

# 基于混沌二进制粒子群算法的独立微网系统的微电源组合优化

李 鹏<sup>1</sup>, 李 涛<sup>1</sup>, 张双乐<sup>2</sup>, 赵晓光<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 东营市供电公司, 山东 东营 257091; 3. 保定天威风电科技有限公司, 河北 保定 071051)

**摘要:** 建立了多目标多约束的独立微网系统优化运行数学模型, 以经济运行成本最小与系统网损最小构成多目标函数, 采用赋权的方式将多目标转化成单目标, 考虑功率平衡、电压越限、机组启停时间等约束条件, 并计及了微网中可控型微电源的启停控制策略。将二进制粒子群算法与混沌优化算法相结合求解模型。典型微网模型仿真结果验证了所提算法与模型的正确性, 采用所提方法可确保微网的优化经济运行。

**关键词:** 二进制粒子群; 混沌理论; 独立微网; 可控型微电源; 组合; 优化

**中图分类号:** TM 732

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.12.006

## 0 引言

微网是一种由负荷、微电源(分布式电源)和储能装置共同组成的有机系统。它可以有效地整合各种分布式电源, 充分发挥分布式电源所带来的经济效益和环境效益; 可以更好地满足用户对电能质量和供电可靠性更高的要求; 可以实现多种能源的梯级利用<sup>[1-7]</sup>。

微网的优化运行<sup>[8-12]</sup>是微网研究的重点和难点问题, 属于多约束、多目标问题, 一般采用智能优化算法来进行优化。

二进制粒子群算法具有结构简单、收敛速度快、对目标函数要求少等优点, 可以很好地解决机组组合优化的问题; 但是也存在“早熟”问题, 易陷入局部最优解<sup>[13-14]</sup>。混沌优化算法具有随机性、遍历性和内在规律性的特点, 但是算法的精度与寻优函数的复杂程度和寻优空间的大小有关。混沌二进制粒子群算法将二进制粒子群算法和混沌算法相结合, 利用混沌变量的遍历性和对初值敏感的特性, 可以有效地克服二进制粒子群算法的早熟问题<sup>[15-17]</sup>。

微电源可以分为输出功率完全可控和不完全可控 2 种类型, 根据微电源的类型不同, 采用的控制策略也不一样。光伏发电、风力发电等输出功率不完全可控的微电源一般采用最大功率点跟踪(MPPT)控制的方式, 不承担负荷波动和调整频率的任务。燃料电池、蓄电池等储能设备和燃气轮机、小型汽轮机输出功率完全可控的微电源<sup>[18-22]</sup>, 可以通过采用合理的控制策略相互配合完成频率调整的任务, 是

微网研究的重点和难点。

本文针对独立微网系统内可控型微电源的组合优化问题, 首次应用混沌二进制粒子群算法求解优化问题, 仿真结果证明了该方法的有效性和正确性。

## 1 独立微网系统模型

### 1.1 微网结构

本文采用简化的独立微网模型, 该微网共有 10 个节点, 具体结构如图 1 所示。微电源有微型燃气轮机(MTG)、柴油发电机(DEG)、燃料电池(FC)、光伏电池(PV)、风力发电(WT)。不同种类微电源具有不同的特性。

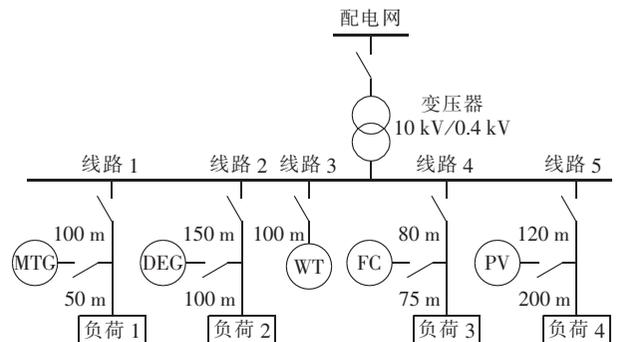


图 1 独立微网系统的结构图

Fig.1 Structure of standalone microgrid

光伏电池与风力发电机组的发电出力受气候环境影响较大, 具有波动性、随机性、间歇性, 属于输出功率不完全可控的微电源。因此, 本文采用 homer 软件对光伏电池和风力发电机组的发电出力进行预测, 并且将光伏电池与风力发电机组的预测发电出力作为“负”负荷, 与传统负荷相叠加得到广义负荷, 并将可控型微电源作为优化变量。

