

# 基于双层优化的微电网系统规划设计方法

刘振国<sup>1,2</sup>, 胡亚平<sup>1,2</sup>, 陈炯聪<sup>1,2</sup>, 余南华<sup>1,2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 广东省智能电网  
新技术企业重点实验室, 广东 广州 510080)

**摘要:** 规划设计是微电网系统核心技术体系之一。从分布式电源的综合优化(组合优化、容量优化)和分布式电源间的调度优化两个方面对其展开研究。根据分布式电源特性, 提出了适用于并网型微电网系统和独立型微电网系统的双层优化规划设计模型。上层优化采用基于 NSGA-II 的多目标遗传算法计算系统最优配置; 下层优化采用混合整数线性规划算法(MILP)计算系统最优运行方案。运用所建立模型, 分别针对并网型和独立型微电网系统作了案例计算, 验证了所提方法的正确性。

**关键词:** 微电网; 双层优化; 规划设计; NSGA-II; MILP

## A planning and design method for microgrid based on two-stage optimization

LIU Zhenguo<sup>1,2</sup>, HU Yaping<sup>1,2</sup>, CHEN Jiongcong<sup>1,2</sup>, YU Nanhua<sup>1,2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;  
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Smart Grid Technology, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Planning and design for microgrid is one of the key technology. Comprehensive optimization (including combination optimization and capacity optimization) and dispatch optimization for distributed generations (DG) are studied. Based on the characteristics of DGs, a two-stage optimal planning and design model for microgrid is presented, which can apply to both stand-alone microgrid and grid-connected microgrid. For the first stage, multi-objective genetic algorithm based on non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) is used to calculate the optimal system configuration, while the mixed integer linear programming (MILP) is used to deal with the dispatch optimization in the second stage. Using the presented model, a case study is made for stand-alone microgrid and grid-connected microgrid respectively, and the validity of the method is verified.

This work is supported by National High-technology R & D Program of china (863 Program) (No. 2012AA050212).

**Key words:** microgrid; two-stage optimization; planning and design; NSGA-II; MILP

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0124-10

## 0 引言

微电网系统可将多种类型的分布式发电单元组合在一起, 有效发挥单一能源系统的优点, 实现多种能源互补, 提高整个微电网系统的效率、能源利用率和供电可靠性。根据其是否与常规电网相连接, 微电网可以分为并网型微电网和独立型微电网<sup>[1]</sup>。微电网接入配电网并网运行, 不仅可以充分利用微电网内部的绿色可再生能源, 还可以提高整个电网

的安全性, 是中国建成智能电网的重要环节。同时, 独立型微电网系统是解决偏远地区 and 海岛供电的有效手段之一<sup>[2-3]</sup>。

规划设计是微电网系统核心技术体系之一, 它直接关系到系统经济性、环保性和可靠性<sup>[4]</sup>。在规划设计的过程中, 需要考虑可再生能源的间歇性、灵活多变的系统组合方案和不同系统运行控制策略, 这些因素的存在使微电网系统优化规划变得较为复杂<sup>[5-7]</sup>。本文将从分布式电源的综合优化(优化组合、优化容量)和分布式电源间的优化调度两个方面出发, 对微电网系统优化规划展开研究。

围绕微电网系统的优化规划, 很多学者已对其开展了一定研究, 提出一系列运行控制策略和优化

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划项目(863项目)(2012AA050212); 广东省智能电网新技术企业重点实验室资助项目(2060299)

规划方法。微电网系统运行控制策略可分为固定策略和优化策略, 固定策略以事先拟定的优先级制定系统运行规则, 优化策略则根据相应目标函数求解系统最优运行规则<sup>[8]</sup>。在美国国家新能源实验室(NERL)开发的 Hybrid2<sup>[9]</sup>仿真软件中, 提出十几种独立微电网系统固定运行策略, 包括平滑功率策略(Traditional Power Smoothing, TPS)、硬充电策略(Hard Cycle Charge, HCC)等, 较为全面地概括了独立微电网系统固定策略控制模式。在该软件中所提出的硬充电策略的基础上, 文献[10]提出了一种适用于风光柴储独立微电网系统的修正硬充电策略, 可有效延长蓄电池使用寿命。在微电网系统的优化调度方面, 通常选取系统调度周期内运行费用最小为优化目标, 文献[11-12]研究了独立微电网系统的优化调度方法, 文献[13]提出了并网型风光柴微电网系统的微电网动态经济调度模型。

在微电网系统的优化规划方面, 大部分学者以智能算法为基础, 提出了一些规划方法, 并开发出一些成熟的规划软件, 如由美国国家新能源实验室开发的 HOMER 软件<sup>[14]</sup>, 其功能强大, 可用于并网型和独立型微电网的容量设计, 但其发电模型比较简单, 软件中仅具有两种简单的控制策略(负荷跟踪, 循环充电), 且优化过程过于偏重系统经济成本, 可再生能源优势得不到充分发挥<sup>[15]</sup>。文献[16]以系统投资费用、能量浪费惩罚费用、排污惩罚费用等系统综合成本最小为优化目标, 建立了风光柴储独立微电网系统的分布式电源容量优化模型。针对包含风力发电和光伏发电的混合能源微电网系统, 文献[17]提出了其在并网运行, 上网运行和孤岛运行时的不同运行策略, 并建立了微电网系统规划设计模型。针对独立微电网系统, 文献[18]采用修正硬充电策略, 提出了考虑经济性、可再生能源渗透率和污染物排放水平的多目标优化设计模型, 但这两种模型仅适用于独立微电网系统。文献[19]采用双层优化的方法, 对并网型冷热电联供微电网系统开展了优化规划研究, 但其并没有对独立型微电网系统开展研究。

