

DOI: 10.7667/PSPC151819

# 考虑时序特性和环境效益的多目标多类型分布式电源规划

马麟, 刘建鹏

(中国能源建设集团天津电力设计院有限公司, 天津 300400)

**摘要:** 通过分析多种类型分布式电源并网所带来的投资及收益情况, 提出了一种多类型分布式电源的选址定容规划方法。该方法考虑了负荷与分布式电源出力的时序特性以及分布式电源的环境效益, 在对日负荷序列和分布式电源日出力序列进行归类的基础上求取了典型日负荷序列和单位容量分布式电源的典型日出力序列。以分布式电源的位置、容量和类型为优化变量建立了数学规划模型并采用改进自适应遗传算法对模型进行求解。实际算例验证了所提出的方法及模型的可行性和有效性。

**关键词:** 时序特性; 环境效益; 多类型分布式电源; 选址定容; 典型日负荷序列; 典型日出力序列

## Multi-objective planning of multi-type distributed generation considering timing characteristics and environmental benefits

MA Lin, LIU Jianpeng

(China Energy Engineering Group Tianjin Electric Power Design Institute Co., Ltd., Tianjin 300400, China)

**Abstract:** A planning method for locating and sizing of multi-type distributed generation is proposed based on the analysis of the investment and income brought by many types of grid-connected distributed generation. This method analyzes the timing characteristics of load and distributed generation output and the environmental benefits of distributed generation. The typical daily load sequence and the typical daily output sequence of distributed generation per capacity are calculated on the basis of the classification of daily load sequence and daily output sequence of distributed generation. The mathematical planning model with the location, capacity and type of distributed generation as the optimization variables is established and the improved adaptive genetic algorithm is used to solve the model. Finally, a practical example is employed to verify the feasibility and effectiveness of the proposed method and model.

**Key words:** timing characteristics; environmental benefits; multi-type distributed generation; locating and sizing; typical daily load sequence; typical daily output sequence

## 0 引言

能源危机和环境污染的日益严重推动了分布式发电技术的迅速发展。据文献报道, 2010年之前全球累计新增发电容量的25%~30%为分布式发电<sup>[1-2]</sup>。由于分布式电源的出力一般具有随机性和间歇性的特点, 它们的大量接入会给配电网带来一系列的影响<sup>[3-5]</sup>, 因此实际电网一般同时接入多种类型的分布式电源进行互补发电以弥补各自独立发电的不足<sup>[6-8]</sup>, 这便涉及到多类型分布式电源的选址定容规划问题。要准确地描述这一问题, 就必须在规划模型中考虑分布式电源出力的时序特性, 只有这样才能真实反映配电网的各项经济技术指标以实现资源的优化配置。

分布式电源通常是指功率为数千瓦至50 MW的小型模块式、分布在负荷附近、与环境兼容的独立电源<sup>[9-10]</sup>, 这一新型能源因具有灵活、高效、环保等多项优点而日益成为传统电网的重要补充, 并最终将代替一些效率低下、污染严重的传统发电方式<sup>[11]</sup>。然而分布式电源的环境价值至今未能得到很好的体现, 主要原因是我国发电公司的发电成本并未将环境成本考虑在内, 这样一来, 常规燃煤电厂发展迅速而清洁能源的开发利用受到了限制<sup>[12]</sup>。因此, 分布式电源的规划问题不可避免地要考虑环境效益, 这样才能更加客观地评价分布式电源的价值, 从而使规划结果更加接近于实际。

目前, 有关分布式电源规划的文献正朝着考虑多因素、多目标的方向发展。文献[13]所建立的模

型考虑了购电成本、缺电成本、损耗成本以及延缓网络更新成本等因素。文献[14]考虑了负荷及分布式电源出力的时序特性, 在分析多场景的基础上建立了包含电能损耗和可靠性的多目标优化模型。文献[15]通过计算等效微增率确定分布式电源的最优安装位置, 建立了有功损耗、电压改善程度和环境改善程度等 3 个目标函数。文献[16]考虑了时序特性并以分布式电源投资费用、燃料费用、网络损耗费用和环境赔偿费用最小为目标函数, 建立了微网分布式电源选址定容的规划模型。但是模型对分布式电源的经济效益分析和环境效益分析尚不够全面, 且单目标优化方式不利于重点考察某一项或者几项指标对分布式电源规划的影响, 因此具有一定的局限性。

本文在考虑负荷及分布式电源出力的时序特性的基础上, 结合传统火电厂的发电成本, 通过综合分析分布式电源并网的净收益项目与净投资项目, 从降损、延迟线路升级、环保、节燃、电能交易与补贴以及分布式电源的固定投资与维护等 6 个方面出发, 建立了分布式电源选址、择类、定容的多目标优化模型, 并采用改进自适应遗传算法对实际系统算例进行分析来验证所提算法和模型的可行性和有效性。

## 1 原始数据的预处理

### 1.1 负荷及分布式电源出力的时序特性分析

负荷的时序特性主要与气象因素和日期类型有关<sup>[17-18]</sup>。气象因素包括温度、湿度和降水等, 它们对负荷时序特性的影响一般会随着季节的变化而变化。日期类型可分为工作日、双休日和节假日等, 对于工作日和双休日, 负荷变化一般具有周期性; 而对于国家法定节假日如元旦、春节、五一等, 负荷一般会呈现出与工作日和双休日明显不同的变化规律<sup>[19-20]</sup>。