### 1.2 目标函数

独立微网系统的微电源组合优化是一个多目

收稿日期: 2013-06-14; 修回日期: 2013-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977029); 河北省自然科学基金资助项目(E2013502074)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50977029) and the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2013502074)

标、多约束条件的复杂优化问题。本文同时考虑了微网的经济成本最小和网损最小作为目标函数,其中经济成本主要考虑了燃料成本、运行维护成本、污染物排放折算成本和启停成本。赋予不同的子目标函数不同的权重,并进行线性加和,将多目标问题转化为微网系统综合成本最低的单目标优化问题,同时采用罚函数的方法对等约束条件进行处理,采用越限取限值的方法对不等式约束条件进行处理。

### 1.2.1 微网经济成本

#### (1) 启停成本。

微电源的启停需要一定的费用,表达式如下:

$$F_{OC}^t = U_i^t(1 - U_i^t)C_{si} \quad (1)$$

其中,  $F_{OC}^t$  为  $t$  时刻微网的启停成本;  $U_i^t$  为第  $i$  种微电源在  $t$  时刻的状态, 取值为 0 或 1, 1 表示开机状态, 0 表示停机状态;  $C_{si}$  为第  $i$  种微电源的启停成本。

#### (2) 燃料成本。

a. 微型燃气轮机的燃料成本与自身的工作效率有关, 表达式如下:

$$F_{MTC}^t = U_{MTC}^t \frac{C}{T_{LHV}} \frac{P_{MTC}^t}{\eta_{MTC}} \quad (2)$$

$$\eta_{MTC} = 0.0753 \left( \frac{P_{MTC}^t}{65} \right)^3 - 0.3095 \left( \frac{P_{MTC}^t}{65} \right)^2 + 0.4174 \frac{P_{MTC}^t}{65} + 0.1068 \quad (3)$$

其中,  $F_{MTC}^t$  为  $t$  时刻微型燃气轮机的燃料成本;  $C$  为燃气轮机采用的燃料气体的单价, 本文取 2 元/ $m^3$ ;  $T_{LHV}$  为天然气的低热热值, 本文中取 9.7 kW·h/ $m^3$ ;  $P_{MTC}^t$  为微型燃气轮机在  $t$  时刻的发电出力;  $\eta_{MTC}$  为燃气轮机的效率, 其大小与微型燃气轮机输出功率的大小有关<sup>[9]</sup>。

b. 柴油发电机的燃料成本就是它的耗量特性函数, 表达式如下<sup>[13]</sup>:

$$F_{DEG}^t = U_{DEG}^t [a + b P_{DEG}^t + c (P_{DEG}^t)^2] \quad (4)$$

其中, 参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的大小一般由生产厂家给定, 本文选取  $a=6$ ,  $b=0.012$ ,  $c=8.5 \times 10^{-4}$ 。

c. 燃料电池的燃料成本与其自身的工作效率有关。表达式如下:

$$F_{FC}^t = U_{FC}^t \frac{C}{T_{LHV}} \frac{P_{FC}^t}{\eta_{FC}} \quad (5)$$

$$\eta_{FC} = -0.0023 P_{FC}^t + 0.6735 \quad (6)$$

其中,  $F_{FC}^t$  为燃料电池在  $t$  时刻的燃料成本,  $P_{FC}^t$  为燃料电池在  $t$  时刻的发电出力,  $\eta_{FC}$  为燃料电池的效率<sup>[17]</sup>。

