

DOI: 10.7667/PSPC171395

智能电网调控中心变电站图形数据即插即用技术

张令涛^{1,2}, 赵林^{1,2}, 张亮^{1,2}, 田国辉^{1,2}, 马仲佳^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192)

摘要: 探讨了智能变电站在调度控制中心的即插即用应用场景, 提出并实现了一种智能变电站图形文件在调度控制中心即插即用技术。该技术无需源端维护图形文件, 只需要获取变电站SCD模型数据后, 自动生成变电站主接线图。方法改变了调度端利用人工绘制变电站接线图的传统方式, 通过解析变电站的模型文件, 解析出变电站的拓扑关系, 利用深度优先搜索算法将设备进行分组。然后构建布局的目标函数, 利用全局优化算法逐步寻优的过程中调整布局元件的位置, 最终生成变电站的主接线图。为了节省搜索的时间, 改进了全局优化算法的邻域搜索策略。将所提出的技术应用于某省500 kV变电站主接线图的自动生成, 结果表明此技术能够快速生成主接线图。

关键词: 智能变电站; 即插即用; 主接线图; 自动布局; 模拟退火; 目标函数

Plug and play technology for substation graphics data in smart grid dispatching control system

ZHANG Lingtao^{1,2}, ZHAO Lin^{1,2}, ZHANG Liang^{1,2}, TIAN Guohui^{1,2}, MA Zhongjia^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. Beijing Kedong Electric Power Control System Corporation Limited, Beijing 100192, China)

Abstract: This paper discusses the plug-and-play application scenario of smart substation in dispatching control center, and proposes and realizes a plug-and-play technology of smart substation graphics file in dispatching control center. The technology does not need to maintain the graphics file at the source, only need to obtain substation SCD model, automatically generate substation main wiring diagram. By analyzing the SCD file of the substation, the topology relation of the substation is obtained. The devices are grouped by the depth-first search algorithm in topology relation. Then the objective function of the layout is constructed, and the position of the layout element is adjusted by the global optimization algorithm. Finally, the main wiring diagram of the substation is generated during the iterative optimization process. In order to save the search time, the neighborhood optimization strategy of the global optimization algorithm is improved. The technique of this paper is applied to the automatic generation of the main wiring diagram of 500 kV substation in a province. The results show that this technology can quickly generate the main wiring diagram.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902600); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGJS0000DKJS1700840) "Research and Application of Key Technology for Intelligent Dispatching and Security Early-warning of Large Power Grid".

Key words: smart substation; plug and play; main wiring diagram; automatic layout; simulated annealing; objective function

0 引言

随着智能电网的进一步发展和国家电网公司“三集五大”战略的推进, 调度自动化系统对于运

行控制的一体化、标准化、适应性以及灵活性提出了更高的要求。而目前变电站和调控中心之间信息共享能力、业务协同手段不足, 无法适应智能电网发展和变电站无人值守的业务需求。智能变电站采用的是 IEC 61850 标准^[1], 通过变电站配置表描述文件(Substation Configuration Description, SCD)完整详细地描述变电站的一次设备、二次设备及其关系。而智能电网调度技术支持系统采用的是 IEC

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902600); 国家电网公司科技项目(SGJS0000DKJS1700840)“大电网智能调度与安全预警关键技术研究及应用”

61970 标准^[2], 通过人机平台编辑软件生成符合 IEC 61970-301 标准的图形文件。虽然通过“远程调阅、告警直传”有效提升了主子站信息协同能力, 但是由于主子站间模型不一致, 限制了主子站进一步的业务协同^[3-5]。

智能变电站的“即插即用”指的是调控主站自动识别和接入变电站模型和数据^[6-7], 自动生成点表和设备自动建模, 在不需要任何人员干涉的情况下即可被电网的其他部分以及控制中心所识别, 并进行良好的协调运行。而调度控制中心在获取变电站模型后自动生成变电站主接线图是变电站“即插即用”技术框架中的核心模块, 本文就针对变电站图形数据即插即用技术展开了研究。