分布式电源一般按照所消耗的能源是否可再生而分为两类<sup>[21]</sup>: 利用可再生能源的分布式电源和利用不可再生能源的分布式电源。前者以风电和光伏最为典型, 其出力的时序特性主要受季节类型的影响; 后者的出力一般具有可控性, 鉴于此, 它们经常被调度用作前者的补充以保证电网运行的稳定性。

### 1.2 配电网日负荷序列分类

由前文分析可知, 同一季节下的负荷及分布式电源出力一般具有一定的相似性。鉴于此, 为简化计算, 可先对配电网全年的日负荷序列进行分类, 然后以此为基础求得各负荷点负荷及各类型分布式电源出力的典型日变化序列。具体分类方法为: 首

先根据季节类型的不同将配电网的日负荷序列划分为春、夏、秋、冬四个大类, 然后针对每个大类, 采用系统聚类法将配电网的日负荷序列分为若干个小类, 小类的个数可根据聚类谱系图及经验确定, 各负荷点的日负荷序列及各类型分布式电源的日出序列则按照每个小类所对应的日期进行划分。配电网日负荷序列的分类方法如图 1 所示。

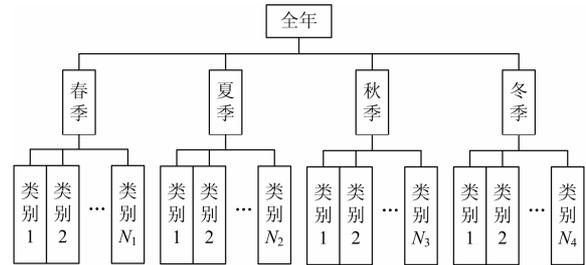


图 1 配电网日负荷序列的分类示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the classification of daily load sequences of distribution network

### 1.3 典型日负荷序列计算

将一定条数的日负荷序列进行平均化即可得到典型日负荷序列。

$$F_i = \frac{1}{n_1} \sum_{j=1}^{n_1} f_{ji} (i=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中:  $F_i$  为典型日负荷序列上的第  $i$  个数据点;  $n_1$  为日负荷序列的总条数;  $f_{ji}$  为第  $j$  条日负荷序列上的第  $i$  个数据点;  $m$  为日负荷序列上数据点的总个数。

### 1.4 单位容量分布式电源典型日出序列计算

将一定条数的分布式电源日出序列进行平均化、单位化即可得到单位容量分布式电源典型日出序列。

$$H_i = \frac{1}{sn_d} \sum_{j=1}^{n_d} h_{ji} (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中:  $H_i$  为典型日出序列上的第  $i$  个数据点;  $s$  为分布式电源的容量;  $n_d$  为日出序列的总条数;  $h_{ji}$  为第  $j$  条日出序列上的第  $i$  个数据点;  $n$  为日出序列上数据点的总个数。

## 2 多目标多类型分布式电源的规划模型

### 2.1 目标函数

本文的目标函数由并网分布式电源所带来的净收益项目与净投资项目构成, 主要致力于使分布式电源的净收益最大并衡量净收益额的大小, 而非简单地使某些指标(如网损、成本等)最小。这样不仅有利于定量描述分布式电源并网所产生的经济效益, 而且有利于重点考察某一项或者几项指标对分布式电源规划的影响, 从而使不同的利益集团能够

根据自己所关心的指标对分布式电源的规划方案进行决策。涉及到的净收益项目有降损、延迟线路升级、环保、节燃、电能交易与补贴等，净投资项目为分布式电源的固定投资与维护。

#### 1) 降损。

$$C_{\text{Loss}} = c_1 \sum_{k=1}^{N_S} d_k \sum_{i=1}^{N_T} t_i \sum_{l=1}^{N_L} (I_{kil}^2 - I_{kil}^2) R_l \quad (3)$$

式中： $C_{\text{Loss}}$  为分布式电源的全年累计降损收益； $c_1$  为损耗电价； $N_S$  为典型日负荷序列的条数； $d_k$  为第  $k$  条典型日负荷序列所包含的日负荷序列的条数； $N_T$  为典型日负荷序列所划分的时段数； $t_i$  为第  $i$  个时段的持续时间； $N_L$  为配网中支路的总条数； $I_{kil}$  和  $I_{kil}$  分别为接入分布式电源前后第  $k$  条典型日负荷序列、第  $i$  个时段、第  $l$  条支路上的电流； $R_l$  为第  $l$  条支路的电阻。

#### 2) 延迟线路升级。

$$C_{\text{Up}} = \sum_{i=1}^{N_L} e_i \left( \frac{r(1+r)^{n_{li}}}{(1+r)^{n_{li}} - 1} - \frac{r(1+r)^{n_{2i}}}{(1+r)^{n_{2i}} - 1} \right) C_{Li} \quad (4)$$

