

# 基于 $\alpha$ 约束支配排序混合进化算法的 微电网多目标优化运行

彭春华<sup>1</sup>, 黄 戡<sup>1</sup>, 袁义生<sup>1</sup>, 潘 蕾<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 东南大学 能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 为降低微电网运行成本和污染排放, 建立微电网多目标优化运行模型, 并提出一种新型的 $\alpha$ 约束支配排序混合进化算法求解模型, 该算法通过采用 $\alpha$ 约束支配排序机制, 将所有约束条件统一处理为 $\alpha$ 约束水平度, 并将其作为进化选择指标以控制所有个体快速转化为可行解, 可显著提高约束处理效率。提出一种基于非劣排序的混合多目标进化算法, 有效融合微分进化算法与分布估计算法各自的优点, 克服单一算法种群多样性不足和易早熟的缺陷。通过分类逼近理想解的排序方法实现多属性决策, 以获得最优折中解。某微电网算例结果表明所提算法有效、可行。

**关键词:** 微电网; 优化;  $\alpha$ 约束支配; 进化算法; 多属性决策; 模型

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.004

## 0 引言

随着节能减排的需求逐渐增强, 分布式发电 DG (Distributed Generation) 的利用率也逐渐增加, 由小容量分布式电源形成的微电网研究也逐渐深入<sup>[1-2]</sup>。微电网将微型燃气轮机、燃料电池、光伏电源和风力发电机等分布式电源通过电力电子接口等方式联合在一起, 为负荷端提供电能和热能。根据微电网与常规配电网的连接与否, 将其划分为并网、孤岛 2 种运行模式<sup>[3-4]</sup>。

微电网的经济运行与优化调度一直是国内外研究的热点, 微电网运行优化问题的研究中, 优化目标多种多样, 如电能质量等技术目标、运行成本等经济目标、排污成本等环境目标, 其中经济目标 and 环境目标是目前微电网运行所考虑的主要优化指标<sup>[5-7]</sup>, 鉴于微电网内基于化石燃料的分布式电源运行时会产生一定的碳排放, 且排放量与其出力密切相关, 同时基于国家“十二五”规划对低碳经济更为重视, 本文将以运行成本和 CO<sub>2</sub> 排放量最小化为目标构建微电网多目标优化运行模型。

微电网的多目标优化运行是一个复杂的带多种等式约束和不等式约束条件的多目标优化问题, 采

用多目标优化算法求解其帕累托(Pareto)最优解集是一种常用手段<sup>[8]</sup>。然而如何在优化算法中方便快捷地处理这些约束条件一直是各学者所致力研究的难题, 常用的约束处理方法有罚函数法及多目标法等<sup>[9-10]</sup>, 这些方法都存在不足之处。罚函数法为个体加入惩罚项, 将约束问题简化成无约束问题, 但惩罚项的设计多种多样, 很难找到一个确切方案; 多目标法将个体违反约束条件的程度作为优化指标, 增加了优化问题目标函数的个数, 计算更加复杂。随着约束条件数量的增加, 传统的约束处理方法复杂度也大幅增加。因此, 本文提出一种新型的 $\alpha$ 约束支配排序混合进化算法  $\alpha$ -CDSHEA ( $\alpha$ -Constraint Dominant Sorting Hybrid Evolution Algorithm), 可显著提高约束处理效率, 降低算法的复杂度。同时, 为有效利用种群的宏观分布信息和个体信息, 保持种群多样性, 提高算法的收敛性和寻优速度, 提出一种微分进化算法 DEA (Differential Evolution Algorithm) 以及分布估计算法 EDA (Estimation of Distribution Algorithm) 相融合的混合进化算法。最后, 通过分类逼近理想解的排序 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) 方法对算法得到的 Pareto 最优解集进行多目标决策, 以获得最优折中解。

本文将以一个含光伏 PV (PhotoVoltaic)、风机 WT (Wind Turbine)、微型燃气轮机 MT (Micro Turbine)、燃料电池 FC (Fuel Cell) 以及负荷的微电网为算例, 分别用  $\alpha$ -CDSHEA、采用常规罚函数约束处理方法的非劣排序微分进化算法 NSDEA (Non-dominated Sorting Differential Evolution Algorithm) 和动态加权遗传算法 (GA) 进行求解, 对比各自得到的 Pareto 最

收稿日期: 2014-08-10; 修回日期: 2015-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51167005, 51106024); 教育部人文社科青年基金资助项目 (14YJCZH135); 江西省科技支撑计划项目 (20142BBE50001); 江西省教育厅科技基金资助项目 (GJJ14386)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51167005, 51106024), Humanity & Social Science Youth Foundation of Ministry of Education (14YJCZH135), Science & Technology Pillar Program of Jiangxi Province (20142BBE50001) and Education Science Research Funds of Jiangxi Province (GJJ14386)

优前沿和运行时间,测试本文提出算法的有效性。

## 1 微电网运行数学模型

### 1.1 分布式电源模型

#### 1.1.1 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机运行时的耗量特性<sup>[11]</sup>可描述为:

$$V_{\text{MT}}(t) = \frac{P_{\text{MT}}(t) \Delta t}{\eta_{\text{MT}}(t) R_{\text{LHV}}} \quad (1)$$

其中, $P_{\text{MT}}(t)$ 为微型燃气轮机 $t$ 时刻的功率(kW); $\Delta t$ 为微型燃气轮机运行时间(h); $\eta_{\text{MT}}(t)$ 为微型燃气轮机 $t$ 时刻发电效率; $R_{\text{LHV}}$ 为天然气低位热值(kW·h/m<sup>3</sup>); $V_{\text{MT}}(t)$ 为 $\Delta t$ 运行时间内微型燃气轮机消耗的天然气量(m<sup>3</sup>)。

