

# 基于三维建模的HGIS配电装置紧凑型布置优化方法

陈晨<sup>1</sup>,李凯<sup>1</sup>,樊庆玲<sup>1</sup>,宋景博<sup>1</sup>,张金凤<sup>1</sup>,周辉<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院,河南 郑州 450006;

2. 郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450002)

**摘要:**采用当前方法对混合气体绝缘开关设备(HGIS)配电装置紧凑型布置进行优化设计时,由于没有构建配电装置现场三维模型,造成优化效率低、合理性差和网络损耗大等问题,为此提出基于三维建模的HGIS配电装置紧凑型布置优化方法。在立体视觉原理的基础上采用四目立体系统获取三维坐标,构建HGIS配电装置现场三维模型。在三维建模的基础上将配电网网络损耗最小、系统电压稳定性最高、电压偏移最小作为优化目标,构建HGIS配电装置紧凑型布置优化模型,采用萤火虫算法对布置优化模型进行求解,实现HGIS配电装置紧凑型布置的优化。实验结果表明,所提方法的优化效率高、合理性好、网络损耗小,实际应用效果较好。

**关键词:**三维模型;混合气体绝缘开关设备配电装置;布置优化;目标模型;萤火虫算法

**中图分类号:**TM86 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22769

## A Compact Layout Optimization Method for HGIS Power Distribution Equipment Based on 3D Modeling

CHEN Chen<sup>1</sup>, LI Kai<sup>1</sup>, FAN Qingling<sup>1</sup>, SONG Jingbo<sup>1</sup>, ZHANG Jinfeng<sup>1</sup>, ZHOU Hui<sup>2</sup>

(1. *Economic and Technological Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company,*

*Zhengzhou 450006, Henan, China;*2. *School of Electrical Engineering,*

*Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, Henan, China*)

**Abstract:** When the current method is used to optimize the compact layout of hybrid gas insulated switchgear (HGIS) distribution equipment, there are some problems such as low optimization efficiency, poor rationality and large network loss due to the lack of 3D model of power distribution device. Therefore, an optimization method of HGIS distribution device compact layout based on 3D modeling was proposed. Based on the principle of stereo vision, the 3D model of HGIS power distribution device was constructed by using four eye stereo system to obtain three-dimensional coordinates. On the basis of 3D modeling, the minimum network loss, the highest system voltage stability and the minimum voltage offset were taken as the optimization objectives, and the compact layout optimization model of HGIS distribution equipment was constructed. The firefly algorithm was used to solve the optimization model, so as to realize the optimization of HGIS distribution device compact layout. The experimental results show that the optimization efficiency of the proposed method is high, the rationality is good, the network loss is small, and the practical application effect is good.

**Key words:** three-dimensional(3D)model; hybrid gas insulated switchgear (HGIS)power distribution device; layout optimization; target model; firefly algorithm

随着智能化电网建设速度的加快,国家电网公司对混合气体绝缘开关设备(hybrid gas insulated switchgear, HGIS)配电装置紧凑化以及小型化

布置提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。但HGIS布置方案在国家电网通用架设设计过程中对于地基处理量较大的山丘地形以及征地费用较高的城乡结合

