

# 采用改进细菌觅食算法的 风/光/储混合微电网电源优化配置

马溪原, 吴耀文, 方华亮, 孙元章

(武汉大学电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072)

## Optimal Sizing of Hybrid Solar-wind Distributed Generation in an Islanded Microgrid Using Improved Bacterial Foraging Algorithm

MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, SUN Yuanzhang

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** Wind and solar energy have the characteristics of randomness and waviness. As the coordination among distributed generation (DG), energy storages and loads is very complicated, proper combination of DG in an islanded microgrid is a primary problem for its reliability and economy. This paper used the bacterial foraging algorithm (BFA) to solve the optimal sizing problem of hybrid solar-wind DG in microgrid. The economic model of optimal sizing was built with the objective that takes annual costs of equipment, operation and maintenance, fuels, environment protection into account. The meteorological conditions of wind speed, solar radiation and temperature were input. According to alternatives of DG and power supply reliability, the types and optimal sizing of DG were designed. The results show the BFA has a strong global optimal capability and fast speed. This method can comprehensively evaluate the economy efficiency of DG and reduce redundant investment to satisfy customer's diversification of reliability requirements according to meteorological conditions.

**KEY WORDS:** microgrid; bacterial foraging algorithm; optimal sizing; distributed generation

**摘要:** 风能和太阳能具有随机性和波动性的特点, 由分布式电源、储能装置、负荷组成的微电网协调运行与控制十分复杂, 对孤岛运行的微电网合理地配置电源以提高供电可靠性、经济性是微电网规划建设的一个首要问题。将改进的细菌觅食算法(bacterial foraging algorithm, BFA)应用到解决

风/光/储混合的全年孤岛运行的微电网电源优化配置问题中, 建立了计及设备投资成本、运行和维护成本、燃料成本、环保折算成本的微电网电源优化配置模型, 以年风速、气温、光照强度作为输入, 根据不同的用户供电可靠性和备选电源要求, 得到微电网电源的类型及其容量的最优方案, 结果表明改进的细菌觅食算法具有全局最优搜索能力强、寻优速度快的特点。该方法可以全面评估各种分布式电源的经济性, 根据微电网建设地点的气象条件、投资成本等降低微电网电源的冗余投资, 满足用户定制的多样化可靠性要求。

**关键词:** 微电网; 细菌觅食算法; 最优容量; 分布式电源

## 0 引言

微电网在提高终端用户多样化的供电可靠性、电能质量等方面具有重要作用<sup>[1]</sup>。随着微电网控制技术的持续发展和可再生能源发电成本的不断降低, 微电网可以表现为一个孤岛独立运行的有源自治电力系统实现节能减排<sup>[2]</sup>。微电网也是解决现代新农村电气化的经济供电方式, 避免了远距离输电带来的电能损耗和建设费用<sup>[3]</sup>, 也可以应用于边远军事哨所、岛屿供电、高海拔独立电网等特殊场合, 是对传统供电形式的有利补充。

在微电网规划中, 合理的电源选型和定容是一个重要和复杂的问题<sup>[4]</sup>:

1) 经济性。分布式电源的效率、设备成本、安装成本、运行和维护成本、燃料成本、全寿命周期等都需要考虑。光伏列阵、风机的设备一次投资很高。在当今国际能源紧张的形势下, 燃料成本也很高。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(201120702020010)。

Project Supported by the Fundamental Research Fund for the Central Universities (201120702020010).

2) 环保性。风能和太阳能虽然不存在燃料和环保成本,但输出功率受自然因素(如风速、光强等)的影响而呈现随机性和波动性。微型燃气轮机、柴油发电机、燃料电池的发电效率低,能耗大且破坏环境。

3) 响应特性。微型燃气轮机和燃料电池等均具有响应速度慢和无惯性的特点,需要在母线加装储能以跟踪负荷的变化;同时储能装置能够跟踪风能和太阳能的出力变化进行充放电,提高供电连续性和可靠性。

4) 系统性。不同的运行方式(如并网或孤岛)、不同的控制手段、不同的可靠性要求也会改变配置的结果。

目前,分布式电源的选址、选型、定容是微电网规划阶段中需要考虑的首要问题,国内外一些学者对其进行研究,取得了一些理论和实践方面的成果。文献[5]考虑了网损、电压改善程度和环境改善程度以优化电源选址和容量;文献[6]提出一种含多种复合能源的分布式发电系统成本最低的机组组合模型;文献[7]建立了将分布式发电作为备用电源的电源容量优化配置模型,考虑了经济性、可靠性和环保性。但文献[5-7]均未考虑风能、太阳能的随机性和波动性给分布式电源优化配置带来的影响以及储能的容量配置问题,只将不可再生分布式发电作为配电网的一个备用电源。

本文研究了含风机、光伏阵列、储能装置及其他类型分布式电源的全年孤岛运行的微电网电源容量优化配置方法,以总投资最少为目标函数,以供电可靠性等为约束条件,将微电网电源的优化配置问题转化为一个多约束条件的非线性整数规划问题,采用改进的细菌觅食算法求解该优化问题。

