

doi: 10.7690/bgzd.2024.09.017

# 一种基于多目标优化的独立微电网容量配置方法

陈 君, 唐秀明, 苏宇生

(湖南科技大学信息与电气工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 针对独立型微电网容量配置存在经济成本和供电可靠性难以实现同时最优的问题, 提出一种实现经济成本和供电可靠性最优的独立型微电网容量多目标优化配置方法。根据独立型风光储微电网系统中各分布式电源的机理构建风机、光伏、磷酸铁锂电池的数学模型, 以等年值投资成本为评估指标构建独立微电网经济成本模型, 功率偏差为评估指标构建出基于层次分析法的独立微电网可靠性模型, 使用非支配排序的多目标粒子群算法求解系统最优容量配置。算例结果表明, 该方法对独立型微电网容量配置在同时实现供电可靠性和经济性上更有优越性。

**关键词:** 独立型微电网; 多目标优化; 等年值投资成本; 容量优化配置

**中图分类号:** TM711 **文献标志码:** A

## An Independent Microgrid Capacity Allocation Method Based on Multi-objective Optimization

Chen Jun, Tang Xiuming, Su Yusheng

(School of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the economic cost and power supply reliability of independent microgrid capacity allocation are difficult to achieve simultaneously, a multi-objective optimal allocation method of independent microgrid capacity is proposed to achieve the optimal economic cost and power supply reliability. A mathematical model of a wind turbine, a photovoltaic and a lithium iron phosphate battery is constructed according to the mechanism of each distributed power supply in an independent wind-photovoltaic-storage microgrid system; an independent microgrid economic cost model is constructed by taking the equal annual investment cost as an evaluation index, and an independent microgrid reliability model based on an analytic hierarchy process is constructed by taking the power deviation as an evaluation index; Multi-objective particle swarm optimization with non-dominated sorting is used to solve the optimal capacity configuration of the system. The example results show that the proposed method is more advantageous in achieving both power supply reliability and economy for the capacity allocation of independent microgrid.

**Keywords:** isolated microgrid; multi-objective optimization; equal annual investment cost; optimal capacity allocation

### 0 引言

由于分布式电源的多样性及微电网运行方式的复杂性<sup>[1-2]</sup>, 微电网内各设备的容量合理配置对保证系统可靠性运行、减少投资成本等方面具有重要的指导意义<sup>[3]</sup>。容量优化配置在保证经济效益最优化的同时需要考虑环境影响以及系统的可靠性等多方面的最优化, 是典型的多目标优化问题。文献[4]提出考虑经济和环保的2个阶段优化配置模型。文献[5]采用分层优化配置, 先实现系统运行规划年限成本最低的优化配置方案, 后考虑供电可靠性的优化配置。文献[6]构建了基于不确定双层规划的综合能源系统优化调度模型, 上层以最小运营成本为目标函数, 下层模型综合考虑各子网的运行经济性。上述分阶段、分层对微电网容量优化配置的研究, 未实现多个目标同时最优。文献[7]通过建立燃料成

本、运行成本和污染气体排放成本的多目标优化配置模型, 使用多目标粒子群优化算法对微电网系统进行优化, 但未考虑系统可靠性对容量配置的影响。

鉴于以上分析, 为解决经济成本和供电可靠性难以实现同时最优的问题, 笔者提出一种基于经济性和可靠性为优化目标的多目标粒子群优化算法的微电网容量优化配置。一方面, 采用等年值投资成本构建出独立微电网经济成本模型, 包含初始投资成本、运行维护成本、置换成本、经济损失成本、新能源补贴等; 另一方面, 采用层次分析法确定负荷缺电率和能量浪费率2个子函数的权重, 构建独立微电网可靠性模型, 客观地反映负荷缺电率和能量浪费率对可靠性的影响; 然后, 建立独立型微电网发电系统容量优化模型多目标函数; 最后, 使用

收稿日期: 2024-05-17; 修回日期: 2024-06-20

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2020JJ4314)

第一作者: 陈 君(1977—), 男, 湖南人, 博士。

非支配排序的多目标粒子群算法求解出系统最优容量配置。通过算例仿真结果表明：该方法能有效实现独立型微电网经济性与可靠性同时最优，对独立微电网的容量配置有较好的指导作用。

## 1 独立型微电网结构及典型分布式电源模型

笔者主要研究独立型风光储微电网系统，包含分布式光伏系统、风力发电系统、磷酸铁锂储能系统、光伏 DC/AC 逆变器、风力 AC/AC 变流器、储能双向逆变器以及负荷，如图 1 所示。