**基金项目:**国家自然科学基金(61071201);国网河南省电力公司科技项目(201921202)

**作者简介:**陈晨(1984—),女,硕士,高级工程师,Email:fq98798@163.com

部仍存在投资过高和空间受限的问题,为了解决上述问题需要对HGIS配电装置紧凑型布置进行优化<sup>[2]</sup>。

随着智能化电网的不断发展,配电装置布局优化已经成为业界国内外学者研究的重点。文献[3]提出了基于多层图分割理论的配电装置布局优化方法,该方法在多层图分割理论的基础上提出由还原、分区和粗化阶段构成的分区方法,将基于最短电气距离的粗化方法应用在粗化过程中,通过贪婪图生长算法进行初始分区,将基于路径搜索的还原方法应用在还原阶段,完成配电装置的布局优化,但是该方法无法获得配电装置现场的相关信息,优化所用的时间较长,存在优化效率低的问题。文献[4]提出了基于量子遗传算法的配电装置布置优化方法,该方法在中压配电网联络断路器、高压配电网自愈系统和电源自动投切装置协同配合的基础上,以备用电源自动投切装置数目最小、配电网负荷转供能力最大为优化目标,在主变容量约束、联络线容量约束和转供负荷等值约束下,构建配电装置布置优化模型,并采用量子遗传算法对配电装置布置优化模型进行求解,实现配电装置的布置优化,但是该方法没有构建配电装置现场三维模型,因此存在合理性差和网络损耗大的问题。

为了解决上述方法中存在的问题,本文提出基于三维建模的HGIS配电装置紧凑型布局优化方法。

## 1 三维模型构建

基于三维建模的HGIS配电装置紧凑型布置优化方法是在立体视觉原理的基础上采用四目立体系统获取三维点坐标。在同一平面内架设4台相同型号的相机,这4台相机通过刚体连接固定,为了降低透视失真概率,令4台相机平行分布,这种布置方式可以对特征点的匹配精度进行控制<sup>[5-6]</sup>。

在4个相机中空间中点 $P$ 的成像可以用 $P_1, P_2, P_3, P_4$ 进行描述,左上、右上、左下、右下的相机分别用 $I_1, I_2, I_3, I_4$ 进行描述。 $l_{ij}$ 为两个相机之间存在的核线,可以利用其计算内外参数已标定相机的核线方程。

在此基础上通过Harris角点检测算法提取图像中存在的特征点,在立体像对之间完成焦点匹

配,同时在四目系统的基础上进行立体匹配,实现配电装置场地的三维建模,具体步骤如下:

1)在核线 $l_{13}$ 周围通过聚类算法寻找 $I_1$ 中的特征点 $P_1$ 与 $I_3$ 中相匹配的特征点,由于相机 $I_1$ 与相机 $I_3$ 之间存在的基距较小,图像对应的相对速度较高,因此通过聚类算法可以获得精度较高的匹配点<sup>[7-8]</sup>。

2)计算核线 $l_{12}$ 与核线 $l_{23}$ 之间存在的焦点 $P_2$ 。

3)与步骤1)相同,利用聚类算法在核线 $l_{24}$ 周围寻找 $P_2$ 在 $I_2$ 中与其匹配度较高的特征点 $P_4$ 。

4)计算核线 $l_{24}$ 和核线 $l_{14}$ 之间存在的交点 $P_{44}$ ,通常情况下点 $P_4$ 应该与点 $P_{44}$ 重合,此时需要对点 $P_2$ 和点 $P_4$ 是否匹配正确进行检测。如果两点之间重合,进行下一步;如果两点之间不重合,则匹配错误,删除点 $P_1$ ,重新寻找特征点<sup>[9]</sup>。

5)计算核线 $l_{13}$ 与核线 $l_{14}$ 之间存在的交点 $P_{11}$ ,当点 $P_1$ 与点 $P_{11}$ 重合时,表示点 $P_1$ 和点 $P_3$ 完成匹配,保留特征点,对下一个特征点进行匹配;当点 $P_1$ 与点 $P_{11}$ 不重合时,丢弃该特征点,重新选择特征点<sup>[10]</sup>。

6)通过不断重复上述过程实现特征点匹配,完成配电装置现场的三维建模。

## 2 HGIS 配电装置紧凑型布置优化方法

### 2.1 构建紧凑型布置优化模型

HGIS配电装置紧凑型布置优化方法设计过程中主要考虑稳定性和经济性,因此将其目标函数设为系统电压稳定性最高、电压偏移最小和网络损耗最小。

#### 2.1.1 配电网网络损耗

在HGIS配电装置紧凑型布置优化过程中配电网网络损耗是重要指标之一<sup>[11-12]</sup>。通常情况下分布式电源(distributed generation, DG)接入配网后会减小支路潮流,降低网络损耗<sup>[13]</sup>。支路潮流当DG配置不当时会出现反向流动,反而会使得网络损耗增加,网络损耗最小化是HGIS配电装置紧凑型布置优化模型的主要目标,网络损耗最小的目标函数表达式如下:

$$\begin{aligned} \min(f_1) &= P_{\text{loss}} \\ &= \sum_{j=1}^N G_{k(i,j)} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $G_{k(i,j)}$ 为节点 $i$ 和节点 $j$ 之间存在的支路 $k$ 在