## 1 风/光/储混合的微电网电源模型

### 1.1 风/光/储混合的微电网

风/光/储混合的微电网可以由风机、光伏阵列、储能装置、微型燃气轮机、柴油发电机、燃料电池等分布式电源及其逆变器和控制器组成,由公共连接点与配电网相连。本文假定微电网电源及其储能装置采用先进的电力电子装置作为接口接入微电网,能够快速跟踪负荷、风能和太阳能出力等的变化,实现“即插即用”,同时微电网有能力根据电源的出力及时调整负荷的大小,可平稳运行在孤岛

模式下<sup>[8-9]</sup>。其结构示意图如图1所示。

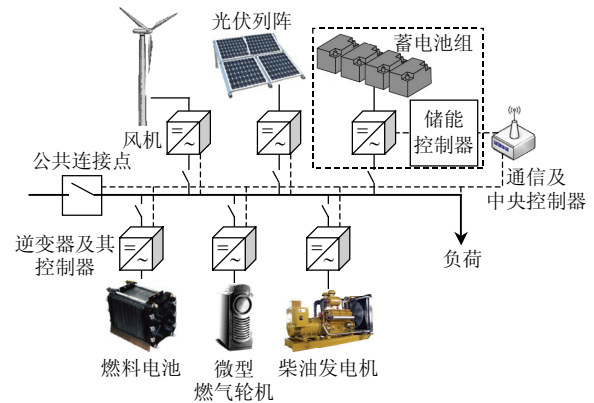


图1 微电网示意图

Fig. 1 Microgrid and components

### 1.2 风机模型

风电机组的输出功率与风速之间的近似关系可用如下分段函数<sup>[10]</sup>表示:

$$P_{WT}(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ \eta(v), & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v \leq v_{co} \\ 0, & v_{co} \leq v \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $v_{ci}$  为切入风速;  $v_{co}$  为切出风速;  $v_r$  为额定风速;  $P_r$  为风力发电机组额定输出功率。当风速介于  $v_{ci}$  和  $v_r$  之间时风力发电机输出功率可以表示为风速函数  $\eta(v)$ , 一般可以近似为线性关系, 即

$$\eta(v) = P_r(v - v_{ci}) / (v_r - v_{ci}) \quad (2)$$

本文采用美国 Bergey Windpower 公司 Bergey Excel 型风机<sup>[11]</sup>, 根据厂家数据其  $P_r$  为 10 kW,  $v_{ci}$  为 2.5 m/s,  $v_r$  为 12 m/s,  $v_{co}$  为 18 m/s。

### 1.3 光伏阵列模型

光伏阵列实际输出功率可由标准额定条件下的输出功率、光照强度、环境温度得到<sup>[12]</sup>:

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_c}{G_{STC}} [1 + k(T_c - T_{STC})] \quad (3)$$

式中:  $P_{PV}$  为工作点的输出功率; 光伏组件厂商通常会给出标准额定条件(standard test condition, STC)下的运行参数, STC 特指太阳辐照度  $G_{STC}$  为  $1 \text{ kW/m}^2$ , 电池表面温度  $T_{STC}$  为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , 相对大气光学质量为 AM1.5 的条件<sup>[13]</sup>;  $G_c$  为工作点的辐照度;  $k$  为功率温度系数;  $P_{STC}$  为标准额定条件下光伏阵列的额定输出功率, 若  $n_{PV}$  为光伏阵列的光伏电池总数,  $p_{stc}$  为光伏电池的额定输出功率, 则  $P_{STC} =$

$n_{PV} p_{stc}$ ;  $T_c$  为工作点的电池表面温度, 它是环境温度  $T_a$  和风速的函数<sup>[12]</sup>:

$$T_c = T_a + \alpha G_c \quad (4)$$

其中系数  $\alpha$  为风速  $v$  的指数函数:

$$\alpha = f(v) = c_1 + c_2 e^{c_3 v} \quad (5)$$

式中  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$  为常系数。

本文采用 SOLAREX 公司 MSX-83 型光伏电池, 其额定输出功率为 83 W。

#### 1.4 储能装置模型

本文使用蓄电池组作为储能元件, 储能控制器可以快速控制储能装置充放电来跟踪负荷的变化。

蓄电池实际可用容量  $E_{bat}$  是电池温度的函数:

$$E_{bat} = E_{STC} [1 + \delta_B (T_{bat} - T_{batSTC})] \quad (6)$$

式中:  $T_{bat}$  为工作点蓄电池温度, 即为环境温度  $T_a$ ;  $E_{STC}$  为标准状况下蓄电池的额定容量, 通常由厂家提供参数; 标准状况下温度  $T_{batSTC}$  为 25 °C;  $\delta_B$  为容量温度系数, 通常为 0.6%<sup>[14]</sup>。

在电池的充放电过程中需考虑 2 个约束条件:

1) 确保蓄电池的寿命和运行安全。  $S_{SOC}$  为电池充电状态(state of charge, SOC), 是储能控制器防止电池过度充电和过度放电的一个重要决策变量。当  $S_{SOC}$  达到电池最大容量(即  $S_{max} = 100\%$ )时, 储能控制器控制电池停止充电, 当  $S_{SOC}$  达到电池最小充电状态时, 储能控制器控制电池停止放电,  $S_{min}$  通常是电池容量的 20%, 即

$$E_{SOC,t+1} = E_{SOC,t} - P_- + P_+ \quad (7)$$

$$S_{min} \leq S_{SOC} \leq S_{max} \quad (8)$$

2) 电池的寿命也与其充放电率有关, 充放电率过高将降低电池的使用寿命。每小时的充放电容量不能超过其最大容量的 20%<sup>[14]</sup>,  $\Delta t$  为 1 h,  $P_+$ 、 $P_-$  为单位小时内的充放电功率, 即

$$\begin{cases} P_+ \leq 0.2 E_{bat} / \Delta t \\ P_- \leq 0.2 E_{bat} / \Delta t \end{cases} \quad (9)$$