#### (3) 运行维护成本。

微电源的运行维护成本可以用微电源输出功率乘以相关的系数来表示, 表达式如下:

$$F_M^t = \sum_{i=1}^N k_i U_i^t P_i^t \quad (7)$$

其中,  $F_M^t$  为微电源在  $t$  时刻总的运行维护成本,  $k_i$  为第  $i$  种微电源的运行维护成本系数,  $P_i^t$  为第  $i$  种微电

源的输出功率,  $N$  为微电源的数目。  $k_i$  的取值按照文献[11]选取, 其中微型燃气轮机、柴油发电机、燃料电池的运行维护成本系数分别为 0.038 49 元/kW、0.082 49 元/kW、0.027 48 元/kW。

#### (4) 污染物排放折算成本。

微型燃气轮机和柴油发电机在运行的过程中会产生氮氧化物( $NO_x$ )、二氧化硫( $SO_2$ )、二氧化碳( $CO_2$ )等空气污染物。考虑到微网的环境效益, 将这些污染物按照一定的成本进行折算, 作为微网优化运行的目标。具体表达式如下:

$$F_p^t = \sum_{i=1}^q U_i^t P_i^t a_{ij} c_j \quad (8)$$

其中,  $F_p^t$  为微网的环保折算成本,  $a_{ij}$  为第  $i$  种微电源排放的第  $j$  种污染物的排放因子,  $q$  为污染物的种类,  $c_j$  为第  $j$  种污染物的折算成本。

不同种类的污染物折算成本以及微型燃气轮机、柴油发电机、燃料电池的排放因子如表 1 所示<sup>[16]</sup>。

表 1 折算成本和排放因子

排放类型	折算成本/ (元·kg <sup>-1</sup> )	MTG 排放因子/ [g·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	DEG 排放因子/ [g·(kW·h) <sup>-1</sup> ]
NO <sub>x</sub>	27.540	0.440	21.800
SO <sub>2</sub>	6.490	0.008	0.454
CO <sub>2</sub>	0.092	1.600	1.400

综合考虑以上因素, 微网的经济成本如下:

$$C^t = F_{OC}^t + F_{MTC}^t + F_{DEG}^t + F_{FC}^t + F_M^t + F_p^t \quad (9)$$

其中,  $C^t$  为在  $t$  时刻微网的经济成本。

### 1.2.2 网损

由于独立微网系统的电压等级相对较低, 一般为 380~1000 V, 因此独立微网系统中的电阻与电抗的比值, 即  $R/X$  值一般较大, 在 5 至几十之间<sup>[17]</sup>, 由此, 独立微网系统的网损可通过潮流计算的方法得到, 表达式如下:

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^M \frac{P_k^2 + Q_k^2}{|U_k|^2} R_k \quad (10)$$

其中,  $P_k$ 、 $Q_k$  为第  $k$  条支路传输的有功、无功功率,  $M$  为支路总数,  $R_k$  为支路  $k$  电阻,  $|U_k|$  为支路电压幅值。

在充分考虑独立微网系统的经济成本与系统网损的基础上, 通过赋予不同目标函数合适的权重, 并进行线性加和, 其多目标函数转化为微网系统的综合成本最低:

$$\min F^t = \lambda_1 C^t + \lambda_2 P_{loss} \quad (11)$$

其中,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  分别为多目标的权重系数,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  赋权的原则主要是在独立微网系统中, 通过权衡微网系统的经济成本与系统网损之间的重要性, 进行线性加权。比如重点考虑微网系统中的网损对独立微网系统优化运行的影响, 可以取  $\lambda_2=0.8$ , 并且满足  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ , 这样将多目标问题转化为单目标问题。

### 1.3 约束条件

#### a. 功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_{\text{load}} + P_{\text{loss}} \quad (12)$$

其中,  $P_i$  为第  $i$  种微电源输出的功率,  $P_{\text{load}}$  为总负荷。

#### b. 微电源输出功率约束。

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (13)$$

其中,  $P_i^{\min}$ 、 $P_i^{\max}$  分别为第  $i$  种微电源输出功率的下限和上限。

#### c. 节点电压约束。

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (14)$$

其中,  $U_i$  为第  $i$  个节点的电压,  $U_i^{\min}$ 、 $U_i^{\max}$  分别为第  $i$  个节点的电压下限和上限。