式中： $C_{\text{Up}}$  为分布式电源每年因延迟线路升级而产生的收益； $e_i$  为 0-1 变量，0 表示第  $i$  条线路未被选中，1 表示被选中； $\frac{r(1+r)^{n_{li}}}{(1+r)^{n_{li}} - 1}$ 、 $\frac{r(1+r)^{n_{2i}}}{(1+r)^{n_{2i}} - 1}$  为第  $i$  条线路的投资回收系数， $r$  为固定年利率， $n_{li}$  为不接入分布式电源的情况下第  $i$  条线路从启用到升级所经过的年限， $n_{2i}$  为接入分布式电源的情况下第  $i$  条线路从启用到升级所经过的年限； $C_{Li}$  为第  $i$  条线路的固定投资。

#### 3) 环保。

一般来说，火力发电的污染物主要有  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、TSP、粉煤灰和炉渣等，分布式电源的开发利用能够有效地减少这些污染物的排放，从而在很大程度上提高环境质量。利用文献[22]中的原始数据可以计算出火力发电和常见的分布式发电生产单位电能各类污染物所造成的环境价值成本，如表 1 所示。

表 1 各类污染物的环境价值成本

Table 1 Costs of environmental values of various pollutants

| 元/MWh |               |               |               |      |      |       |      |
|-------|---------------|---------------|---------------|------|------|-------|------|
| 发电方式  | $\text{SO}_2$ | $\text{NO}_x$ | $\text{CO}_2$ | CO   | TSP  | 粉煤灰   | 炉渣   |
| 火电    | 41.47         | 23.04         | 27.42         | 0.09 | 0.32 | 47.52 | 1.08 |
| 风电    | 0             | 0             | 0             | 0    | 0    | 0     | 0    |
| 光伏    | 0             | 0             | 0             | 0    | 0    | 0     | 0    |
| 燃气轮机  | 0.01          | 9.92          | 17.69         | 0    | 0.10 | 0     | 0    |
| 燃料电池  | 0.01          | 7.75          | 13.82         | 0    | 0.08 | 0     | 0    |

分布式电源的环保收益可以表示为

$$C_{\text{Env}} = \sum_{a=1}^{N_D} Q_a \sum_{i=1}^{N_P} (C_{\text{FPi}} - C_{\text{DPi}}) \quad (5)$$

$$Q_a = \sum_{k=1}^{N_S} d_k \sum_{j=1}^{N_T} t_j P_{akj} \quad (6)$$

式中： $C_{\text{Env}}$  为分布式电源每年的环保净收益； $N_D$  为并网分布式电源的个数； $Q_a$  为第  $a$  个分布式电源的年发电量； $N_P$  为污染物的类数； $C_{\text{FPi}}$ 、 $C_{\text{DPi}}$  分别为火电厂、分布式电源第  $i$  种污染物的环境价值成本； $P_{akj}$  为第  $a$  个分布式电源在第  $k$  条典型日负荷序列、第  $j$  个时段的有功功率。

若仅从分布式电源所有者的利益出发，则分布式电源的所有者需向有关部门缴纳排污罚款，此时分布式电源的环境价值收益不在其所有者的收益范围之内，式(5)可重写为

$$C_{\text{Env}} = - \sum_{a=1}^{N_D} Q_a \sum_{i=1}^{N_P} D_{Pi} \quad (7)$$

式中， $D_{Pi}$  为第  $i$  种污染物的罚款标准。

#### 4) 节燃。

$$C_{\text{Fuel}} = \sum_{a=1}^{N_D} Q_a (C_F - C_{\text{Da}}) \quad (8)$$

式中： $C_{\text{Fuel}}$  为分布式电源每年的节燃净收益； $C_F$  为火电厂生产单位电能所消耗燃料的平均费用； $C_{\text{Da}}$  为第  $a$  个分布式电源生产单位电能所消耗燃料的平均费用，若无需消耗燃料则此项为零。

同样，若仅从分布式电源所有者的利益出发，则式(8)应重写为

$$C_{\text{Fuel}} = - \sum_{a=1}^{N_D} Q_a C_{\text{Da}} \quad (9)$$

#### 5) 电能交易与补贴。

仅从分布式电源所有者的利益出发时，此项存在，不考虑集团之间的利益关系时，此项不存在。

$$C_{\text{Sasb}} = (\alpha C_{\text{Buy}} + \beta C_{\text{Sal}} + C_{\text{Sub}}) \sum_{a=1}^{N_D} Q_a \quad (10)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (11)$$

式中： $C_{\text{Sasb}}$  为分布式电源所有者每年获得的电能交易与补贴收益； $C_{\text{Buy}}$  为购电电价； $C_{\text{Sal}}$  为售电电价； $C_{\text{Sub}}$  为补贴电价； $\alpha$ 、 $\beta$  分别为购电电量和售电电量的比例系数。

#### 6) 分布式电源的固定投资与维护。

$$C_{\text{DG}} = \sum_{i=1}^{N_D} \left( \frac{r(1+r)^{n_{Di}}}{(1+r)^{n_{Di}} - 1} V_{Di} + W_{Di} \right) \quad (12)$$

式中:  $C_{DG}$  为分布式电源折算到每年的固定投资与维护费用;  $\frac{r(1+r)^{n_{Di}}}{(1+r)^{n_{Di}}-1}$  为第  $i$  个分布式电源的投资

回收系数,  $n_{Di}$  为第  $i$  个分布式电源的经济使用年限;  $V_{Di}$  为第  $i$  个分布式电源的固定投资;  $W_{Di}$  为第  $i$  个分布式电源每年的维护费用。

