

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220054

改进引力-斥力算法在配电网单线图自动生成中的应用研究

唐广瑜, 金鑫琨

(国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610000)

摘要: 为了解决现有配电网单线图自动生成后需要大量人工调整才能满足实际需要的问题, 基于配电网单线图自动生成系统, 提出了一种结合改进引力-斥力算法和地理坐标信息的单线图生成方法。采用分块法对布局进行降维, 并结合地理坐标信息进一步优化引力-斥力算法。根据地理信息确定主干线, 自适应调节节点间自然连接长度, 通过父节点与子节点之间的关系限制节点的移动方向, 完成配电网馈线单线图的自动生成。通过仿真与优化前结果进行对比分析, 验证了该方法的可行性。结果表明, 与优化前相比, 该方法能生成线长均匀、信息丰富、清晰易读的配电网馈线单线图, 满足电网企业对单线图自动成图方法的实时性需求。

关键词: 配电网; 馈线单线图; 引力-斥力算法; 地理坐标信息; 自动生成

Research on application of improved gravity-repulsion algorithm in automatic generation of distribution network one-line diagram

TANG Guangyu, JIN Xinkun

(Chengdu Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610000, China)

Abstract: It is to solve the problem that a large number of manual adjustments are required to meet the actual needs after the automatic generation of the existing one-line diagrams of the distribution network. Based on the automatic generation system of the one-line diagrams of the distribution network, a one-line diagram generation method combining an improved gravitation-repulsion algorithm and geographic coordinate information is proposed. The block method is used to reduce the dimensions of the layout, and the gravitation-repulsion algorithm is further optimized in combination with geographic coordinate information. This paper determines the main line based on geographic information, adaptively adjusts the length of the natural connection between nodes, and limits the movement direction of the node through the relationship between the parent node and the child node, and completes the automatic generation of the feeder single-line diagram of the distribution network. The feasibility of the method is verified by comparing the simulation and the results before optimization. The results show that after optimization, this method can generate a distribution network feeder single-line diagram with uniform line length and rich information. It is clear and easy to read, and meets the real-time requirements of power grid enterprises for the single-line diagram automatic generation method.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGSJ2000JXJS0229).

Key words: distribution network; single-line diagram of feeder; gravity-repulsion algorithm; geographic coordinate information; automatic generation

0 引言

随着电网发展模式的转变, 我国正在大力发展以“特高压电网、坚强智能电网、分布式发电”为骨干的能源互联网^[1]。大规模电网互联已成为我国

的发展趋势。大量分布式电源的接入, 转变了配电网的供电方式^[2]。配电网单线图提供了电网运行中设备状态的直观展示, 工作人员可以通过单线图管理、监控和分析电力系统, 但人工绘制工作量巨大。因此, 对单线图自动成图方法进行研究具有一定的实际意义。

目前, 国内外众多学者对配电网单线图的自动

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGSJ2000JXJS0229)

成图方法进行了研究, 取得了一些优秀的成果, 主要包括图论知识法^[3]、启发式算法^[4]、计算几何法^[5]等。文献[6]提出了一种将大数据技术和机器学习技术相结合的单线图自动成图方法。结果表明, 相比于传统方法, 所提方法成图更加美观, 层次更加分明。文献[7]提出了一种主干/分支线模型用于单线图自动成图。结果表明, 该方法生成的单线图可以满足运维人员的要求。文献[8]将 GIS 和 SVG 相结合用于单线图自动成图。结果表明, 该方法可以显示低压电网单线图, 包括箱内设备的连接状态、低压电网的连接形式及其地理分布信息, 便于运维人员制定科学合理的运维路线。文献[9]提出了一种基于网格化的配电网自动成图方法。结果表明, 该方法作为支持电网协调运行的重要技术工具, 更易于实现配电网的自动成图。虽然上述研究为自动成图提供了很好的参考。但是, 上述单线图自动生成方法存在布线复杂、效率低、重叠交叉等问题, 需要进一步提高适应性。

在此基础上, 本文提出了一种将引力-斥力算法和地理坐标信息相结合的配电网单线图自动成图方法, 采用分块法对布局进行降维, 并结合地理坐标信息进一步优化引力-斥力算法。通过仿真验证了该方法的有效性。