#### 1.1.2 燃料电池模型

燃料电池的耗能特性与微型燃气轮机类似<sup>[11]</sup>,可描述为:

$$V_{\text{FC}}(t) = \frac{P_{\text{FC}}(t) \Delta t}{\eta_{\text{FC}}(t) R_{\text{LHV}}} \quad (2)$$

式中各参数的意义参照式(1)。

光伏和风机的功率外特性模型分别参照文献[12]和文献[13]。

### 1.2 优化运行目标函数

#### 1.2.1 运行成本目标函数

运行成本目标函数 $F_1$ 包括投资折旧成本、运行维护成本、燃料成本以及微电网与外网的交互成本<sup>[14-15]</sup>:

$$F_1 = \sum_{t=1}^{24} (C_{\text{DP}}(t) + C_{\text{OM}}(t) + C_{\text{fuel}}(t) + C_{\text{grid}}(t)) \quad (3)$$

$$\begin{cases} C_{\text{DP}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{C}}} \left[ C_{\text{az},i} P_{iN} \frac{r(1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1} \right] \\ C_{\text{OM}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{C}}} K_{\text{OM},i} P_i(t) \\ C_{\text{fuel}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{C}}} C_{\text{F},i}(P_i(t)) \\ C_{\text{grid}}(t) = C_{\text{E}}(t) P_{\text{grid}}(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $C_{\text{DP}}(t)$ 、 $C_{\text{OM}}(t)$ 、 $C_{\text{fuel}}(t)$ 、 $C_{\text{grid}}(t)$ 分别为 $t$ 时刻各DG的投资折旧成本、运行维护成本、燃料成本以及微电网向外网的购电成本; $N_{\text{C}}$ 为系统DG总数; $C_{\text{az},i}$ 为第 $i$ 个DG的单位容量安装成本; $P_{iN}$ 为第 $i$ 个DG的装机容量; $r$ 为年利率; $n_i$ 为第 $i$ 个DG的使用寿命; $K_{\text{OM},i}$ 为第 $i$ 个DG的单位电量运行维护成本系数; $P_i(t)$ 为第 $i$ 个DG在 $t$ 时刻的有功输出; $f_i$ 为第 $i$ 个DG的燃料成本函数; $C_{\text{F}}$ 为天然气的价格; $C_{\text{E}}(t)$ 为 $t$ 时刻微电网向外网购电的实时电价; $P_{\text{grid}}(t)$ 为 $t$ 时刻微电网向外网的购电量。

#### 1.2.2 CO<sub>2</sub>排放量目标函数

CO<sub>2</sub>排放量目标函数 $F_2$ 为<sup>[16]</sup>:

$$F_2 = \sum_{t=1}^{24} \left( \sum_{i=1}^{N_{\text{C}}} k_i P_i(t) + k_{\text{grid}} P_{\text{grid}}(t) \right) \quad (5)$$

其中, $k_i$ 为第 $i$ 个DG的CO<sub>2</sub>排放系数; $k_{\text{grid}}$ 为配电网的CO<sub>2</sub>排放系数。

### 1.3 约束条件

#### a. 潮流方程约束:

$$P_{fs} = \sum_{g \in f} U_f U_g (G_{fg} \cos \theta_{fg} + B_{fg} \sin \theta_{fg}) \quad (6)$$

$$Q_{fs} = \sum_{g \in f} U_f U_g (G_{fg} \sin \theta_{fg} - B_{fg} \cos \theta_{fg}) \quad (7)$$

其中, $P_{fs}$ 、 $Q_{fs}$ 分别为节点 $f$ 的有功和无功注入量; $U_f$ 、 $U_g$ 分别为节点 $f$ 和 $g$ 的电压; $G_{fg}$ 、 $B_{fg}$ 、 $\theta_{fg}$ 分别为节点 $f$ 和 $g$ 之间的电导、电纳和相角差; $g \in f$ 为与节点 $f$ 相连的节点。

#### b. 功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{C}}} P_i(t) = P_{\text{d}}(t) + P_{\text{loss}}(t) \quad (8)$$

其中, $P_{\text{d}}(t)$ 为实时有功负荷; $P_{\text{loss}}(t)$ 为实时有功损耗。

#### c. 节点电压约束:

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (9)$$

其中, $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 $i$ 的最小、最大电压允许值; $N$ 为系统节点数。

#### d. 微电源的有功出力约束:

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad i=1, 2, \dots, N_{\text{C}} \quad (10)$$

其中, $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为第 $i$ 个DG有功功率的最小、最大值。

#### e. 微电网与外网允许交互的传输功率约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{grid},\max} \\ 0 \leq Q_{\text{grid}}(t) \leq Q_{\text{grid},\max} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $P_{\text{grid},\max}$ 、 $Q_{\text{grid},\max}$ 分别为微电网与外网允许交互的最大有功和无功功率。

#### f. CO<sub>2</sub>排放约束:

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{C}}} k_i P_i(t) \leq L_{\max} \quad (12)$$