上述文献并不能同时应用于并网型和独立型微电网系统的规划设计, 在微电网系统分布式电源综合优化方面, 较少考虑微电网系统分布式电源类型的优化, 在分布式电源优化调度方面, 大多采用固定策略作为系统的控制策略, 较少考虑分布式电源间的优化运行<sup>[20]</sup>。本文根据光伏、风能发电等分布式电源特性, 提出了适用于并网型微电网系统和独立型微电网系统的双层优化规划设计模型, 上层优化采用基于 NSGA-II 的多目标遗传算法计算系统最

优配置, 模型中考虑了分布式电源的类型优化、容量优化和组合优化; 下层优化采用混合整数线性规划算法计算系统最优运行方案, 实现系统的动态经济最优调度。运用本文建立模型, 分别针对并网型和独立型微电网系统作了案例计算, 验证了所提方法的正确性, 得出了具有参考意义的结论。

## 1 微电网系统规划设计架构研究

### 1.1 微电网系统结构

本文研究的微电网系统结构如图1所示。风力发电机、光伏发电和储能系统等通过各自的变流器接入交流微电网系统, 并通过公共连接点(PCC)与配电网连接, 组成并网型微电网。通过对该微电网的控制, 可实现微电网的孤岛和并网运行。柴油发电机采用同步发电机发电, 直接并入交流微电网。在优化规划设计中, 忽略线路阻抗引起的损耗。

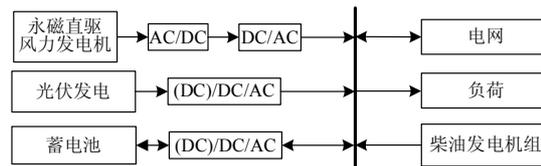


图 1 微电网系统结构图

Fig. 1 Structure of the microgrid system

### 1.2 微电网系统双层规划设计结构

本文采用双层优化规划方法对微电网系统进行优化, 上层为容量优化模块, 用于寻找系统最优配置, 包括系统各设备类型、台数和容量, 下层为调度优化模块, 用于计算系统最优运行方案。

双层优化含有两个层次, 上层决策结果一般会影响下层目标和约束条件, 而下层则将决策结果反馈给上层, 从而实现上下层决策的相互作用, 如图2所示为本文双层优化逻辑图。

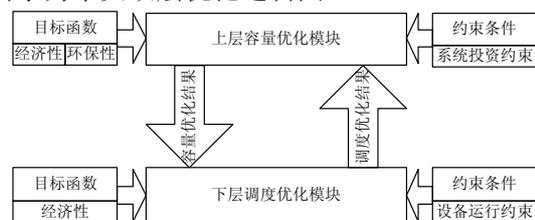


图 2 双层优化逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of the two-stage optimization

## 2 基于双层优化的微电网系统规划设计数学模型

### 2.1 双层优化模型

Bracken J 和 McGill J T 于 1973 年最早提出了多层规划的概念, 已解决多层规划/优化问题, 双层规划是多层规划的特例。双层规划在输电系统、无

功优化、配电系统优化规划等领域已有研究报道。数学上双层优化可描述为

$$\begin{cases} J_1 = \min_x F(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \text{s.t. } G(x) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} J_2 = \min_y f(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \text{s.t. } g(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $F(\bullet)$ 为上层优化的目标函数； $x$ 为上层优化的决策向量； $G(\bullet)$ 为上层优化所需满足的约束条件； $f(\bullet)$ 为下层优化的目标函数； $y$ 为下层优化的决策向量； $g(\bullet)$ 为下层优化所需满足的约束条件。

## 2.2 上层容量优化模型

### 2.2.1 目标函数

本文选取微电网项目周期内系统经济性能和环保性能作为评估系统优劣的指标，可描述为

$$J_1 = \min(F_1, F_2) \quad (3)$$

#### (1) 全寿命周期经济现值

微电网系统的全寿命周期经济现值可由式(4)计算。

$$F_1 = C_{\text{NPC}} = \frac{C_{\text{TANN}}}{\text{CRF}_l} \quad (4)$$

式中： $C_{\text{TANN}}$ 指等年值费用； $\text{CRF}_l$ 指资本回收系数(the Capital Recovery Factor)，可由式(5)计算。

$$\text{CRF}_l = \frac{r(1+r)^l}{(1+r)^l - 1} \quad (5)$$

式中： $l$ 表示年数； $r$ 表示资本的年利率。

系统等年值费用由设备投资等年值费用和系统年运行和设备维护费用组成。计算公式为

$$C_{\text{TANN}} = C_{\text{fac}} + C_{\text{ope}} + C_{\text{OM}} \quad (6)$$

式中： $C_{\text{TANN}}$ 指项目投资等年值费用； $C_{\text{fac}}$ 指设备投资等年值； $C_{\text{ope}}$ 指系统年运行费用； $C_{\text{OM}}$ 指设备年维护费用。

设备投资等年值费用使用式(7)计算。

$$C_{\text{fac}} = \sum_{i \in \text{fac}} C_{l,i} \cdot \text{CRF}_l \quad (7)$$

式中： $C_{l,i}$ 指设备*i*初始投资费用； $l_i$ 为设备*i*运行寿命期望值。

系统年运行费用包括系统购电费用、燃料购买费用和卖电收益，计算公式为

$$C_{\text{ope}} = C_E + C_F - C_S \quad (8)$$

式中： $C_E$ 指系统年购电费用； $C_F$ 指系统年购买燃料费用； $C_S$ 指年卖电收益。

#### (2) 污染物排放

柴油发电机以柴油作为主要燃料，其污染物包括 CO、CO<sub>2</sub>、燃料中未燃烧尽的碳氢化合物、硫化物和一氧化氮。污染物的排放量与燃料消耗量直

接相关。微电网年排放水平等于年燃料消耗量乘以其气体排放系数。

$$F_2 = (\sigma^{\text{CO}_2} + \sigma^{\text{CO}} + \sigma^{\text{HC}} + \sigma^{\text{NO}} + \sigma^{\text{S}})v_F \quad (9)$$