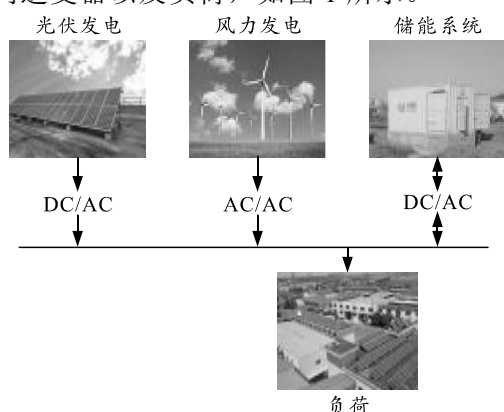


图 1 独立型微电网结构

### 1.1 光伏发电模型

光伏发电的输出功率大小与光伏电池的温度和光照强度相关。在一定时间段内，太阳光的光照强度可以近似等效为 Beta 分布。光伏电池输出的电压和电流随着太阳能电池上辐射强度和温度的变化而变化，光伏阵列输出功率为<sup>[8]</sup>：

$$P_{PV} = P_{STC} f_{PV} \frac{G_{AC}}{G_{STC}} \left[ 1 + \alpha_p (T_C - T_{STC}) \right] \quad (1)$$

式中： $P_{PV}$  为电池板的输出功率； $P_{STC}$  为额定容量； $f_{PV}$  为降额因子，表示电池衰减和尘土对太阳能电池的影响系数，一般取 0.9~0.95。 $G_{STC}$  为标准测试条件下的光照强度，取值为 1 kW/m<sup>2</sup>； $G_{AC}$  为光照强度，kW/m<sup>2</sup>； $\alpha_p$  为功率温度系数，其值为 -0.47 %/K； $T_C$  为电池板工作温度； $T_{STC}$  为标准测试条件下电池温度，取为 25 °C。

光伏电池板工作温度  $T_C$  计算公式如下：

$$T_C = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} G_{AC} \quad (2)$$

式中： $T_a$  为光伏电池安装点的温度；NOCT 为额定操作条件下的光伏电池温度，定义为光伏电池在太阳辐射强度为 800 W/m<sup>2</sup>、环境温度为 20 °C 操作条件下的光伏电池温度，NOCT 通常为 42~46 °C。

则由式(1)和(2)得出单块光伏电池功率输出表

达式如下：

$$P_{PV}(t) = P_{STC} f_{PV} \left( \frac{G_{AC}(t)}{G_{STC}} \right) \left[ 1 + \alpha_p (T_a + (NOCT - 20) \frac{G_{AC}(t)}{800} - T_{STC}) \right] \quad (3)$$

式中： $G_{AC}(t)$ 、 $T_a$  已知； $P_{STC}=0.2$  kW； $f_{PV}=0.9$ ； $G_{STC}=1$  kW/m<sup>2</sup>； $\alpha_p=-0.0047$ ；NOCT=44； $T_{STC}=25$ 。

### 1.2 风力发电模型

风机的发电原理为风力带动风车叶片旋转，使得风能转变为机械能，通过传动装置使风机的转子在磁场中旋转，最终使风机发出电能。影响风力发电机输出功率大小的关键因素就是风速的大小变化。不同高度不同粗糙度下的风速计算如下<sup>[9]</sup>：

$$v(t) = v_1(t) (h/h_1)^\alpha \quad (4)$$

式中： $v(t)$  为风机轮毂高度  $h=12$  m 处的实时风速； $v_1(t)$  为距地面某参考高度  $h_1=10$  m 的风速； $\alpha$  为地表粗糙度因子取 0.14。

得到风机轮毂处风速后，便可以得到风力机组的输出功率与风速之间关系如下：

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0, & v(t) < v_i \text{ 或 } v(t) > v_c \\ P_r (v(t)^k - v_i^k) / (v_r^k - v_i^k), & v_i \leq v(t) \leq v_r \\ P_r, & v_r < v(t) \leq v_c \end{cases} \quad (5)$$

式中： $P_{WT}(t)$  为单台风机的输出功率； $P_r$  为机组的额定功率； $v_i$ 、 $v_r$ 、 $v_c$  为风力机的启动风速、额定风速和截止风速； $k$  为威布尔分布参数。（取  $v_i=3$  m/s， $v_r=12$  m/s， $v_c=25$  m/s， $P_r=10$  kW， $k=3$ ）

### 1.3 磷酸铁锂电池模型

储能系统 (battery energy storage system, BESS) 由多组磷酸铁锂电池组成。电池荷电状态 (state of charge, SOC) 是衡量磷酸铁锂电池剩余电量的重要参数，SOC 由前一时刻剩余电量和相邻时刻充放电功率决定。

1) 当满足条件式(6)时，则判定磷酸铁锂电池处于充电状态：

$$\left. \begin{aligned} P_{WT}(t) + P_{PV}(t) > P_L(t) \\ SOC(t-1) < SOC_{max} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