此外, 蓄电池在充放电过程中是存在损耗的, 由电池的自身放电和充放电损耗组成。通常厂家会给出其双程效率, 本文的充电效率采用双程效率, 放电效率认为是 100%。采用 GEFC 公司 125V200A-VRB 钒电池电堆<sup>[15]</sup>, 其标准额定容量为 50 kW·h, 额定功率为 25 kW, 双程效率为 72%, 每小时自放电率为 0.01%。

## 2 微电网的电源优化配置模型

### 2.1 目标函数

#### 2.1.1 微电网电源优化配置目标函数

本文建立了含有风机、光伏阵列、储能装置及其他不间断电源(主要为微型燃气轮机、柴油机、燃料电池)的复合微电网电源优化配置模型, 主要将设备投资费用、运行和维护费用、燃料费用、环保折算费用 4 部分计入目标函数, 使等年值投资费用最低, 同时满足用户要求的供电可靠性。经济性数学模型(cost function, CF)描述如下:

$$C_{CF}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N (C_{CP_i} x_i + C_{OM_i} x_i + C_{FC_i} x_i + C_{EC_i} x_i) \quad (10)$$

式中:  $N$  为电源的类型数目;  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ , 为决策变量;  $x_i$  为第  $i$  种电源的数目;  $C_{CP_i}$  为第  $i$  种电源的等年值设备投资费用;  $C_{OM_i}$  为第  $i$  种电源的年运行和维护费用;  $C_{FC_i}$  为第  $i$  种电源的年燃料费用;  $C_{EC_i}$  为第  $i$  种电源的环保折算费用。

#### 2.1.2 等年值设备投资费用

分布式发电的装机成本与集中式发电相比偏高, 但随着技术的发展, 这一制约因素有望得到解决。分布式发电装机成本与具体项目密切相关:

$$C_{CP} = C_{TCP} \mu_{CRF}(r, Y_p) \quad (11)$$

式中:  $C_{CP}$  为电源的等年值设备投资费用;  $C_{TCP}$  为装机成本;  $Y_p$  为项目全寿命周期年限, 13 a;  $\mu_{CRF}$  为年资金回收率<sup>[16]</sup>(capital recovery factor, CRF), 其表达式为

$$\mu_{CRF}(r, Y_p) = \frac{r(1+r)^{Y_p}}{(1+r)^{Y_p} - 1} \quad (12)$$

式中  $r$  为折现率, 其值为加权平均资本成本, 用于测算投资方案的净现值和现值系数, 以比较投资方案, 进行投资决策。为简化计算, 考虑筹资方式如下: 借款利率  $R_w$  为 6.9%(目前银行 5 a 以上长期贷款利率为 6.84%), 权益收益率  $E_w$  为 15%, 负债率  $D_w$  为 80%, 所得税率  $T_w$  为 33%。则  $r$  的计算<sup>[16]</sup> 如下:

$$r = R_w D_w (1 - T_w) + E_w (1 - D_w) = 6.7\% \quad (13)$$

#### 2.1.3 运行和维护费用

$C_{OM_i}$  正比于机组装机容量  $P_i$ :

$$C_{OM_i} = P_i K_{OM_i} + C_{SUC,i} \quad (14)$$

式中:  $K_{OM_i}$  为第  $i$  种电源的比例系数, \$(/(\text{kW} \cdot \text{a}))\$;  $C_{SUC,i}$  为第  $i$  种电源的年机组启停费用。

不间断电源存在机组启停费用,  $C_{SUC,i}$  取决于第  $j$  次启动前的停运时间  $T_{off,i}$ , 其表达式<sup>[17]</sup>为

$$C_{SUC,i} = \sum_{j=1}^{N_{SUC,i}} \{ \zeta_i + \delta_i [1 - \exp(\frac{-T_{off,i,j}}{\tau_i})] \} \quad (15)$$

式中:  $\zeta_i$  为第  $i$  种电源的热启动费用;  $\delta_i$  为第  $i$  种电源的冷启动费用;  $\tau_i$  为第  $i$  种电源的冷启动时间常数;  $N_{SUC,i}$  为第  $i$  种电源的启停次数。

#### 2.1.4 燃料费用

不间断电源也存在燃料费用。天然气、柴油价格的上升会恶化分布式发电的经济性。

$$C_{FC_i} = K_{FC_i} E_i \quad (16)$$

式中:  $E_i$  为第  $i$  种电源的年发电量, kW·h;  $K_{FC_i}$  为各种电源燃料费用比例系数。当采用热电联产运行时, 产生的废热可以用于用户侧的热水或蒸汽供应, 替代供热的燃料成本, 客观上会降低燃料费用。