配电装置中对应的电导; $P_{loss}$ 为网络耗损值; $N$ 为网络支路数量; $\theta_i, \theta_j$ 分别为节点*i*和节点*j*的电压相位; $V_i, V_j$ 分别为节点*i*和节点*j*的电压幅值。

### 2.1.2 配电网网络节点电压偏移

配电系统电压质量可以通过节点电压水平进行衡量,该指标可以对HGIS配电装置紧凑型布局的合理性进行评价<sup>[14-15]</sup>。HGIS配电装置的布局优化可以对节点电压起到支撑作用,降低节点电压在配电装置中的电压偏移。电压偏移最小的目标函数表达式如下:

$$\min(f_2) = I_v = \sum_{i=1}^{N-1} w_i \frac{V_i - V_0}{V_0} \quad (2)$$

式中: $I_v$ 为电压偏移值; $w_i$ 为第*i*个节点对应的权重因子; $V_0$ 为额定电压幅值。

### 2.1.3 配电网电压稳定性

配电网的电压水平会受到HGIS配电装置布局的影响,导致配电网承受较大负荷的能力下降,此时会对配电网的稳定性造成不利影响。设置电压稳定指标VSI对系统的电压稳定性进行衡量,设VSI<sub>k</sub>为支路*k*在电力系统中对应的电压稳定指标,其计算公式如下:

$$VSI_k = \frac{4[(X_{ij}P_j - R_{ij}Q_j)^2 + (X_{ij}Q_j - R_{ij}P_j)V_i^2]}{V_i^4} \quad (3)$$

式中: $X_{ij}$ 为支路*k*的电抗; $P_j$ 为支路*k*接收端点*j*的有功功率; $R_{ij}$ 为支路*k*的电阻; $Q_j$ 为支路*k*接收端点*j*的无功功率。

系统的电压稳定性随着电压稳定指标VSI值的减少而升高,各个支路VSI的最大值也就是整个配电装置系统的电压稳定指标。系统电压稳定性最高这一目标函数的表达式如下:

$$\max(f_3) = VSI = \max\{VSI_1, VSI_2, \dots, VSI_N\} \quad (4)$$

### 2.1.4 约束条件

1)机会约束。在配电装置系统正常工作过程中,个别线路出现短路的过负荷现象不会对系统的整体运行产生影响,主要原因是线路的热容量决定了其极限值,线路在短时过负载情况下不会达到热稳定极限。但在配电装置运行过程中应需要对过负荷情况进行限制,考虑负荷和电源功率的不确定性,用软约束的形式描述机会约束如下:

$$\Pr\{S_{ij} \leq S_{ijmax}\} \geq \beta \quad (5)$$

式中: $\Pr\{\cdot\}$ 为事件 $\{\cdot\}$ 成立的概率; $S$ 为馈线传输容量; $\beta$ 为不越限的情况下馈线传输容量的置信

水平。

2)等式约束。配电装置的潮流方程约束即为HGIS配电装置紧凑型布置优化模型的等式约束,其表达式如下:

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_i$ 为节点*i*对应的有功功率; $Q_i$ 为节点*i*的无功功率; $G_{ij}$ 为节点*i*和节点*j*之间存在的互电导; $\theta_{ij}$ 为节点*i*和节点*j*之间存在的相位差; $B_{ij}$ 为节点*i*和节点*j*之间存在的互电纳。

