

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191240

# 计及多种分布式能源运行的配电网双层优化规划方法

宋倩芸

(国家电网福建电力技术经济研究院, 福建 福州 350001)

**摘要:** 在配电网分布式可再生能源(Renewable Distributed Generation, RDG)优化规划问题上, 考虑可控分布式电源和可中断负荷的调度运行情况, 建立 RDG 双层优化模型。上层模型以配电网系统电压偏移最小、网络损耗最小为目标, 求解 RDG 接入配电网的最优位置和容量。下层模型以配电网发电综合运行成本最小为目标, 求解各时段可控分布式电源和可中断负荷最优出力安排。利用场景分析方法处理多种分布式可再生能源优化中的不确定因素。为减少模型计算量, 采用 *K-means* 聚类算法获取典型场景。最后, 采用改进的自适应遗传算法求解, 以 IEEE-33 节点网络系统为例对所提模型与方法的有效性进行验证。仿真结果表明, 该方法能够有效提高 RDG 优化方案在系统实际运行中的适用性。

**关键词:** 可再生能源; 可控分布式电源; 场景分析法; 改进自适应遗传算法; 双层优化模型

## A bi-level optimization planning method for a distribution network considering different types of distributed generation

SONG Qianyun

(State Grid Fujian Electric Power Economic Research Institute, Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** To optimize renewable distributed generation in a distribution network, a bi-level optimization model is established considering the scheduling of controllable distributed generation and interruptible load. The upper level model aims to solve the location and capacity allocation of renewable distributed generation connected to the network with the goal of minimum voltage offset and minimum network loss in the distribution network system. The lower model solves the optimal output arrangement of controllable distributed generation and interruptible load in each period with the goal of minimum comprehensive operational cost of the distribution network. Scenario analysis is used to deal with the uncertainty in the optimization of renewable distributed generation. In order to reduce the amount of calculation, the *K-means* clustering algorithm is used to obtain typical scenes. Finally, an improved adaptive genetic algorithm is used to solve the model. The IEEE-33 node network is used as an example to analyze and calculate to verify the effectiveness of the proposed model and method. Results show that the method can effectively improve the applicability of the RDG optimization scheme in actual operation of the distribution network.

**Key words:** renewable distributed generation; controllable distributed generation; scenario analysis; improved adaptive genetic algorithm; bi-level optimization model

## 0 引言

在智能电网与能源互联网技术的推动下, 电力系统中的发电资源向清洁化和多元化发展, 加快利用风能、太阳能、地热能等可再生能源和发展分布式发电技术, 已成为世界各国的基本共识和应对策略<sup>[1]</sup>。随着大规模分布式可再生能源并网, 电力系统的结构、形态与运行控制方式随之产生了根本性变革, 电力系统的运行形态将更加复杂<sup>[2-6]</sup>。

国内外众多学者对含分布式可再生能源的配电网规划已有相关研究工作<sup>[7-18]</sup>。文献[7]考虑投资成本、发电成本、短路电流、网损等因素建立配电网规划模型。文献[8]以投资商收益最大为目标建立分布式电源规划模型, 并采用人工蜂群算法求解。文献[9]考虑经济性、可靠性与环境效益, 提出了分布式电源与配电网协调规划的思路, 并针对传统遗传算法的缺点对算法进行了改进。上述文献在规划过程中均将分布式可再生能源出力看作恒定出力, 结

果与实际情况往往存在一定偏差。

风、光等可再生能源受环境因素影响其出力具有很强的不确定性，因而含分布式可再生能源的配电网规划是一个计及不确定性的多变量、多约束的非线性优化问题。文献[10]考虑储能接入，提出了一种主动配电网规划方法。文献[11-12]考虑风电、光伏出力不确定性，建立了概率模型，采用蒙特卡洛模拟法将不确定性问题转化为确定性问题求解。文献[13]通过光伏-负荷的连续概率密度函数，将概率性场景进行最优多状态建模以抽取代表性时序场景，采用粒子群算法求解规划模型。利用概率模型求解存在模拟精度与计算量之间的矛盾，且模型对概率分布参数的准确性要求较高。文献[14-15]利用历史数据进行多场景构建，并根据每个场景的概率分布情况，通过混合求解策略求解模型。文献[16-17]根据 RDG 出力和负荷时序特性曲线构建多个耦合场景，建立规划模型。文献[18]根据季节对配网运行场景进行场景划分，建立主动管理模式下的双层规划模型。

目前对含 RDG 的配电网规划的研究，在考虑不确定性问题时均以分布式可再生能源“即装即忘”，日常发电机组恒定出力为基本运行条件，很少考虑实际运行时可再生能源出力、可控发电机组调度计划、可控负荷等多方关联，在对 RDG 的优化规划中往往忽略了其他类型分布式电源参与日常调度的问题。为此，本文兼顾配电网规划与运行过程，提出一种计及多种分布式能源运行的配电网双层优化方法。通过场景分析法描述不确定性，上层根据各典型场景计算规划周期内 RDG 最优配置方案并传递给下层，下层基于该方案在典型场景下对可控的分布式电源(Distributed Generation, DG)及可中断负荷(Interruptible Load, IL)进行优化调度，并将各场景下的调度安排反馈给上层，上层利用反馈结果对配置方案进行修正，通过改进的自适应遗传算法对本文模型进行求解。最后以 IEEE-33 节点系统为例，对本文所提模型的有效性进行验证。