其中： $\sigma^{\text{CO}_2}$ 、 $\sigma^{\text{CO}}$ 、 $\sigma^{\text{HC}}$ 、 $\sigma^{\text{NO}}$ 、 $\sigma^{\text{S}}$ 分别代表各污染物的排放系数(kg/L)； $v_F$ 代表柴油发电机的年消耗燃料量(L)。

### 2.2.2 约束条件

由于系统为多目标优化，为保证系统优化目标在可接受范围内，限制系统目标函数在一定区间内，即

$$F_i < F_{i,\text{max}} \quad i=1,2 \quad (10)$$

### 2.2.3 优化变量

选择微电网系统中的柴油发电机类型  $DG_{\text{type}}$ ，柴油发电机台数  $DG_{\text{number}}$ ，风机类型  $WT_{\text{type}}$ ，风机台数  $WT_{\text{number}}$ ，光伏电池容量  $PV_{\text{capacity}}$ ，蓄电池容量  $BAT_{\text{capacity}}$  和变流器容量  $CON_{\text{capacity}}$  为优化变量。定义优化变量为

$$X = [DG_{\text{type}}, DG_{\text{number}}, WT_{\text{type}}, WT_{\text{number}}, PV_{\text{capacity}}, BAT_{\text{capacity}}, CON_{\text{capacity}}] \quad (11)$$

## 2.3 下层调度优化模型

### 2.3.1 目标函数

调度优化模型选取 24 h 为调度尺度，实现系统的动态经济调度，以系统日运行费用最低为目标函数，包括日购电费用、日燃料购买费用、日卖电收益。

$$J_2 = \min(C_e + C_f + C_s) \quad (12)$$

式中： $C_e$ 指系统日购电费用； $C_f$ 指系统日燃料购买费用； $C_s$ 指系统日卖电收益。

### 2.3.2 约束条件

#### 2.3.2.1 功率平衡约束

$$P_G - P_S + P_{\text{DG}} + P_{\text{CON}} = P_L - P_{\text{PV}} - P_{\text{WT}} \quad (13)$$

式中： $P_G$ 指电网购电功率； $P_S$ 指电网卖电功率； $P_{\text{DG}}$ 指柴油发电机功率； $P_{\text{CON}}$ 指变流器功率，整流为负，逆变为正； $P_L$ 指负荷功率； $P_{\text{PV}}$ 指光伏发电功率； $P_{\text{WT}}$ 指风机发电功率。

#### 2.3.2.2 设备性能约束

##### (1) 柴油发电机

本文采用简化线性功率燃料曲线描述柴油发电机发电量和燃料消耗量之间的关系为

$$F = F_0 \cdot Y_{\text{gen}} + F_1 \cdot P_{\text{gen}} \quad (14)$$

其中： $F_0$ 是燃料曲线的截距系数(L/h/kW)； $F_1$ 是燃料曲线的斜率(L/h/kW)； $Y_{\text{gen}}$ 是发电机的额定容量(kW)。

由于柴油发电机运行于低负载率时效率较低，为使燃气发电机以高效率运行，柴油发电机出力应满足如式(15)的约束。

$$P_{DG,\min} u_{DG} \leq P_{DG} \leq P_{DG,\max} u_{DG} \quad (15)$$

其中:  $P_{DG,\min}$  和  $P_{DG,\max}$  分别是柴油发电机出力的最小有功功率和最大有功功率(kW);  $u_{DG}$  是二进制变量, 标志柴油发电机的启停(0 表示关机, 1 表示开机)。

### (2) 蓄电池性能约束

蓄电池作为储能设备, 其能量存储就有时间上的耦合性, 即本时刻的储能状态受上一时刻储能状态影响。即

$$W_t^B = W_{t-1}^B(1 - \eta^{B,l}) + (P_t^{B,c} - P_t^{B,d})/C^B \quad (16)$$

式中:  $W_t^B$  和  $W_{t-1}^B$  分别为  $t$  和  $t-1$  时段蓄电池储能状态;  $\eta^{B,l}$  指蓄电池自损耗率;  $P_t^{B,c}$  和  $P_t^{B,d}$  分别指蓄电池最大充电功率和最大放电功率;  $C^B$  指蓄电池容量。

由于文中调度运行仅针对 1 天仿真, 每天的结束时段蓄电池储能状态值应等于每日初始时段的储能状态, 即

$$W_{24}^B = W_0^B \quad (17)$$

时段  $t$  蓄电池的最大充电功率计算公式为

$$0 \leq P_t^{B,c} \leq X_t^B r^{B,\max,c} C^B \quad X_t^B = \{0,1\} \quad (18)$$

同理, 最大放电功率计算公式为

$$0 \leq P_t^{B,d} \leq Y_t^B r^{B,\max,d} C^B \quad Y_t^B = \{0,1\} \quad (19)$$

同时, 蓄电池同一时段不允许同时充放电, 因此应满足如式(20)的约束。

$$X_t^B + Y_t^B \leq 1 \quad (20)$$

其中:  $\gamma^{B,\max,c}$ 、 $\gamma^{B,\max,d}$  分别指蓄电池最大充放电倍率;  $X/Y$  均为二进制变量, 指蓄电池充放电标志位, 其值不允许同时为 1。