3)不等式约束。HGIS配电装置紧凑型布置优化模型的不等式约束通常包括DG最大准入容量约束、节点电压约束、DG无功出力 and 有功出力的上下限约束,即

$$\begin{cases} V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} & i = 1, \dots, N-1 \\ P_{DG,imin} \leq P_{DG,i} \leq P_{DG,imax} & i = 1, \dots, N_{DG} \\ Q_{DG,imin} \leq Q_{DG,i} \leq Q_{DG,imax} & i = 1, \dots, N_{DG} \\ \sum_{i=1}^{N_{DG}} S_{DG_i} \leq S_{DGmax} & i = 1, \dots, N_{DG} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $N_{DG}$ 为配电装置中DG的数量。

## 2.2 模型求解

萤火虫算法作为一种启发式算法,算法源自萤火虫在自然界中的信息传递行为。通过对空间分布的*N*个萤火虫进行求解,根据萤火虫能够感知到的搜索半径,搜索出亮度最强的那只萤火虫,并向其进行移动,在移动的过程中,再根据新的搜索半径搜索出半径范围内亮度最强的萤火虫,并向其移动,不断迭代,直到萤火虫到达能感知到的最亮萤火虫所在位置,该位置则为函数的最优解<sup>[16]</sup>。由于萤火虫算法属于群智能算法,设置参数较少,且操作简单。因此,采用萤火虫算法对HGIS配电装置紧凑型布置优化模型进行求解,相较于用于求解双尺度差分方程逼近算法的阶梯形算法<sup>[17]</sup>来说,算法所用时间更短,精度更高。

采用萤火虫算法对HGIS配电装置紧凑型布置优化模型进行求解,实现HGIS配电装置紧凑型优化布置,模型求解的具体步骤如下:

1)初始化HGIS配电装置紧凑型布置优化模型中的各个参数值,包括最大迭代次数、步长因子和最大吸引度等<sup>[18]</sup>。

2)随机分布萤火虫位置,利用目标函数对投资值进行计算,将计算得到的结果作为萤火虫个



体的初始荧光亮度最大值。

3)利用下式对萤火虫个体对应的荧光亮度大小  $I$  进行计算:

$$I = I_0 \times e^{-\gamma r_{ij}} \quad (8)$$

其中

$$r_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (9)$$

式中:  $I_0$  为萤火虫的最大荧光亮度;  $\gamma$  为光强系数;  $r_{ij}$  为萤火虫  $i$  和萤火虫  $j$  之间存在的空间距离;  $d$  为变量维数;  $x_{ik}, x_{jk}$  分别为  $k$  支路上萤火虫  $i$  和  $j$  的空间位置。

设  $\beta$  为萤火虫个体吸引度的大小,其计算公式如下:

$$\beta = \beta_0 \times e^{-\gamma r_i^2} \quad (10)$$

式中:  $\beta_0$  为最大吸引度。

4)根据上述过程获得的吸引度大小和荧光亮度,以此判断萤火虫的移动方向,并利用下式对萤火虫的位置进行更新,使萤火虫的位置越来越接近最优位置。

$$x_{i+1} = x_i + \beta_{ij} \times (x_j - x_i) + \alpha(rand - 1/2) \quad (11)$$

式中:  $x_i, x_j$  分别为萤火虫  $i$  和萤火虫  $j$  的空间位置;  $\beta_{ij}$  为萤火虫  $j$  对萤火虫  $i$  产生的相对吸引力;  $rand$  为随机因子,在区间  $[0, 1]$  内取值;  $\alpha$  为步长因子,在区间  $[0, 1]$  内取值。

5)根据萤火虫移动后位置重新对萤火虫吸引度大小和荧光度大小进行计算。

6)设置最大迭代次数,当迭代次数小于最大迭代次数时重复上述过程,重新计算萤火虫吸引度大小和荧光度大小,当迭代次数满足设置的条件时进行下一步。

7)输出HGIS配电装置紧凑型布置优化模型的最优解,完成HGIS配电装置紧凑型布置优化。

### 3 实验分析

为了验证本文所设计的基于三维建模的HGIS配电装置紧凑型布置优化方法的整体有效性,需要对该方法进行实验测试,本次测试的硬件环境为CPU: Intel I3, 4G以上处理器。分别采用本文基于三维建模的HGIS配电装置紧凑型布置优化方法、文献[3]中基于多层图分割理论的配电装置布局优化方法和文献[4]中基于量子遗传算法的配电装置布置优化方法进行测试,对比不同方法优化时间,测试结果如图1所示。