#### d. 最短开停机时间约束。

$$T_{i,\text{off}}' \geq T_{i,\text{down}}, \quad T_{i,\text{on}}' \geq T_{i,\text{up}} \quad (15)$$

其中,  $T_{i,\text{on}}'$  和  $T_{i,\text{off}}'$  分别为第  $i$  种微电源的开、停机时间,  $T_{i,\text{up}}$  和  $T_{i,\text{down}}$  分别为第  $i$  种微电源的最短开、停限制。

#### e. 微电源爬坡率约束。

$$\Delta P_i^{\min} \leq P_i^t - P_i^{t-1} \leq \Delta P_i^{\max} \quad (16)$$

其中,  $P_i^t$  为第  $i$  种微电源在  $t$  时刻的输出功率;  $P_i^{t-1}$  为第  $i$  种微电源在  $t-1$  时刻的输出功率;  $\Delta P_i^{\max}$ 、 $\Delta P_i^{\min}$  分别为第  $i$  种微电源单位时间内的发电出力上、下限。

## 2 混沌二进制粒子群算法原理

### 2.1 混沌搜索

混沌优化算法具有遍历性、随机性、规律性的特点,能在一定的范围内按照自身的规律不重复地遍历所有的状态。混沌优化算法能避免陷入局部极小,比随机搜索更具有优越性,易于跳出局部最优解。

在混沌优化中,一般应用 Logistic 映射来产生混沌变量, Logistic 映射的形式如式(17)所示:

$$x_{k+1} = \mu x_k (1 - x_k) \quad (17)$$

其中,  $x_k$  为第  $k$  次迭代的混沌变量。

Logistic 映射是模拟生物种群随时间演变的数学模型。当  $\mu=4$  时,系统进入混沌状态,混沌变量能遍历在  $[0, 1]$  之间的所有状态。注意式(17)中存在不动点 0.25、0.5、0.75,应避免混沌变量的初值为这些点。

### 2.2 二进制粒子群

二进制粒子群算法是在基本粒子群算法的基础上提出的,适用于离散空间优化问题<sup>[18]</sup>。在二进制粒子群中,粒子的速度向量不再是粒子位置的变化率,而是粒子位置改变的概率。速度向量表示粒子以某一概率确定是 1 状态还是 0 状态。根据速度的大小来选择粒子在对应位置上为 1 或 0。在二进制粒子群中,粒子位置更新公式为:

$$U_{i,d}^k = \begin{cases} 1 & r < \text{Sigmoid}(v_{i,d}^k) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $U_{i,d}^k$  为在  $d$  维的搜索空间中第  $i$  个粒子在第  $k$  次迭代时的位置;  $r$  为  $[0, 1]$  之间的随机数; Sigmoid 函数定义为式(19)所示<sup>[15]</sup>。

$$\text{Sigmoid}(v_{i,d}^k) = \begin{cases} \frac{2}{1 + e^{-v_{i,d}^k}} - 1 & v_{i,d}^k > 0 \\ 1 - \frac{2}{1 + e^{-v_{i,d}^k}} & v_{i,d}^k < 0 \end{cases} \quad (19)$$

### 2.3 混沌二进制粒子群算法

粒子群算法后期收敛速度慢、收敛精度差、容易陷入局部最优解,为此很多研究学者将二进制粒子群算法和混沌优化算法相结合,利用混沌变量的初值敏感性和遍历性特点,对失去搜索能力的粒子进行混沌搜索。文献[23]提出了粒子群早熟现象的判断机制,并给出了混沌粒子群算法的计算步骤。文献[24]提出了自适应的混沌粒子群算法,利用混沌优化算法初始化粒子群体和对优选粒子进行操作。