## 1 风、光电源出力及负荷时序场景构建

### 1.1 风电、光伏出力模型

风电机组的输出功率  $P_w$  与风电安装地点的风速  $v$  之间的关系可以用如式(1)的分段函数形式表达。

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < v_i \text{ 或 } v_0 \leq v \\ P_{wr} \frac{v - v_i}{v_s - v_i} & v_i \leq v < v_s \\ P_{wr} & v_s \leq v < v_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $v_s$ 、 $v_i$  和  $v_0$  分别为风电机组的额定风速、切入风速和切出风速； $P_{wr}$  为风电机组的额定输出功率。

光伏机组的输出功率  $P_v$  与安装地点的光照强度密切相关，假设光伏机组的额定光照强度参数  $h_r$ ，当实际光照强度  $h$  小于  $h_r$  时，输出功率随着  $h$  的增加而加大，一旦  $h$  达到  $h_r$ ，则 PV 保持输出额定功率  $P_{vr}$ 。其输出功率可表示为

$$P_v = \begin{cases} \frac{P_{vr}}{h_r} h & h \leq h_r \\ P_{vr} & h > h_r \end{cases} \quad (2)$$

式中： $h_r$  为额定光照强度； $P_{vr}$  为光伏额定输出功率。

### 1.2 典型时序场景构建

采用场景分析方法提取若干场景，将不确定性模型转化为各自的确定性等价类，然后建立等价的确定性规划模型，进而降低建模和求解的难度，是一种常用的不确定性分析方法。但是当不确定性因素过多时，如何对其进行分类、组合，构成各种具有代表性的场景且保证模型精度，是该方法一直以来的研究难点。本文采用 K-means 聚类算法<sup>[19-20]</sup>根据各场景相似度对原始场景样本进行场景缩减，获取能够涵盖原始场景特征的典型时序场景。

风电/光伏出力和负荷的变化都具有一定的周期性和不确定性，根据配网区域内大量的风电/光伏负荷历史资源数据，选取规划地区全年 8 760 个小时的风速、光照强度及常规负荷作为原始场景数据，以日内一天 24 h 作为聚类单元，将 8 760 个小时的原始数据划分为 365 个原始场景，第  $i$  天的风速  $V(i) = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,24})$  和光照强度  $H(i) = (h_{i,1}, h_{i,2}, \dots, h_{i,24})$ ，第  $i$  天的负荷  $P_h(i) = (P_{hi,1}, P_{hi,2}, \dots, P_{hi,24})$ ，当天的运行场景曲线表示为  $\varphi(i) = [V(i) H(i) P_h(i)]$ 。样本周期内 365 天运行场景样本集表示为  $N = [\varphi(1); \varphi(2); \dots; \varphi(365)]$ 。

基于 K-means 聚类算法的“风-光-负荷”典型日运行场景构建流程如下：

1) 选定聚类数目  $K$ ，从原始场景集中随机选取  $K$  个场景作为初始聚类中心  $T^{(0)} = (\varphi_1^{(0)}, \varphi_2^{(0)}, \dots, \varphi_K^{(0)})$ 。

2) 根据式(3)计算剩余每个原始场景到  $K$  个聚类中心的欧氏距离，将各原始场景划分到距离最近的聚类簇中。

$$d(\varphi_i, \varphi_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (\varphi_i(k) - \varphi_j(k))^2} \quad (3)$$

式中： $d(\varphi_i, \varphi_j)$  表示场景曲线间的距离； $\varphi_i(k)$  表示场景曲线  $i$  的第  $k$  维数据。

3) 分别计算  $K$  个聚类簇的中心点，并将  $K$  个中

心点更新为新的聚类中心  $T^{(l)} = (\varphi_1^{(l)}, \varphi_2^{(l)}, \dots, \varphi_K^{(l)})$ 。

4) 重复步骤 2) 和 3)，直至聚类中心不再改变，最终的聚类中心曲线即为聚类出的典型场景曲线，对应  $K$  个典型运行场景  $\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_K\}$ 。

本文通过伪 F-统计(PFS)指标<sup>[21]</sup>作为不同聚类结果的评价指标。

$$PFS = \frac{tr(S_B)/(K-1)}{tr(S_W)/(S-K)} \quad (4)$$

式中： $tr(S_B)$ 为样本类内散布矩阵的迹； $tr(S_W)$ 为样本类间散布矩阵的迹； $S$ 为原始场景样本总数； $K$ 为聚类数目。从聚类效果上看，若聚类结果中不同场景聚类中心之间距离越大，同一场景曲线之间距离越小，PFS 指标越大，表明聚类效果越好。采用不同  $K$  值进行聚类，比较 PFS 指标，可以选定最优聚类  $K$  值。确定最优  $K$  值后，确定典型“风-光-负荷”场景为  $\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_K\}$ ，再根据式(1)和式(2)计算 RDG 出力，得到典型时序场景。

## 2 双层优化模型及求解

### 2.1 双层优化模型结构

双层优化模型是一种具有 2 层递阶结构的系统优化模型<sup>[22-24]</sup>，本文构建的考虑多种分布式能源的配电网双层优化模型，上层模型首先求解风、光等分布式可再生能源接入配电网的最优位置和容量。下层模型求解各时段可控 DG 的输出功率和 IL 的切除功率。上下层模型之间相互影响，上层模型将风、光等分布式可再生能源配置方案传递给下层模型，下层模型基于上层决策给定的配置方案求解出各时段可控分布式电源和可中断负荷出力后，将求解结果反馈到上层，上层利用反馈结果对配置方案进行修正，再次优化风、光电源的位置和容量，如此循环往复，迭代至设定的最大迭代次数，得到最终的 RDG 配置结果。利用该双层模型得到的最优配置方案综合考虑了配电网各分布式电源的规划与实际运行情况，兼顾配电网运行经济性与安全性，具体模型如图 1 所示。