为延长蓄电池使用寿命, 其荷电状态(SOC)应满足如式(21)的约束。

$$SOC_{\min} \leq SOC \leq SOC_{\max} \quad (21)$$

式中:  $SOC_{\min}$ 、 $SOC_{\max}$  分别指蓄电池荷电状态最小值和最大值;  $SOC_t$  指  $t$  时刻蓄电池荷电状态。

### (3) 变流器性能约束

由于系统仅针对蓄电池用双向变流器进行容量优化, 此处变流器指蓄电池用双向变流器, 其运行约束为

$$P_{CON} = \begin{cases} P_{B,c} / \eta_{B,c} / \eta_{CON,rec} \\ P_{B,d} \eta_{B,d} \eta_{CON,inv} \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $\eta_{B,c}$ 、 $\eta_{B,d}$  分别指蓄电池充、放电效率;  $\eta_{CON,rec}$ 、 $\eta_{CON,inv}$  分别指变流器整流、逆变效率。

### (4) 光伏发电模型

采用式(23)计算光伏阵列的输出功率。

$$P_{PV} = f_{PV} P_{V,cap} \left( \frac{I_T}{I_S} \right) [1 + \alpha_p (T_{cell} - T_{cell,STC})] \quad (23)$$

其中:  $f_{PV}$  为光伏阵列降额因数, 表示光伏实际输出与额定条件输出的比值, 用于计及由于光伏板表面污渍和雨雪的遮盖以及光伏板自身老化等引起的损耗, 一般取 0.9;  $P_{V,cap}$  为光伏阵列的额定容量(kW);  $I_T$  为光照强度(kW/m<sup>2</sup>);  $\alpha_p$  为功率温度系数(%/°C); 规定无风, 光照强度为 1 kW/m<sup>2</sup>, 光伏电池温度 25 °C 为光伏标准测试条件(Standard Test Conditions, STC);  $I_S$  和  $T_{cell}$  分别为标准测试条件下的光照强度和光伏电池温度, 取值为 1 kW/m<sup>2</sup> 和 25 °C。室外环境温度对于光伏板的运行效率有影响, 通常环境温度增高, 光伏阵列的运行效率会下降。光伏电池温度  $T_{cell}$  可以通过式(24)进行计算。

$$T_{cell} = \frac{T_a + (T_{cell,NOCT} - T_{a,NOCT}) \left( \frac{I_T}{I_{T,NOCT}} \right) \left[ 1 - \frac{\eta_{mp,STC} (1 - \alpha_p T_{cell,STC})}{\tau \alpha} \right]}{1 + (T_{cell,NOCT} - T_{a,NOCT}) \left( \frac{I_T}{I_{T,NOCT}} \right) \left( \frac{\alpha_p \eta_{mp,STC}}{\tau \alpha} \right)} \quad (24)$$

式中:  $T_a$  是环境温度(°C); 规定光照强度为 0.8 kW/m<sup>2</sup>、环境温度为 20 °C、风速为 1 m/s 为光伏额定运行条件(Normal Operating Cell Temperature, NOCT);  $I_{T,NOCT}$  和  $T_{a,NOCT}$  分别表示额定运行条件的光照强度和环境温度, 取值为 0.8 kW/m<sup>2</sup> 和 20 °C;  $T_{cell,NOCT}$  是指在额定运行条件下光伏电池的表面温度, 一般取值为 45~48 °C;  $\eta_{mp,STC}$  是标准测试条件下最大功率点效率, 由于假设光伏系统运行在最大功率点处, 使用该点的效率表示光伏运行效率;  $\tau$  指光伏阵列遮盖物的太阳能透过率, 一般取 90% 的默认值;  $\alpha$  是 PV 阵列的太阳能吸收率, 指表面能够吸收太阳能的比例, 默认值 90%。

### (5) 风机发电性能约束

风机功率按式(25)计算。

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci}, v \geq v_{co} \\ P(v) & v_{ci} < v < v_{co} \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $v$  为风机轮毂高度处的实际风速;  $v_{ci}$ 、 $v_{co}$  为切入风速和切出风速, 当实际风速低于或高于实际风速时, 风机都不工作;  $P(v)$  为正常风速范围内风机出力, 由风速-功率曲线线性插值得到。

#### 2.3.2.3 系统运行约束

微电网系统从电网购电和售电应满足如式(26)的约束。

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_G \leq P_{G,\max} \\ 0 &\leq P_S \leq P_{S,\max} \end{aligned} \quad (26)$$

其中,  $P_{G,\max}$ 、 $P_{S,\max}$  分别指系统最大购电功率和最大卖电功率。

同时, 系统运行中各设备出力不能超过其额定功率限制。

### 2.3.3 优化变量

选取系统中每小时购电功率  $P_G$ 、卖电功率(或弃能功率) $P_S$ 、柴油发电机出力  $P_{DG}$ 、蓄电池充放电功率  $P_{B,C}$ 、 $P_{B,D}$  为优化变量, 可描述为

$$X_2 = [P_G, P_S, P_{DG}, P_{B,c}, P_{B,d}] \quad (27)$$

## 3 系统求解方法

### 3.1 基于 NSGA-II 的多目标遗传算法求解上层容量优化问题

多目标优化通常作为一种在不同目标中寻找最优解的有效方法。由于这些目标可能是非线性的、矛盾的或不可测量的, 多目标的全局最优解通常通过 Pareto 最优解集获得。Pareto 是不同目标解的折中方案, 决策者可以依据 Pareto 前沿和对不同目标的需求做出决策。当使用多目标遗传算法时, 所得到的解并没有好坏之分。因此, 它避免了将多目标问题转化为单目标问题权重问题的引入。本文基于 NSGA-II 的多目标遗传算法<sup>[21]</sup>被用来求解多目标问题。