其中, $L_{\max}$ 为该地区CO<sub>2</sub>允许排放的最大限值。

## 2 $\alpha$ -CDSHEA

### 2.1 $\alpha$ 约束支配排序

Takahama提出了 $\alpha$ 约束处理方法<sup>[17]</sup>, $\alpha$ 约束方法将种群个体符合约束条件的程度数值化,提出了约束水平度的概念。用 $\mu(x)$ 表示个体 $x$ 的约束水平度,且 $\mu(x) \in [0, 1]$ 。 $\mu(x)$ 越大表示个体 $x$ 属于可行解的概率越大,若 $\mu(x)=1$ ,则表示个体 $x$ 属于可行解。约束水平度 $\mu(x)$ 的值可由下式计算得出:

$$\mu_{h_i(x)}(x) = \begin{cases} 1 - |h_i(x)/b_i| & |h_i(x)| \leq b_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_{g_j(x)}(x) = \begin{cases} 1 & g_j(x) \leq 0 \\ 1 - g_j(x)/b_j & 0 \leq g_j(x) \leq b_j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $h_i(x)$ 、 $g_j(x)$ 分别表示个体的等式约束和不等

式约束值;  $b_i, b_j$  分别为种群中不可行解对应的等式约束和不等式约束的平均值。

在得到个体  $x$  对应各约束条件的约束水平度之后, 定义个体  $x$  的总约束水平度为:

$$\mu(x) = \min \{ \min_i [\mu_{h(x)}(x)], \min_j [\mu_{g_j(x)}(x)] \} \quad (15)$$

从而定义  $\alpha$  约束水平截集为:

$$A_\alpha = \{x | \mu(x) \geq \alpha, \alpha \in [0, 1]\} \quad (16)$$

对于个体  $x$ , 如果  $x \in A_\alpha$ , 则称之为满足  $\alpha$  约束的个体。

由此可定义如下的  $\alpha$  约束支配关系(用  $f_\alpha$  表示):

$$x f_\alpha y \Leftrightarrow \begin{cases} f(x) < f(y) & x, y \in A_\alpha, \mu(x) = \mu(y) \\ \mu(x) \geq \mu(y) & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中, 若个体  $x, y$  均满足  $\alpha$  约束, 即  $x, y \in A_\alpha$ , 或者个体  $x, y$  的  $\alpha$  约束水平度相等, 即  $\mu(x) = \mu(y)$ , 那么目标函数值  $f(x), f(y)$  决定它们之间的支配关系; 否则,  $\alpha$  约束水平度  $\mu(x), \mu(y)$  决定它们之间的支配关系。

式(16)中的约束判定量  $\alpha$  是一个时变量, 可表示为  $\alpha(T)$ , 它随着进化代数  $T$  在 0~1 之间逐渐增加。其初值  $\alpha(0)$  的大小由优化问题的可行域占全部搜索空间的比例决定, 比例越大,  $\alpha(0)$  可取的值越大。 $\alpha(T)$  可由下式计算得出:

$$\alpha(T) = (1 - \beta)\alpha(T-1) + \beta \quad (18)$$

其中,  $\beta$  为  $\alpha$  的控制参数,  $\beta \in [0, 1]$ , 根据文献[17], 本文取  $\beta = 0.03$ 。由式(18)可以看出, 在  $\beta$  的控制下,  $\alpha$  的值随着进化代数  $T$  增大逐渐增大到 1, 即  $\alpha$  约束条件越来越严格, 代表解集逐渐向可行域收敛。

将  $\alpha$  约束支配关系作为主选择排序机制并以传统的非劣排序方法[18]为辅助排序机制引入多目标优化算法。在算法种群进化过程中, 父代和子代种群按以下原则进行选择 and 种群更新操作。

**a.** 父代种群  $P(T)$  和子代种群  $P(T+1)$  构成集合  $Q(T)$ , 将  $Q(T)$  分成满足  $\alpha$  约束的子集  $Q_f$  和 不满足  $\alpha$  约束的子集  $Q_{inf}$ 。

**b.** 将  $Q_f$  中的个体进行  $\alpha$  约束支配排序分级, 同一级别的个体按非劣排序方法进行排序; 将  $Q_{inf}$  中的个体按  $\alpha$  约束水平度大小进行排序。

**c.** 将  $Q_{inf}$  中的个体按顺序排在  $Q_f$  中的个体之后更新集合  $Q(T)$ , 按照种群规模  $M$  在  $Q(T)$  中选择前  $M$  位的个体更新子代种群  $P(T+1)$ 。

设最优前沿的个体集合为  $B_{best}$  ( $B_{best}$  最终输出即为 Pareto 最优解集), 初始  $B_{best}$  为空集, 在产生初始种群并进行种群排序后, 将满足  $\alpha$  约束的个体储存其中。种群进化过程中, 考察  $Q_f$  中满足  $\alpha$  约束的全部个体  $x_i$  与  $B_{best}$  中的全部个体  $y_j$  之间的  $\alpha$  约束支配关系,  $B_{best}$  的更新操作按以下原则进行: 如果  $x_i$  被  $y_j$

支配,  $B_{best}$  集合不变; 如果  $x_i$  支配  $y_j$ , 则从  $B_{best}$  中删去  $y_j$  并加入  $x_i$ , 即  $B_{best} = (B_{best} - y_j) \cup x_i$ 。

$B_{best}$  的规模如果超过预定值, 则按非劣排序方法对其中个体进行排序, 删去排序靠后的个体以保持其规模恒定。

## 2.2 混合进化算法

文献[18]提出 NSDEA, 它是一种基于 DEA 的多目标优化算法。DEA 是一种非常优秀的进化优化算法, 具有结构简单、鲁棒性强、收敛性好、易于与其他进化算法混合等特点[19]。至今为止, DEA 已发展出多种进化策略[20]。本文采用的 DE/best/2/bin 策略简述如下。

### a. 变异。

在种群进化到第  $T$  代时, 通过下式变异产生新个体:

$$v_{i,T} = x_{best,T} + F(x_{r1,T} - x_{r2,T}) + F(x_{r3,T} - x_{r4,T}) \quad (19)$$