1 配电网单线图自动生成系统概述

配电网单线图提供了电网运行中设备状态的直观展示, 工作人员可以通过单线图管理、监控和分析电力系统^[10]。配电网单线图自动生成系统结构如图 1 所示。核心模块包括网络拓扑搜索、馈线自动生成模块和基础潮流计算模块等。

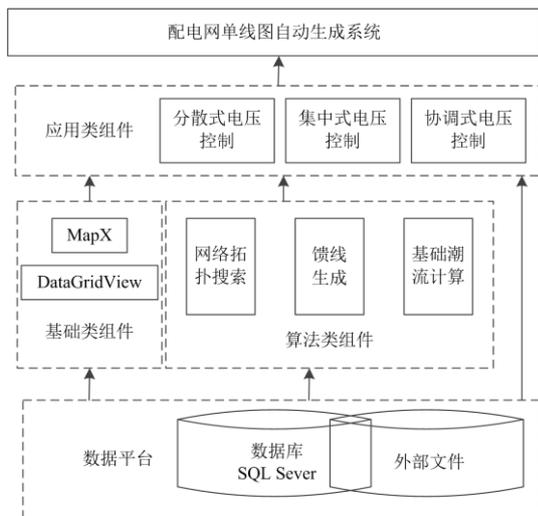


图 1 系统结构

Fig. 1 System structure

2 单线图自动生成方法

2.1 图形分块

配电网单线图采用分块法对布局进行降维, 有效地减少算法的计算时间。合理选择主干线并固定后, 应按下列规则进行分块^[11]。从首节点开始, 遍历后续主干线节点, 统计所有节点(包括分支)的数量。当节点总数达到设定值 Z 时, 选择相应的主干节点作为末端节点。此时, 首末端节点作为一个块, 块中的节点总数通常大于或等于 Z ^[12]。当上述块操作完成时, 剩余节点作为一个块。因此, 在图形分块时, 最多可以有一个块节点数小于 Z 。

2.2 基本引力-斥力算法

在引力算法中, 粒子通过引力相互吸引, 并朝一个方向移动^[13]。为了增加粒子运动的多样性, 引入斥力可以在适当的时间改变粒子的受力方向, 使粒子能够探索更多的未知区域, 加强全局搜索^[14]。

引力-斥力算法的基本思想是: 考虑到所有节点都有质量, 受引力和斥力共同作用的影响, 会出现偏离情况^[15]。通过迭代偏移量逐渐降低, 最后, 所有节点上的力趋于稳定, 即达到终止条件, 结束。

1) 引力计算

两个相连的节点之间存在引力关系。如果节点之间的实际距离小于 L , 则引力为零。如果节点之间的实际距离大于 L , 引力与(实际距离 - L)成正比。计算如式(1)所示^[16]。

$$|T_{il}| = \begin{cases} 0, & d_{il} < L \\ k_1(d_{il} - L), & d_{il} > L \end{cases} \quad (1)$$

式中: d_{il} 为节点 i 到节点 l 的实际距离; L 为节点间的自然长度; k_1 为比例稀疏, 它的值越高, 布局越密集。

2) 斥力计算

任何节点之间都存在斥力。斥力与节点的质量成正比, 与实际距离平方成反比。当两个节点重叠时, 会产生较大的固定斥力。此时, 方向是随机的。节点之间的斥力通过式(2)进行计算^[17]。

$$|R_{is}| = \begin{cases} f, & d_{is} = 0 \\ \frac{g \times M_i \times M_s}{d_{is}^2}, & d_{is} \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: f 为节点重合时设置的斥力值; M_i 和 M_s 分别为节点 i 和节点 s 的质量; d_{is} 为节点 i 到节点 s 的实际距离; g 为常量, 它的值越大, 布局越稀疏。

3) 偏移量计算

偏移量计算如式(3)一式(5)所示^[18]。

$$|\Delta_{il}| = \sqrt{(x_i - x_l)^2 + (y_i - y_l)^2} \quad (3)$$

$$\Delta_{il} = p((x_l - x_i), (y_l - y_i)) \quad (4)$$

$$d_i = \sum_{l=1}^n \left(\frac{\Delta_{il}}{|\Delta_{il}|} \times F_{il} \right) / M_i \quad (5)$$

式中: n 为节点 i 偏移的作用节点数; $|\Delta_{il}|$ 为节点 i 到节点 l 的几何距离; d_i 为节点 i 的偏移量; F_{il} 为节点 i 对节点 l 的作用力; p 为设定值, 引力 $p=1$, 斥力 $p=-1$ 。