对于主子站图形信息的共享技术已经有了较为深入的研究。文献[8-9]提出的主子站一体化图形共享方案均是借助于源端维护的 SVG 图形或 CIM/G 图形文件, 并未实现根据模型自动生成图形的功能, 而且 SVG 没有统一的变电站图元标准, 造成各个厂家生成的 SVG 图形不完全兼容, 调度中心需要针对不同厂家的 SVG 图形进行二次解析和处理^[10-11]; 另外有很多厂家和科研机构一直致力于建立和推行统一的变电站标准或能量管理系统(EMS)标准, 旨在实现模、数、图的无缝对接和共享^[12], 但这需要一个漫长的过程去验证和推行。

关于单线图的自动布局算法主要集中在输电网、配电网单线图的自动生成上, 对于变电站的接线图自动生成研究较少, 文献[13]提出了一种由 CIM 生成主接线图的经验算法, 但需要借助 Oracle Spatial 网络分析功能, 而且并未提出一个整体指标去衡量所成图的布局质量。文献[14]提出了一种基于样式的厂站图自动生成接线图, 通过构建样式库保存不同类型接线图的模板, 然后调用模板生成接线图, 但随着变电站类型的逐步增多, 此方法需要浪费大量人力不断地维护更新样式库。

鉴于此, 本文提出并实现了一种智能变电站图形文件在调度控制中心即插即用的技术, 该技术无需借助源端维护图形文件, 只需要获取变电站 SCD 模型数据后, 自动生成变电站主接线图。方法改变了调度端利用人工绘制变电站接线图的传统方式。

1 拓扑关系解析

变电站的拓扑模型以结构树的形式存在于 SCD 文件内, 相连元件通过连接点进行连接, 通过解析变电站文件, 能够解析出完整的拓扑关系。为了便于绘图, 需要按照一定的准则将变电站的元件

组解析为常用的间隔, 比如二分之三接线、双母出线、单母出线等, 具体的解析分组过程如图 1 所示, 分组搜索完成之后, 根据分组内设备的类型和电压等参数辨识出间隔的类型。

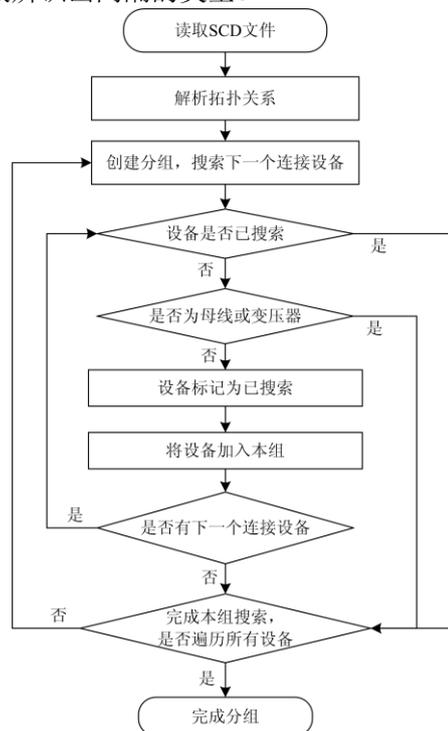


图 1 SCD 文件解析分组流程图

Fig. 1 SCD parsing and grouping flow chart

2 目标函数的构建

变电站主接线图的布局不同于电网潮流图和配用电单线图, 变电站主接线图具有以下特点:

- (1) 按照电压等级分区域绘制;
- (2) 同组的设备均为水平或者垂直放置;
- (3) 连接线均为水平或垂直, 不存在斜线。

按照主接线图的布局特点, 目标函数需要包含布局紧凑度和平均度两项指标, 并且需要附加惩罚条件使得元件的移动符合主接线图的特点, 下面分别介绍目标函数和惩罚条件的建立。