在粒子群体的一次迭代寻优过程中,至少有 1 个粒子处于不动状态,其他粒子逐渐向该粒子靠近。当存在一个粒子,其位置距离不动粒子足够近时,该粒子只能搜索有限的区域,寻优功能大幅减弱<sup>[17]</sup>。为了提高此粒子的搜索性能,本文在粒子群进行优化的前期采用混沌算法进行初始化,优选初始粒子群体。

采用混沌搜索的方法对即将重叠的粒子进行分离,通过判断任意粒子与当前最优粒子之间的距离作为粒子是否重叠的标准。当粒子的距离小于设定值时,认为 2 个粒子已经重叠,此时当前最优粒子保持位置不变,另一个粒子映射到混沌变量空间,以混沌变量进行式(17)所示的混沌运动。将得到的新的混沌变量重新映射到变量搜索空间中得到新的粒子,用混沌搜索得到的新粒子替换原来的粒子。

### 2.4 算法步骤

**a. 初始化。**输入粒子群规模、变量个数、惯性权重、最大飞行速度、最大迭代次数、各个微电源的参数、初始启停状态等。利用混沌迭代公式初始化  $N$  个矢量,并尽可能均匀地分布在  $[0, 1]$  空间中,然后映射到变量搜索空间,得到粒子的初始化位置。

**b. 计算每一个粒子的适应值  $\delta_{\text{fit}} = F'(x)$ ,取最小值作为群体当前的最优解  $F_{\text{best}}$ ,并记录该粒子位置为全局极值点  $x_{\text{gbest}}$ ,设定当前每个粒子的位置为个体极值点  $x_{\text{pbest}}$ 。并设定当前迭代次数  $n_{\text{it}}$  为 1。**

**c. 判断当前的迭代次数是否满足最大迭代次数,若满足则输出计算结果,否则设定迭代次数  $n_{\text{it}} = n_{\text{it}} + 1$ 。**

**d. 更新粒子的位置和速度。并根据式(18)更新**

微电源的开停机状态变量。

e. 计算任意粒子与当前最优粒子之间的距离,若  $x(i)$  为任意粒子  $i$  当前的位置,  $x(r)$  为当前最优粒子的位置, 当粒子的距离  $d(i) = (x(i) - x(r))^2$  小于给定值(本文中取  $10^{-3}$ )时, 则一个粒子不变, 另一个粒子赋予混沌运动, 在给定的步数内进行混沌搜索, 用得到的结果替换原来的粒子。

f. 判断粒子的状态是否满足各类不等式约束条件, 若满足则保留粒子位置, 否则取限值。

g. 计算当前每个粒子的适应值, 保存全局最优解  $F_{\text{best}}$ , 全局最优位置  $x_{\text{gbest}}$  和个体最优位置  $x_{\text{pbest}}$ , 并转到步骤 c。

### 3 仿真分析

本文选取的独立微网系统的电压等级为 380 V, 线路选择 LJ-16 型导线, 线路阻抗为  $R=1.98 \Omega/\text{km}$ ,  $X=0.358 \Omega/\text{km}$ <sup>[24]</sup>。本文采用混沌二进制粒子群优化算法进行计算, 其中粒子群规模为 200, 变量个数为 3, 每个变量是 24 维, 代表一天 24 个小时时间段, 惯性权重  $C_1=2$ 、 $C_2=2$ , 最大飞行速度  $v_{\text{max}}=10$ , 最大迭代次数为 1500。假设本文同等看待微网系统的经济成本与系统网损, 因此赋权为  $\lambda_1=0.5$ ,  $\lambda_2=0.5$ 。各个微电源的相关参数如表 2 所示。

表 2 微电源的参数  
Tab.2 Parameters of micro-sources

微电源	发电出力/kW		开停机费用/元	最短开停机时间/h
	上限	下限		
MTG	30	3	3.0	1.5
DEG	30	3	1.5	1.0
FC	30	4	2.0	2.0