2.3 考虑地理坐标信息的优化算法

考虑到地理坐标信息, 算法改进如下。

1) 选择主干线并确定节点质量

根据节点的地理坐标查找主干线。在文中的图优化过程中, 主干节点的数量决定了节点所需的空間^[20]。

2) 虚拟节点的改进

虚拟节点是为了块之间的连接而设置, 确保首末端节点与前后块的连接节点移动方向和距离。由于主干节点之间的距离也随着图的缩小而减小, 因此虚拟节点设置仅对相邻块主干节点进行考虑, 并且仅考虑前一块的最后一个主节点和下一块的第一个主节点^[15], 如图 2 所示。

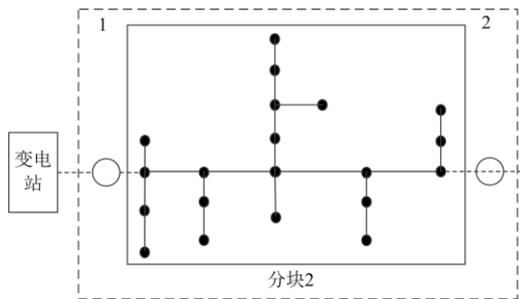


图 2 虚拟节点设置

Fig. 2 Virtual node settings

3) 自然长度的自适应

由式(1)可知, 引力与(实际距离- L)成正比。通过 L 的调整可以调整引力大小, 自适应规则如下: 假设存在主节点 A 连接 n 个子节点, B 为 A 的相邻主节点, L 的值如式(6)所示^[21]。

$$L = \frac{w_1(Z_1 + Z_2 + L + Z_i + L + Z_n)}{n} + cw_2 \quad (6)$$

式中: w_1 、 w_2 分别为主节点 A 与子节点和主节点 B 之间的连接权重; Z_i 为子节点 i 到主节点 A 的连接长度; c 为主节点 A 和 B 的连接长度; n 为主节点 A 中子节点数。

4) 节点移动方向的改进

引力-斥力算法模型中节点的运动通常基于力

的方向和大小, 节点之间的相对位置是固定的^[22]。在获得节点的所有合力后, 这些力将分解到固定方向上, 并仅在该方向上移动。

通过式(3)~式(5)可以看出, 在该迭代循环中需要移动的节点方向和大小。在计算引力时, 考虑两个节点之间的直接连接关系, 引力作用下的移动方向是父节点的方向^[23]。在计算斥力时, 考虑所有节点之间的斥力特性。在这种情况下, 假设节点 A 是节点 B 的父节点, 此时在斥力作用下, 节点 B 的移动距离, 通过式(7)和式(8)计算^[24]。

$$\cos \theta_{ab} = \frac{x_a x_b + y_a y_b}{\sqrt{x_a^2 + y_a^2} \sqrt{x_b^2 + y_b^2}} \quad (7)$$

$$d_{Ri} = \sum_{i=1}^n (\cos \theta_{ab} \times R_{ab}) / M_i \quad (8)$$

式中: θ_{ab} 为力的方向与运动方向的夹角; (x_a, y_a) 和 (x_b, y_b) 分别为父子节点间和节点 B 受力方向向量(横, 纵)坐标; R_{ab} 为子节点 B 的受斥力大小; d_{Ri} 为子节点 B 的移动距离。

改进后的算法步骤如下:

步骤(1) 初始化, 读取节点地理信息并设置算法参数。

步骤(2) 找到主线并对图形进行分块。

步骤(3) 遍历分块并在块中设置虚拟点^[25]。

步骤(4) 计算节点引力所需的自然长度。

步骤(5) 应用改进算法对节点进行优化。

步骤(6) 根据公式计算引力和偏移量。

步骤(7) 根据公式计算排斥和偏移量。

步骤(8) 对限制方向上节点偏移量进行计算。

步骤(9) 节点移动, 更新坐标和初始化偏移量。

步骤(10) 判断是否满足结束条件(最大迭代次数或合力为 0), 满足执行下一步, 不满足转到步骤(5)^[26]。

步骤(11) 判断是否遍历所有分块, 如果已遍历所有块, 则执行下一步, 否则转到步骤(3)^[27]。

步骤(12) 输出最终成图。

改进算法的流程图如图 3 所示。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真参数

为了验证该方法的准确性, 以某地区 10 kV 馈线单线图为研究对象, 仿真设备是联想 PC, 操作系统是 Windows 1064 位旗舰, Intel i5 2450m CPU, 2.5 GHz 频率和 8 GB 内存^[28]。自动绘图系统是用 C#语言实现, 基于 Visual Studio 2012 平台^[29]。