2.1 目标函数

按照变电站主接线图分区域和分组的特点, 综合考虑布局的紧凑度和平均度, 构建了布局优化的目标函数为

$$f = \min(\sum K_1 E_L + \sum K_2 E_R) \quad (1)$$

式中: 第一项为主接线图所有线路的总长度, 线路包括所有元件之间的连线和母线, 在求解的过程中, 此项能够保证接线图逐渐紧凑; 第二部分为布局均匀度指标, 为画布中心点到每个元件中心坐标向量和的模, 均匀分布的布局此项指标应该趋于 0。平

均度和紧凑度为优化的两个目标,属于多目标优化问题,式(1)中的目标函数通过归一化因子将多目标函数转换为单目标函数,其中 K_1 、 K_2 为归一化因子,通过归一化处理,消除指标之间的量纲影响,两项指标处于同一数量级,适合进行综合对比评价。

2.2 组内元件位置约束

按照变电站主接线图分区域和分组的特点,综合考虑布局的紧凑度和平均度,构建了布局优化的目标函数,如下所示:根据主接线图的特性,一组元件在主接线图内需要附加约束条件 g_1 为

$$x_i = x_j, y_i = y_j, \forall i, j \in G \text{ 且 } i \neq j \quad (2)$$

组内元件约束保证元件为水平或竖直对齐排列,也能够保证尽量少地出现连接点。

2.3 组内接线分布约束

每一组元件需满足组内元件均匀分布,通过添加组内连线的标准差为 0 确保元件分布均匀,约束条件 g_2 为

$$\begin{cases} \sum_{L_i \in G_i} \sqrt{\frac{(L_i - \bar{L})^2}{n-1}} = 0 \\ L_i \geq L_{obj} \end{cases} \quad (3)$$

式中: L_i 表示组内的连线; L 为组内连线的均值,双母线组内元件可以通过双母线之间的距离与连线的数组确定,单母线可以通过连接在该母线上元件最多的组的长度和本组内连线的数目得到;另外 L_{obj} 为元件连线的最小设置值,考虑元件需要显示相关状态信息,因此设置连线的长度不得小于设定好的最小值,以便于状态信息能够完整清晰地显示,可以根据需要调整最小值。

2.4 组间距离约束

两组元件之间的距离需要考虑为出线 and 连线预留空间,又不能过大影响布局的均匀度。因此设置组间的最小距离约束条件 g_3 为

$$G_i \geq G_{obj} \quad (4)$$

组间的距离大于设定的最小值 G_{obj} ,而目标函数中的母线最短的优化目标又能够避免多组设备布局过于稀疏。因此,主接线图自动布局的完整目标函数为

$$\begin{cases} f = \min(\sum E_L + \sum E_R) \\ \text{st. } g_1, g_2, g_3 \end{cases} \quad (5)$$

将目标函数的惩罚条件纳入优化目标,将有约束条件的非线性优化布局问题转为无约束的非线性优化布局问题,形成的最终优化目标函数为

$$E_{\min} = \min(\lambda_1 \cdot f + \lambda_2 \cdot g_1 + \lambda_3 \cdot g_2 + \lambda_4 \cdot g_3) \quad (6)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 为权重系数,可以根据侧重点的不同调整权重系数的取值。上述布局目标函数的决策变量为

$$\begin{cases} V_i(x, y), V_i \text{ 为同一电压等级区} \\ G_j(x, y_0), \text{ 同一母线元件组垂直摆放} \\ \text{或 } G_j(x_0, y), \text{ 同一母线元件组水平摆放} \\ E_k(x, y_0), \text{ 当元件组内垂直摆放时} \\ \text{或 } E_k(x_0, y), \text{ 当元件组内水平摆放时} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $V(x, y)$ 为相同电压等级元件组成的模块的坐标,一般选用左上角的坐标值; $G(x, y_0)$ 为链接到母线上的一组设备的坐标,一般也取左上角的坐标;坐标 y_0 表示连接到相同母线的多组设备的 y 坐标相等;同理, x_0 表示多组设备的 x 值相等; $E(x, y)$ 为元件的坐标,其中 x_0 表示相同组的元件 x 值相等, y_0 表示同组设备的 y 值相等。