#### 2.1.5 环保折算费用

按照《京都议定书》的规定, 包括中国在内的发展中国家从2012年开始承担温室气体减排义务。中国政府为节约能源、减少污染, 实行了节能减排政策, 鼓励利用清洁能源和可再生能源发电。以风电和太阳能为主的可再生能源发电是实现节能减排的有效途径之一。为了将微电网电源对环境的影响统一到评估模型, 本文根据文献[18]中各种分布式发电技术的污染排放特性来评估环境影响, 将环境影响折算成费用:

$$C_{EC_i} = \sum_{k=1}^M v_{k,i} E_i (V_k + V'_k) \quad (17)$$

式中:  $v_{k,i}$  为第  $k$  种污染物的排放系数;  $V_k$  为其污染物的环境价值;  $V'_k$  为污染物所受罚款;  $M$  为污染物的种类。分布式电源的污染物排放及评价参数如表1、2所示。

表1 各种发电技术的污染排放系数

DG	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>
微型燃气轮机	0.619	184	0.170	0.000 928
内燃机	4.330	232	2.320	0.464 000
燃料电池	0.023	635	0.054	0.000 000

表2 电力行业污染物环境评价标准

系数	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>
环境价值	1.000	0.002 875	0.125	0.750
罚款	0.250	0.001 250	0.020	0.125

## 2.2 约束条件

1) 电源出力约束。

对于第  $i$  种电源, 有

$$P_i \leq p_i x_i \quad (18)$$

式中:  $p_i$  为单机容量;  $x_i$  为第  $i$  种电源台数。

2) 蓄电池充放电约束。

$$S_{\min} \leq S_{SOC} \leq S_{\max} \quad (19)$$

$$\begin{cases} P_+ \leq 0.2 E_{bat} / \Delta t \\ P_- \leq 0.2 E_{bat} / \Delta t \end{cases} \quad (20)$$

3) 可靠性约束。

$$R_{LRSP} \leq R_{\max} \quad (21)$$

式中:  $R_{LRSP}$  为缺电概率 (loss of power supply probability, LPSP)<sup>[19]</sup>, 为全年孤岛运行的微电网可靠性指标;  $R_{\max}$  为系统最大允许缺电概率。下文介绍  $R_{LRSP}$  可靠性指标的计算方法。

## 2.3 微电网可靠性指标

因为风能和太阳能具有随机性和波动性的特点, 全年处于孤岛运行的微电网会出现发电机出力小于负荷的情况, 这时需要储能装置和不间断电源共同补充风能和太阳能出力的不足。

本文计算微电网1a的缺电概率, 认为每小时内风能和太阳能等分布式电源的输出功率是恒定的, 将一年分为8760h, 每小时计算一次。

$$E_{R,t} = N_{WT} E_{WT,t} + N_{PV} E_{PV,t} \quad (22)$$

式中:  $N_{WT}$ 、 $N_{PV}$  分别为风机和光伏列阵的数量;  $E_{WT,t}$ 、 $E_{PV,t}$  分别为风机和光伏列阵的第  $t$  小时内的发电量, 以风速、气温、光照强度等数据作为输入, 由式(1)~(5)计算得到;  $E_{R,t}$  为其总发电量。

当第  $t$  小时风机和光伏列阵总发电量大于用电量时, 蓄电池充电:

$$E_{Bat,t} = E_{Bat,t-1} (1 - \sigma) - (E_{R,t} - E_{load,t} / \eta_{inv}) \eta_{Bat} \quad (23)$$

式中:  $E_{load,t}$  为第  $t$  小时内的用电量;  $E_{Bat,t}$  为第  $t$  小时电池的容量;  $E_{Bat,t-1}$  为第  $t-1$  小时电池的容量;  $\sigma$  为电池自放电系数;  $\eta_{inv}$  为变换器的效率;  $\eta_{Bat}$  为电池的充电效率。

当第  $t$  小时风机和光伏列阵总发电量小于用电量时, 蓄电池放电:

$$E_{Bat,t} = E_{Bat,t-1} (1 - \sigma) - (E_{R,t} - E_{load,t} / \eta_{inv}) \quad (24)$$

当第  $t$  小时风机和光伏列阵总发电量远小于用

电量时，需要其他不间断电源共同为微电网供电，其总发电量为  $E_G$ ，不间断电源经过组合后最大限度地满足微电网的负荷需求，此时

$$E_G = E_{R,t} + E_{\text{others}} \quad (25)$$

当所有微电网电源及储能剩余容量仍不能满足负荷需求时，第  $t$  小时的缺电量  $E_{LPS,t}$  为

$$E_{LPS,t} = E_{\text{load},t} - [E_G + E_{\text{Bat},t-1}(1 - \sigma)S_{\text{SOCmin}}] \quad (26)$$

值得注意的是，在计算  $R_{LPS}$  的过程中需要满足约束条件 1) 和 2)。依据式(22)—(26)计算全年缺电概率  $R_{LPS}$ ：

$$R_{LPS} = \frac{\sum_{t=1}^{8760} E_{LPS,t}}{\sum_{t=1}^{8760} E_{\text{load},t}} \quad (27)$$

上述微电网电源优化配置目标函数及其约束条件的求解问题，对于待选电源类型较多的系统，是一个多元非线性整数最优化问题，本文利用采用细菌觅食算法的人工智能方法予以求解。