表 1 为算法参数。如果节点数量未达到 100,

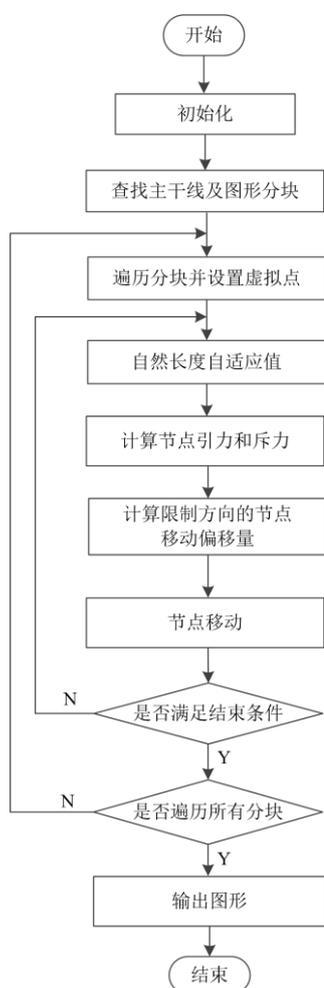


图3 改进算法流程

Fig. 3 Improved algorithm flow

表1 算法参数

Table 1 Algorithm parameters

参数	数值
节点重合斥力 f	120
常数 g	100 000
分块数 Z	60
主节点与子节点连线权重 w_1	0.8
主节点间连线权重 w_2	0.2

则总迭代次数为 150。如果节点数大于 100，则将迭代次数设置为节点数加 30。

设置 w_1 和 w_2 数值的目的是通过两个主要节点及其各自的连接关系，得到合适的自然长度 L ，从而改变不同节点自动布局的 L 值^[30]。

3.2 仿真分析

所提方法将改进引力-斥力算法和地理坐标信息相结合用于单线图自动生成。主要解决了可视化过程中由于局部视图模糊和模型结构不合理造成的

图形视觉效果差等问题。为此，以某地区 10 kV 馈线单线图为研究对象，自动生成 59 节点配电网馈线单线图。图 4 为优化前后 59 节点配电网馈线单线图的自动布局。

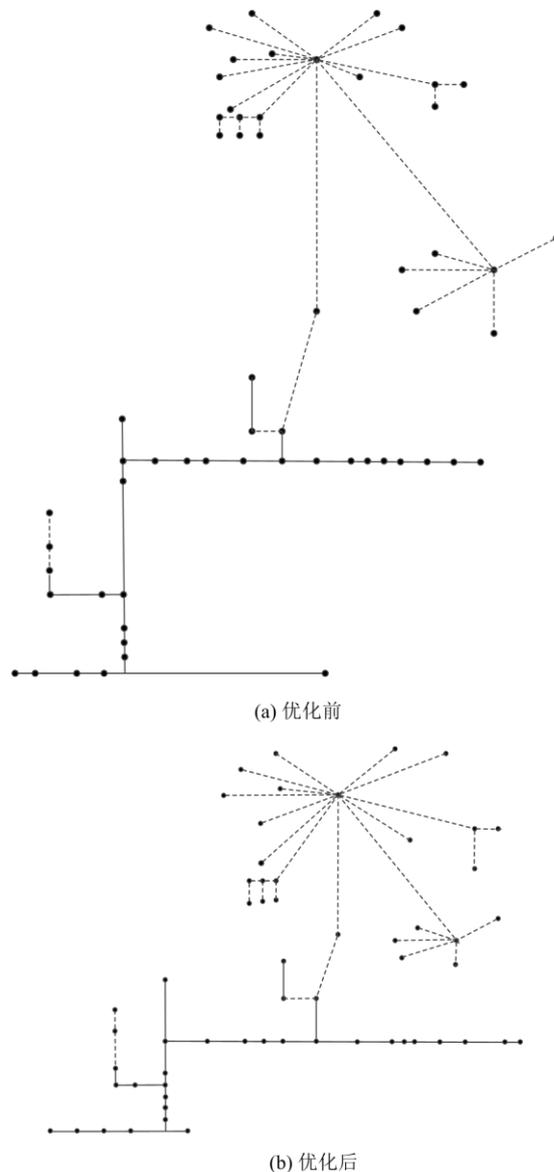
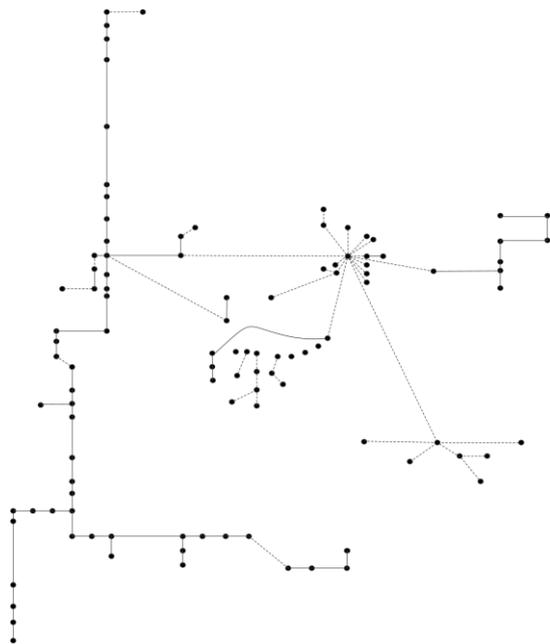