从目标函数可以看出,通过添加约束条件主接线图的布局问题为有约束条件的非线性布局优化问题,变量的数目随着接线图中元件的增长而增长,找不到一种确切的多项式时间的解决方法,因此本文采用模拟退火方法求解出有约束非线性规划问题的全局最优解。

3 模拟退火算法解决布局优化问题

选用模拟退火算法解决变电站主接线图自动布局问题是因为模拟退火算法在求解复杂的非线性优化问题已经得到较为成熟的应用^[15],能够避免陷入局部极小值的陷阱。理论上已经证明,只要模拟过程足够充分,这种算法就可以收敛到全局最优解。但其缺点是收敛速度慢,执行时间较长。本文针对其缺点提出了改进措施。

3.1 算法步骤

模拟退火算法的求解过程是通过将目标函数模拟为冷却目标,将温度 T 作为控制参数,设定冷却进度表,然后从初始解开始,根据邻域的产生规则产生一个新解,采用 Metropolis 接受准则判断新解是否接受,算法持续进行“产生新解—计算目标函数差—判断是否接受新解—接受或舍弃”的迭代过程,直至满足迭代终止条件。具体的步骤如下:

(1) 给定冷却进度表和初始解,其中冷却进度表参数包括:初始温度 T_0 、衰减系数、终止条件以及 Markov 链长度 L_k 。

(2) 参数 $T=T(i)$ 时,按照如下过程做 L_k 次邻域搜索。

1) 根据当前解 X_k 产生一偏移量,得到当前解邻域的新的试探点 X'_k 为

$$X'_k = X_k + R_k \quad (8)$$

2) 计算试探点与当前点的转移概率 P 。

$$P = \begin{cases} 1, & f(X'_k) < f(X_k) \\ \exp\left(\frac{f(X_k) - f(X'_k)}{T_k}\right), & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

模拟退火算法为了能够避免陷入局部最小, 以随机概率的方式确定是否接受新状态, 当 $P > \text{random}[0,1]$ 时, 则接受新解, 如果不满足则当前解不变。

3) 当终止条件不满足或搜索次数小于 Markov 链长度时, 返回步骤(1), 否则进入步骤(3)。

(3) 如果迭代条件满足终止条件, 则算法结束, 当前解为全局最优解, 否则继续步骤(4)。

(4) 根据给定的温度衰减系数产生新的温度控制参数 T_{k+1} , 转入步骤(2), 进入下一个温度点的寻优步骤。

利用模拟退火算法的求优过程能够有效避免陷入局部最小的可能性, 但是其收敛速度较慢, 随着布局元件的增长, 迭代的次数和用时也将急剧增长, 因此, 本文对模拟退火算法进行了改进。

3.2 算法改进

模拟退火算法在邻域的搜索过程中需要覆盖全部可行解空间, 针对电网主接线图布局问题, 随着元件的增长, 搜索空间会急剧增长, 会导致模拟退火算法的搜索时间过长。根据目标函数的决策变量(式(7)), 可以将退火算法的邻域搜索进行改进, 避免无用的搜索, 邻域更新公式为

$$\begin{cases} G_{j+1}(x, y_0) = G_j(x, y_0) + G'_n \\ E_{k+1}(x, y_0) = E_j(x, y_0) + E'_n \end{cases} \quad (10)$$

式中, 扰动输入值为

$$\begin{cases} G'_n = 0.01 \cdot \text{random} \cdot (V_i(x_{\max} - x_{\min}), 0) \\ E'_n = 0.01 \cdot \text{random} \cdot (G_i(x_{\max} - x_{\min}), 0) \end{cases} \quad (11)$$

从式(11)中可以看出, 元件的搜索范围限定在组内移动, 而元件组的位置移动限定在相同电压等级内, 具体的移动示意图如图 2 所示。

V_i 为电压模块, 可以垂直和水平移动, 电压模块内包含三组常用间隔 G , 间隔可以沿着母线方向双向移动, 组内设备 E 可以沿着间隔设备的排列方向双向移动。通过以上的邻域搜索方法可以有效地缩短 Markov 链的长度, 减少了寻优的时间。