其中,  $v_{i,T}$  为变异得到的新个体;  $x_{best,T}$  为全局最优个体;  $F$  为缩放因子,  $F \in (0, 1)$ ;  $x_{r1,T}, x_{r2,T}, x_{r3,T}, x_{r4,T}$  为随机抽取的 4 个个体。

### b. 交叉。

进化群体  $X_{i,T+1}$  和变异之后的群体  $V_{i,T+1}$  通过下式进行交叉产生新个体:

$$u_{j,i,T+1} = \begin{cases} v_{j,i,T+1} & \text{rand}(0, 1) \leq \delta_{CR} \text{ 或 } j=k \\ x_{j,i,T+1} & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

其中,  $u_{j,i,T+1}$  为交叉位;  $k$  为随机整数;  $\text{rand}(0, 1)$  为随机产生的 0~1 之间的数;  $\delta_{CR}$  为交叉概率。

然而, 上述 DEA 在进化过程中, 种群会较快失去个体多样性而导致变异差分项趋于 0, 使得寻优停滞或陷入局部搜索。EDA 是一种基于统计学原理的新型进化算法[21], 不同于传统进化算法采用交叉、变异等进化手段, EDA 通过建立概率模型描述解集在搜索空间的分布信息, 然后采用随机采样从群体宏观角度进化产生子代, 能充分利用群体的智能信息, 具有较强的全局搜索能力。为此本文拟将 EDA 基于整个种群统计信息的宏观层面控制种群进化的模式与 DEA 基于个体变异、交叉的传统进化模式相融合, 提出一种混合进化算法, 可有效加强算法的种群多样性, 提高其收敛速度并防止早熟收敛。本文采用基于高斯分布建模的连续域 EDA, 其建模原理简述如下。

用一个概率向量  $p_T(x)$  来表示第  $T$  代种群的概率分布,  $p_T(x) = (p_T(x_1), p_T(x_2), \dots, p_T(x_M))$ 。从其中选择  $m$  个优势个体, 本文取  $m = M/2$ , 假设其满足以下高斯分布:

$$p_T(x) \sim \prod_{i=1}^M N(x_i; \mu_i^T; \sigma_i^T) = \prod_{i=1}^M \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} e^{-[(x_i - \mu_i)/\sigma_i]^2/2} \quad (21)$$

其中,  $N(x_i; \mu_i^T; \sigma_i^T)$  为关于  $x_i, \mu_i^T, \sigma_i^T$  的高斯分布。各代

的均值  $\mu_i$  和方差  $\sigma_i^2$  估计如下:

$$\begin{cases} \hat{\mu}_i = \frac{1}{m} \sum_{s=1}^m x_{i,s}^T \\ \sigma_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{s=1}^m (x_{i,s}^T - \hat{\mu}_i)^2 \end{cases} \quad (22)$$

其中,  $x_{i,1}^T, x_{i,2}^T, \dots, x_{i,m}^T$  为第  $T$  代种群的  $m$  个优势个体。

### 3 算法求解步骤

#### 3.1 Pareto 最优解集

本文提出的  $\alpha$ -CDSHEA 流程如图 1 所示。

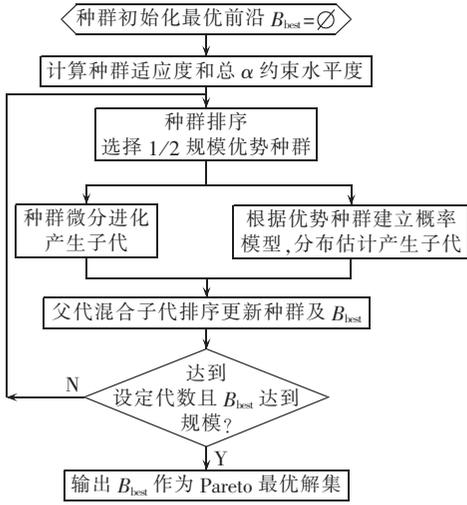


图 1 算法流程图

Fig.1 Flowchart of algorithm

综上所述,  $\alpha$ -CDSHEA 的 Pareto 最优解求解步骤如下。

**a. 种群初始化。** 进化代数  $T=0$ , 最优前沿  $B_{best} = \emptyset$ 。以一天 24 h 各时段的微型燃气轮机、燃料电池有功出力 and 微电网向电网的实时购电量为个体变量, 随机产生初始种群  $P(T)$ , 计算种群的适应度  $f$  和针对各约束条件的约束值  $[g_j(x) \ h_i(x)]$ , 然后计算个体的  $\alpha$  约束水平度进而得到个体的总  $\alpha$  约束水平度。

**b. 排序并选择优势个体。** 对种群进行  $\alpha$  约束支配排序和非劣支配排序, 选择前一半个体形成优势种群, 并更新最优前沿集合  $B_{best}$ 。

**c. 种群进化产生子代。** 根据优势种群建立概率分布模型, 分别用 DEA 和 EDA 进化产生子代种群  $P_1(T+1)$  和  $P_2(T+1)$ , 计算子代种群的适应度  $f$  和约束值  $[g_j(x) \ h_i(x)]$ , 并计算个体的  $\alpha$  约束水平度和总  $\alpha$  约束水平度。