### 2.2 上层优化配置模型

上层优化配置模型进行 RDG 的优化配置，在设定的安全约束内，综合考虑电压偏移和网络损耗两个目标建立数学模型，目标函数为

$$\begin{cases} \min f = \omega_1 F_1 + \omega_2 F_2 \\ F_1 = \sum_{i=1}^K \mu_i \cdot \sum_{j=1}^n U_{\text{offset}}^{\xi_i}(i) \\ F_2 = \sum_{i=1}^K \mu_i \cdot P_{\text{loss}\xi_i} \end{cases} \quad (5)$$

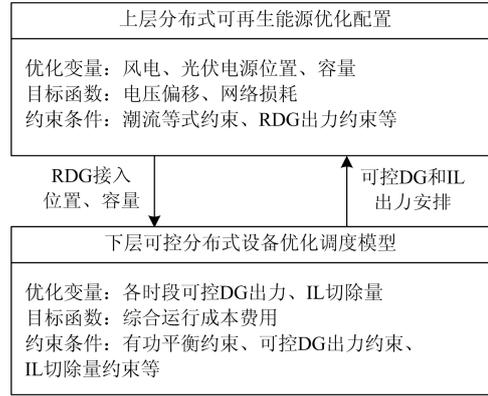


图 1 双层优化模型

Fig. 1 Bi-level optimization model

其中，

$$U_{\text{offset}}^{\xi_i}(i) = \begin{cases} 1.0 & , \Delta U_i^{\xi_i} > \Delta U_{\max} \\ \frac{\Delta U_i^{\xi_i} - \Delta U_{\min}}{\Delta U_{\max} - \Delta U_{\min}} & , \Delta U_{\min} \leq \Delta U_i^{\xi_i} \leq \Delta U_{\max} \\ 0 & , \Delta U_i^{\xi_i} < \Delta U_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

式中： $f$ 为加权处理后的目标函数； $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 为权重因子， $0 \leq \omega_i \leq 1$ ， $i=1,2$ ，且  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ ； $F_1$ 、 $F_2$ 分别为电压偏移评估函数值和系统有功网损； $\mu_i$ 为典型场景  $\xi_i$  的概率； $P_{\text{loss}\xi_i}$ 为场景  $\xi_i$  下系统的网络损耗； $U_{\text{offset}}^{\xi_i}(i)$ 为场景  $\xi_i$  下节点  $i$  的电压波动函数值； $\Delta U_i^{\xi_i} = |\Delta U_i^{\xi_i} - 1|$ ； $\Delta U_{\max}$ 、 $\Delta U_{\min}$ 分别为无法接受的波动值和可接受的波动值。

对应的安全约束条件如下：

(1) 潮流方程等式约束

$$P_{\text{RDG}_i} + P_{\text{CDG}_i} + P_{\text{IL}_i} - P_{L_i} = U_i \cdot \sum_{j=1}^n U_j \cdot (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (7)$$

$$Q_{\text{RDG}_i} + Q_{\text{CDG}_i} - Q_{L_i} = U_i \cdot \sum_{j=1}^n U_j \cdot (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (8)$$

式中： $n$ 为配电网节点数； $P_{\text{RDG}_i}$ 、 $Q_{\text{RDG}_i}$ 为 RDG 节点有功和无功功率注入量； $P_{\text{CDG}_i}$ 、 $Q_{\text{CDG}_i}$ 为可控 DG 节点有功和无功出力； $P_{\text{IL}_i}$ 为可切负荷切除量； $P_{L_i}$ 、 $Q_{L_i}$ 为负荷的有功和无功功率； $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 为线路电导和电纳。

(2) 不等式约束

包括分布式可再生能源的有功出力约束、各节点的电压约束以及 RDG 总容量约束。

$$0 \leq P_{\text{RDG}_i} \leq P_{\text{RDG}}^{\max}, i=1,2,\dots,N_{\text{RDG}} \quad (9)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, i=1,2,\dots,n \quad (10)$$

$$P_{\text{total-RDG}} \leq 25\% \times P_{\text{total-load}} \quad (11)$$

式中:  $P_{\text{RDG}}^{\max}$  为 RDG 有功出力上限;  $U_i$  是第  $i$  个负荷节点的电压幅值;  $U_i^{\min}$ 、 $U_i^{\max}$  分别为节点电压的下限和上限;  $P_{\text{total-RDG}}$  为接入 RDG 的总容量;  $P_{\text{total-load}}$  为系统总负荷。

### 2.3 下层优化调度模型

下层调度优化模型以配电网综合运行成本  $F_3$  最小为目标建立优化模型。

风、光等可再生能源发电相对燃料发电机组成本较低,因此本文忽略其发电成本,优化调度目标是使配网中分布式的柴油发电机(Diesel Engine, DE)运行成本、切负荷补偿成本以及配网向主网购电成本之和最小。目标函数表示为

$$F_3 = \sum_{t=1}^{24} (C_{\text{DE}}(t) + C_{\text{cut}}(t) + C_{\text{grid}}(t)) \quad (12)$$