### 3 改进的细菌觅食算法

细菌觅食算法<sup>[20-21]</sup>是由 K. M. Passino 于 2002 年根据 *Escherichia coli* 大肠杆菌在人体肠道内吞噬食物的行为，提出的一种新型仿生类算法。该算法因具有群体智能算法的并行搜索、易跳出局部极小值等优点，成为生物启发式计算研究领域的又一热点。细菌觅食算法(bacterial foraging algorithm, BFA)模型中，空间矢量  $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p]^T \in \mathbf{R}^p$  ( $p$  为矢量维度)，将其作为一个细菌，优化问题的解  $J(\theta)$  对应搜索空间中细菌的健康状态，即优化函数适应值。BFA 算法包括趋化、繁殖和驱散 3 个步骤：

1) 趋化。细菌向富养区域聚集的行为。在趋化过程中，细菌运动模式包括翻转和前进。细菌改变方向移动单位步长定义为翻转。当细菌完成一次翻转后，若适应值得到改善，将沿同一方向继续移动若干步，直至适应值不再改善，或达到预定的前进步数临界值，此过程定义为前进。趋化过程可用下式表示：

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}} \quad (28)$$

式中： $\theta^i(j, k, l)$  为第  $l$  次驱散、第  $k$  次复制、第  $j$  次趋化过程中第  $i$  个细菌的空间矢量； $C(i)$  为细菌  $i$  向某一方向移动的长度向量； $\Delta$  为单位方向向量，

$\Delta \in (-1, 1)$ ；

2) 繁殖。一旦生命周期结束，即达到临界趋化次数，细菌将进行繁殖。细菌繁殖过程遵循自然界“优胜劣汰，适者生存”的原则：

$$J_{\text{health}}^i = \sum_{j=1}^{N_c+1} J(i, j, k, l) \quad (29)$$

式中  $N_c$  为趋化次数。以趋化过程中各细菌适应值累加和  $J_{\text{health}}^i$  为标准，较差的半数细菌死亡，较好的半数细菌分裂成 2 个子细菌。子细菌将继承母细菌的生物特性，具有与母细菌相同的位置及步长。为简化计算，可以规定复制过程中细菌总数保持不变。

3) 驱散。趋化过程可确保细菌的局部搜索能力，繁殖过程能加快细菌的搜索速度，但对于复杂的优化问题，趋化和繁殖无法避免细菌陷入局部最优现象的发生。BFA 引入驱散过程以加强算法全局寻优能力。细菌在完成一定次数的繁殖后，将以一定概率被驱散到搜索空间中的任意位置。

本文将细菌觅食算法应用于微电网电源的优化配置过程中并做了如下改进：

1) 微电网电源的优化配置是一个多约束条件的非线性整数规划问题。一般性 BFA 算法的细菌变量是变量取值范围内的任意实数，因为本问题中将风/光/储等电源台数作为细菌变量，运用 BFA 算法应注意所有变量应为整数，以  $p$  种类型的微电网电源  $\mathbf{x}([x_1, x_2, \dots, x_p])$  组成的空间矢量  $\theta([ \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p ]^T)$  作为一个细菌，采用式(10)计算出的微电网电源等年值投资费用  $C_{CF}(\theta)$  的解对应搜索空间中细菌的健康状态  $J(\theta)$ ，即优化函数适应值。

2) 一般性 BFA 算法的细菌健康状态  $J(\theta)$  没有考虑到约束条件的影响，本文考虑到约束条件的影响，当  $\theta$  的变化使得  $R_{LPS} \geq R_{\text{max}}$  时，优化函数适应值应作如下修正：

$$J(\theta) = C_{CF}(\theta) + \kappa \quad (30)$$

式中  $\kappa$  为罚函数，罚函数  $\kappa$  为负荷年停电成本，由文献[22]的方法求得，与负荷的类型有关，是停电持续时间  $T$  的非线性函数  $c(T)$ ， $\$/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。在实际中应根据具体的项目合理地评估停电损失：

$$\kappa = \sum_{t=1}^{8760} E_{LPS,t} c(T) \quad (31)$$

3) 趋化过程中，一般性 BFA 算法中采用统一

的前进步长，然而风/光/储等电源的单机容量及其成本均不同，采用统一步长没有考虑适应值  $J(\theta)$  对各种电源装机数量的灵敏度。为了加快寻优速度，趋化过程中不同的细菌采用不同的前进步长。同时，在同一细菌  $\theta^i$  中，可基于数值灵敏度技术，采用目标函数  $C_{CF}(\theta)$  对第  $n$  种电源数量  $\theta_n$  的灵敏度指导细菌向某一方向  $n$  移动，其步长表达式为

$$C_n(i) = g_n \frac{\partial C_{CF}(\theta)}{\partial \theta_n} \quad (32)$$

式中： $g_n$  为微增率系数； $C_n(i)$  为前进步长。

4) 在趋化过程中，细菌会出现向培养基中某一高营养区高度密集的分群现象，为了避免这种局部收敛和早熟，维持细菌多样性，本文采用分群过程中每一个细菌会诱惑其他细菌向其运动、同时排斥以保持与其他细菌的距离的方法，这种信息的传递可表示为

$$J_{cc}(\theta, P(j, k, l)) = \sum_{i=1}^S J_{cc}(\theta, \theta^i(j, k, l)) = \sum_{i=1}^S \{-d_{attractant} \exp[-w_{attractant} \sum_{m=1}^p (\theta_m - \theta_m^i)^2]\} + \sum_{i=1}^S \{h_{repellant} \exp[-w_{repellant} \sum_{m=1}^p (\theta_m - \theta_m^i)^2]\} \quad (33)$$