综合以上分析, 本文的目标函数为

$$\max C = \lambda_1 C_{\text{Loss}} + \lambda_2 C_{\text{Up}} + \lambda_3 C_{\text{Env}} + \lambda_4 C_{\text{Fuel}} + \lambda_5 C_{\text{Sasb}} - \lambda_6 C_{\text{DG}} \quad (13)$$

式中, 各项指标的权重一般由分布式电源所有者根据自身需求取 1 或 0。但若相对于量化分布式电源的净收益额, 所有者更希望得到重点考虑某些指标影响的规划方案, 此时各项指标的权重可由所有者根据经验取其他值。

## 2.2 约束条件

本文的约束条件为

$$P_{Gi} + P_{Di} - P_{Li} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (14)$$

$$Q_{Gi} + Q_{Di} - Q_{Li} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (15)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (16)$$

$$P_{Di}^{\min} \leq P_{Di} \leq P_{Di}^{\max} \quad (17)$$

$$P_D^{\min} \leq \sum_{i=1}^{n_L} P_{Di} \leq P_D^{\max} \quad (18)$$

$$P_{Dk}^{\min} \leq \sum_{i=1}^{n_L} P_{Dki} \leq P_{Dk}^{\max} \quad (19)$$

$$k'_i \in T'_i \quad (20)$$

式中:  $P_{Gi}$ 、 $P_{Di}$  和  $P_{Li}$  分别表示节点  $i$  处发电机、分布式电源和负荷的有功功率;  $Q_{Gi}$ 、 $Q_{Di}$  和  $Q_{Li}$  分别表示节点  $i$  处发电机、分布式电源和负荷的无功功率;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别表示支路的电导和电纳;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  之间的功率角;  $U_i$ 、 $U_i^{\max}$ 、 $U_i^{\min}$  分别为节点  $i$  处的电压及其上下限;  $P_{Di}$ 、 $P_{Di}^{\max}$ 、 $P_{Di}^{\min}$  分别为节点  $i$  处允许接入分布式电源的有功功率及其上下限;  $P_D^{\max}$ 、 $P_D^{\min}$  分别为配电网中允许接入分布式电源有功功率的上下限;  $n_L$  为配电网中负荷点的数目;  $P_{Dki}$  为节点  $i$  处类型为编号为  $k$  的分布式电源的有功功率;  $P_{Dk}^{\max}$ 、 $P_{Dk}^{\min}$  分别为配电网中允许接入类型为编号为  $k$  的分布式电源有功功率的上下限;  $k'_i$  为节点  $i$  处分布式电源的类型编号;  $T'_i$  为节点  $i$  处允许接入的分布式电源类型编号的集合。

## 3 模型的求解

### 3.1 改进自适应遗传算法的应用

遗传算法是一种模拟生物进化的随机搜索优化算法, 无需目标函数满足连续、可微等苛刻条件, 已经被广泛应用于电力系统规划问题的研究中<sup>[23-24]</sup>。考虑到基本遗传算法存在收敛速度慢、稳定性差以及易造成早熟现象等问题, 本文模型的求解采用改进自适应遗传算法, 如下:

1) 染色体编码。为了便于分析, 本文假设分布式电源均位于负荷节点上, 算法中的染色体采用二进制编码, 每个负荷点所对应的二进制位串由分布式电源的类型和容量两部分构成。具体形式为

$$\phi = \{T_1 S_1, T_2 S_2, \dots, T_{n_L} S_{n_L}\} \quad (21)$$

式中:  $\phi$  为染色体;  $T_i S_i$  为负荷点  $i$  处分布式电源的类型和容量, 其中  $T$  代表类型,  $S$  代表容量。

2) 选择算子。采用最优保存策略, 即将上一代种群中的若干最优个体直接复制到本代。数学上可以证明此举能够保证算法以概率“1”收敛至全局最优解<sup>[25]</sup>。

3) 交叉算子。采用改进自适应交叉算子, 算法的交叉概率按式(22)进行自适应调整。

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{P_{c1} - P_{c2}}{f_{\max} - f_{\text{ave}}} (f_{\text{mor}} - f_{\text{ave}}) & f_{\text{mor}} \geq f_{\text{ave}} \\ P_{c1} & f_{\text{mor}} < f_{\text{ave}} \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $P_c$  为调整后的交叉概率;  $f_{\max}$  为群体中最大的适应度;  $f_{\text{ave}}$  为每代群体的平均适应度;  $f_{\text{mor}}$  为要交叉的两个个体中较大的适应度; 交叉概率选择为  $P_{c1}=0.9$ ,  $P_{c2}=0.4$ 。

4) 变异算子。采用改进自适应变异算子, 变异概率的自适应调整公式为

$$P_e = \begin{cases} P_{e1} - \frac{P_{e1} - P_{e2}}{f_{\max} - f_e} (f_{\max} - f_e) & f_e \geq f_{\text{ave}} \\ P_{e1} & f_e < f_{\text{ave}} \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $P_e$  为调整后的变异概率;  $f_e$  为要变异个体的适应度; 变异概率选择为  $P_{e1}=0.1$ ,  $P_{e2}=0.001$ 。