3.3 设定初始布局

合理的初始布局可以适当地缩短自动布局的用时, 提高自动成图的效率。根据变电站主接线图的布局特点, 设定主接线图的初始布局具备以下特点:

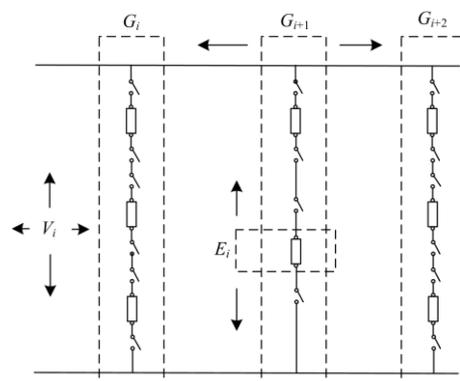


图 2 元件布局邻域搜索示意图

Fig. 2 Component layout neighborhood search diagram

(1) 根据电压等级将绘图区分为不同的区域, 初始布局中各区域不重合;

(2) 高电压等级的母线一般绘制在图上半部分, 低电压等级的母线绘制在图的下半部分;

(3) 变压器绘制在多电压区域的中间位置;

(4) 根据主接线图的类型参考常用的布局先验知识, 比如双母分段的布局特点, 双母分段带旁母的布局特点等。

设定初始布局的目的是为了减少迭代次数, 缩短寻优用时。可以根据主接线图的电压等级、母线类型等特点设定常用初始布局模板库。

3.4 布局优化流程

利用改进的模拟退火算法进行变电站主线图自动布局的流程如图 3 所示。在读取变电站解析结果

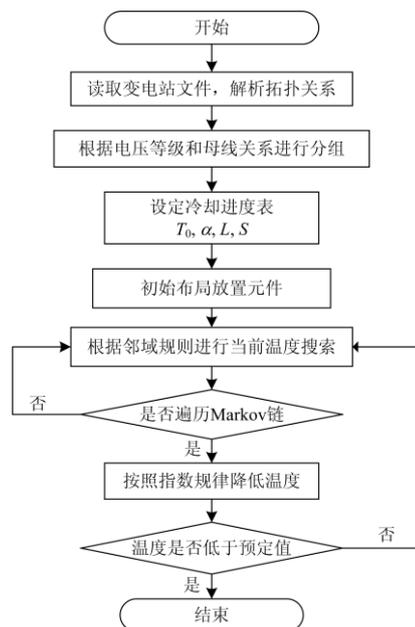


图 3 布局的流程

Fig. 3 Flow chart of auto layout

之后, 设定冷却进度表, 其中包括初始温度 T_0 、温度衰减系数 α 、Markov 链长度 L 和终止条件 S , 然后利用温度控制整个布局寻优过程, 通过温度的逐步下降搜索元件布局的所有可行解空间, 逐步达到最优布局接线图。

其中的降温方法采用指数降温, 如式(12)。

$$T_i = \alpha \cdot T_{i-1}, i \geq 1 \quad (12)$$

式中, $\alpha \in (0,1)$, α 越小, 降温速度越快, 但是容易陷入局部极小值, α 越大, 解空间越能够得到充分的搜索, 但是会导致搜索时间加长。

4 算法验证

采用本文提出的算法对某省 500 kV 变电站的主接线图进行了自动布局, 该变电站的元件共有 211 个, 连接线共有 313 条, 变电站包含 3 个电压

等级 500 kV、220 kV 和 35 kV。根据实际布局的效果, 间隔间最小距离 G_{obj} 为 30, 元件之间的最小距离 L_{obj} 为 10。算法的冷却进度表如表 1 所示。