**d. 选择和种群更新。** 依据 2.1 节中的操作原则更新种群  $P(T+1)$  和最优前沿集合  $B_{best}$ 。

**e. 判断。** 若达到进化代数要求且最优前沿集合  $B_{best}$  达到预定规模, 进入下一步; 否则  $T=T+1$ , 转步骤 **b**。

**f. 输出最优前沿集合  $B_{best}$  中的个体为最终的**

Pareto 最优解。

#### 3.2 最优折中解

为挑选最优折中解, 决策者需根据偏好对 Pareto 最优解集进行筛选排序。Hwang 和 Yoon 提出的 TOPSIS 方法<sup>[22]</sup>通过计算 Pareto 最优解集和理想解的距离, 使其与理想解距离最近, 并且与负理想解距离最远, 判断解集的优劣并排序。以  $r$  个目标、 $l$  个解为例, 其排序流程如下:

**a.** 对原始决策矩阵  $X = [x_{ij}]_{l \times r}$  进行向量规范化, 得到规范化决策矩阵  $Y = [y_{ij}]_{l \times r}$ ;

**b.** 构成加权规范化决策矩阵  $Z = [z_{ij}]_{l \times r}$ , 其中  $z_{ij} = \tau_j y_{ij}$ ,  $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_r]^T$  为决策者给定的加权向量;

**c.** 确定正理想解  $Z^+$  和负理想解  $Z^-$ ;

**d.** 计算各个解到正理想点的距离  $d_i^+$  和到负理想点的距离  $d_i^-$ ;

**e.** 计算各个解的综合评价指数  $c_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}$ , 进而排序。

其中的加权向量  $\tau$  可采用客观赋权的变异系数法<sup>[23]</sup>确定, 其流程如下: 计算各目标的均值  $\bar{y}_j = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l y_{ij}$

和方差  $S_j^2 = \frac{1}{l-1} \sum_{i=1}^l (y_{ij} - \bar{y}_j)^2$ ; 计算各目标的变异系数  $V_j = S_j / \bar{y}_j$ ; 将变异系数归一化, 可得各目标的加权系数  $\tau_j = V_j / \sum_{i=1}^r V_i$ 。

### 4 算例分析

#### 4.1 微电网结构与参数

本文以一个含光伏发电、风力发电、微型燃气轮机、燃料电池 4 种微源的微电网系统为例<sup>[24]</sup>, 如图 2 所示, 馈线  $L_1$  为民用负荷 (功率因数为 0.85), 馈线  $L_2$ 、 $L_3$  分别为工业负荷和商业负荷 (功率因数为 0.90)。

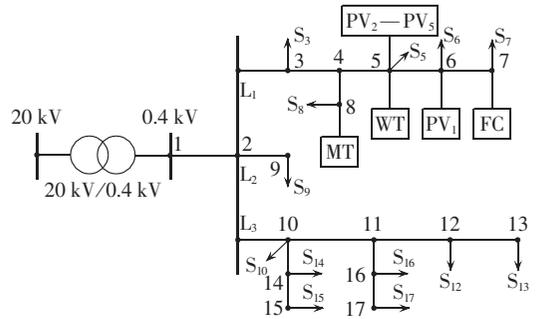


图 2 微电网结构图

Fig.2 Structure of microgrid

本文作如下假设: 在单位时间间隔内, 各微源的有功和无功出力恒定、负荷需求恒定、微电网与主网间的交互功率恒定且交互电价维持恒定。本文取单位时间间隔为 1 h。

微电网中各线路参数以及各节点最大负荷如表 1 所示,表中  $R$ 、 $X$  和  $S_{\max}$  分别为线路电阻、电抗和末节点最大负荷。实时的民用负荷、工业负荷、商业负荷占节点最大负荷的百分比如图 3 所示。微电网与外网允许传输的最大有功和无功功率分别设为 75 kW 和 46.48 kvar(传输线功率因数 0.85),实时电价见文献[25],天然气价格为 3 元/ $\text{m}^3$ ,各 DG 的运行成本系数、 $\text{CO}_2$  的排放系数以及某地区  $\text{CO}_2$  的排放限值见文献[26],微电网中各 DG 的参数见表 2。

表 1 微电网参数

Table 1 Parameters of microgrid

首节点	末节点	$R/\Omega$	$X/\Omega$	$S_{\max}/(\text{kV}\cdot\text{A})$
1	2	0.000 16	0.000 16	0
2	3	0.000 16	0.000 16	5.7
3	4	0.020 00	0.006 00	0
4	5	0.020 00	0.006 00	25.0
5	6	0.020 00	0.006 00	5.7
6	7	0.020 00	0.006 00	25.0
4	8	0.035 00	0.007 00	57.0
2	9	0.053 00	0.014 00	70.0
2	10	0.012 00	0.008 00	16.5
10	11	0.024 00	0.017 00	0
11	12	0.034 00	0.009 00	13.8
12	13	0.034 00	0.009 00	11.0
10	14	0.017 00	0.009 00	13.8
14	15	0.017 00	0.009 00	4.4
11	16	0.037 00	0.010 00	8.8
16	17	0.037 00	0.010 00	4.4

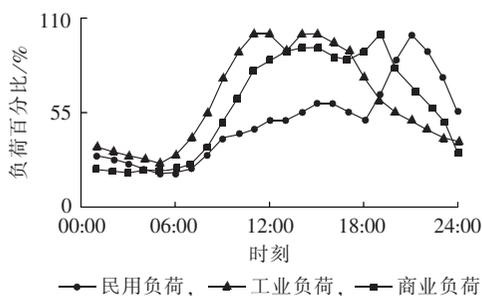


图 3 实时负荷曲线

Fig.3 Real-time load curve

表 2 各分布式电源参数

Table 2 Parameters of different distributed power sources

DG	单位造价/ (万元· $\text{kW}^{-1}$ )	寿命/a	功率上、 下限/ $\text{kW}$	容量/ $\text{kW}$
$\text{PV}_1$	2.0	20	12,0	12
$\text{PV}_2-\text{PV}_3$	2.0	20	10,0	10
WT	1.2	10	24,0	24
MT	1.0	10	65,15	65
FC	2.8	10	40,8	40