式中： $P(j, k, l)$  为细菌位置； $J_{cc}(\theta, P(j, k, l))$  为附加在目标函数的数值； $S$  为细菌总数； $d_{attractant}$ 、 $w_{attractant}$ 、 $h_{repellant}$ 、 $w_{repellant}$  为不同诱惑和排斥系数。

5) 备选电源类型有风机、光伏阵列、蓄电池、柴油发电机、燃料电池、微型燃气轮机。在 BFA 算法中，细菌为 6 维空间矢量，每代细菌总数为 20 个，趋化 5 次，最大前进步数为 10 步，繁殖 4 次，驱散 3 次，细菌繁殖期死亡概率为 0.5，驱散概率为 0.25。

本文针对微电网电源的优化配置问题采用改

进的细菌觅食算法求得最优解的流程，如图 2 所示。

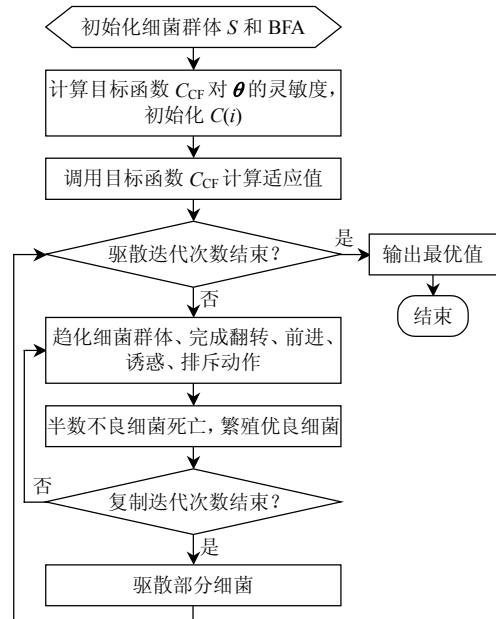


图 2 求解微电网电源优化配置问题的 BFA 流程图

Fig. 2 Flow chart of BFA for optimal microgrid source

### 4 算例分析

#### 4.1 风\光\储混合微电网的经济性分析

应用本文方法对某独立微电网供电系统的电源进行优化配置：备选分布式电源类型有风机、光伏阵列、蓄电池、柴油发电机、燃料电池、微型燃气轮机。综合文献[1]及厂家数据，各种机组成本参数如表 3 所示。将该地点 2008 年的风速、辐照度、温度气象数据及年负荷曲线作为系统输入数据，气象数据如图 3 所示，年负荷曲线如图 4 所示。

表 3 电源最优配置方案等年值投资费用

Tab. 3 Cost result of optimal sizing					10 <sup>5</sup> \$/a
方案	设备投资	运行维护	燃料	环保折算	总费用
1)	21.130	0.742	0.000	0.000	21.870
2)	6.522	0.309	0.354	0.012	7.198

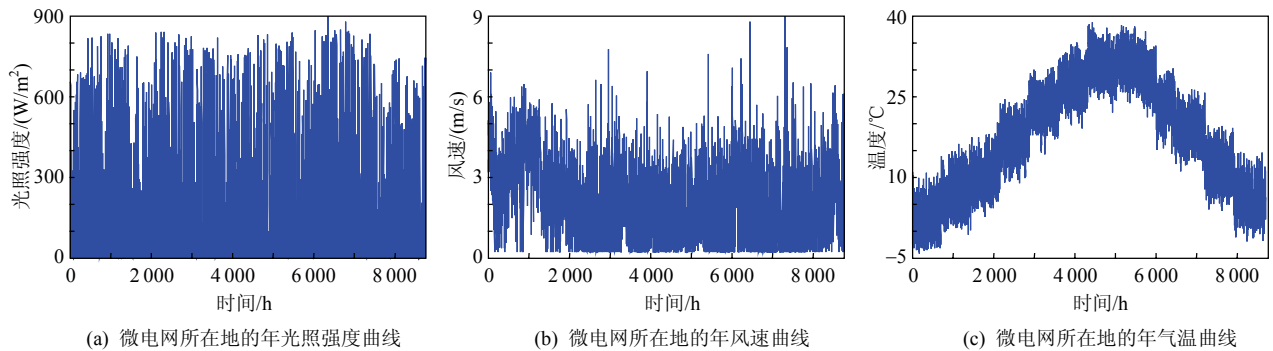


图 3 微电网所在地的气象数据

Fig. 3 Meteorological conditions at the location of microgrid

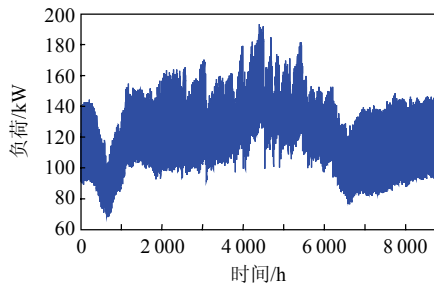


图 4 微电网年负荷曲线

Fig. 4 Hourly load profile of microgrid in a year

表 4 分布式电源成本及配置结果

Tab. 4 Cost information of select distributed generation technologies and optimal sizing result