微网的“广义负荷”曲线、日负荷预测曲线和风力发电、光伏发电在某个典型日 24 h 内的功率预测曲线如图 2 所示。

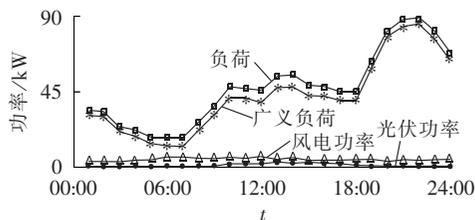


图 2 “广义负荷”、负荷、风电、光伏预测功率  
Fig.2 Generalized load, load, wind power and predicted photovoltaic power

本文首次将混沌二进制粒子群算法应用到微网经济优化运行中进行分析, 计算结果得出的微网总费用曲线如图 3 所示, 微网的总网损曲线如图 4 所示。

由图 2、图 3 可以看出微网总的费用变化趋势与微网的“广义负荷”变化趋势相同; 由图 2、图 4 可以看出微网的总网损变化趋势与微网的“广义负荷”

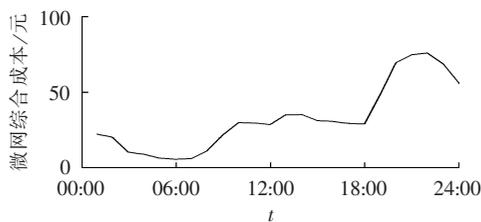


图 3 独立微网系统不同时段的综合成本  
Fig.3 Comprehensive cost of standalone microgrid system for different periods

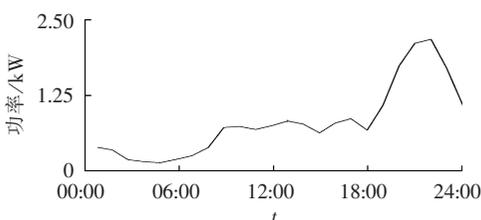


图 4 独立微网系统不同时段网损曲线图  
Fig.4 Grid loss of standalone microgrid system for different periods

变化趋势相同。

各个微电源输出功率的变化情况如图 5 所示。由图 5 中可以看出在 03:00—08:00 和 10:00—18:00, 微型燃气轮机的输出功率为 0, 此时微型燃气轮机处于停机状态; 在 01:00—09:00, 柴油发电机输出功率为 0, 此时柴油发电机处于停机状态; 燃料电池的输出功率一直大于 0, 所以燃料电池一直处于开机状态。

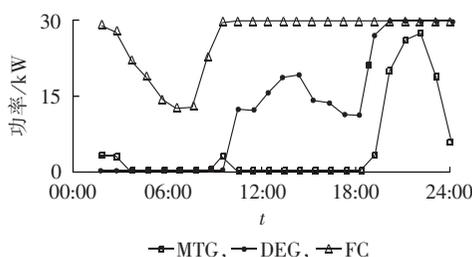


图 5 不同种类微电源在不同时段的发电出力图  
Fig.5 Power output of different micro-sources for different periods

图 6 是微型燃气轮机、柴油发电机、燃料电池的发电费用与发电出力关系图。由图 6 可知, 在发电出力小于 50 kW 的范围内, 燃料电池的发电费用总是比微型燃气轮机、柴油发电机的发电费用要少, 所以燃料电池应一直处于开机状态。当发电出力小于 4 kW 时, 微型燃气轮机的发电费用小于柴油发电

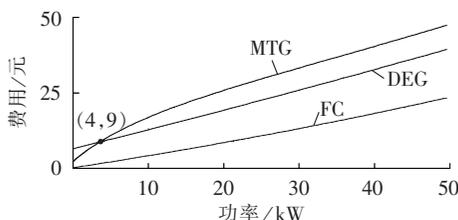


图 6 不同种类微电源发电费用与发电出力关系图  
Fig.6 Relationship between cost and output for different micro-sources