如图 3 所示, 结合本文求解模型, 基于 NSGA-II 的多目标遗传算法求解上层优化问题的流程可描述如下。

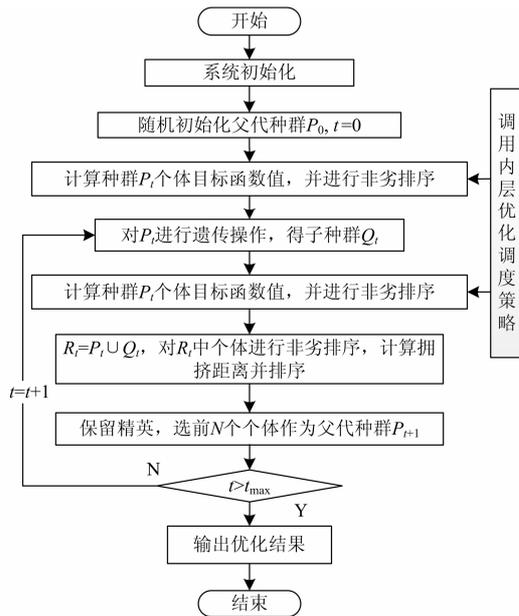


图 3 微电网系统优化求解流程图

Fig. 3 Optimization algorithm flow chart of microgrid system

- 1) 系统初始化。读取系统各设备、负荷、日照、风速、遗传算法等参数。
- 2) 初始化种群  $P_0$ , 通过随机函数产生  $N$  个个体, 作为初始种群  $P_0$ , 取  $t=0$ 。
- 3) 调用下层优化调度策略, 计算种群  $P_t$  适应度

值。按式(28)计算各个体适应度函数值。

$$Fitness = \begin{cases} [f_1(X), f_2(X)], & X \text{ 是一个可行解} \\ [f_{1,max}(X) + \Delta, f_{2,max}(X) + \Delta], & X \text{ 不是可行解} \end{cases} \quad (28)$$

其中:  $f_{1,max}(X)$ 表示所有个体的第 1 个目标函数值中的最大值;  $f_{2,max}(X)$ 表示所有个体的第 2 个目标函数值中的最大值;  $\Delta$  为不满足约束条件个体的相关约束的绝对值之和。

4) 对种群  $P_t$  执行遗传操作, 生成子代种群  $Q_t$ 。

5) 从父代种群  $P_t$  中通过遗传操作(选择、交叉和变异)得到子代种群  $Q_t$ 。

6) 调用下层优化调度策略, 计算种群  $Q_t$  适应度值。

7) 将当前种群  $P_t$  与子代种群  $Q_t$  合并得种群  $R_t$ , 根据适应度函数值, 计算各个体的支配关系和聚集距离, 对个体进行 Pareto 排序。

8) 保留精英, 从种群  $R_t$  中选择前  $N$  个个体作为父代中期  $P_{t+1}$ 。

9) 终止条件。判断终止条件, 若满足, 则输出系统的优化结果, 否则返回 4)。

### 3.2 混合整数线性规划算法求解下层调度优化问题

混合整数线性规划是一类重要的数学规划问题, 它与一般规划问题的区别, 在于这类问题的数学模型可以用线性的关系式来表示<sup>[22]</sup>。一个混合整数线性规划问题的完整数学描述, 包括一个用于求解最大值或最小值的线性目标函数, 一个联立线性方程组, 以及各优化变量的约束条件。

本文所提混合整数线性规划问题可被写成

$$\begin{aligned} \min \quad & cx \\ \text{s.t.} \quad & Ax \begin{cases} \geq \\ = \\ \leq \end{cases} = b \\ & x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \quad i \in I \\ & x_j \in \{0, 1\} \quad j \in J \end{aligned} \quad (29)$$

式中:  $cx$  指目标函数;  $A$  指联立线性方程组系数矩阵;  $b$  指联立线性方程组值;  $x_i$  和  $x_j$  分别指连续型变量和整形变量。本文应用修正单纯性法(Revised simplex method)解决线性规划问题, 分支界定法(Branch and bound method)解决混合整数问题。

## 4 算例分析

### 4.1 算例概述

选取我国南部某社区作为研究对象, 该社区建有光伏系统、风机系统、柴油发电机以及蓄电池, 由于设备容量及政策限制, 所发电量仅发自自用,

不上网。根据该社区全年预测的风力、光照强度和电负荷需求情况, 采用本文提出的优化模型进行优化配置计算。仿真时间步长为 1 h, 选取 20 年作为工程寿命周期。为缩短系统优化运行时间, 系统下层调度优化采用典型日数据替代系统全年数据, 将数据分为工作日、高峰日、休息日, 取每月 20 个工作日, 8 个休息日, 3 个高峰日。

柴油发电机、光伏电池、风力发电机、铅酸蓄电池和电池用变流器的相关参数分别如表 1 所示。

表 1 系统设备参数

Table 1 Technology parameters of the system		
柴油发电机		
单机额定功率	50 kW	120 kW
使用寿命	15 年	15 年
最小负荷率	40%	40%
截距系数	0	0
燃料曲线斜率	0.27 L/h/kW	0.25 L/h/kW
初始投资费用	1 500 元/kW	1 300 元/kW
运行维护费用	0.02 元/kWh	0.015 元/kWh
燃料费用	7.36 元/L	7.36 元/L
风机		
单机额定功率	30 kW	50 kW
使用寿命	15 年	15 年
轮毂高度	15 m	18 m
切入风速	3 m/s	3 m/s
切出风速	24 m/s	24 m/s
初始投资费用	6 000 元/kW	7 000 元/kW
运行维护费用	2 000 元/年	9 150 元/年
光伏		
降额因数	0.8	
额定功率	1 kW	
STC 下效率	0.13	
温度系数	-0.005	
使用寿命	25 年	
初始投资费用	6 195 元	
运行维护费用	230 元	
蓄电池		
自损耗率	0.04	
最大充电速率	0.2	
最大放电速率	0.4	
充电效率	0.95	
放电效率	0.95	
最大 SOC	0.9	
最小 SOC	0.2	
初始投资费用	5 400 元/kWh	
运行维护费	0 元	
变流器		
使用寿命	20 年	
逆变效率	0.95	
整流效率	0.95	
初始投资费	5 000 元/kWh	
运行维护费	0 元	