其中,

$$C_{\text{DE}}(t) = \sum_{g \in \Omega_{\text{DE}}} (k_{\text{fuel}}^{\text{DE}} + k_{\text{OM}}^{\text{DE}}) \cdot P_{\text{DE},g}(t) \cdot \Delta t \quad (13)$$

$$C_{\text{cut}}(t) = \sum_{g \in \Omega_{\text{cut}}} k_{\text{IL}}^{\text{cut}} \cdot P_{\text{cut},g}(t) \cdot \Delta t \quad (14)$$

$$C_{\text{grid}}(t) = \sum_{t=1}^{24} k_{\text{grid}}(t) \cdot P_{\text{grid}}(t) \cdot \Delta t \quad (15)$$

式中:  $C_{\text{DE}}(t)$  为柴油机组  $t$  时刻的发电成本;  $C_{\text{cut}}(t)$  表示  $t$  时刻切负荷的补偿成本;  $C_{\text{grid}}(t)$  表示  $t$  时刻配电网向大电网购电的成本;  $k_{\text{fuel}}^{\text{DE}}$ 、 $k_{\text{OM}}^{\text{DE}}$  分别表示柴油发电机每千瓦时的燃料费用和运行维护费用;  $P_{\text{DE},g}(t)$  表示  $t$  时刻第  $g$  个节点上 DE 的发电功率;  $k_{\text{IL}}^{\text{cut}}$  表示可中断负荷每千瓦时的补偿成本;  $P_{\text{cut},g}(t)$  表示  $t$  时刻第  $g$  个节点上的切负荷功率;  $k_{\text{grid}}(t)$  表示  $t$  时刻配电网向大电网购电费用系数;  $P_{\text{grid}}(t)$  表示  $t$  时刻配电网向主网购电量。

对应的安全约束条件如下:

#### (1) 有功平衡约束

$$\sum_{g \in \Omega_{\text{DE}}} P_{\text{DE},g}(t) + P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{LOAD}}(t) - \sum_{g \in \Omega_{\text{cut}}} P_{\text{cut},g}(t) - P_{\text{DWG}}(t) - P_{\text{PV}}(t) \quad (16)$$

式中:  $P_{\text{LOAD}}(t)$  表示  $t$  时刻的系统有功负荷;  $P_{\text{DWG}}(t)$ 、 $P_{\text{PV}}(t)$  分别表示  $t$  时刻的风电、光伏有功出力。

#### (2) DE 机组约束

DE 出力上下限约束

$$P_{\text{DE},g\min} \leq P_{\text{DE},g}(t) \leq P_{\text{DE},g\max}, g \in \Omega_{\text{DE}} \quad (17)$$

式中,  $P_{\text{DE},g\max}$ 、 $P_{\text{DE},g\min}$  分别表示第  $g$  个节点上的 DE 机组的出力上、下限。

DE 爬坡约束

$$-v^{\text{down},g} \leq P_{\text{DE},g}(t+1) - P_{\text{DE},g}(t) \leq v^{\text{up},g} \quad (18)$$

式中,  $v^{\text{down},g}$ 、 $v^{\text{up},g}$  分别表示 DE 机组输出功率的最大向下爬坡速率和最大向上爬坡速率。

(3) IL 容量约束

$$0 \leq P_{\text{cut},g}(t) \leq P_{\text{max}}^{\text{cut},g} \quad (19)$$

式中,  $P_{\text{max}}^{\text{cut},g}$  表示节点  $g$  处 IL 的最大可切容量。

### 2.4 优化求解算法(IAGA)

遗传算法具有逻辑简单、收敛性好、并行性强等优点,被广泛应用于求解电力系统优化问题。传统 GA 一般人为设定遗传操作的概率,并且均设为定值,伴随着一定的盲目性。此外,在种群的更新进化过程中,当代的良好个体也可能在交叉和变异中改变掉了原有的基因构造。针对这两个问题,本文上下两层优化模型均采用改进的自适应遗传算法<sup>[25-27]</sup>(Improved Adaptive Genetic Algorithm, IAGA)。IAGA 相比原来的遗传算法,具有两个明显的优势:

(1) 交叉和变异概率自适应确定。根据个体的适应度值自行调整概率,使其不再为定值。其机理可以概括为:对高适应度的解降低遗传操作的概率,而对低适应度的解提高遗传操作的概率。交叉和变异概率的计算公式如式(20)、式(21)所示。

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(F_{\text{better}} - F_{\text{avg}})}{F_{\text{max}} - F_{\text{avg}}}, & F_{\text{better}} \geq F_{\text{avg}} \\ P_{c1}, & F_{\text{better}} < F_{\text{avg}} \end{cases} \quad (20)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(F - F_{\text{avg}})}{F_{\text{max}} - F_{\text{avg}}}, & F \geq F_{\text{avg}} \\ P_{m1}, & F < F_{\text{avg}} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $P_c$ 、 $P_m$  分别为交叉和变异概率;  $P_{c1}$ 、 $P_{c2}$  分别为交叉概率的最大值和最小值;  $P_{m1}$ 、 $P_{m2}$  分别为变异概率的最大值和最小值;  $F_{\text{max}}$  为当前种群的最大适应度值;  $F_{\text{avg}}$  为当前种群的平均适应度值;  $F_{\text{better}}$  为交叉父本中较大的适应度值;  $F$  表示变异父本的适应度值。

(2) 精英策略。若当前种群的最优个体的适应度比子代的某一个体高,则其直接替换子代中适应度值最小的个体。通过精英保留,提高了子代平均适应度,使整个种群朝更优的方向进化。