图4 59节点优化前后对比图

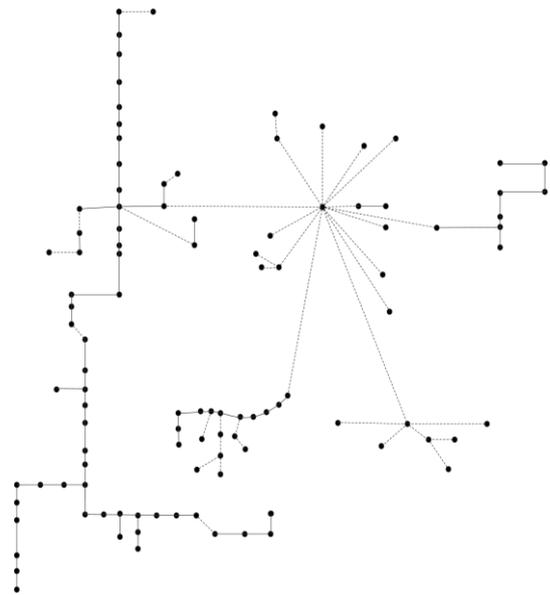
Fig. 4 Comparison of 59 nodes before and after optimization

从图 4 可以看出，优化前图节点之间的连接长度相差很大，视觉效果也不理想。上方 1 个主节点与 12 个子节点的连接位置非常密集，难以区分。经过优化后，节点之间的连接长度相对均匀，保持了节点之间的相对地理位置，线路长度自适应变化，整体画面效果优于优化前的布局。优化后能够较为清晰地展示密集处的子节点，满足运维人员的使用要求。图 5 为优化前后 105 节点配电网馈线单线图

的自动布局。



(a) 优化前



(b) 优化后

图 5 105 节点优化前后对比图

Fig. 5 Comparison before and after 105 nodes optimization

从图 5 可以看出，优化前图的纵向长度较长。在图 5 的展示中，空白处较多，且节点中心过于密集。优化后，横向、纵向节点分布都相对均匀，特别是中心位置的 1 个主节点与 13 个子节点进行连接。虽然中心位置分布了较多节点，但整体效果比优化前要好。密集区域更清晰，节点关系明确，整体图形显示更加清晰直观。

为了验证算法的有效性，对改进前后的成图时间进行了比较分析。表 2 为改进前后的成图时间。

表 2 改进前后时间对比

Table 2 Comparison of time before and after improvement

算法	成图时间/s	
	引力-斥力算法	文中算法
59 节点	0.37	0.23
105 节点	0.68	0.40

在节点数量较少的情况下，59 节点配电网不符合分块标准，不进行分块处理。成图时间从 0.37 s 降低到 0.23 s。对于多节点情况，在保证效果的前提下，将 105 个节点的配电网分为两块，成图时间从 0.68 s 降低到 0.40 s。可以看出，改进后的方法大大降低了成图的运行时间，且图形没有交叉重叠部分。