磷酸铁锂电池处于充电状态时， $t$  时刻的荷电状态为<sup>[10]</sup>：

$$SOC(t) = (1 - \sigma) SOC(t-1) + P_c(t) \eta_c \cdot t / E_b \quad (7)$$

式中： $\sigma$  为磷酸铁锂电池的自放电率； $P_c(t)$  为磷酸铁锂电池的充电功率； $\eta_c$  为充电效率； $E_b$  为磷酸铁锂电池的额定容量。

2) 当满足条件式(8)时，则判定磷酸铁锂电池

处于放电状态：

$$\left. \begin{aligned} P_{WT}(t) + P_{PV}(t) < P_L(t) \\ SOC(t-1) > SOC_{\min} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

磷酸铁锂电池处于放电状态时， $t$  时刻的荷电状态为：

$$SOC(t) = (1 - \sigma)SOC(t-1) - P_d(t) \cdot t / \eta_d E_b \quad (9)$$

式中： $P_d(t)$ 为磷酸铁锂电池的放电功率； $\eta_d$ 为放电效率。 $(P_L(t))$ 已知， $SOC_{\min}=0.1$ ， $SOC_{\max}=0.9$ ， $SOC(t)$ 初始为 0.9； $E_b=2.4$  kWh， $\Delta t=1$ ， $\sigma=0.03$ ， $\eta_c=0.9$ ， $\eta_d=0.9$ )

## 2 独立型微电网系统容量优化模型

从独立型微电网系统供电可靠性与经济性 2 方面来建立容量配置与优化函数模型。首先，建立系统供电经济性模型与可靠性目标函数；然后，考虑系统的约束条件，主要包括功率平衡约束、磷酸铁锂电池充放电功率约束、荷电状态约束和可再生能源安装数量约束。

### 2.1 经济模型

经济性指标能够反映系统初期建设和运行维护期间的经济成本，国际上采用全寿命周期成本衡量发电系统的经济性<sup>[11]</sup>。本文中采用等年值投资成本  $C$  为目标函数，分别包含初始投资成本、运行维护成本、置换成本、经济损失成本、新能源补贴。

$$\left. \begin{aligned} C &= (C_{in} + C_m + C_r + C_{cop} - C_s)(r(1+r)^y / ((1+r)^y - 1)) \\ C_{in} &= c_{WT} N_{WT} + c_{PV} N_{PV} + c_b N_b \\ C_m &= (c'_{WT} N_{WT} + c'_{PV} N_{PV} + c'_b N_b) y_t \\ C_r &= c_{WR} N_{WT} k_{WT} + c_{PR} N_{PV} k_{PV} + c_{BR} N_b k_b \\ C_{cop} &= k * y_t * LPS * c_d \\ C_s &= y_t k_s \sum_{t=1}^{8760} (N_{WT} P_{WT}(t) + N_{PV} P_{PV}(t)) * t \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中： $C_{in}$ 、 $C_m$ 、 $C_r$ 、 $C_{cop}$ 、 $C_s$  分别为初始投资成本、运行维护成本、置换成本、经济损失成本、新能源补贴； $r$  为实际年利率，取 0.04； $y_t$  为系统的寿命年限，取 20； $c_{WT}$ 、 $c_{PV}$ 、 $c_b$  分别为单台风机、单块光伏电池、单块磷酸铁锂电池的购买成本； $N_{WT}$ 、 $N_{PV}$ 、 $N_b$  分别为系统内风力发电机、光伏电池、磷酸铁锂电池的数量； $c'_{WT}$ 、 $c'_{PV}$ 、 $c'_b$  分别为单台风机、单块光伏电池、单块磷酸铁锂电池的年维护成本； $c_{WR}$ 、 $c_{PR}$ 、 $c_{BR}$  分别为单台风机、单块光伏电池、单块磷酸铁锂电池的更换费用； $k_{WT}$ 、 $k_{PV}$ 、 $k_b$  为系统寿命周期内磷酸铁锂电池更换的次数； $c_d$  为电费单价，取 0.5 元/kWh； $k$  为惩罚系数，取 1 000；LPS 为全

年累计亏欠电量； $k_s$  为补贴的电价，取 0.1 元/kWh； $P_{WT}(t)$  为单台风机在  $t$  时刻的运行功率； $P_{PV}(t)$  为单块光伏电池在  $t$  时刻的运行功率。

### 2.2 可靠性模型

可靠性指标能够反映发电系统供电的可靠性与安全性，这里采用全年负荷缺电率和能量浪费率来衡量发电系统的可靠性<sup>[12]</sup>。

#### 1) 全年负荷缺电率。

独立型微电网的负荷缺电是指当光伏发电和风力发电所发电量之和不能够满足负荷用电需求，且磷酸铁锂电池荷电状态已达到荷电状态下限的现象。使用全年负荷缺电率 (loss of power supply probability, LPSP)，即在全年 8 760 h 内，全年负荷缺电量与全年负荷需求电量的比值来衡量。