DG	型号	单机容量/kW	机组成本/(\$/kW)	安装成本/(\$/kW)	运行维护/\$(/kW-a)	燃料成本/\$(/kW-h)	方案 1) /台	方案 2) /台
风机	WD-10	10	2 805	3 250	5.7	0.000	51	0
光伏电池	MSX-83	0.083	5 175	1 500	14.3	0.000	15 041	7 773
蓄电池	VRB-50	50(kW-h)	1 100	200	7.0	0.000	154	32
柴油机	DE-K-60	60	290	574	26.5	0.145	—	0
燃料电池	PAFC-O-200	200	3 500	3 000	26.5	0.025	—	0
微型燃气轮机	MTL-C-30	30	1 200	1 333	119.0	0.045	—	3

供电可靠性为 99.9%，2 种方案的最优方案成本如表 3 所示，容量配置结果如表 4 所示。

对比分析方案 1) 和方案 2)，显然采用方案 2) 是经济的，其原因分析如下：

1) 风机、光伏阵列、蓄电池的装机容量较其他电源成本明显偏高，影响整个方案的经济性，以目前的市场价格对微电网配置风能和太阳能供电是不经济的。但是随着技术的进步，风能和太阳能的成本有望大幅下降，天然气和柴油价格将继续上涨，燃料成本也将持续上涨，风机和太阳能的经济性将会得到体现，其节能减排的功能有望得到发挥。

2) 风能和太阳能具有随机性和波动性，算例中所在地区常年有效风速偏低，不能达到风机运行的切入风速；风能和负荷均呈现季节性不均，当负荷高峰出现在夏季时，风能却出现低谷，造成夏季多出现供电不足，如图 5 所示，因此需要微电网接

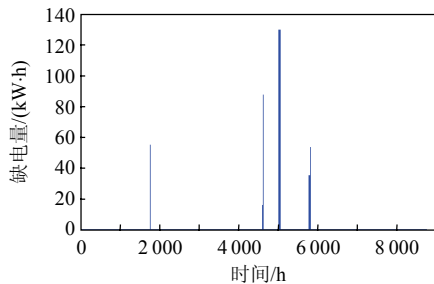


图 5 缺电量分布曲线

Fig. 5 Loss of power supply of configuration

仿真时间为 1 a，最小时间段为 1 h，由气象数据计算风/光/储混合微电网的电源出力，同时计算微电网的可靠性指标 LPSP 并将其作为约束条件，用表 4 中的分布式电源成本数据计算等年值投资费用并将其作为目标函数，应用改进的细菌觅食算法求解多元非线性整数规划问题。

计算 2 种方案：1) 微电网备选电源只考虑风机、光伏阵列、蓄电池；2) 考虑全部备选电源。设该微电网的最大允许缺电概率为 0.1%，即系统的

入大容量储能装置，提高了成本。

#### 4.2 可靠性约束对配置方案的影响分析

以方案 1) 为例，计算可靠性约束  $R_{max}$  与方案年投资成本的关系，如图 6 所示，由结果可知可靠性约束对经济性有重要影响：当  $R_{max}$  在 0%~1% 变化时，微电网年投资费用变化较大，高供电可靠性会带来高经济性代价。由此可见，合理地评估停电损失和设置可靠性约束是降低微电网电源冗余投资的有效手段之一。

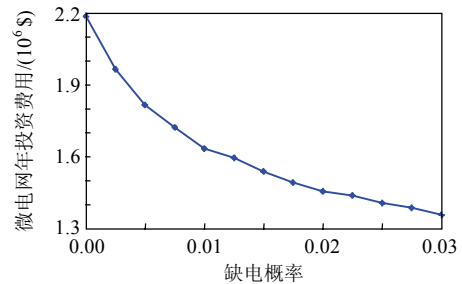


图 6 供电可靠性与年投资成本的关系

Fig. 6 Relationship between annual cost and LPSP

#### 4.3 环保成本对配置方案的影响分析

分布式发电属于新兴技术，其制造成本仍然是配置方案中的最主要部分，由表 3 可知，方案 2) 的环境折算费用仅占整个年投资费用的 0.17%，采用文献[18]的方法评估分布式发电环境效益的折算费用对微电网电源配置的影响很小。但是，环境污

染造成的损失和治理费用因所在地区经济发展阶段不同而有较大差异,中国有些城市已经开始限制化石燃料废气的排放,对于环境要求较高的场合,清洁的低排放分布式电源将具有竞争优势。

#### 4.4 改进的细菌觅食算法与其他算法的对比分析

本文分别采用一般性BFA、改进的BFA算法和遗传算法(genetic algorithm, GA)<sup>[21]</sup>分析计算方案1)的最优解,3种算法的收敛曲线如图7所示,结果表明:BFA算法的收敛速度优于遗传算法;BFA算法具有群体智能算法并行搜索、易跳出局部极小值等优点;本文改进的BFA算法明显提高了收敛速度。