结果表明，优化后的节点相对地理位置与优化前相比没有变化，成图更加均匀和清晰，运行时间也在一定程度上降低，满足运维人员的需要。

4 结论

本文提出了一种基于改进引力-斥力算法和地理坐标信息的配电网单线图自动生成方法。在考虑地理坐标信息的前提下，进一步优化了引力-斥力算法。结果表明，与优化前相比，该方法生成的馈线单线图具有更均匀的长度、更清晰的线条和更短的运行时间，但也存在一些问题和不足，如节点之间的连线没有优化。后续可以结合一些算法来提高自动成图方法的性能，不断完善配电网单线图自动成图系统。

参考文献

[1] 孙凯, 张新燕, 周登钰, 等. 含大规模新能源的现代电力系统动态经济调度研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(5): 771-777.
SUN Kai, ZHANG Xinyan, ZHOU Dengyu, et al. The research on dynamic economic dispatch of modern power system containing large scale new energy sources[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(5): 771-777.

[2] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in Hadoop MapReduce[J]. Cybernetics and Information Technologies, 2017, 21(1): 146-163.

[3] 高生凯, 曹炜, 张旭航, 等. 一种改进型配网自适应过流保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 110-119.
GAO Shengkai, CAO Wei, ZHANG Xuhang, et al. A novel adaptive overcurrent protection method for a

- distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(7): 110-119.
- [4] 章坚民, 邱程峰, 王锋华, 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 Fenghua, et al. Single-line diagram of substation centralized distribution network part two initial automatic layout[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(19): 124-131.
- [5] 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 distribution network part one diagram-data model based on generic switching station[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(18): 102-110.
- [6] 何雄坤, 周宏志, 聂辉, 等. 大数据技术在配网单线图自动成图的应用研究[J]. *电力大数据*, 2020, 23(5): 54-63.
HE Xiongkun, ZHOU Hongzhi, NIE Hui, et al. Research on the application of big data technology in automatic graphing of single-line diagram of distribution network[J]. *Power Systems and Big Data*, 2020, 23(5): 54-63.
- [7] 程伟, 彭森, 刘士进, 等. 基于主干线/分支线模型的配网单线图自动生成方法[J]. *计算机系统应用*, 2021, 30(7): 41-49.
CHENG Wei, PENG Sen, LIU Shijin, et al. Automatic generation method of one-line diagram for distribution network based on trunk-branch line model[J]. *Computer Systems & Applications*, 2021, 30(7): 41-49.
- [8] 赵峻, 陈喆, 莫岫, 等. GIS 与 SVG 视域下低压配网单线图的自动化布局算法研究[J]. *计算机应用*, 2021, 40(1): 40-47.
ZHAO Jun, CHEN Zhe, MO Shen, et al. Research on the automatic layout algorithm of the single-line graph of the low-voltage distribution network in the view of GIS and SVG[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2021, 40(1): 40-47.
- [9] 陈兵, 赵肖旭, 施伟成, 等. 配电网网格化自动成图的实现[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(6): 100-105.
CHEN Bing, ZHAO Xiaoxu, SHI Weicheng, et al. Realization of automatic grid generation in distribution network[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(6): 100-105.
- [10] NAHMAN J, SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation[J]. *Electric Power Systems Research*, 2017, 41(12): 151-156.
- [11] 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, 129.
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, 129.
- [12] 郭光华, 杜颖, 范云鹏, 等. 以电为核心的综合能源系统研究综述[J]. *山东电力技术*, 2020, 48(8): 1-7, 24.
GUO Guanghua, DU Ying, FAN Yunpeng, et al. Integrated energy system with electricity as the core overview of systematic research[J]. *Shandong Electric Power*, 2020, 48(8): 1-7, 24.
- [13] PATEL G K, DABHI V K, PRAJAPATI H B. Clustering using a combination of particle swarm optimization and K-means[J]. *Journal of Intelligent Systems*, 2017, 12(3): 457-469.
- [14] 宋国彬. 配电网馈线单线图自动布局的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2018.
SONG Guobin. Research on automatic layout of feeder single line diagram in distribution network[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018.
- [15] CAETANO C E F, LIMA A B, PAULINO J O S, et al. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding[J]. *Electric Power Systems Research*, 2018, 46(5): 159-162.
- [16] HU Jianjiang, FICHTNER M, BARICCO M. Preparation of Li-Mg-N-H hydrogen storage materials for an auxiliary power unit[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(27): 17144-17148.
- [17] JIA Zhiwei, WANG Lijun, ZHANG Jinchuan, et al. High efficiency, low power-consumption DFB quantum cascade lasers without lateral regrowth[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2017, 12(1): 88-95.
- [18] 向珉江, 袁通, 苏善诚, 等. 基于 5G 授时的配网差动保护数据同步方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(8): 8-15.
XIANG Minjiang, YUAN Tong, SU Shancheng, et al. 5G timing base data synchronization scheme for differential protection of distribution networks[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(8): 8-15.
- [19] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网