## 2.5 整体优化流程

本文基于改进的自适应遗传算法进行双层模型的优化，整体优化流程如图 2 所示。

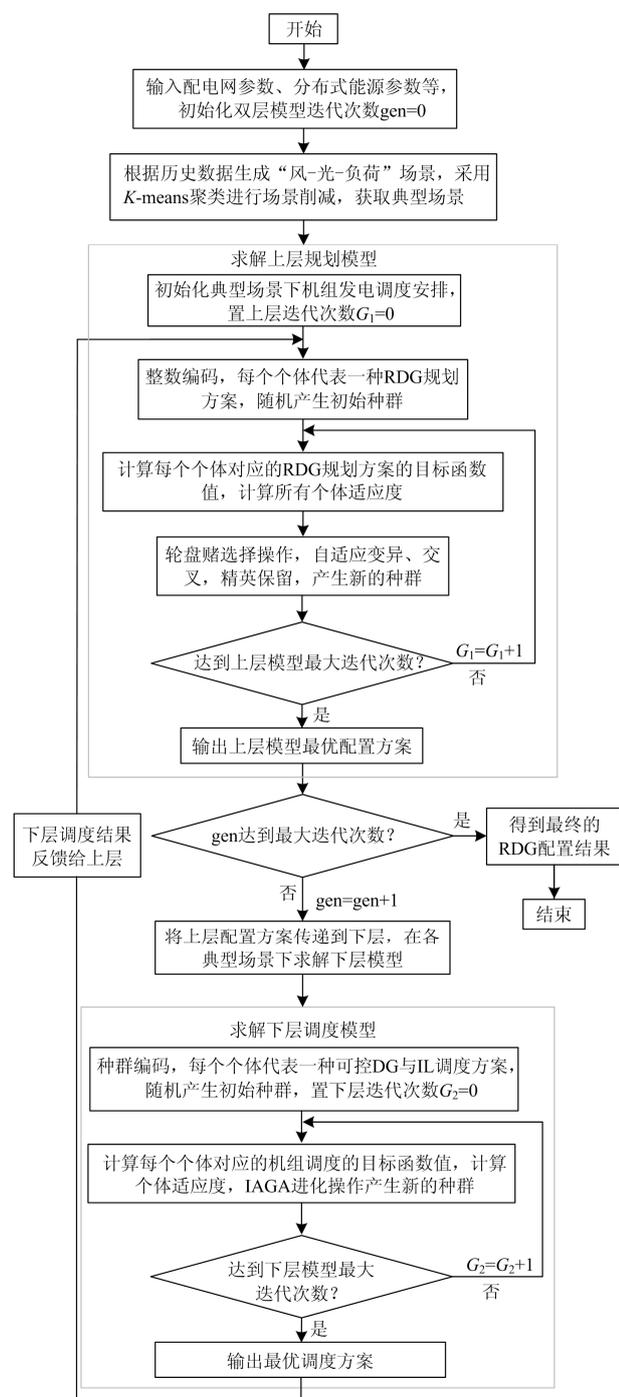


图 2 双层优化流程

Fig. 2 Flowchart of bi-level optimization model

## 3 算例分析

本文结合 IEEE-33 节点配电系统算例进行配电网双层优化，IEEE-33 节点系统如图 3 所示，系统

参数见参考文献[28]。风电安装候选节点为节点 13-18，光伏安装候选节点为节点 28-33，单个风电、光伏的接入容量不超过 500 kW。光伏额定光照强度取 1 000 W/m<sup>2</sup>，风电切入风速、额定风速、切出风速分别取 3 m/s、13.5 m/s、20 m/s。节点 7、24、25 处安装有额定容量为 500 kW 分布式柴油发电机组，IL 用户接在节点 8 和节点 25 处。双层模型最大迭代次数为 50 次，上下层模型内部采用 IAGA 算法，参数设置如下：最大迭代次数均为 100 次，种群规模均为 100。

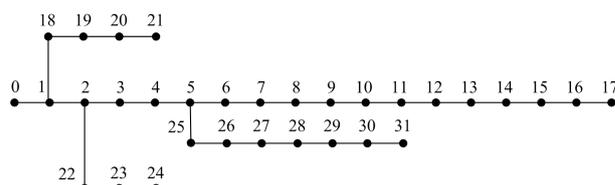


图 3 IEEE-33 节点配电系统

Fig. 3 IEEE33-bus distribution network

### 3.1 典型运行场景

规划地区 365×24 h 的风速、光照强度及常规负荷波动曲线如图 4 所示。

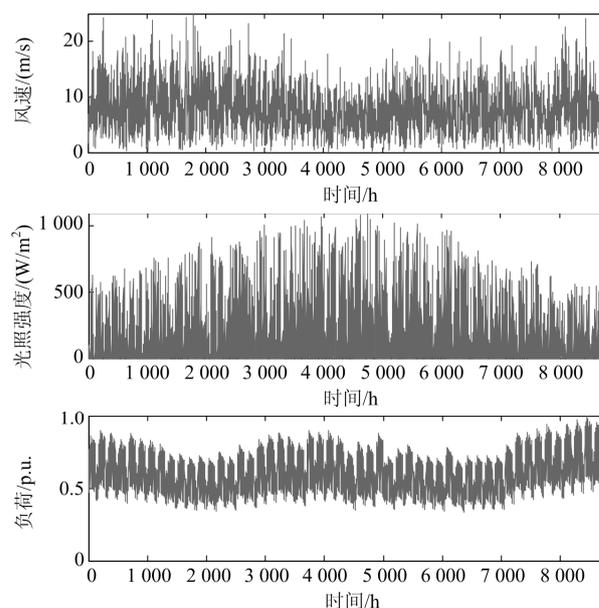


图 4 风速、光照强度及常规负荷年变化曲线

Fig. 4 Wind speed, light intensity and load curves

采用 *K-means* 聚类算法提取能够反映周期内风、光电源出力以及负荷变化特征的典型时序场景，根据 PFS 指标确定聚类数目，分析表 1 所示的各聚类数目对应的 PFS 值可知，当典型场景数取 4 时，PFS 最大。4 类典型场景的风、光出力以及负荷变化曲线如图 5 所示。