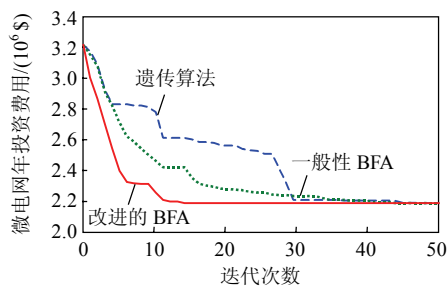


图7 GA、BFA和改进的BFA算法计算结果

Fig. 7 Calculation results of GA, BFA and improved BFA

## 5 结论

本文提出了采用细菌觅食算法对风/光/储混合的微电网电源优化配置问题进行求解的方法,建立了计及设备投资成本、运行和维护成本、燃料成本、环保折算成本的微电网电源优化配置模型,综合考虑了风能和太阳能的随机性和波动性、蓄电池的充放电特性等对风/光/储混合微电网电源配置的影响,并根据不同的用户供电可靠性要求和备选电源,得到相应的微电网电源装机容量最优配置方案。

采用细菌觅食算法求解该多元非线性整数规划问题,并根据微电网电源配置问题在算法中进行了部分改进。相对于传统智能优化算法,BFA算法具有寻优速度较快、容易跳出局部最优解等特点。

## 参考文献

[1] Lasseter R, Abbas A, Marnay C. Integration of distributed energy resources: the CERTS microgrid concept[R]. USA: California Energy Commission, 2003.  
 [2] Hatziargyriou N, Asano H, Iravani R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.  
 [3] Venkataramanan G, Marnay C. A larger role for microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008,

6(3): 78-82.

- [4] 罗运虎,王冰洁,梁昕,等. 电力市场环境下微电网不可再生分布式发电容量的优化配置问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 28-33.  
 Luo Yunhu, Wang Bingjie, Liang Xin, et al. Configuration optimization of non-renewable energy distributed generation capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 28-33(in Chinese).  
 [5] 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(in Chinese).  
 [6] 丁明,包敏,吴红斌,等. 复合能源分布式发电系统的机组组合问题[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 46-50.  
 Ding Ming, Bao Min, Wu Hongbin, et al. Unit commitment problem in distributed generation system with multiple energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 46-50(in Chinese).  
 [7] 赵国波,刘天琪,李兴源. 分布式发电作为备用电源的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 85-89.  
 Zhao Guobo, Liu Tianqi, Li Xingyuan. Optimal deployment of distributed generation as backup generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 85-89(in Chinese).  
 [8] Kroposki B, Lasseter R, Ise T. Making microgrids work[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 40-53.  
 [9] Hassan N, Robert H. Distributed generation interface to the CERTS microgrid[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2009, 24(2): 1598-1608.  
 [10] 张节潭,程浩忠,胡泽春,等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 34-39.  
 Zhang Jietan, Cheng Haozhong, Hu Zechun, et al. Power system probabilistic production simulation including wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 34-39(in Chinese).  
 [11] Windpower B. BWC EXCEL wind turbine[EB/OL]. 2010[2010-8-20]. <http://www.bergey.com/Products/Excel.html>.  
 [12] Gavanidou E, Bakirtzis A. Design of a stand alone system with renewable energy sources using trade off methods [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1992, 7(1): 42-48.  
 [13] Soto W, Klein S, Beckman W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance



- solar energy[J]. *Solar Energy*, 2006, 80(1): 78-88.
- [14] Yang Hongxing, Zhou Wei, Lu Lin, et al. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm[J]. *Solar Energy*, 2008, 82(4): 354-367.
- [15] GEFC 公司. GEFC-125V200A2h-VRB 钒电池[EB/OL]. 2008[2010-8-20]. <http://www.gefc.com/info/20081224/20081224151310.shtml>.
- [16] 胡骅, 徐冲, 吴汕, 等. 影响用户侧分布式发电经济性因素分析[J]. *电力自动化设备*, 2008, 28(5): 29-33. Hu Hua, Xu Chong, Wu Shan, et al. Analysis of factors influencing economy of customer-side distributed generation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2008, 28(5): 29-33(in Chinese).
- [17] Faisal A, Heikki N. System modelling and online optimal management of microgrid using mesh adaptive direct search[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2010, 32(5): 398-407.
- [18] 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(in Chinese).
- [19] Borowy B, Salameh Z. Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system[J]. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 1996, 11(2): 367-375.
- [20] Swagatam D, Arijit B, Sambarta D, et al. Bacterial foraging optimization algorithm: theoretical foundations, analysis, and applications[J]. *Studies in Computational Intelligence*, 2009, 203: 23-55.
- [21] Dong H, Ajith A, Jae H. A hybrid genetic algorithm and bacterial foraging approach for global optimization[J]. *Information Sciences*, 2007, 177(18): 3918-3937.
- [22] Ghajar R, Billinton R, Chan E. Distribution nature of residential customer outage costs[J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 1996, 11(3): 1236-1244.



马溪原

收稿日期: 2011-05-12。

作者简介:

马溪原(1986), 男, 博士研究生, 主要从事微电网方向的研究, maxiyuan1986@163.com;

吴耀文(1965), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事电力系统规划与运行方面的研究工作;

方华亮(1978), 男, 工学博士, 讲师, 从事电力系统分析方面的研究工作;

孙元章(1954), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 长江学者特聘教授, 主要研究方向为 FACTS、电力系统非线性控制、电力系统稳定性和电力系统运行可靠性。

(责任编辑 刘浩芳)