- 在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.
- DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.
- [20] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联的二次设备运维技术研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 177-184.
- WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of intelligent maintenance system based on internet of things and mobile internet technology[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 177-184.
- [21] 徐小琴, 郑旭, 王思聪, 等. 基于改进遗传退火算法的输配电网协调规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 124-130.
- XU Xiaoqin, ZHENG Xu, WANG Sicong, et al. Coordinated planning method of transmission and distribution network based on an improved genetic annealing algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 124-130.
- [22] 王炜, 刘宏伟, 陈永杰, 等. 基于 LSTM 循环神经网络的风力发电预测[J]. 可再生能源, 2020, 38(9): 1187-1191.
- WANG Wei, LIU Hongwei, CHEN Yongjie, et al. Wind power generation prediction based on LSTM recurrent neural network[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(9): 1187-1191.
- [23] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
- SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/SMES hybrid energy storage systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [24] 张奇峰, 闫红漫, 于文鹏, 等. 基于引力斥力模型的配电网单线图自动生成[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(4): 59-61, 65.
- ZHANG Qifeng, YAN Hongman, YU Wenpeng, et al. Electric distribution network one-line diagram automatic generation based on repulsion-tension model[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(4): 59-61, 65.
- [25] AL-KASHOASH H A A, AMER H M, MIHAYLOVA L, et al. Optimization-based hybrid congestion alleviation for 6LoWPAN networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(6): 2070-2081.
- [26] 刘梦超, 王生铁, 温素芳. 光储微电网并网平滑切换控制策略研究[J]. 可再生能源, 2020, 38(12): 1633-1639.
- LIU Mengchao, WANG Shengtie, WEN Sufang. Research on parallel off grid smooth switching control strategy for optical storage microgrid[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(12): 1633-1639.
- [27] 傅质馨, 张晶晶, 崔晓丹, 等. 储能支撑光伏参与电网一次调频的优化控制策略研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(11): 1530-1540.
- FU Zhixin, ZHANG Jingjing, CUI Xiaodan, et al. Research on optimal control strategy of photovoltaic participating in power grid primary frequency regulation supported by energy storage[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(11): 1530-1540.
- [28] 李凯, 康世威, 闫方, 等. 基于风光火储的多能互补新能源基地规划分析[J]. 山东电力技术, 2020, 47(10): 17-21, 35.
- LI Kai, KANG Shiwei, YAN Fang, et al. Multi energy complementation based on solar thermal storage planning and analysis of new energy base[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(10): 17-21, 35.
- [29] 朱胜杰, 张厚升. 直流微电网双向全桥 DC/DC 变换器控制策略[J]. 山东电力技术, 2020, 47(9): 1-6.
- ZHU Shengjie, ZHANG Housheng. Control strategy of bi-directional full bridge DC/DC converter in DC microgrid[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(9): 1-6.
- [30] 余潇潇, 宋福龙, 周原冰, 等. “新基建”对中国“十四五”电力需求和电网规划的影响分析[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 11-17.
- YU Xiaoxiao, SONG Fulong, ZHOU Yuanbing, et al. Analysis of the impact of "new infrastructure" on China's power demand and power grid planning during the "14th Five-Fear Plan" [J]. Electric Power, 2021, 54(7): 11-17.

收稿日期: 2022-01-12; 修回日期: 2022-02-18

作者简介:

唐广瑜(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: gsodserees@163.com

金鑫琨(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 周金梅)