$t$  时刻负荷亏欠的电量可表示如下：

$$S(t) = P_L(t) - (P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_B(t)) = P_L(t) - \left( \sum_{i=1}^{N_{WT}} P_{WT,i}(t) + \sum_{j=1}^{N_{PV}} P_{PV,j}(t) + \sum_{n=1}^{N_b} P_{b,n}(t) \right) \quad (11)$$

式中： $P_B(t)$  为磷酸铁锂电池组的充放电功率，当磷酸铁锂电池处于充电状态时  $P_B(t) \leq 0$ ， $P_B(t) = -P_c(t)$ ；当磷酸铁锂电池处于放电状态时  $P_B(t) \geq 0$ ， $P_B(t) = P_d(t)$ ； $P_L(t)$  为  $t$  时刻负荷所需功率； $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$  分别为  $t$  时刻风机、光伏阵列的出力， $P_{WT,i}(t)$  为第  $i$  个风力发电机在  $t$  时刻的输出功率； $P_{PV,j}(t)$  为第  $j$  个光伏电池在  $t$  时刻的输出功率； $P_{b,n}(t)$  为第  $n$  个磷酸铁锂电池在  $t$  时刻的充放电功率。

当  $S(t) > 0$  时，表示  $t$  时刻负荷处于缺电状态，缺电量为  $S(t)$ ；

$$LPS(t) = S(t), \quad S(t) > 0 \quad (12)$$

式中 LPS( $t$ ) 为第  $t$  小时负荷亏欠的电量。

由式可知，全年负荷缺电率可表示为：

$$LPSP = \sum_{t=1}^{8760} LPS(t) / \sum_{t=1}^{8760} P_L(t) \quad (13)$$

由全年负载缺电率定义可以看出，LPSP 的值介于 0~1 之间，且数值越小可靠性越好。通常，对于独立型微电网系统，要求 LPSP 的值不超过 5%。

#### 2) 全年能量浪费率。

独立型微电网发电系统中，当光伏发电和风力发电所发电量之和超出负荷用电需求时，且磷酸铁锂电池荷电状态已达到荷电状态的上限时，就会出现能量浪费的现象。在全年 8 760 h 内，全年能量浪费量与全年负荷需求电量的比值称为全年能量浪费率 (surplus of power supply probability, SPSP)。

当  $S(t) \leq 0$  时，表示  $t$  时刻能量过剩，具体表示如下：

$$SPS(t) = |S(t)|, S(t) \leq 0. \quad (14)$$

式中  $SPS(t)$  为第  $t$  小时系统浪费的能量。

由式可知，全年能量浪费率可表示为：

$$SPSP = \sum_{t=1}^{8760} SPS(t) / \sum_{t=1}^{8760} P_L(t). \quad (15)$$

### 3) 可靠性优化目标函数。

为综合考虑负荷缺电率与能量浪费率对独立型微电网可靠性的影响，运用层次分析法确定负荷缺电率与能量浪费率的权重，进而得到独立型微电网的可靠性综合目标函数  $F$ 。

层次分析法能是一种定性与定量相结合确定权重的方法。它在反映客观情况的同时体现了使用者对各目标的重视程度。以可靠性优化目标函数评价的指标为 2 个，通过运用表 1 的标度标准对各指标之间的关系进行标度，进而得出判断矩阵，经过相关的计算得到该矩阵的最大特征值和特征向量，然后对得到的特征向量归一化处理，并判断其是否可以通过一致性检验，若通过，则所获得的特征向量即为各指标的权重系数。

表 1 判断矩阵形成准则

标度	含义
1	2 个因素相比具有同等重要性
3	2 个因素相比，一个比另一个稍微重要
5	2 个因素相比，一个比另一个明显重要
7	2 个因素相比，一个比另一个强烈重要
2, 4, 6, 8	2 个因素相比，一个比另一个极度重要
倒数	若 $i$ 与 $j$ 的关系为 $\alpha_{ij}$ ，则 $j$ 与 $i$ 的关系为 $1/\alpha_{ij}$

一致性指标可由式(16)求解：

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1}. \quad (16)$$

式中： $\lambda$  为判断矩阵的最大特征值； $n$  为判断矩阵的阶数。

借助随机一致性指标 RI 对 CI 进行检验。RI 的大小通常与  $A_{ij}$  的阶数有关，具体如表 2 所示。

表 2 随机一致性检验

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

一致性比率可由式(17)求解：

$$CR = CI/RI. \quad (17)$$

根据需要，在本文中的指标重要程度判断中，可靠性指标(功率偏差)比经济指标(等年值成本)更为重要，经济指标标度取值为 1；可靠性指标标度取值为 5。得到的判断矩阵为：

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & 5 \\ 1/5 & 1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

