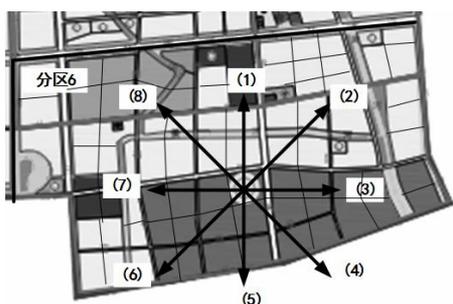


图 6 分区 6 自适应 V 图扩散过程示意

Fig. 6 Expansion process of partition 6 based on the adaptive weighted V diagram

表 3 分区 6 生成元扩散过程参数

Table 3 Expansion process parameters of partition 6

扩散 步骤	扩散 方向	r_{Mi}	r_{Li}	r_{Di}	r_{Bi}	r_{Pi}	w_i
1	(1)	1.075	0.995	0.885	0.85	1	0.961
	(2)	1.075	0.995	0.83	0.7	1	0.92
	(3)	0.956	0.995	0.885	0.7	1	0.9072
	(4)	0.956	0.995	0.83	0.7	1	0.8962
	(5)	0.956	0.995	0.885	1	1	0.9672
	(6)	0.956	0.995	0.83	1	1	0.9562
	(7)	0.956	0.995	0.885	1	1	0.9672
	(8)	1.075	0.995	0.83	0.85	1	0.95
2	(1)	1.075	0.969	0.732	0.6	1	0.8752
	(2)	1.075	0.969	0.561	0.6	1	0.841
	(3)	0.956	0.969	0.74	1	1	0.933
	(4)	0.956	0.969	0.516	1	1	0.8882
	(5)	0.956	0.969	0.748	0.9	1	0.9146
	(6)	0.956	0.969	0.343	0.9	1	0.8336
	(7)	0.956	0.969	0.7	0.9	1	0.905
	(8)	1.075	0.969	0.423	0.6	1	0.8134

但从表 2 也可以看出, 无虚拟元自适应 V 图可能会出现个别分区面积偏大和个别变电站负载率偏高或偏低的情况。解决该问题的方法有两种: (1) 减小式(3)中 r_{Pi} 归属地系数的权重 e , 可能又会带来跨区供电的问题; (2) 引入虚拟元。考虑 110 kV 姜堰变位于老城区增容扩建困难, 而 110 kV 太宇变容量较充裕, 为避免大量 10 kV 线路跨越主干道景观道和跨区域供电, 规划在分区 4 建设开关站, 即虚拟元 1(50 MVA), 其容量来自 110 kV 太宇变, 如图 7 所示。远景年, 根据负荷增长情况, 可以考虑将该开关站扩建为变电站。虚拟元 2 主要是考虑城北组团为新建旅游开发区, 未来负荷增长潜力较大, 而 110 kV 姜堰变供电压力较大, 且供电距离偏大, 建议增设变电站, 现状容量暂由 110 kV 姜堰变提供。基于含虚拟元的自适应 V 图配网分区结果如图 7 和表 4 所示, 有效解决了供电面积、变电容量和归属地之间的矛盾。



图 7 基于自适应 V 图(含虚拟元)某市城区供电分区

Fig. 7 Power supply partition based on adaptive weighted Voronoi diagram with virtual generator

表 4 基于自适应 V 图(含虚拟元)的分区结果

Table 4 Results of partitions based on the adaptive weighted V diagram with virtual generator

分 区	面积/ km ²	供电半 径/km	负荷/ MW	变电容量/ MVA	负载 率/%	归属地
1	7.26	1.55	45.84	90	51	开发区
2	6.61	1.4	20.1	50	40	开发区
3	6.77	1.46	28.46	50	57	开发区
4	6.22	1.45	23.78	50	48	城区
5	5.31	1.31	24.5	40	61	城区
6	6.75	1.58	28.6	63	45	城区
7	7.51	1.63	37.6	63	60	桥头
8	6.18	1.4	19.54	40	49	城区、 开发区