表 1 不同聚类数目的 PFS 值

Table 1 PFS of different clustering numbers

聚类数目	2	3	4	5	6	7
PFS	2.62	13.85	29.86	18.47	13.43	15.17
聚类数目	8	9	10	11	12	13
PFS	17.28	15.97	15.48	16.68	15.38	14.65

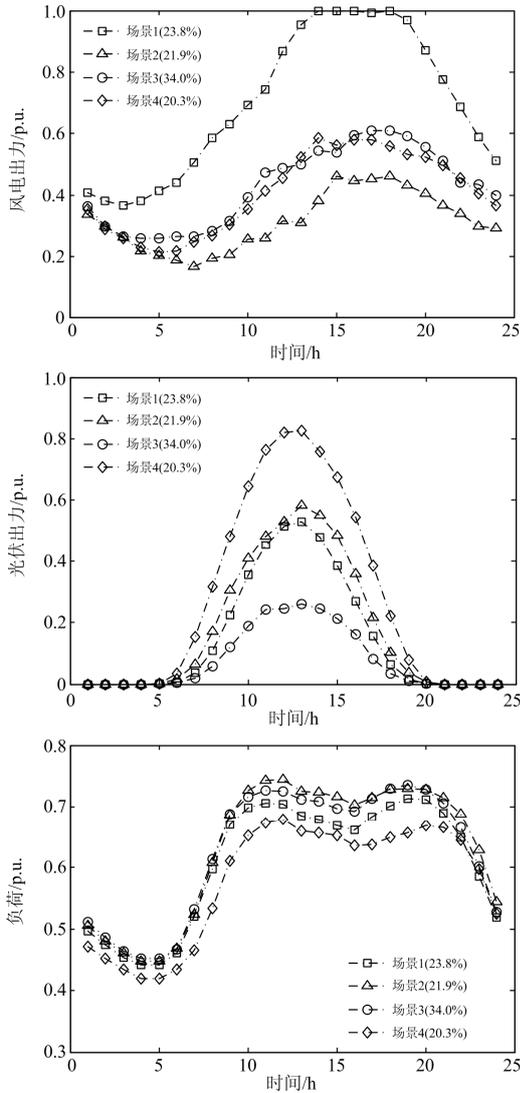


图 5 风速、光照强度及常规负荷典型场景

Fig. 5 Wind speed, light intensity and load scenarios

### 3.2 算法性能分析

采用传统 GA 算法和本文所提的 IAGA 算法在求解 RDG 优化问题上进行对比, 仿真得到的迭代收敛特性曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出, 传统 GA 算法在第 105 代出现了早熟的问题, 在第 208 代才最终达到收敛。而本文提出的 IAGA 改善了 GA 算法的全局搜索能力, 有助于算法快速找到最优解, 从图中可以看出 IAGA 算法在第 94 代就达到最优,

收敛速度和精度均优于传统 GA 算法。

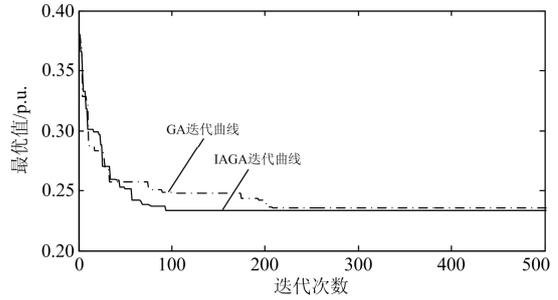


图 6 不同算法迭代收敛曲线对比

Fig. 6 Comparison of iterative convergence curves of different algorithms

### 3.3 优化结果分析

分别采用两种不同的模型对分布式可再生能源进行优化配置得到最优方案。

方案 1: 基于典型场景对分布式可再生能源进行优化配置, 未考虑可控 DG 以及 IL 调度安排。

方案 2: 基于典型场景并考虑可控 DG 和 IL 调度安排影响, 对分布式可再生能源进行优化配置。

两个不同方案的优化配置结果如表 2 所示, 优化配置方案中 13(10)表示在节点 13 装设 100 kW 容量的 RDG。

表 2 优化配置结果

Table 2 Optimization results

	优化配置结果	RDG 容量/MW
方案 1	13(2),14(3),15(4),16(16),17(14),18(16), 28(5),29(8),30(5),31(13),32(2),33(4)	0.92
方案 2	13(7),14(7),15(6),16(14),18(21), 29(6),31(3),32(23),33(5)	0.92

以典型场景 1 为例, 在此场景下方案 1 的可控 DG 出力和 IL 切除量的优化调度结果如图 7 所示。而在方案 1 的模型中, 未考虑调度安排, 模型中可控 DG 与 IL 的出力都过于理想, 如图 7 中虚线所示。