由于矩阵为二阶矩阵，其具备完全一致性。最后，经过矩阵特征值和特征向量运算，得到的权重向量  $W=[0.833 \ 3 \ 0.166 \ 7]$ ，从而得到基于负荷缺电率与能量浪费率的可靠性优化目标函数为：

$$\min F = w_1 * LPSP + w_2 * SPSP. \quad (19)$$

### 2.3 独立型微电网发电系统容量优化模型目标函数

利用 2.1 节的经济模型和 2.2 节的可靠性模型的分析与运算，建立独立型微电网发电系统基于系统供电可靠性与经济性的目标函数：

$$\left. \begin{aligned} \min C &= (C_{in} + C_m + C_r + C_{COP} - C_s)(r(1+r)^y / ((1+r)^y - 1)) \\ \min F &= w_1 * LPSP + w_2 * SPSP \end{aligned} \right\}. \quad (20)$$

### 2.4 约束条件

为保证独立型微电网安全可靠运行，应对容量优化加以一定的约束条件，约束条件主要包括磷酸铁锂电池充放电功率和荷电状态约束、发电系统安装数量约束、功率平衡约束。

#### 1) 磷酸铁锂电池荷电状态约束。

磷酸铁锂电池的寿命与充放电深度有关，过充和过放都会影响磷酸铁锂电池的性能，为延长电池的寿命，需对电池充放电过程中的 SOC 进行约束。其约束条件如下：

$$SOC_{min} < SOC(t) < SOC_{max}. \quad (21)$$

式中  $SOC_{max}$  和  $SOC_{min}$  分别为磷酸铁锂电池荷电状态的上限与下限 ( $SOC_{min}=0.1$ ， $SOC_{max}=0.9$ ，初始 SOC 取 0.9)。

#### 2) 磷酸铁锂电池充放电功率约束。

当磷酸铁锂电池的充放电功率过大会影响磷酸铁锂电池的寿命甚至是系统的安全运行，为延长磷酸铁锂电池的寿命，需对电池的充放电功率进行约束，其约束条件如下：

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq P_c(t) &\leq \min \{ P_{c,max}, E_b [SOC_{max} - (1-\sigma)SOC(t-1)] / \eta_c \cdot t \} \\ 0 \leq P_d(t) &\leq \min \{ P_{d,max}, E_b [(1-\sigma)SOC(t-1) - SOC_{min}] \eta_d / \Delta t \} \end{aligned} \right\}. \quad (22)$$

式中： $P_{c,max}$  和  $P_{d,max}$  分别为磷酸铁锂电池充放电最大功率； $E_b$  为磷酸铁锂电池的额定容量 ( $P_{c,max}=P_{d,max}=0.48 \text{ kW}$ ， $\eta_c=0.9$ ， $\eta_d=0.9$ )； $\sigma$  为自放电率。

#### 3) 发电系统安装数量约束。

在某一区域建立微电网发电系统时，其预先规划建设建设的场地是有限的，因此在建设时要对风力发电系统、太阳能发电系统、蓄电池储能系统的数量进行限制，其约束条件如下：

$$\left. \begin{aligned} 1 \leq N_{WT} \leq N_{WT, \max} \\ 1 \leq N_{PV} \leq N_{PV, \max} \\ 1 \leq N_b \leq N_{b, \max} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

式中  $N_{WT, \max}$ ,  $N_{PV, \max}$ ,  $N_{b, \max}$  分别为风力发电系统、太阳能发电系统、磷酸铁锂电池储能系统允许安装的最大数量。

4) 功率平衡约束：

$$\begin{aligned} dP &= P_L - P_{PV} - P_{WT}; & (24) \\ \left. \begin{aligned} P_L &= P_{PV} + P_{WT} + P_B \quad dP > 0 \\ P_{PV} + P_{WT} &= P_L + P_B \quad dP < 0 \end{aligned} \right\} \quad (25) \end{aligned}$$

当负荷功率大于光伏及风机的出力功率之和时，磷酸铁锂电池放电，与光伏、风机共同给负荷供电；当负荷功率小于光伏及风机出力功率之和时，磷酸铁锂电池被充电，和负荷共同消耗光伏和风机的出力。

3 微电网运行策略与求解方法

独立型微电网的能量调度策略决定了各类电源出力的优先次序，对最后的微电网配置结果和系统可靠运行有较大影响。笔者所指的运行控制策略，是通过磷酸铁锂电池充放电来调节发电单元和负荷部分的功率平衡。具体控制策略流程如图 2 所示。