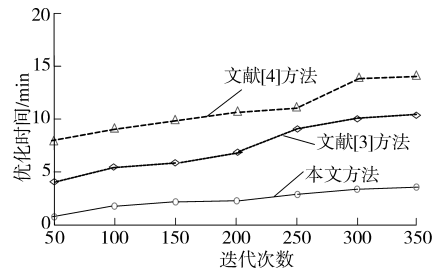


图1 优化时间测试结果

Fig.1 Optimization time test results

分析图1中数据可知,基于三维建模的本文方法对配电装置紧凑型布置进行优化时所用时间均在3 min以内,远远低于文献[3]方法和文献[4]方法,这是由于基于三维建模的优化方法对配电装置布置优化之前对配电装置现场进行了三维建模,获取了现场的相关数据,为后续的优化布置提供了相关数据,缩短了优化布置所用的时间,提高了基于三维建模优化方法的优化效率。

模型的合理性通过合理性系数来表示,合理性系数越高表明优化后的HGIS配电装置布置合理性越高,布置的方式更为科学,布置的位置更为合理。设置合理性系数  $\delta$ ,在区间  $[0, 1]$  内取值,不同方法的合理性系数如图2所示。

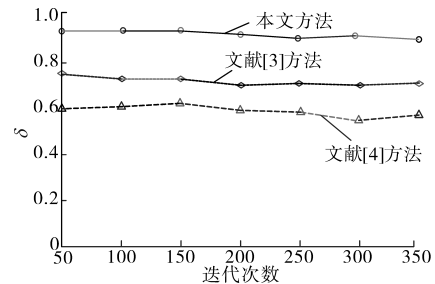


图2 合理性系数测试结果

Fig.2 Test result of rationality coefficient

分析图2中的数据可知,在多次迭代中本文方法的合理性系数均在0.8以上,而文献[3]方法和文献[4]方法在迭代过程中获得的合理性系数分别在0.7和0.6附近波动。对比不同方法的合理性系数测试结果可知,基于三维建模的优化方法的合理性系数最高。这是由于该方法通过三维模型可直接获得HGIS配电装置现场的相关数据,根据获取的数据构建HGIS配电装置紧凑型布置优化模型,优化后提高了配电装置的合理性。

配电网网络损耗是衡量配电装置布置优化方法有效性的重要指标,设置损耗系数  $\xi$ ,该系数在区间  $[0, 10]$  内取值,损耗系数越高表明配电网网络损耗越大,配电装置布置优化方法的有效性越差,不同方法的损耗系数如图3所示。

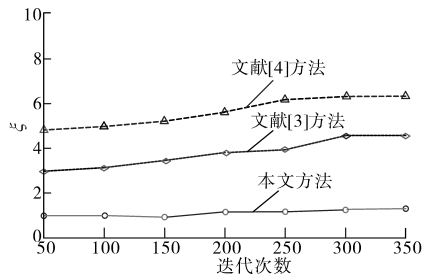


图3 损耗系数测试结果  
Fig.3 Loss factor test results

由图3可知,本文方法在多次迭代中的损耗系数均在2以下,文献[3]方法在迭代次数到达300次后的损耗系数超过4,文献[4]方法在迭代次数到达250次后的损耗系数达到6。对比上述方法的测试结果可知,本文方法的损耗系数最低,表明基于三维建模的优化方法布置优化后的HGIS配电装置网络损耗较少。由于本文方法在三维模型的基础上将配电网网络损耗最小作为优化目标构建HGIS配电装置紧凑型布置优化模型,减少了配电网网络损耗。