表 1 冷却进度表

Table 1 Cooling schedule

T_0	α	L	S
10 000	0.95	100	1

如表 1 所示, 为了能够取得全局最小值, 将初始温度定为 10 000, 温度衰减系数为 0.95, 采用指数方式进行降温, 每个温度搜索 Markov 链长为 100, 当连续三个解没有变化时, 此温度的搜索也将终止。搜索的终止温度为 1。通过本文算法计算的布局结果如图 4 所示, 另外利用本文算法自动生成的包含 220 kV 和 66 kV 两个电压等级的主接线图见图 5。

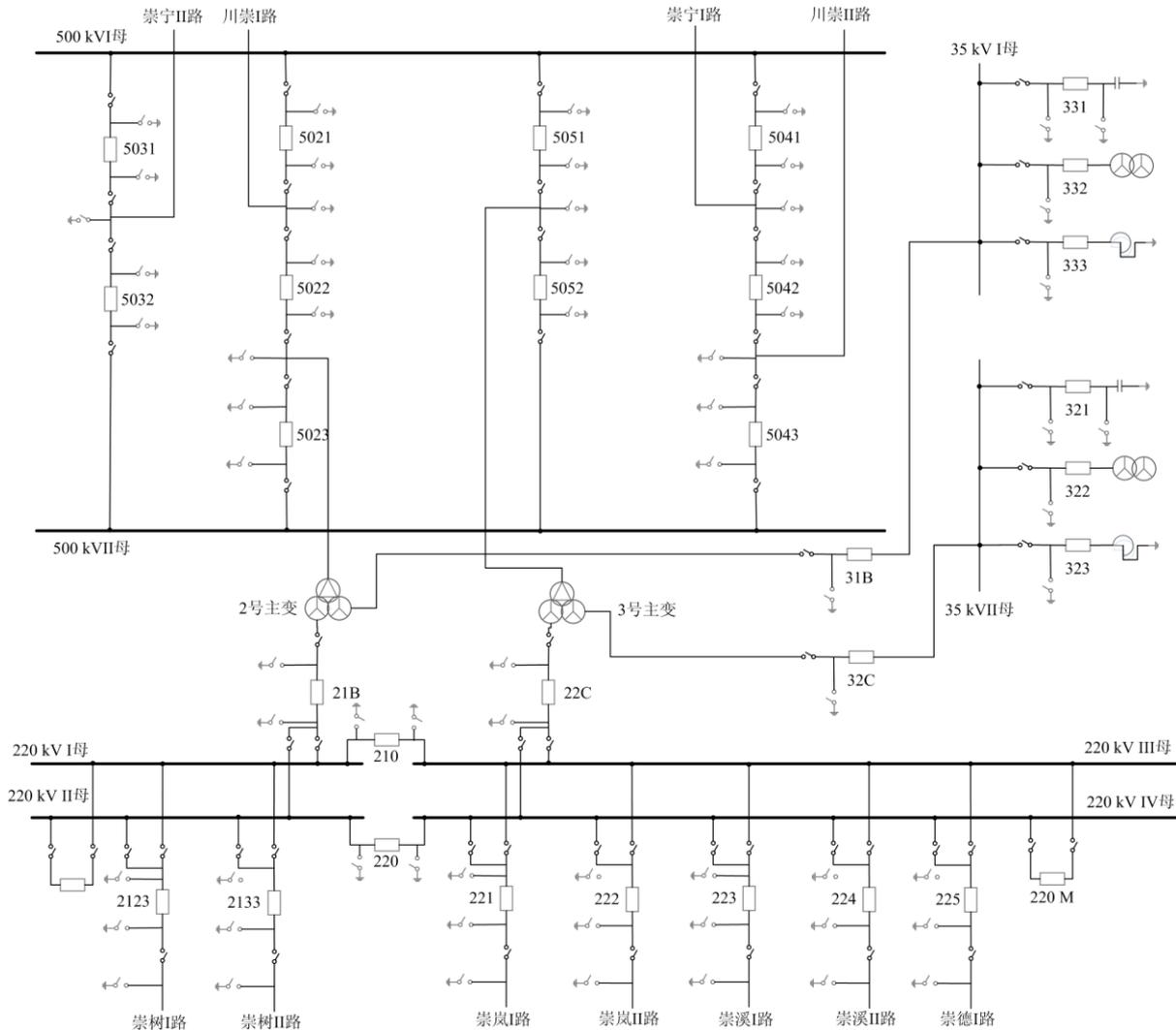


图 4 变电站主接线图的自动布局结果

Fig. 4 Main wiring graph of automatic layout result of substation

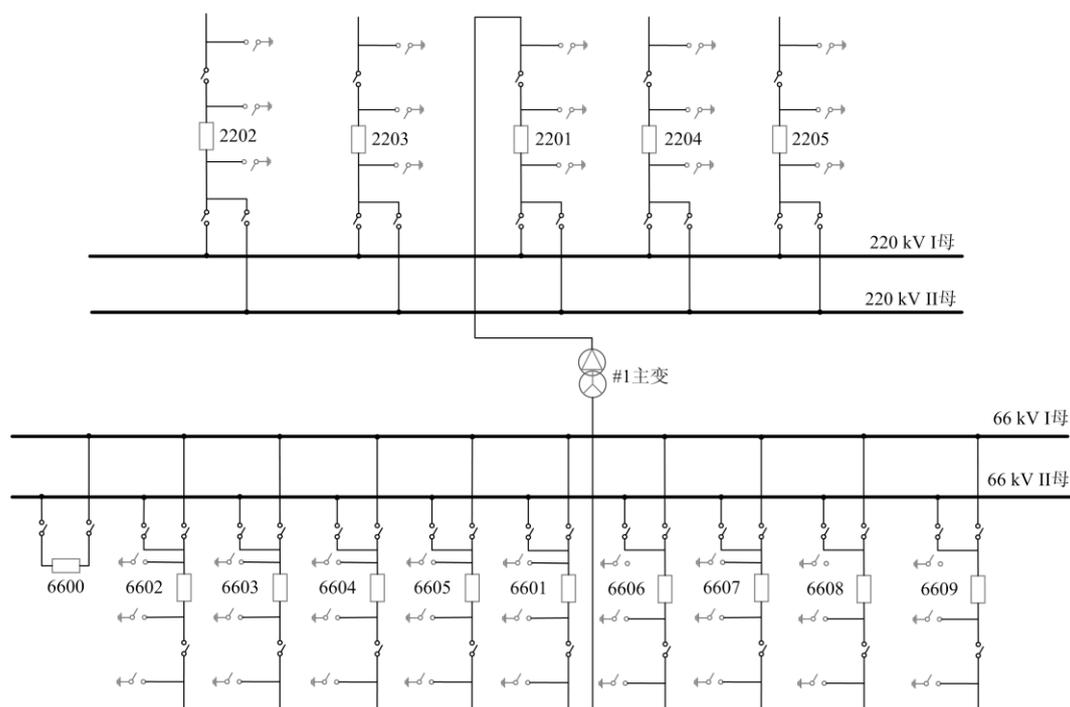


图 5 自动生成的 220 kV 主接线图

Fig. 5 Main wiring diagram of automatically generated 220 kV voltage

根据自动布局的结果图可以看出, 布局紧凑, 结构清晰, 符合变电站主接线图的绘制要求。

5 结论

本文探讨了智能变电站图形数据在调度主站的即插即用技术, 提出了一种利用变电站模型自动生成变电站主接线图的算法, 通过读取析变电站 SCD 文件, 解析出变电站的拓扑关系并完成常用间隔的辨识; 针对变电站主接线图的特点, 利用主接线图的电压区域、间隔的布局特性, 构建了自动布局的目标函数, 将惩罚条件纳入优化目标, 将有约束条件的非线性优化布局问题转为无约束的非线性优化布局问题。通过全局寻优的模拟退火算法搜索最优布局, 改进了模拟退火算法的邻域搜索准则, 避免搜索过程中的无效搜索。利用本文算法对某省 500 kV 和 220 kV 变电站的主接线图进行自动生成, 实验结果证明了本文算法能够快速生成主接线图, 而且接线图结构紧凑、布局均匀, 符合主接线图的绘制要求。

参考文献

[1] IEC 61970 energy management system application program interface (EMS-API) - part 301: common information model (CIM) base[S]. 2013.