对应控制策略中的字母 A~B 表示系统在对应时间的工作状态。

**A:** 当微电网中风力发电和光伏发电所发电量之和大于负荷需求时，混合发电系统在给负荷输送电能后会有剩余电能，此时若磷酸铁锂电池组的荷电状态未达到  $SOC_{\max}$ ，风机和光伏电池发出的电能就会对磷酸铁锂电池进行充电。

**B:** 当微电网中风力发电和光伏发电所发电量之和小于负荷需求时，会造成负荷功率的缺额，此时若磷酸铁锂电池组的荷电状态大于  $SOC_{\min}$ ，就要靠磷酸铁锂电池来弥补负荷功率缺额。

**C:** 当微电网中风力发电和光伏发电所发电量之和小于负荷需求且磷酸铁锂电池容量不足以弥补负荷缺额时，对 20% 的可削减负荷进行切除。

依 2.3 和 2.4 节分析可知，建立的独立型微电网供电系统容量优化模型，是典型的多目标优化问题。需要在经济成本和供电可靠性目标函数之间进

行权衡下作出最优决策。本文中使用非支配排序的多目标粒子群优化算法 (multi-objective particle swarm optimization, MOPSO) [7,13] 对 2 个目标函数进行求解。运用非支配排序思想对等年值投资成本  $C$  与功率偏差  $F$  进行排序，得到 pareto 最优解集。算法流程如图 3 所示。

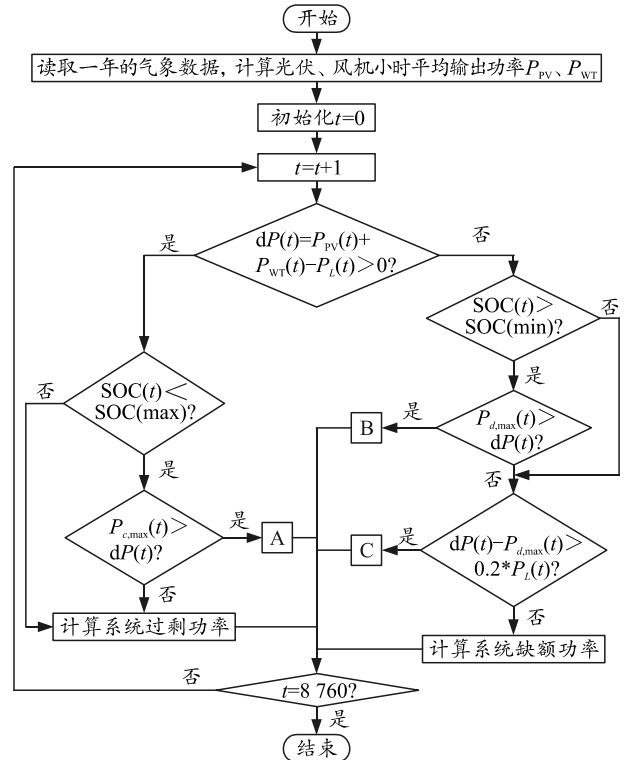


图 2 独立型微电网运行策略

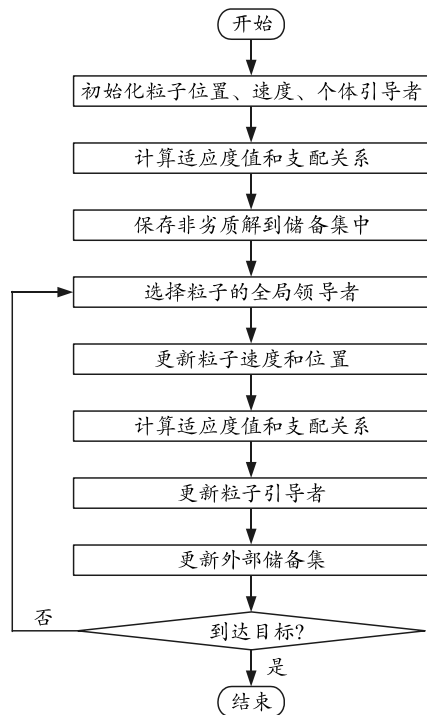


图 3 MOPSO 算法流程

以微电网中光伏阵列、风机、磷酸铁锂电池的数量为优化变量，建立优化配置模型。首先对粒子群的规模、粒子的位置与速度进行初始化；然后，根据一年内的气象数据求出系统中光伏每小时的出力。结合负载数据，完成全年系统仿真，得到独立微电网年发电量、全年缺电量和全年过剩电量，计算全年负载缺电率和全年能量浪费率，将全年负载缺电率和全年能量浪费率转化为一个可靠性指标：功率偏差  $\min F$ 。以等年值投资成本  $\min C$ 、功率偏差  $\min F$  为目标函数进行求解，并迭代优化得到 pareto 最优解集。

### 4 算例分析

选取某海岛的全年光照数据、风速数据和负荷数据作为系统输入数据，仿真步长设置为 1 h，共计 8 760 组数据。其中，年平均光照强度为  $0.2379 \text{ W/m}^2$ ，年平均风速为  $6.62 \text{ m/s}$ 。年平均每小时负荷为  $20.06 \text{ kW}$ 。分布如图 4—6 所示。