### 3.2 一般步骤

基于本文提出的方法, 多类型分布式电源规划的一般步骤可概括如下:

1) 各负荷点日负荷序列及各类型分布式电源日出力序列分类。将各负荷点全年的日负荷序列及各类型分布式电源的日出力序列按照前文所述方法划分为  $A$  个小类, 记录每个小类所包含的天数。

2) 典型日负荷序列计算。针对日负荷序列的每一个小类, 按照式(1)计算该小类的典型日负荷序

列。若用  $n_L$  表示配电网中负荷点的数目, 则计算结束后得到典型日负荷序列的总条数为  $An_L$ 。

3) 单位容量分布式电源典型日出力序列计算。针对分布式电源日出力序列的每一个小类, 按照式(2)计算单位容量分布式电源的典型日出力序列。如果用  $B$  表示待选分布式电源的类数, 则计算结束后得到单位容量分布式电源典型日出力序列的总条数为  $ABn_L$ 。

4) 分布式电源典型日出力序列计算。针对个体中的每一个负荷点, 按照分布式电源的类型和容量选择单位容量分布式电源的典型日出力序列并进行折算, 即可得到各个负荷点处分布式电源的典型日出力序列。

5) 潮流计算。将分布式电源典型日出力序列与典型日负荷序列进行叠加然后进行潮流计算并判断参数是否越限, 如果越限, 则个体的适应度直接取 0, 否则就按适应度函数进行计算。

6) 结果分析。重复步骤 4) 和步骤 5) 直到遗传代数达到预先设定的最大值, 则适应度最大的个体即为分布式电源规划模型的最优解, 它指明了每个负荷点应该接入分布式电源的类型和容量。

具体计算流程如图 2 所示。

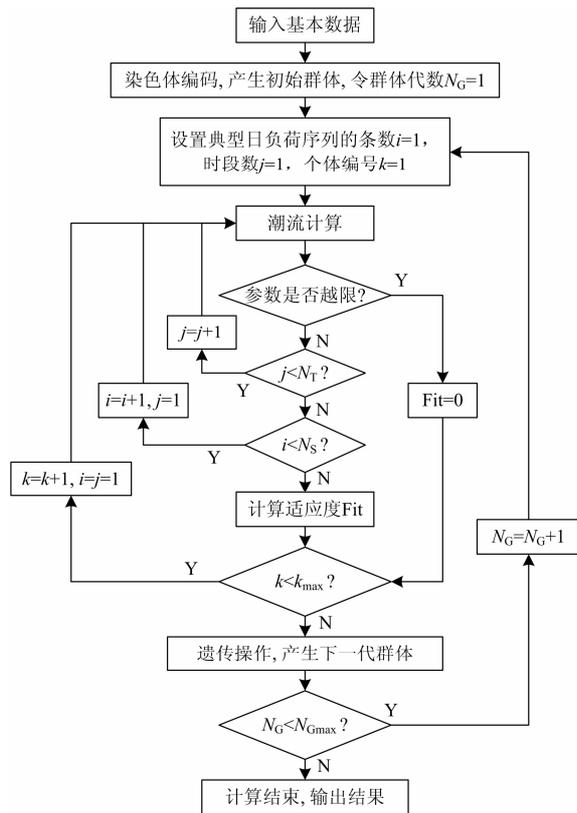


图 2 基于遗传算法的流程图

Fig. 2 Flow chart of algorithm based on GA

## 4 算例分析

### 4.1 测试系统概况

本文取某城市 10 kV 中压配电网的一部分进行多类型分布式电源规划, 该系统包含 26 个节点、13 条支路以及 12 台配电变压器, 其结构如图 3 所示。

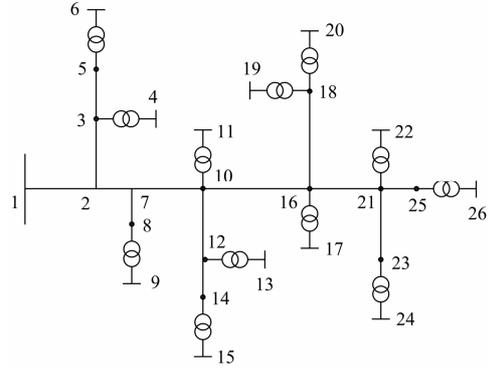


图 3 测试系统结构

Fig. 3 Test system structure

假设网络中所有的负荷节点均允许接入分布式电源, 待选类型为风电(Wind Power Generation, WG)、光伏(Photovoltaic Power Generation, PV)、微型燃气轮机(Micro Gas Turbine, MT)和燃料电池(Fuel Cell, FC), 待选容量为  $K \times 10$  kW ( $K=1, 2, \dots, 15$ ), 其他参数及取值见表 2。

表 2 算例中的参数及取值

Table 2 Parameters and values in calculation example

| 参数          | 取值          |
|-------------|-------------|
| WG 装机成本     | 7 000 元/kW  |
| PV 装机成本     | 10 000 元/kW |
| MT 装机成本     | 3 000 元/kW  |
| FC 装机成本     | 12 000 元/kW |
| 固定年利率       | 3%          |
| 负荷增长速率      | 1%          |
| 损耗电价        | 0.35 元/kWh  |
| 购电电价        | 0.35 元/kWh  |
| 售电电价        | 0.5 元/kWh   |
| 补贴电价        | 1.0 元/kWh   |
| 分布式电源功率因数   | 0.9         |
| 分布式电源经济使用年限 | 25 年        |