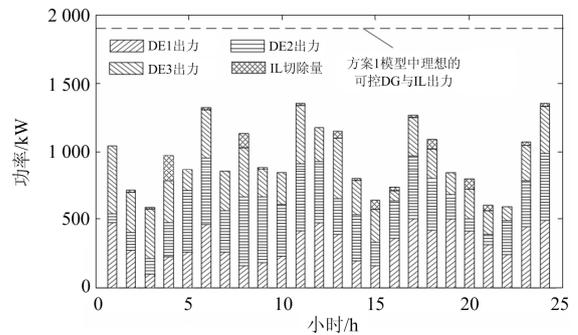


图 7 方案 1 配置下的优化调度结果

Fig. 7 Optimal scheduling results of scheme 1

场景 1 中, 方案 1 在实际调度安排下与理想情况下的目标函数对比如图 8 所示。由图 8 可知, 方案 1 模型未考虑机组调度安排, 计算得到的优化结果往往过于理想, 与实际存在一定出入。

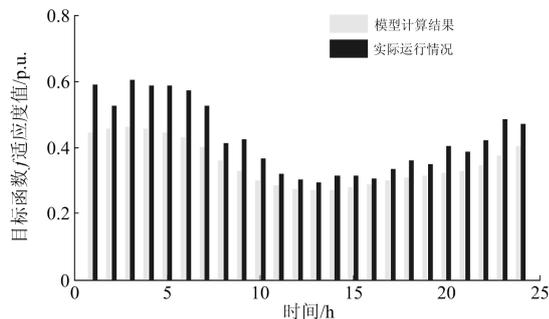


图 8 方案 1 实际运行结果与模型计算结果对比

Fig. 8 Comparison of model calculation results with actual operation

以场景 1 晚上 20 点时刻为例, 此时在两个方案配置条件下的节点电压情况如图 9 所示, 可以看出方案 2 对电压的支撑作用更加明显。对比两个方案在实际运行时的优化情况, 两个方案在场景 1 内 24 h 的优化效果对比如图 10 所示。对比可知, 无论

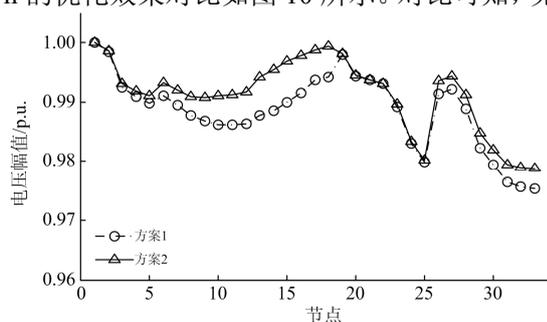


图 9 两方案在同一时刻的节点电压曲线

Fig. 9 Node voltage curve of the two schemes at the same moment

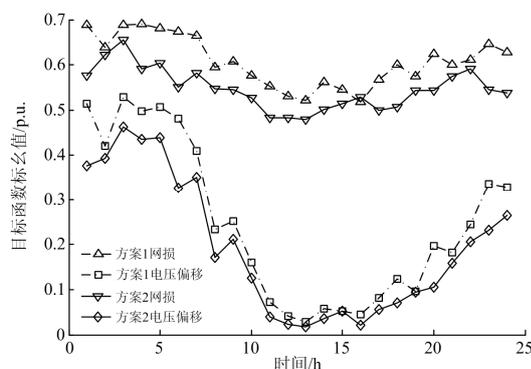


图 10 两方案优化效果对比

Fig. 10 Comparison of optimization effects of two schemes

是电压偏移方面还是系统网络损耗方面, 方案 2 在实际运行中都表现出了更好的优化效果。通过分析, 本文构建的双层模型考虑实际机组调度安排, 得到的最优方案在实际运行中具有更好的适用性。

## 4 结论

本文计及多种分布式电源, 通过构建典型场景对分布式可再生能源进行不确定性规划, 考虑实际运行时可控分布式电源和可中断负荷的调度安排, 建立配电网双层优化模型, 基于 IAGA 算法进行求解, 得出以下结论:

- 1) 通过  $K$ -means 聚类算法构建能够反映配电网实际运行状态的典型场景集, 在典型场景中判断方案运行参数, 可以兼顾配电网规划与运行。
- 2) 考虑配电网中可控分布式电源和可中断负荷的调度运行情况, 基于双层模型得到的最优方案更贴近实际, 在实际运行中能够获得更好的优化效果。

## 参考文献

- [1] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.  
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [2] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.  
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [3] 钟迪, 李启明, 周贤, 等. 多能互补能源综合利用关键技术研究现状及发展趋势[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 1-5, 55.  
ZHONG Di, LI Qiming, ZHOU Xian, et al. Research status and development trends for key technologies of multi-energy complementary comprehensive utilization system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 1-5, 55.
- [4] ZHANG C, LI J, ZHANG Y J A, et al. Optimal location planning of renewable distributed generation units in distribution networks: an analytical approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(3): 2742-2753.