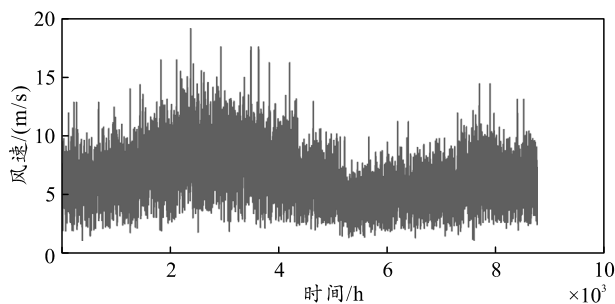


图 4 风速数据

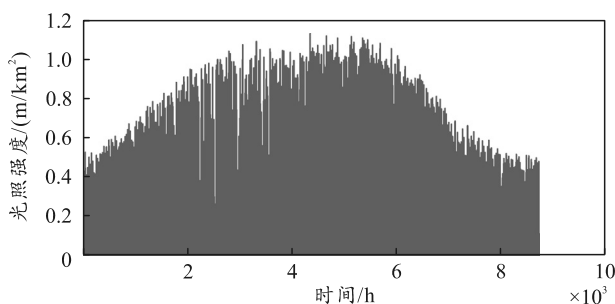


图 5 光照数据

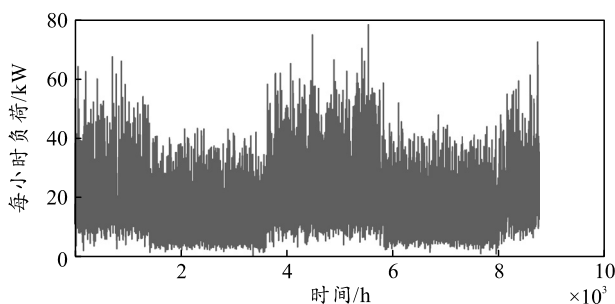


图 6 负荷数据

由以上数据可求得风机与光伏每小时功率如图

7 和 8 所示。

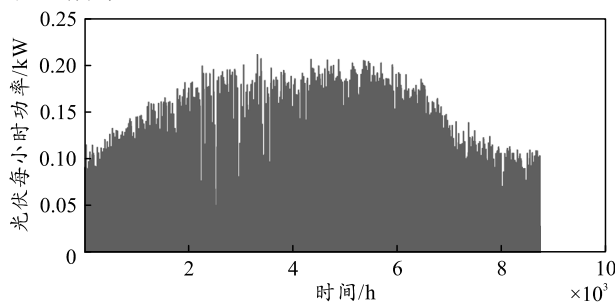


图 7 光伏功率

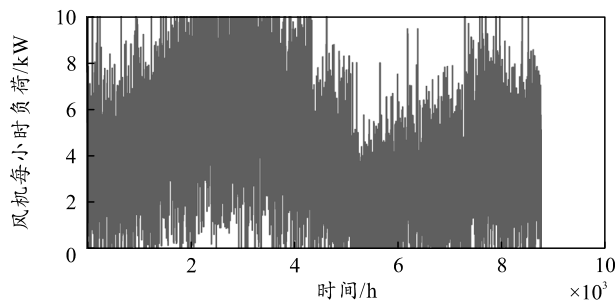


图 8 风机功率

本文中设定微电网系统的寿命周期为 20 年，在此期间，磷酸铁锂电池需更换 4 次，其他相关参数如表 3 和 4 所示。

表 3 不同设备的成本参数

设备	规格参数/kW	初始成本/元	年运维成本/元	更换成本/元	寿命/年
光伏阵列	0.2	600	100		20
风机	10.0	100 000	600		20
磷酸铁锂电池	2.4	4 800	80	4 000	5

表 4 微电网系统其他参数

参数	取值	参数	取值
$\omega$	0.9	$N_{WT}$	20
$N_{PV}$	1 000.0	$N_b$	800

根据笔者所提的容量优化配置方法，同时对多目标粒子群参数依照经验<sup>[7]</sup>和优化后，最终设置多目标粒子群数量为 40，迭代次数为 100 次，得到以下的配置方案和目标函数值。

表 5 容量配置方案

方式	方案	等年值投资成本/万元	功率偏差	光伏台数	风机台数	磷酸铁锂电池台数
一	1	18.449 5	0.341 7	226	18	70
	2	22.020 5	0.260 1	416	13	84
	3	28.973 4	0.180 8	298	11	137
	4	18.540 5	0.338 7	111	20	70
二	5	22.395 9	0.224 9	272	13	95
	6	24.372 2	0.183 8	291	12	109

方式一为不加可削减负荷时的容量配置方案，方式二为加入 20%可削减负荷的容量配置方案。

1) 比较方案 1、2、3，分析功率偏差与经济成本之间的关系。与方案 1 相比，方案 2、3 功率偏差

分别减少了 8%、16%，而成本分别增加了 3.57%、10.52%。方案 2、3 通过减少风机和光伏的数量，增加磷酸铁锂电池的数量，使得系统功率偏差明显减少，磷酸铁锂电池能平衡系统的不平衡功率从而提高系统的供电可靠性，但由于其成本较高，往往会使得系统的经济成本不断增加。