光伏和风机均为不可控的分布式电源,采用最大功率跟踪输出模型,且由于光伏、风机发电成本低和污染物排放率低,本文假设其为零运行成本、零排放。根据某日的光照和风力强度,假定光伏和风机的预测日小时出力如图 4 所示。

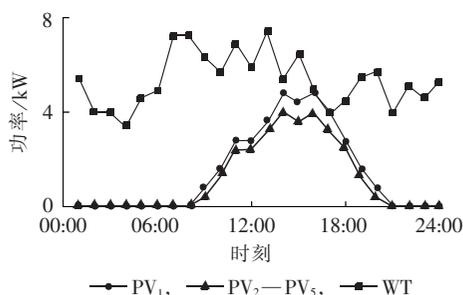


图 4 光伏发电、风力发电出力曲线

Fig.4 Output power of PV and WT

## 4.2 优化结果

为了证明本文算法在处理复杂约束多目标优化问题上的优越性,分别用  $\alpha$ -CDSHEA、采用常规罚函数约束处理方法的 NSDEA 以及动态加权遗传算法对本文算例进行求解,得到该日微电网运行成本和  $\text{CO}_2$  排放量的 Pareto 最优解集。3 种算法的种群规模均设为 100, $\alpha$ -CDSHEA 和 NSDEA 的微分进化缩放因子均为 0.85,交叉概率为 0.5, $\alpha$ -CDSHEA 的  $\alpha$  初值设为 0.5。本文中遗传算法直接调用现成的 MATLAB 遗传算法工具箱(GAOT)[27],由于该软件包不能直接求解多目标优化的 Pareto 前沿,为此需对双目标函数进行加权使之转化成单目标函数,鉴于加权值难以确定,可通过在 0~1 之间均匀取 100 个动态权重值构造动态加权遗传算法,以间接获得 Pareto 前沿。本文运行算法硬件环境的 CPU 为 Intel Core i5-3317 @ 1.70 GHz 1.70 GHz,仿真环境为 MATLAB R2013a。以上 3 种算法各自运行 100 代得到的优化曲线如图 5 所示,运行时间如表 3 所示。

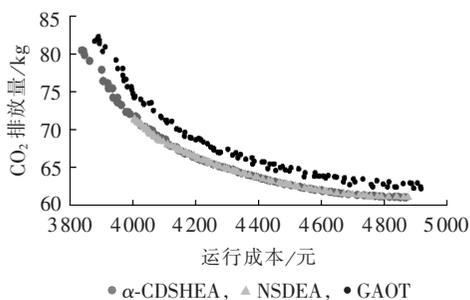


图 5 优化曲线对比

Fig.5 Comparison of optimization curve

表 3 算法运行时间对比

Table 3 Comparison of running time among algorithms

算法	运行时间/s
$\alpha$ -CDSHEA	171.967 556
NSDEA	172.254 344
GAOT	734.856 672

图 5 中曲线对比可以看出, $\alpha$ -CDSHEA 比采用常规罚函数约束处理方法的 NSDEA 最终得到的 Pareto 前沿分布更加均匀、解集更加全面。而采用

GAOT 通过动态加权函数优化得到的解集明显劣于  $\alpha$ -CDSHEA, 与真正的 Pareto 最优解集相差甚远。另外, 由于采用 GAOT 求解多目标优化问题需要不断动态改变权值进行单目标优化, 因此表 3 中 GAOT 运行时间远大于  $\alpha$ -CDSHEA 和 NSDEA。而  $\alpha$ -CDSHEA 所需要的运行求解时间略小于 NSDEA, 实际上由于  $\alpha$ -CDSHEA 是融合了 DEA 与 EDA 这 2 种不同算法机制的混合算法, 其理论运行时间应远大于 NSDEA, 但本文提出的约束处理方法有效降低了算法的复杂度, 导致最终运行时间略小。

为进一步比较  $\alpha$ -CDSHEA 和 NSDEA 在得到 Pareto 解集时在收敛速度上的优劣, 取各自运行 25 代时的优化曲线对比, 如图 6 所示。

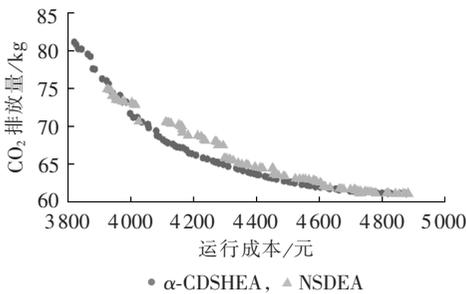


图 6 25 代时的优化曲线对比

Fig.6 Comparison of optimization curve at 25th generation

由图 6 可知, 运行至 25 代时,  $\alpha$ -CDSHEA 已基本收敛, 而 NSDEA 还远未达到收敛, 可见  $\alpha$ -CDSHEA 的收敛速度要高于 NSDEA, 说明引进  $\alpha$  约束处理方式和混合进化算法是有效、可行的。

经过对  $\alpha$ -CDSHEA 优化得到的 Pareto 前沿进行最终多目标决策优选, 可得到该日最终运行成本和  $\text{CO}_2$  排放量分别为 4 101.2 元和 68.236 8 kg, 对应的该日微型燃气轮机、燃料电池的有功出力及微电网系统与电网的交互购电优化结果如图 7 所示。