分布式电源的类型采用 2 位二进制编码, 00 表示 WG, 01 表示 PV, 10 表示 MT, 11 表示 FC, 每个负荷点处接入分布式电源的容量采用 4 位二进制编码。为了达到互补的效果并保证系统运行的稳定性, 本文限定每类分布式电源的最低接入容量为总接入容量的 10%, 总接入容量不超过系统总负荷的 10%。

## 4.2 原始数据处理

首先将配电网全年的日负荷序列分为春、夏、秋、冬 4 个大类, 如表 3 所示。

表 3 大类的划分方法

Table 3 Division method of large classes

| 大类编号 | 季节类型 | 涉及月份       |
|------|------|------------|
| 一    | 春季   | 3月、4月、5月   |
| 二    | 夏季   | 6月、7月、8月   |
| 三    | 秋季   | 9月、10月、11月 |
| 四    | 冬季   | 12月、1月、2月  |

然后用 SPSS 软件对每个大类的日负荷序列进行聚类。以第一大类为例, 谱系图如图 4 所示, 取定小类个数为 4, 则具体划分结果如表 4 所示。

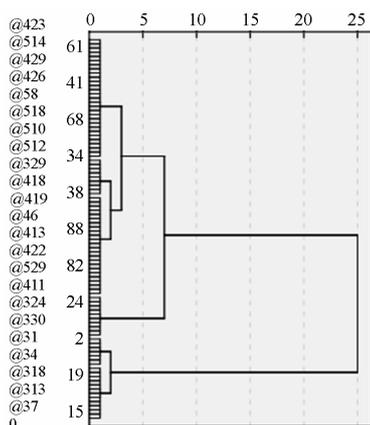


图 4 聚类谱系图

Fig. 4 Clustering pedigree chart

表 4 小类的划分结果

Table 4 Division result of small classes

| 小类编号 | 涉及日期   |
|------|--|
| 1    | 3/1, 3/2, 3/3, 3/4, 3/5, 3/6, 3/7, 3/8, 3/9, 3/10, 3/11, 3/12, 3/13, 3/14, 3/15, 3/16, 3/17, 3/18, 3/19, 3/20  |
| 2    | 3/21, 3/22, 3/23, 3/24, 3/25, 3/26, 3/27, 3/30, 3/31, 4/1  |
| 3    | 3/28, 3/29, 4/2, 4/3, 4/4, 4/5, 4/6, 4/7, 4/8, 4/9, 4/11, 4/12, 4/13, 4/14, 4/15, 4/16, 4/17, 4/18, 4/19, 4/20, 4/21, 4/22, 5/21, 5/22, 5/23, 5/24, 5/25, 5/26, 5/27, 5/28, 5/29, 5/30, 5/31 |
| 4    | 4/10, 4/23, 4/24, 4/25, 4/26, 4/27, 4/28, 4/29, 4/30, 5/1, 5/2, 5/3, 5/4, 5/5, 5/6, 5/7, 5/8, 5/9, 5/10, 5/11, 5/12, 5/13, 5/14, 5/15, 5/16, 5/17, 5/18, 5/19, 5/20                          |

## 4.3 不同优化方案分析

方案一：不考虑集团之间的利益关系。取  $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=\lambda_4=\lambda_6=1$ ,  $\lambda_5=0$ , 优化后可得分布式电源每

年所带来的最大净收益。利用本文的模型和算法得到的分布式电源优化方案如表 5 所示, 各项子目标的计算值如表 6 所示。

表 5 分布式电源的优化方案

Table 5 Optimization scheme of distributed generation

| 节点编号 | 接入容量/kW | 接入类型 |
|------|---------|------|
| 6    | 30      | PV   |
| 9    | 90      | MT   |
| 13   | 120     | WG   |
| 19   | 20      | PV   |
| 20   | 50      | FC   |
| 24   | 50      | WG   |
| 26   | 100     | MT   |

表 6 各项子目标的计算值

Table 6 Calculated value of each subgoals

| 目标函数        | 计算值/万元 |
|-------------|--------|
| 降损          | 2.83   |
| 延迟线路升级      | 1.95   |
| 环保          | 9.54   |
| 节燃          | 5.36   |
| 分布式电源的投资与维护 | 17.25  |
| 分布式电源的最大净收益 | 2.43   |

容易看出, 在接入容量上 MT 和 WG 之间的差距并不十分明显, 这说明环境成本和燃料费用在很大程度上淡化了 MT 的经济优势, 而 PV 和 FC 由于装机成本较高, 短时间内还难以得到广泛应用。另外, 由于不考虑集团之间的利益关系, 火力发电污染物的减排收益以及燃料消耗的缩减收益均属于分布式电源所带来的收益, 这些收益构成了分布式电源经济效益的主体, 从而使分布式电源盈利成为可能。可见, 不考虑集团之间的利益关系时, 分布式电源的经济效益得到了更为客观的体现。

方案二：仅考虑分布式电源所有者的利益。设分布式电源归供电公司所有, 根据供电公司的利益, 可令  $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=\lambda_4=\lambda_5=\lambda_6=1$ , 优化后可得供电公司每年的最大净收益。表 7 为优化后分布式电源的位置、容量和类型信息, 各项子目标的计算值如表 8 所示。