选取单机额定功率分别为 50 kW 和 100 kW 两种类型的柴油发电机, 单机额定功率分别为 30 kW 和 50 kW 的风力发电机进行优化设计。光伏发电的最大安装容量受场地铺装面积限制, 最大可安装容量为 150 kW; 风电机组的最大容量受园区绿地等空间限制, 最大可安装 10 台; 柴油发电机的最大安装台数根据负荷大小设定为 4 台; 蓄电池最大安装容量为 1 000 kWh; 蓄电池用双向变流器最大安装容量为 200 kW。系统优化规划使用年限为 20 年, 折现率  $r$  取为 3%。遗传算法中的种群个数为 40, 迭代次数  $T$  为 400, 交叉率为 0.9, 变异率为 0.2。

图 4~图 6 为该社区月平均负荷值、风速值和光照值, 其中月平均负荷值为工作日、高峰日、休息日 3 个典型日的平均值。表 2 为系统分时电价, 由于该系统发电仅自发自用, 不上网, 算例中不考虑上网电价。表 3 为柴油和电网污染物排放参数表。

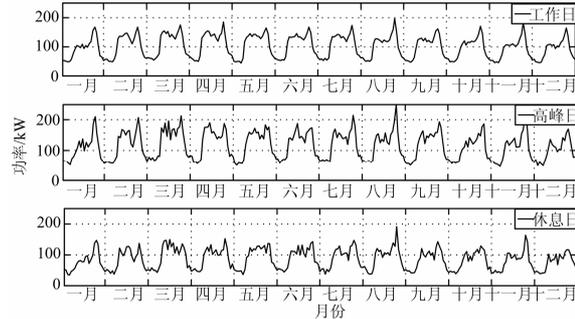


图 4 月平均负荷

Fig. 4 Monthly load of the district

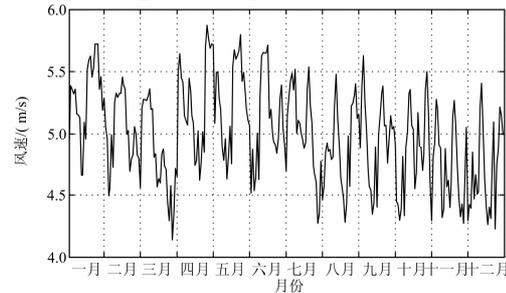


图 5 月平均风速

Fig. 5 Monthly wind speed of the district

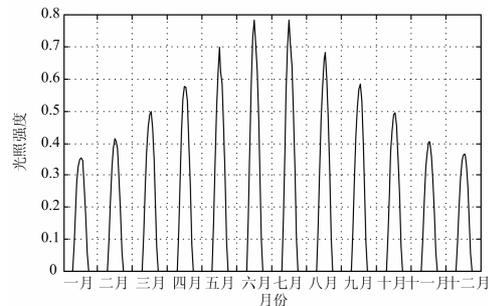


图 6 月平均光照强度

Fig. 6 Monthly solar radiation of the district

### 4.2 并网型微电网系统

根据 4.1 节所述算例，图 7 为并网型微电网系统优化结果 Pareto 前沿，由图可以看出系统全寿命周期经济现值和全寿命周期污染物排放是一对矛盾的目标，微电网的不同配置方式，对系统经济性和环保性有较大影响。

表 2 分时电价

价格/(元/kWh)	时间段
0.471 1	23:00~7:00
0.875 9	7:00~9:00
	12:00~14:00
1.094 7	16:00~19:00
	21:00~23:00
1.094 7	9:00~12:00
	14:00~16:00
	19:00~21:00

表 3 污染物排放参数表

污染物	柴油排放/(g/L)	电网排放/(g/kWh)
CO <sub>2</sub>	2 633.3	864.7
CO	6.5	8.0
氮氧化物	2.2	30.9
SO <sub>2</sub>	58	39.4

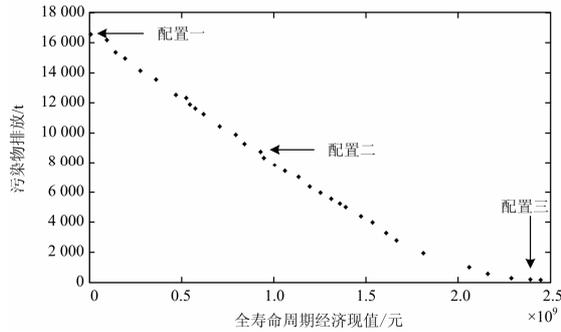


图 7 并网型微电网系统优化结果 Pareto 前沿

Fig. 7 Pareto frontier of the grid-connected microgrid optimal results

表 4 为图 7 中所列三种配置的具体参数，由表 4 可以看出，配置一中所有设备容量为零，说明从经济性角度出发，在文中所列设备价格、柴油价格和售电价格下，并网型微电网系统并不能给用户带来经济效益，对比配置一至配置三中污染物排放可以看出，并网型微电网系统可以给用户带来明显的环保效益。系统中各设备容量受其他设备容量影响，蓄电池用变流器容量受蓄电池容量制约，蓄电池容量同时受可再生发电装置影响。风机、光伏等可再生能源发电设备的接入，可明显降低系统排污水平，但对系统经济性影响较大。