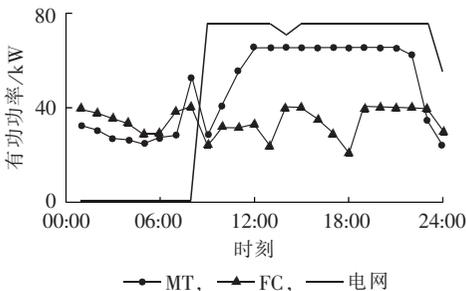


图 7 微型燃气轮机、燃料电池有功出力及从电网购电情况

Fig.7 Active power output of MT and FC, and power purchased from grid

为保证微电网的独立性, 当网内 DG 输出足够满足负荷需求时, 不向外网购电, 此时相当于孤岛运行; 当网内 DG 输出无法满足负荷需求时, 在允许传

输限值范围内向外网购电, 此时相当于并网运行。从图 7 中可以看出, 01:00—08:00 时微型燃气轮机和燃料电池的出力足够满足网内负荷安全有效运行, 不需要向外网购电; 09:00—14:00、16:00—19:00、22:00—24:00, 微型燃气轮机和燃料电池的出力满足不了网内负荷需求, 故需要向外网购电; 15:00、19:00—21:00, 微型燃气轮机、燃料电池的出力配合向外网购电仍然不能满足网内负荷需求, 存在有功缺额, 此时微型燃气轮机和燃料电池为最大功率输出, 向外网所购电量也达到传输上限, 此时为保证微电网安全有效运行, 应适当切除民用负荷。微电网的无功负荷也由微型燃气轮机和燃料电池共同负担, 并配合少量外网提供的无功出力。

## 5 结论

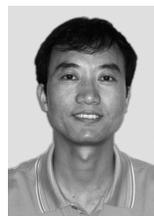
本文构建了以微电网运行成本和  $\text{CO}_2$  排放量最小为目标的优化模型。微电网多目标优化运行是一个复杂的带多种等式约束和不等式约束条件的多目标优化问题, 为了提高约束处理效率并改进算法提高其质量, 本文提出了  $\alpha$ -CDSHEA。以一个含光伏发电、风力发电、微型燃气轮机、燃料电池以及负荷的微电网为算例进行仿真分析, 分别用  $\alpha$ -CDSHEA、采用常规罚函数约束处理方法的 NSDEA 以及动态加权遗传算法进行优化得到其 Pareto 解集, 算例结果表明,  $\alpha$ -CDSHEA 在解集质量、收敛速度和运算时间上都明显优于另外两者, 能有效地处理复杂约束的多目标优化问题, 较好地验证了本文所建模型和求解算法的可行性和有效性。

## 参考文献:

- [1] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRANVANI R, et al. Micro grids [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [2] KATIRAEI F, IRAVANI M R. Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generations units [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1821-1831.
- [3] MARKVART T. Microgrids—power systems for the 21st Century [J]. Refocus, 2006, 7(4): 44-48.
- [4] 王鹤, 李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 19-23.  
WANG He, LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 19-23.
- [5] 邢龙, 张沛超, 方陈. 基于广义需求侧资源的微网运行优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 7-12.  
XING Long, ZHANG Peichao, FANG Chen. Optimization of the micro grid operation based on generalized demand side resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 7-12.
- [6] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 57-66.  
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Microgrid multi-objective economic dispatch optimization [J]. Proceedings of the CSEE,