与方案 1 相比, 分布式电源总的接入容量略有减少而 MT 的接入容量略有增加, 这主要是因为 MT 的排污罚款远低于污染物的环境价值成本。此外, 如果没有国家补贴, 供电公司将出现亏损。这说明仅考虑分布式电源所有者的利益时, 分布式电源的经济效益未能很好地体现出来, 这也是分布式电源难以普及的原因之一。

表 7 分布式电源的优化结果

Table 7 Optimization result of distributed generation

| 节点编号 | 接入容量/kW | 接入类型 |
|------|---------|------|
| 4    | 30      | PV   |
| 6    | 60      | WG   |
| 9    | 40      | MT   |
| 15   | 30      | PV   |
| 19   | 70      | WG   |
| 20   | 110     | MT   |
| 24   | 50      | MT   |
| 26   | 50      | FC   |

表 8 各项子目标的计算值

Table 8 Calculated value of each subgoals

| 目标函数        | 计算值/万元 |
|-------------|--------|
| 降损          | 2.36   |
| 延迟线路升级      | 1.68   |
| 环保          | -1.18  |
| 节燃          | -16.93 |
| 售电与补贴       | 93.72  |
| 分布式电源的投资与维护 | 16.38  |
| 供电公司的最大净收益  | 63.27  |

此外，通过对比分析可以证明，时序特性和环境效益会对分布式电源的规划结果产生较大影响，准确衡量二者的影响作用有助于提高模型的计算精度，客观上能够使规划结果更加贴近实际。

#### 4.4 算法的收敛性分析

图 5 为本文算法求解方案一的过程，它反映了解的变化情况。由该图可知，遗传到 80 代左右时，计算结果稳定下来，显示了该算法良好的收敛性。

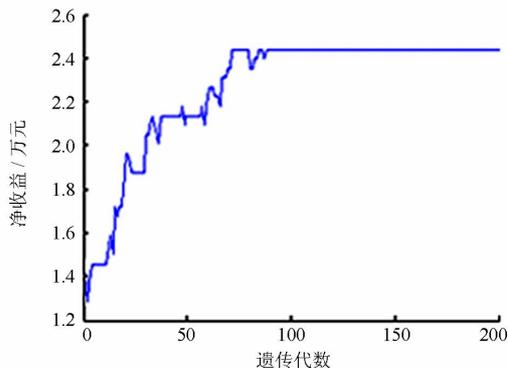


图 5 解的变化情况

Fig. 5 Solution changes with generation

## 5 结论

本文基于负荷及分布式电源出力的时序特性提出了一种多类型分布式电源规划方法。该方法详细分析了并网分布式电源所带来的净收益项目与净投

资项目，不仅适用于客观地衡量分布式电源的经济效益而且能够使不同的集团根据自身利益对分布式电源的规划方案进行决策。算例结果表明，该方法可行的、有效的，能够为分布式发电的规划设计提供重要的参考依据。

不考虑集团之间的利益关系时，分布式电源的经济效益能够得到最为客观的体现，此时分布式电源处于盈利状态；仅考虑分布式电源所有者的利益时，分布式电源的经济效益大部分被掩盖，分布式电源的所有者只能通过获取国家补贴来维持盈利状态。

当前形势下，并网分布式电源所带来的净收益并不十分乐观，然而随着分布式电源成本的降低以及常规能源价格的攀升，分布式发电的经济效益将会越来越显著。

## 参考文献

- [1] PARKER P. Integrating distributed resources into electric utility distribution systems[R]. California, EPRI PEAC Corporation, 2001.
- [2] 钱科军, 袁越, 石晓丹, 等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11-15.  
QIAN Kejun, YUAN Yue, SHI Xiaodan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 11-15.
- [3] TRAN K, VAZIRI M. Effects of dispersed generation (DG) on distribution systems[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, USA, 2005.
- [4] CHIRADEJA P, RAMAKUMAR R. An approach to quantify the technical benefits of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(4): 764-773.
- [5] 王旭强, 刘广一, 曾沅, 等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47-53.  
WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on the effects of Volt/Var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.
- [6] 董英瑞, 杨金明, 胡海平. 分布式风光互补发电系统协调控制的研究[J]. 电测与仪表, 2012, 49(554): 48-51.  
DONG Yingrui, YANG Jinming, HU Haiping. Coordination control of distributed wind-solar hybrid system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(554): 48-51.
- [7] 宋旭日, 叶林. 风/光/柴多能互补发电系统优化配置研究[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(5): 66-72.