图 8 为并网型微电网系统中配置二在 12 月休

息日优化调度方案，由此可以看出分时电价对系统运行的影响：在低谷电价和平值电价时，从电网买电为蓄电池充电；在峰值电价时，优先使用风机发电和光伏发电满足负荷需求，不足由蓄电池放电补充，尽量不从电网买电。

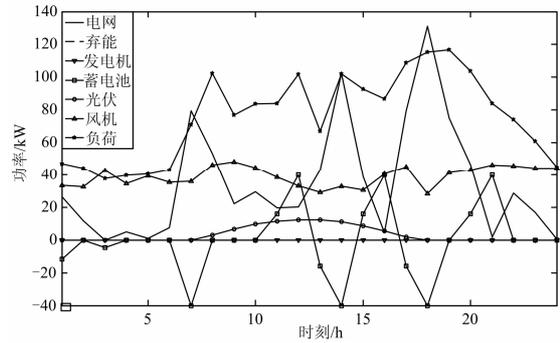


图 8 并网型微电网系统优化调度方案

Fig. 8 Optimization scheduling of the grid-connected microgrid system

### 4.3 独立型微电网系统

根据 4.1 节所述算例，图 9 为独立型微电网系统优化结果 Pareto 前沿，相比并网型微电网系统优化结果，独立型微电网系统不能向电网购电，负荷均由分布式发电装置满足，污染物排放相对较小，但由于分布式发电装置的接入，全寿命周期经济现值相对较大。

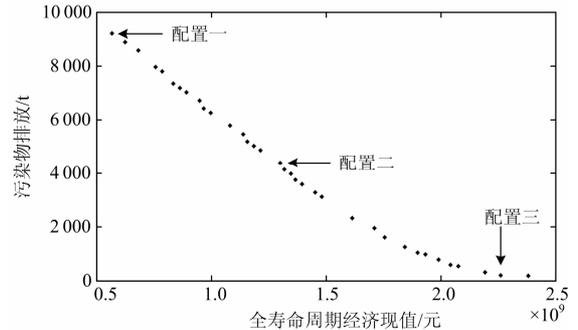


图 9 独立型微电网系统优化结果 Pareto 前沿

Fig. 9 Pareto frontier of the stand-alone microgrid system optimal results

表 5 为图 9 中所列三种配置的具体参数，由表 5 可以看出，对于独立型微电网系统，为保证负荷的供电可靠性，柴油发电机和蓄电池装机容量均较大。同并网型微电网系统优化结果，各设备容量间具有较强的耦合关系。

图 10 为独立型微电网系统中配置一在 12 月休息日优化调度方案，由于系统不能向电网购电，蓄电池仅用于储存系统中可再生能源发电剩余电能，

表 4 并网型微电网系统优化结果

Table 4 Optimal results of the grid-connected microgrid system

	配置一	配置二	配置三
经济现值/万元	879.501	92 818.6	228 837
污染物排放/t	16 550.7	8 731.74	272.768
维护费用/万元	0	4.214	12.6
运行费用/万元	879.501	92 523.1	227 695
系统购电/(kWh/年)	877 556	462 977	14 462.8
系统弃能/(kWh/年)	0	25.010 9	148 758
发电机发电/(kWh/年)	0	0	0
蓄电池放电/(kWh/年)	0	62 423.9	152 615
光伏发电/(kWh/年)	0	43 447.4	162 928
风机发电/(kWh/年)	0	383 987	880 291
负荷功率/(kWh/年)	877 556	877 556	877 556
燃料消耗/(L/年)	0	0	0
发电机类型	无	50 kW	50 kW
发电机台数	0	0	1
风机类型	无	30 kW	50 kW
风机台数	0	6	10
蓄电池容量/kWh	0	80	680
光伏容量/kW	0	40	150
变流器容量/kWh	0	40	230

表 5 独立型微电网系统优化结果

Table 5 Optimal results of the stand-alone microgrid system

	配置一	配置二	配置三
经济现值/万元	56 806	129 986	226 037
污染物排放/t	9 212.99	4 403.47	205.939
维护费用/万元	5.330 89	7.857 3	12.413 3
运行费用/万元	56 112.6	129 127	224 922
系统购电/(kWh/年)	0	0	0
系统弃能/(kWh/年)	0	407.999	151 230
发电机发电/(kWh/年)	631 892	302 021	14 124.8
蓄电池放电/(kWh/年)	3 109.31	11 492.1	86 094.4
光伏发电/(kWh/年)	54 309.2	130 342	152 066
风机发电/(kWh/年)	191 994	447 985	880 291
负荷功率/(kWh/年)	877 556	877 556	877 556
燃料消耗/(L/年)	170 611	81 545.8	3 813.69
发电机类型/kW	50	50	50
发电机台数	3	3	3
风机类型/kW	30	30	50
风机台数	3	7	10
蓄电池容量/kWh	530	580	630
光伏容量/kW	50	120	140
变流器容量/kWh	260	260	260