机的发电费用,与图 5 中微型燃气轮机处于开机状态,而柴油发电机处于关机状态时的发电出力相对应,验证了图 5 结果的正确性。

根据表 1、图 4 和图 5 可以看出,虽然微型燃气轮机和柴油发电机是可控的微电源,但在当前低碳环保的市场环境下,由于其排放 CO<sub>2</sub> 等污染物,微型燃气轮机和柴油发电机的发电效率受到了一定的限制。而燃料电池是环境友好型的发电装置,发电效率较高。

## 4 结论

本文针对独立微网系统中可控型微电源的组合优化问题进行深入研究,并将二进制粒子群与混沌优化算法相互结合,首次应用混沌二进制粒子群算法进行求解,实现了独立微网系统的经济优化运行,进一步提高了微网系统的整体经济效益和环境效益,主要结论如下。

**a.** 针对独立微网系统,充分考虑了微网中不同种类微电源的发电出力特性,以微网的经济成本和系统网损成本线性加和构成的微网系统的综合成本最低为目标函数,保证了系统的经济性。

**b.** 将二进制粒子群与混沌优化算法相结合,首次将混沌二进制粒子群算法应用到微网优化运行中进行求解,并通过算例仿真验证。仿真分析表明,混沌二进制粒子群算法可以有效地解决独立微网系统的优化运行问题。

**c.** 根据不同种类微电源的发电出力与其发电费用的比较可以看出,虽然微型燃气轮机和柴油发电机是可控的微电源,但在当前低碳的环境下,由于其排放 CO<sub>2</sub> 等污染物,微型燃气轮机和柴油发电机的发电效率受到了一定的限制。而燃料电池是环境友好型的发电装置,发电效率较高。

由于本文仅针对独立微网系统可控型微电源的组合优化问题进行了研究,并未涉及微网并网优化运行问题,因此在本文研究的基础上,可针对微网并网系统以及考虑微网与大电网之间的交互功率等方面继续深入研究。

## 参考文献:

[1] 王成山,高菲,李鹏,等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):2-8.  
WANG Chengshan,GAO Fei,LI Peng,et al. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(25):2-8.

[2] 王成山,王守相. 分布式发电功能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2008,32(20):1-4.  
WANG Chengshan,WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(20):1-4.

[3] 丁明,张颖媛,茆美琴,等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济优化运行[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.

[4] 王成山,肖朝霞,王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(7):98-103.  
WANG Chengshan,XIAO Zhaoxiao,WANG Shouxiang. Synthetic control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(7):98-103.

[5] 曹培,王媚,郭创新,等. 智能微网运行的低碳综合效益分析[J]. 电网技术,2012,36(6):15-20.  
CAO Pei,WANG Mei,GUO Chuangxin,et al. Analysis on low-carbon integrative benefits of smart microgrid operation[J]. Power System Technology,2012,36(6):15-20.

[6] 李鹏,张玲,王伟,等. 微网技术应用与分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(20):109-115.  
LI Peng,ZHANG Ling,WANG Wei,et al. Application and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(20):109-115.

[7] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):100-107.  
LU Zongxiang,WANG Caixia,MIN Yong,et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems,2007, 31(19):100-107.

[8] 袁晓辉,王乘,袁艳斌,等. 一种求解机组组合问题的新型改进粒子群方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(1):34-38.  
YUAN Xiaohui,WANG Cheng,YUAN Yanbin,et al. A new enhanced particle swarm optimization method for unit commitment [J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(1):34-38.

[9] 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.

[10] 李兵,蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997,14(4):613-615.  
LI Bing,JIANG Weisun. Chaos optimization algorithm and its application[J]. Control Theory & Application,1997,14(4): 613-615.

[11] 刘丽军,李捷,蔡金锭. 基于强引导粒子群和混沌优化的电力系统无功优化[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):71-75.  
LIU Lijun,LI Jie,CAI Jinding. Reactive power optimization based on induction-enhanced particle swarm optimization and chaos search[J]. Electric Power Automation Equipment,2010, 30(4):71-75.

[12] 郭佳欢. 微网经济运行优化的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2010.  
GUO Jiahuan. Study on economic operation optimization of microgrid[D]. Beijing:North China Electric Power University,2010.