- SONG Xuri, YE Lin. Optimization configuration of wind/solar/diesel hybrid power generation system[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(5): 66-72.
- [8] 付丽伟, 王守相, 张永武, 等. 多类型分布式电源在配电网中的优化配置[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 79-84.
- FU Liwei, WANG Shouxiang, ZHANG Yongwu, et al. Optimal selection and configuration of multi-types of distributed generators in distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 79-84.
- [9] 杨琦, 马世英, 宋云亭. 分布式电源规划方案综合评判方法[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 212-217.
- YANG Qi, MA Shiyong, SONG Yunting. Comprehensive evaluation of distributed generation planning scheme[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 212-217.
- [10] 张奇, 王官庆, 翟慧娟. 我国分布式电源的发展及综合效益指标体系分析[J]. 华东电力, 2012, 40(7): 1248-1251.
- ZHANG Qi, WANG Guanqing, ZHAI Huijuan. Index system for distributed generation development and comprehensive benefits in China[J]. East China Electric Power, 2012, 40(7): 1248-1251.
- [11] 胡骅, 吴汕, 夏翔, 等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源准入功率计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 13-19.
- HU Hua, WU Shan, XIA Xiang, et al. Computing the maximum penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 13-19.
- [12] 陆华, 周浩. 发电厂的环境成本分析[J]. 环境保护, 2004, 37(4): 51-54.
- LU Hua, ZHOU Hao. Environmental cost analysis of power plants[J]. Environmental Protection, 2004, 37(4): 51-54.
- [13] CELLI G, GHIANI E, MOCCI S, et al. A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 750-757.
- [14] 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.
- 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.
- [15] 郑漳华, 艾芊, 顾承红, 等. 考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 23-28.
- ZHENG Zhanghua, AI Qian, GU Chenghong, et al. Multiobjective allocation of distributed generation considering environmental factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 23-28.
- [16] 徐迅, 陈楷, 龙禹, 等. 考虑环境成本和时序特性的微网多类型分布式电源选址定容规划[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 914-921.
- XU Xun, CHEN Kai, LONG Yu, et al. Optimal site selection and capacity determination of multi-types of distributed generation in microgrid considering environment cost and timing characteristics[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 914-921.
- [17] 王新, 孟玲玲. 基于 EEMD-LSSVM 的超短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 61-66.
- WANG Xin, MENG Lingling. Ultra-short-term load forecasting based on EEMD-LSSVM[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 61-66.
- [18] 马哲, 舒勤. 基于 ESPRIT 分解算法的短期电力负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 90-96.
- MA Zhe, SHU Qin. Short term load forecasting based on ESPRIT integrated algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 90-96.
- [19] 林辉, 刘晶, 郝志峰, 等. 基于相似日负荷修正的节假日短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 47-51.
- LIN Hui, LIU Jing, HAO Zhifeng, et al. Short-term load forecasting for holidays based on the similar days' load modification[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 47-51.
- [20] 崔和瑞, 彭旭. 基于 ARIMAX 模型的夏季短期电力负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 108-114.
- CUI Herui, PENG Xu. Summer short-term load forecasting based on ARIMAX model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 108-114.
- [21] 唐亮. 分布式电源的分类及对配电网的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- TANG Liang. The class of DG and its influence of distribute network[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.
- [22] 随新鲜. 计及分布式电源的配电网的可靠性及其经济

性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.

SUI Xinxian. Reliability and its economic evaluation of distribution network considering DG[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.

[23] 张粒子, 舒隽, 林宪枢, 等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 5-8.

ZHANG Lizi, SHU Jun, LIN Xianshu, et al. Reactive power planning based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 5-8.

[24] 张李盈, 范明天. 配电网综合规划模型与算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 59-64.

ZHANG Liying, FAN Mingtian. A new model and methodology for distribution network integration planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 59-64.

[25] 丁明, 吴义纯. 基于改进遗传算法的风力-柴油联合发电系统扩展规划[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 23-27.

DING Ming, WU Yichun. Expansion planning of wind-diesel energy system based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 23-27.

---

收稿日期: 2015-10-15; 修回日期: 2016-04-11

作者简介:

马 麟(1979-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为智能配电网规划与设计; E-mail: lma126@126.com

刘建鹏(1988-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统运行与控制、新能源发电技术。E-mail: ljp5360@126.com

(编辑 周金梅)

## 电力电子技术专辑征文通知

近年来, 电力电子技术在电力系统中的应用越来越广, 已涉及电力系统的各个方面, 包括发电系统、输配电系统、储能系统等等。为了推动电力电子技术在电力系统的发展, 加强专家学者的深入交流, 促进先进科研成果的传播, 我刊特推出“电力电子技术专辑”, 拟在《电力系统保护与控制》杂志 2017 年 2 月发表。

欢迎国内外相关领域的专家学者踊跃投稿!

### 一、征稿范围

- 1) 高压直流输电技术
- 2) 柔性交流输电技术
- 3) 新能源发电技术
- 4) 电能质量治理技术
- 5) 电源与储能技术
- 6) 电力系统节能环保技术
- 7) 其他相关技术

### 二、投稿要求

- 1) 论文应重点突出, 结构合理, 字数以 6000 字左右为宜(包括图表)。
- 2) 论文能充分反映电力电子技术近年的发展形势, 有自己的理论创新或实际应用分析, 论点、论据及结论清晰明确。
- 3) 论文须未在国内外公开发行的期刊上发表过。
- 4) 投稿请用 Word 排版, 论文格式、摘要、作者信息等与《电力系统保护与控制》保持一致。
- 5) 投稿请注明“电力电子技术专辑”, 论文题目格式: “专题投稿+论文题目”, 投稿后来电确认。
- 6) 投稿网址: <http://www.dlbh.net>

### 三、征稿时间

征稿截止日期: 2016 年 11 月 30 日