5 结论

(1) 基于自适应权重 V 图的配电网分区方法综合考虑了负荷密度、主变负载率、供电半径、地理屏障和归属地等因素, 可以根据负荷分布的实际情况灵活调整各个方向上的扩散速度, 不仅保证了各分区变电站负载率、供电半径均在合理范围之内, 同时避免了跨越大江大河、主干道, 及跨区域供电的情况, 使得分区结果更贴近实际需求、方便运行管理。

(2) 结合城市发展规划, 根据区域功能定位情况及未来负荷增长趋势, 在恰当的位置引入虚拟元, 使得配电网分区与城市规划衔接的更好, 有利于配电网从现状网架向目标网架的过渡, 实现配网的可持续发展。

参考文献

[1] 肖峻, 高海霞. 城市中压配电网评估方法与实例研究[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 77-81.
XIAO Jun, GAO Haixia. Evaluation method and case study of urban medium voltage distribution network[J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 77-81.

[2] 肖峻, 崔艳妍, 王建民, 等. 配电网规划的综合评价指标体系与方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15): 36-40.
XIAO Jun, CUI Yanyan, WANG Jianmin, et al. A hierarchical performance assessment method on the distribution network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 36-40.

[3] 李智宇, 陈建福. 基于优化分区的配电网规划研究及实践[J]. 广西电力, 2006(4): 1-4.
LI Zhiyu, CHEN Jianfu. Study and practice about distribution network planning based on optimal partitioning[J]. Guangxi Electric Power, 2006(4): 1-4.

[4] 刘念, 马丽. 计及抗灾能力和地区特点的配电网规划方案综合评估[J]. 电网技术, 2012, 30(5): 219-225.
LIU Nian, MA Li. Synthetical assessment on distribution network planning scheme considering anti-disaster ability and regional characteristics[J]. Power System Technology, 2012, 30(5): 219-225.

[5] 宋蒙, 刘健, 刘巩权. 基于优化分区的城市配电网架规划[J]. 继电器, 2005, 33(23): 31-35.
SONG Meng, LIU Jian, LIU Gongquan. Urban distribution network planning based on optimal partitioning[J]. Relay, 2005, 33(23): 31-35.

[6] 杨丽徙, 王金凤, 王家耀. 基于 Voronoi 图的配电变压器定位和供电区域的[J]. 测绘通报, 2004(5): 33-35.

YANG Lixi, WANG Jinfeng, WANG Jiayao. Locating of distribution transformers and power supply area plotting based on Voronoi diagrams[J]. Journal of Mapping, 2004(5): 33-35.

[7] 张新昌, 张项安, 刘星. 基于广义节点的配电网区域控制划分[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 122-127.
ZHANG Xinchang, ZHANG Xiangan, LIU Xing. Partition operation on distribution network based on theory of generalized node[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 122-127.

[8] 张彼德, 刘代伟, 周江平, 等. 基于图论及联系数的复杂配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 74-79, 155.
ZHANG Bide, LIU Daiwei, ZHOU Jiangping, et al. Reliability evaluation of complex distribution networks based on graph theory and connection number[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 74-79, 155.

[9] TEMRAZ H K, SALAMA M M A. A planning model for siting, sizing and timing of distribution substations and defining the associated service area[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 62(2): 145-151.

[10] YU Yixin, HUANG Chunhua, WANG Chengshan, et al. Optimal planning of distribution substation locations and sizes-model and algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1996, 18(6): 353-357.

[11] 黄伟, 庞琳, 曹彬, 等. 基于分区解耦的配电网状态估计的分布式并行计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 45-51.
HUANG Wei, PANG Lin, CAO Bin, et al. Parallel and distributed computing for an area-decoupled state estimation method for distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 45-51.

收稿日期: 2014-12-03; 修回日期: 2015-03-23

作者简介:

唐小波(1977-), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电网规划、智能电网、分布式发电等; E-mail: xiaobotang@126.com

刘 笠(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网规划、电动汽车; E-mail: ll199097@126.com

张 娟(1980-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为城市规划、旅游规划. E-mail: zhangjuan929@163.com

(编辑 姜新丽)