[13] 陈达威. 微电网中负荷优化分配技术研究[D]. 北京:清华大学, 2010.  
CHEN Dawei. Study on load optimization dispatch of microgrid [D]. Beijing:Tsinghua University,2010.

[14] 李凤婷,晁勤,童菲,等. 风电系统容量的优化配置探讨[J]. 电力自动化设备,2007,27(6):36-38.

- LI Fengting, CHAO Qin, TONG Fei, et al. Discussion on configuration optimization of wind power capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(6): 36-38.
- [15] MOHAMED F A, KOIVO H N. System modeling and online optimal management of microgrid[C]//Proceeding of 6th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms. Delft, Netherlands: [s.n.], 2006: 470-478.
- [16] 陈达威, 朱桂萍. 低压配电网中的功率传输特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 117-122.
- CHEN Dawei, ZHU Guiping. Power transmission characteristics of voltage microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 117-122.
- [17] KENNEDY J, EBERHART R. A discrete binary version of the particle swarm optimization[C]//Proc IEEE Int Conf on Neural Networks. Perth, Australia: [s.n.], 1997: 4104-4108.
- [18] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 基于混沌粒子群优化方法的电力系统无功最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 53-57.
- LIU Zifa, GE Shaoyun, YU Yixin. Optimal reactive power dispatch using chaotic particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 53-57.
- [19] 刘玲, 钟伟民, 钱锋. 改进的混沌粒子群优化算法[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2010, 36(2): 267-272.
- LIU Ling, ZHONG Weimin, QIAN Feng. An improved chaos-particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of East China University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2010, 36(2): 267-272.
- [20] 唐小波, 徐青山, 唐国庆. 基于“负荷质心”的分布式电源并网优化配置[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 12-16.
- TANG Xiaobo, XU Qingshan, TANG Guoqing. Optimal configuration based on load centroid for distributed generation grid-connection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 12-16.
- [21] 刘军民, 高岳林. 混沌粒子群优化算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(2): 322-325.
- LIU Junmin, GAO Yuelin. Chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Applications, 2008, 28(2): 322-325.
- [22] 文升, 顾洁, 程浩忠, 等. 分布式电源的准入容量与优化布置的实用方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 109-114.
- WEN Sheng, GU Jie, CHENG Haozhong, et al. Maximum penetration level and optimal placement of distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 109-114.

#### 作者简介:

李 鹏(1965-), 男, 河北保定人, 教授, IEEE 高级会员, 博士, 主要研究方向为新能源并网发电与微网技术、电能质量分析与控制、电力电子技术在电力系统中的应用等(**E-mail**: ncepulp@gmail.com);

李 涛(1987-), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向为微网的优化配置及经济优化运行(**E-mail**: taoer-789@163.com)。

## Combinatorial optimization of micro-sources in standalone microgrid based on chaotic binary particle swarm optimization algorithm

LI Peng<sup>1</sup>, LI Tao<sup>1</sup>, ZHANG Shuang<sup>2</sup>, ZHAO Xiaoguang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Dongying Supply Company, Dongying 257091, China; 3. Baoding Tianwei Wind Power Technology Co., Ltd., Baoding 071051, China)

**Abstract:** A multi-objective multi-constraint optimization model is built for the operation of standalone microgrid, which takes the minimum operational cost and the minimum grid loss as its multi-objective function, applies the weight assignment to convert the multiple objectives into single objective, considers the constraints of power balance, voltage limit and unit startup/shutdown time, and takes into account the startup/shutdown control strategy of controllable micro-sources in microgrid. The binary particle swarm algorithm combined with the chaotic optimization algorithm is adopted to solve the model. The simulative results of a typical microgrid model verify the correctness of the proposed algorithm and model, which can be applied to ensure the optimized economic operation of microgrid.

**Key words:** binary particle swarm; chaotic theory; standalone microgrid; controllable micro-source; combination; optimization