#### 4 结论

随着城市化进程的加快,我国土地资源日益稀缺,受用地规划等外部条件的限制,变电站建设逐渐向小型化、集约化方向发展,因此对HGIS配电装置紧凑型布置进行优化具有重要意义。当前HGIS配电装置紧凑型布置优化方法存在优化效率低、合理性差和网络损耗大的问题,所以提出基于三维建模的HGIS配电装置紧凑型布置优化方法,通过构建配电装置场地三维模型,在三维模型的基础上搭建布置优化模型,并采用萤火虫算法实现HGIS配电装置紧凑型布置的优化。经实验测试可知,该方法优化效率更高、合理性更好、网络损耗更小,能够为HGIS配电装置的应用和发展奠定坚实的基础。但在实际的应用过程中,还需要考虑以下缺陷:萤火虫搜索过程中易造成振荡现象,萤火虫选择压力大。因此,在以后的研究中,可对萤火虫算法进行改进,使得基于三维建模的HGIS配电装置紧凑型布置优化综合性能表现更优。

#### 参考文献

- [1] 郭波. 矿用高压配电装置若干问题分析及优化[J]. 煤矿安全, 2018, 49(10): 143-146.
- [2] 鄢庆猛. 110 kV GIS垂直出线配电装置及其在变电站应用[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 201-204.
- [3] 张今, 江全元, 周自强, 等. 含柔性多状态开关的配电网分区方法[J]. 电力建设, 2019, 40(2): 71-78.
- [4] 毛宇晗, 张焰, 苏运. 多电压等级配电网备用电源自动投切装置的优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 72-78, 86.
- [5] 周涛, 查国才, 徐允祥. 新型矿用隔爆型永磁高压真空配电装置的研制[J]. 煤炭技术, 2019, 38(10): 160-163.
- [6] 牛冲宣, 康鹏, 谭海龙, 等. 户外330 kV GIS配电装置立体紧凑型出线方案的研究与应用[J]. 青海电力, 2019, 38(3): 45-48.
- [7] 曾琰, 李明. 220 kV HGIS配电装置联合构架在浏阳500 kV变电站的应用[J]. 大众用电, 2020, 35(4): 27-29.
- [8] 向重平, 韩燕. 河床式水电站高压配电装置布置及振动分析[J]. 水电站设计, 2018, 34(2): 26-28.
- [9] 赵吉祥, 李丹, 廖攀峰, 等. 基于无功超调率指标的变电站无功优化配置[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 51-57.
- [10] 常伯涛, 朱萍, 杨建华, 等. 基于“大车间”式户内配电装置布置研究[J]. 电力勘测设计, 2017, 18(6): 53-57.
- [11] 张彪, 何珣. 220 kV变电站户外HGIS配电装置布置优化[J]. 电力系统装备, 2018, 25(9): 84-85.
- [12] 徐君茹, 徐弘. 变电站电气总平面布置及配电装置优化[J]. 江西电力, 2019, 43(8): 40-44.
- [13] 韩志萍. 户内750 kV GIS配电装置布置方案研究[J]. 青海电力, 2020, 39(1): 42-48.
- [14] 褚强, 叶军, 朱清清. 城市型变电站GIS配电装置室的优化方法[J]. 电力与能源, 2018, 39(1): 10-15.
- [15] 张育炜, 石琦, 武恩光. 基于支持向量机GIS局放小波包能量谱故障诊断[J]. 电气传动, 2020, 50(9): 99-105, 114.
- [16] 路艳玲, 徐家川, 张裕晨, 等. 基于萤火虫算法的自行车式房车内部分布优化[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2019, 33(5): 45-49.
- [17] 楚智媛. 矩形与阶梯形光栅正反问题数值算法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [18] 王大鹏, 黄雨华, 刘强, 等. 特高压换流站500 kV户内GIS配电装置布置优化研究[J]. 湖南电力, 2017, 37(S1): 22-25.

收稿日期: 2020-12-04

修改稿日期: 2021-01-14