- [5] 张勇军, 林晓明, 张紫珩, 等. 基于耐受渗透比的 10 kV 配电网分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 49-54.  
ZHANG Yongjun, LIN Xiaoming, ZHANG Ziheng, et al. Distributed generation planning of 10 kV distribution network based on tolerant permeability ratio[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 49-54.
- [6] IQBAL F, SIDDIQUI A S. Optimal configuration analysis for a campus microgrid—a case study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 245-256. DOI: 10.1186/s41601-017-0055-z.
- [7] 叶承晋, 黄民翔. 基于改进粒子群算法的分布式电源经济性最优规划[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 126-132.  
YE Chengjin, HUANG Minxiang. Distributed power optimally economical planning based on modified discrete particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 126-132.
- [8] 周文越, 吕飞鹏, 廖小君. 基于人工蜂群算法的分布式电源规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(5): 39-43.  
ZHOU Wenyue, LÜ Feipeng, LIAO Xiaojun. Optimal planning of distributed generation based on artificial bee colony algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(5): 39-43.
- [9] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.  
MA Xiufan, CUI Huanjun. An improved genetic algorithm for distribution network planning with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 175-181.
- [10] YANG L, BO F, LI G, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution networks considering integration of energy storage[J]. Applied Energy, 2018, 210.
- [11] 彭显刚, 林利祥, 刘艺, 等. 计及电动汽车和可再生能源不确定因素的多目标分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2188-2194.  
PENG Xiangang, LIN Lixiang, LIU Yi, et al. Multi-objective optimal allocation of distributed generation considering uncertainties of plug-in electric vehicles and renewable energy sources[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2188-2194.
- [12] 江知瀚, 陈金富. 计及不确定性和多投资主体需求指标的分布式电源优化配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 34-42, 4.
- JIANG Zhihan, CHEN Jinfu. Optimal distributed generator allocation method considering uncertainties and requirements of different investment entities[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 34-42, 4.
- [13] 李斌, 吕林, 刘友波, 等. 考虑光伏接入不确定性的主动配电网有功-无功可控资源优化配置[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 355-365.  
LI Bin, LÜ Lin, LIU Youbo, et al. Optimal configuration of controllable active-reactive power resources in active distribution network considering photovoltaic access uncertainty[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 355-365.
- [14] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 间歇性分布式电源在主动配电网中的优化配置[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 45-51.  
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generator in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 45-51.
- [15] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 主动管理模式下分布式风电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 208-214.  
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Siting and sizing planning of distributed wind generators under active management mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 208-214.
- [16] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 58-63, 128.  
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 58-63, 128.
- [17] 石玉东, 刘晋源, 徐松, 等. 考虑时序特性的配电网风-光-储随机规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 23-32.  
HI Yudong, LIU Jinyuan, XU Song, et al. Integrated wind-photovoltaic-storage stochastic planning model considering time-varying characteristics in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 23-32.
- [18] 徐雨田, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 主动管理模式下基于多场景分析的分布式电源规划[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(2): 38-46.  
XU Yutian, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Distributed generation planning considering active management based on multi-scene analysis[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(2): 38-46.

- [19] 吴丽珍, 蒋力波, 郝晓弘. 基于最优场景生成算法的主动配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 152-159.  
WU Lizhen, JIANG Libo, HAO Xiaohong. Reactive power optimization of active distribution network based on optimal scenario generation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 152-159.
- [20] 彭春华, 于蓉, 孙惠娟. 基于 K-均值聚类多场景时序特性分析的分布式电源多目标规划[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 58-65.  
PENG Chunhua, YU Rong, SUN Huijuan. Multi-objective DG planning based on K-means clustering and multi-scenario timing characteristics analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 58-65.
- [21] 丁明, 解蛟龙, 刘新宇, 等. 面向风电接纳能力评价的风资源/负荷典型场景集生成方法与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4064-4072.  
DING Ming, XIE Jiaolong, LIU Xinyu, et al. The generation method and application of wind resources/load typical scenario set for evaluation of wind power grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4064-4072.
- [22] 郭金明, 李欣然, 邓威, 等. 基于 2 层规划的间歇性分布式电源及无功补偿综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 25-33, 6.  
GUO Jinming, LI Xinran, DENG Wei, et al. Comprehensive optimal allocation of intermittent distributed generation and reactive power compensation based on bilevel planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 25-33, 6.
- [23] ASENSIO M, MUNOZ-DELGADO G, CONTRERAS J. A bi-level approach to distribution network and renewable energy expansion planning considering demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4298-4309.
- [24] 唐权, 胥威汀, 叶希, 等. 考虑聚合商参与的配电网分布式储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 83-92.  
TANG Quan, XU Weiting, YE Xi, et al. Optimized configuration of distributed energy storage system in distribution network considering the participation of aggregators[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 83-92.
- [25] 张永斌, 聂明林, 张俊鹏, 等. 考虑分布式电源不确定性的配电网网架模糊规划[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 258-263.  
ZHANG Yongbin, NIE Minglin, ZHANG Junpeng, et al. Grid fuzzy planning of the distribution network with distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 258-263.
- [26] 徐岩, 郅静. 基于改进自适应遗传算法的 PMU 优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 55-62.  
XU Yan, ZHI Jing. Optimal PMU configuration based on improved adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 55-62.
- [27] 孙宇贞, 李朵朵, 张婷, 等. 信息熵改进免疫遗传算法在火电厂主蒸汽温度控制系统中应用[J]. 热力发电, 2018, 47(8): 97-102.  
SUN Yuzhen, LI Duoduo, ZHANG Ting, et al. Application of immune genetic algorithm improved by information entropy in main steam temperature control system of thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(8): 97-102.
- [28] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.

收稿日期: 2019-10-11; 修回日期: 2019-11-23

作者简介:

宋倩芸(1991—), 女, 通信作者, 本科, 助理工程师, 研究方向为大电网规划与运行。E-mail: sqy911104@163.com

(编辑 张爱琴)