- 2013,33(19):57-66.
- [7] 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. Multi-objective allocation of distributed generation considering environmental factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 23-28.
- [8] 洪博文,郭力,王成山,等. 微电网多目标动态优化调度模型与方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):100-107.  
HONG Bowen, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Model and method of dynamic multi-objective optimal dispatch for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 100-107.
- [9] WANG Y, CAI Z X, ZHOU Y R, et al. An adaptive tradeoff model for constrained evolutionary optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(1): 80-92.
- [10] VIEIRA D A G, ADRIANO R L S, VASCONCELOS J A, et al. Treating constraints as objectives in multi-objective optimization problems using niched pareto genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 1188-1191.
- [11] 李乐. 微网的经济运行研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.  
LI Le. Study of economic operation in microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [12] 崔明勇. 微网多目标优化运行及控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2011.  
CUI Mingyong. Study on multi-objective optimal operation and control strategy of microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [13] 王茜,张粒子. 采用 NSGA-II 混合智能算法的风电场多目标电网规划[J]. 中国电机工程学报,2011,31(19):17-24.  
WANG Qian, ZHANG Lizi. Multi-objective transmission planning associated with wind farms applying NSGA-II hybrid intelligent algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(19): 17-24.
- [14] 石庆均,江全元. 包含蓄电池储能的微网实时能量优化调度[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):76-82.  
SHI Qingjun, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch for microgrid with battery storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 76-82.
- [15] 张双乐,李鹏,陈超,等. 基于改进变尺度混沌优化算法的微网优化运行[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):70-74.  
ZHANG Shuangle, LI Peng, CHEN Chao, et al. Economic operation of microgrid based on improved mutative scale chaotic optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 70-74.
- [16] 薛贵挺,张焰,刘玉娇,等. 基于克隆选择算法的微电网多目标运行优化[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):16-21.  
XUE Guiting, ZHANG Yan, LIU Yujiao, et al. Multi-objective operation optimization based on clone selection algorithm for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 16-21.
- [17] TAKAHAMA T, SAKAI S. Constrained optimization by applying the  $\alpha$  constrained method to the nonlinear simplex method with mutations[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2005, 9(5): 437-451.
- [18] 彭春华,孙惠娟. 基于非劣排序微分进化的多目标优化发电调度[J]. 中国电机工程学报,2009,29(34):71-76.  
PENG Chunhua, SUN Huijuan. Multi-objective optimization power dispatch based on non-dominated sorting differential evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 71-76.
- [19] 彭春华,齐彦伟,陈首昆. 基于分层分区模型的分布式电源分布优化[J]. 华东交通大学学报,2013,30(2):85-89.  
PENG Chunhua, QI Yanwei, CHEN Shoukun. Distribution optimization of DGs in distribution networks based on hierarchical partitioning model[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2013, 30(2): 85-89.
- [20] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11: 341-359.
- [21] 周树德,孙增圻. 分布估计算法综述[J]. 自动化学报,2007,33(2):113-124.  
ZHOU Shude, SUN Zengqi. A survey on estimation of distribution algorithms[J]. Acta Automatic Sinica, 2007, 33(2): 113-124.
- [22] 李学斌. 火电厂厂级负荷分配的多目标优化和决策研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(35):102-107.  
LI Xuebin. Study of multi-objective optimization and multi-attribute decision making of economic load dispatch problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(35): 102-107.
- [23] 马辉. 综合评价系统中的客观赋权方法[J]. 合作经济与科技, 2009, 376: 50-51.  
MA Hui. Objective weighting method in the comprehensive evaluation system[J]. Co-Operative Economy & Science, 2009, 376: 50-51.
- [24] 汪少勇. 基于分布式电源的微网的设计与运行[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):120-123.  
WANG Shaoyong. Design and operation of micro-grid based on distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 120-123.
- [25] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报,2011,31(4):7-14.  
DING Ming, ZHANG Yingyuan, MAO Meiqin, et al. Economic operation optimization for microgrids including Na/S battery storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 7-14.
- [26] 杨佩佩,艾欣,崔明勇,等. 基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分析[J]. 电网技术,2009,33(20):38-42.  
YANG Peipei, AI Xin, CUI Mingyong, et al. Particle swarm optimization based economic operation analysis of microgrid containing multi energy supply system[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 38-42.
- [27] 施展武,罗云霞,邱家驹. 基于 Matlab 遗传算法工具箱的梯级水电站优化调度[J]. 电力自动化设备,2005,25(11):30-33.  
SHI Zhanwu, LUO Yunxia, QIU Jiaju. Optimal dispatch of cascaded hydropower stations using Matlab genetic algorithm toolbox[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(11): 30-33.

#### 作者简介:



彭春华

彭春华(1973—),男,江西乐平人,教授,博士,主要研究方向为微电网优化运行与控制、智能优化算法(E-mail: chinapch@163.com);

黄戡(1987—),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为微电网运行优化(E-mail: adamzorro@163.com);

袁义生(1974—),男,江西上高人,副教授,博士,主要从事电力电子技术方向的研究;

潘蕾(1971—),女,甘肃天水人,副教授,博士研究生导师,博士,研究方向为发电自适应控制及优化方法。

(下转第 37 页 continued on page 37)

## Distribution system reliability evaluation considering influence of intermittent renewable energy sources for microgrid

WANG Shao,TAN Wen,HUANG Han

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,  
Chongqing University,Chongqing 400044,China)

**Abstract:** Based on the Markov method,a multi-state power output model is built for a microgrid with intermittent renewable resources DG(Distributed Generation),energy storage device and multiple loads to analyze the influence of DG's intermittence on the power supply reliability,which considers different load importance levels. According to the power balance equation of microgrid in island mode and based on the built model,the bi-state power output model is built for each load point in microgrid,a method of reliability evaluation is proposed for the distribution network with microgrid,and the indices for evaluating the continuous power supply ability of micro power source are given. Case calculation verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method,showing that,the power supply probability for users in the microgrid is improved,the average user outage rate is deteriorated when the intermittence of DG is considered,and the rational capacity and maximum output power configuration of the energy storage device can relieve the impact of DG's intermittence on the continuous power supply ability.

**Key words:** microgrid; electric power distribution; distributed generation; intermittence; energy storage; Markov method; reliability; evaluation

(上接第 30 页 continued from page 30)

## Microgrid operation multi-objective optimization based on hybrid evolution algorithm with $\alpha$ -constraint dominant sorting

PENG Chunhua<sup>1</sup>,HUANG Kan<sup>1</sup>,YUAN Yisheng<sup>1</sup>,PAN Lei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical & Electronic Engineering,East China Jiaotong University,Nanchang 330013,China;

2. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education,  
Southeast University,Nanjing 210096,China)

**Abstract:** In order to reduce the operational cost and pollution emission,a multi-objective optimization model is built for microgrid and a hybrid evolution algorithm with  $\alpha$ -constraint dominant sorting is proposed to solve the model,which applies the  $\alpha$ -constraint dominant sorting mechanism to treat all constraints as the  $\alpha$ -constraint levelness and takes the levelness as the evolutionary selection index to quickly transform all individuals into the feasible solution,significantly improving the constraint processing efficiency. A hybrid multi-objective evolution algorithm with non-dominated sorting is proposed to effectively combine the advantages of the DEA(Differential Evolution Algorithm) and EDA(Estimation of Distribution Algorithm) for overcoming the defects of low species diversity and premature convergence of single algorithm. The similarity sorting method is adopted to approach the ideal solution for realizing the multi-attribute decision and obtaining the optimal compromise solution. Case study for a microgrid shows that the proposed algorithm is effective and feasible.

**Key words:** microgrid; optimization;  $\alpha$ -constraint domination; evolutionary algorithms; multi-attribute decision; models