- [2] IEC 61850 communication networks and systems in substations-part 5: communication requirements for functions and device models[S]. 2004.
- [3] 贾华伟, 郭利军, 叶海明, 等. 智能变电站分布式智能告警研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 92-99.
JIA Huawei, GUO Lijun, YE Haiming, et al. Research and application of distributed intelligent alarm in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 92-99.
- [4] 安永帅, 李刚, 樊占峰, 等. 新一代智能变电站控制保护一体化智能终端研究与开发[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 138-146.
AN Yongshuai, LI Gang, FAN Zhanfeng, et al. Research and development on intelligent terminal units incorporated with control and protection functions in new generation smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 138-146.
- [5] RAHUL, KAPOOR R, TRIPATHI M M. Detection and classification of multiple power signal patterns with Volterra series and interval type-2 fuzzy logic system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 92-101. DOI: 10.1186/s41601-017-0039-z.
- [6] 刘颖. 智能变电站全寿命周期“即插即用”技术体系的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22):

- 23-28.
- LIU Ying. Research and application on the technology system of plug & play in the smart substation's life cycle[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 23-28.
- [7] 李瑞生. 云一层一端三层架构体系的随机性电源即插即用构想[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 47-54.
- LI Ruisheng. Idea of random power supply plug and play based on cloud-layer-terminal three layer architecture[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 47-54.
- [8] 黄凯, 杨骥, 顾全. 一体化电网运行智能系统的源端维护技术[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 71-75.
- HUANG Kai, YANG Ji, GU Quan. A source-based maintenance technology for integrated intelligent operation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 71-75.
- [9] 徐丹丹, 米为民, 邓勇, 等. 智能变电站与调度主站间模型/图形协调共享及无缝通信一体化建模方案[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 235-239.
- XU Dandan, MI Weimin, DENG Yong, et al. Integrated modeling for coordinated sharing of models/images and seamless communication between smart substation and dispatch master station[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 235-239.
- [10] 唐昆明, 龙泓吉, 张太勤. 一种基于 SVG 的 SSD 文件生成新方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 120-125.
- TANG Kunming, LONG Hongji, ZHANG Taiqin. Research of a new method of generating SSD file based on SVG[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 120-125.
- [11] 周特军, 邱建, 王春艺, 等. 基于 SVG 的可视化技术在继电保护定值在线校核系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 112-117.
- ZHOU Tejun, QIU Jian, WANG Chunyi, et al. Application of visualization technology based on SVG in on-line relay settings verification system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 112-117.
- [12] 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): 84-91.
- ZHANG Jianmin, YE Yi, XU Guanhua. Consistency design of model, data, diagram of substation one-line diagram and its auto-generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 84-91.
- [13] 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.
- [14] 李宝潭, 邱俊宏, 张海庭, 等. 基于样式的变电站自动化厂站图形辅助生成系统[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 120-125.
- LI Baotan, QIU Junhong, ZHANG Haiting, et al. Style based graph auxiliary generation system in substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 120-125.
- [15] 庞峰. 模拟退火算法的原理及算法在优化问题上的应用[D]. 长春: 吉林大学, 2006.

收稿日期: 2017-09-19; 修回日期: 2017-11-28

作者简介:

张令涛(1979—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统分析与自动控制技术; E-mail: zhanglingao@163.com

赵林(1976—), 男, 本科, 教授级高工, 研究方向为智能电网控制系统等; E-mail: zhaolin@sgepri.sgcc.com.cn

张亮(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能电网控制系统。E-mail: neu_zhangliang@126.com

(编辑 周金梅)