在可再生能源发电出力不足时放电, 如仍有功率缺额, 由柴油机发电补足。由于该月可再生资源发电较少, 储能没有充放电, 系统功率缺额均由柴油机满足。

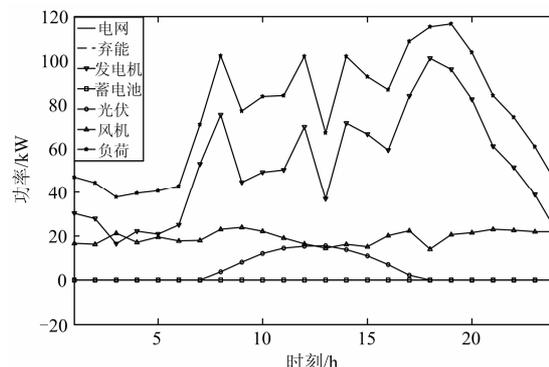


图 10 独立型微电网系统优化调度方案

Fig. 10 Optimization scheduling of the stand-alone microgrid system

## 5 结论

本文根据光伏、风能发电等分布式电源特性, 提出了适用于并网型微电网系统和独立型微电网系统的双层优化规划设计模型, 可实现微电网系统的分布式电源的综合优化, 以及分布式电源间的调度优化。运用本文建立的双层优化模型, 分别针对并网型和独立型微电网系统作了案例计算, 验证了所提方法的正确性。无论并网型微电网系统和独立型微电网系统, 系统经济性能和环境性能是一对矛盾的目标, 且优化结果表明各设备容量间具有较强的耦合关系。算法优化策略可以根据实际情况进行调整, 更倾向经济性能或环境性能, 以适应实际工程需要。

## 参考文献

- [1] 李瑞生. 微电网关键技术实践及实验[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 73-78.  
LI Ruisheng. Practice and experiment of the key microgrid technologies[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 73-78.
- [2] 张洋, 王伟, 李献伟. 基于有功缺额的微电网集中控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 106-111.  
ZHANG Yang, WANG Wei, LI Xianwei. Research on micro-grid centralized control strategy based on active power vacancy[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 106-111.

- [3] 艾欣, 金鹏, 孙英云. 一种改进的微电网无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 147-155.  
AI Xin, JIN Peng, SUN Yingyun. An enhanced reactive sharing control strategy of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 147-155.
- [4] 陆晓楠, 孙凯, GUERRERO J, 等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 35-42.  
LU Xiaonan, SUN Kai, GUERRERO J, et al. DC hierarchical control system for microgrid applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 35-42.
- [5] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 77-84.  
SUN Xiaofeng, LÜ Qingqiu. Improved PV control of grid-connected inverter in low voltage micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 77-84.
- [6] 何越, 李正天, 林湘宁. 微网分布式电源非线性功率控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 48-55.  
HE Yue, LI Zhengtian, LIN Xiangning. Study of nonlinear control of power output of DG in the micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 48-55.
- [7] 赵山, 文黎星, 赵伟, 等. 基于微电网的电能质量问题研究[J]. 广东电力, 2012, 25(10): 61-64.  
ZHAO Shan, WEN Lixing, ZHAO Wei, et al. Power quality research based on micro power grid[J]. Guangdong Electric Power Systems, 2012, 25(10): 61-64.
- [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] MANWELL J, ROGERS A, HAYMAN G, et al. Hybrid2—a hybrid system simulation model: theory manual[EB/OL]. <http://www.ecs.umass.edu/mie/labs/rerl/hy2/>.
- [10] 刘梦旋, 郭力, 王成山, 等. 风光柴储独立微电网系统协调运行控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 19-24.  
LIU Mengxuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. A coordinated operating control strategy for hybrid isolated microgrid including wind power, photovoltaic system, diesel generator and battery storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 19-24.
- [11] MORAIS H, KÁDÁR P, FARIA P, et al. Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming[J]. Renew Energy, 2010, 35(1): 151-156.
- [12] 石庆均, 耿光超, 江全元. 独立运行模式下的微电网实时能量优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 26-35.  
SHI Qingjun, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch of standalone microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 26-35.
- [13] 刘小平, 丁明, 张颖媛, 等. 微电网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77-84.  
LIU Xiaoping, DING Ming, ZHANG Yingyuan, et al. Dynamic economic dispatch for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 77-84.
- [14] HOMER V. 2.68beta National Renewable Energy Laboratory (NREL), 617 Cole Boulevard, Golden, CO 80401-3393[EB/OL]. <http://www.homerenergy.com/>.
- [15] 肖峻, 白临泉, 王成山, 等. 微电网规划设计方法与软件[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 149-157.  
XIAO Jun, BAI Linquan, WANG Chengshan, et al. Method and software for planning and designing of microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 149-157.
- [16] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微电网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 41(3): 575-581.  
DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 41(3): 575-581.
- [17] 杨艳红, 裴玮, 齐智平. 基于动态运行策略的混合能源微电网规划方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 30-36.  
YANG Yanhong, PEI Wei, QI Zhiping. Planning method

- for hybrid energy microgrid based on dynamic operation strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 30-36.
- [18] 刘梦璇, 王成山, 郭力, 等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 40(17): 34-39.  
LIU Mengxuan, WANG Chengshan, GUO Li, et al. An optimal design method of multi-objective based island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 40(17): 34-39.
- [19] GUO L, LIU W, CAI J, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system[J]. Energy Conversion and Management, 2013(74): 433-445.
- [20] 武星, 殷晓刚, 宋昕, 等. 中国微电网技术研究及其应用现状[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 142-149.  
WU Xing, YIN Xiaogang, SONG Xin, et al. Research on microgrid and its application in China[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 142-149.
- [21] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [22] 程世军, 孟杰, 王晓晖, 等. 风电-储能联合日运行优化调度模型[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(4): 68-72.  
CHENG Shijun, MENG Jie, WANG Xiaohui, et al. A joint daily operational optimization model for wind power and energy storage devices [J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(4): 68-72.

---

收稿日期: 2014-07-03

作者简介:

刘振国(1983-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微网、新能源及其利用; E-mail: flynee@126.com

胡亚平(1986-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统调度自动化测试与研究;

陈炯聪(1979-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统二次专业的研究及技术管理工作。

(编辑 周金梅)