2) 比较方案 1、2、3、4、5、6，分析加入 20% 可削减负荷对系统的经济性和可靠性的影响关系。与方案 1 相比，方案 4 功率偏差减少了 0.3%，而成本只增加了 0.091%。加入 20% 可削减负荷之后大幅减少了光伏的数量，增加少量的风机数量，使得等年值投资成本无明显变化，而功率偏差得到一定的改善。与方案 2 相比，方案 5 功率偏差减少了 3.52%，而成本只增加了 0.38%。通过减少光伏的数量，增加磷酸铁锂电池的数量，来提高系统的功率偏差使得系统的等年值投资成本相差不大的情况下，改善了系统的供电可靠性。与方案 3 相比，方案 6 功率偏差增加了 0.3%，而成本减少了 4.6%。在功率偏差变化较小的情况下，系统的等年值投资成本有了明显减少。加入 20% 可削减负荷能够有效的提高系统的供电可靠性，也能够减少系统的经济成本。

3) 比较方式一、二，方式二的供电可靠性与经济性较方式一都得到一定改善。该容量配置方法可以更为直观地展示系统供电可靠性与经济性的关系。能提供多种不同的优化配置方案，决策者可以根据实际需求选择合理的配置方案。

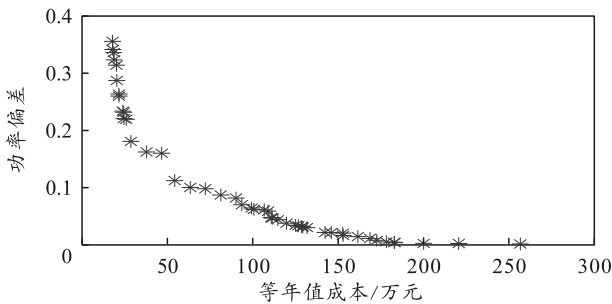


图 9 未考虑可削减负荷系统优化配置结果

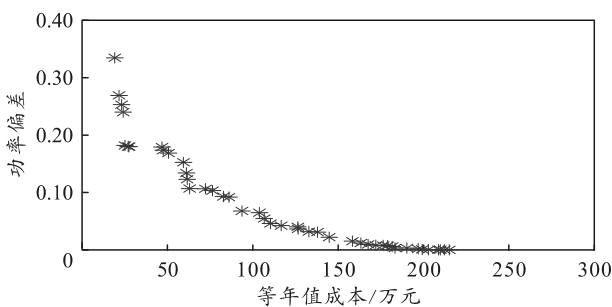


图 10 考虑 20%可削减负荷系统优化配置结果

结合表 5、图 9 和 10 可以看出，系统的等年值

投资成本越高，系统的供电可靠性就越高。当系统在优化配置中更多考虑系统的经济性时就会牺牲系统的可靠性。从方案 1 到 3，方案 4 到 6 可以看出，系统的功率偏差减少幅度较小，但是等年值投资成本却大幅增加；因此，在进行容量配置时，应合理评估经济性和可靠性的重要程度。仿真结果表明：

1) 系统功率偏差越小，系统的等年值投资成本就越高。即高供电可靠是以高投资成本为代价的。在系统缺额功率过大时，加入 20%的可削减负荷能有效的降低投资成本，提高系统的供电可靠性。

2) 采用多目标粒子群算法能够直观地反映供电可靠性和经济性成本的关系，对独立型微电网的优化配置有更好的效果。

### 5 结论

独立型微电网是改善海岛和偏远地区落后供电环境的关键技术，笔者在满足系统约束的前提下，考虑了独立型微电网的经济性、供电可靠性。以等年值投资成本为评估指标构建经济成本模型，以年负载缺电率和年能量浪费率构建可靠性模型。并采用 MOPSO 算法求解容量优化配置模型。本文中的方法不仅在经济成本与供电可靠性上更具优越性，而且能得到多组容量配置方案，为决策者提供更全面的方案。

### 参考文献：

- [1] 国家能源局综合司. 国家能源局综合司关于公开征求《关于建立健全清洁能源消纳长效机制的指导意见(征求意见稿)》意见的公告[R/OL].(2020-05-19)[2020-05-19]. [http:// www.nea.gov.cn/2020-05/19/c\\_139069819.htm](http://www.nea.gov.cn/2020-05/19/c_139069819.htm).
- [2] 李欣然, 崔曦文, 黄际元, 等. 电池储能电源参与电网一次调频的自适应控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3897-3908.
- [3] 马益平. 考虑电动汽车调度的微电网混合储能容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 98-107.
- [4] DONG J, ZHANG Y, WANG Y, et al. A Two-Stage Optimal Dispatching Model for Micro Energy Grid Considering the Dual Goals of Economy and Environmental Protection under CVaR[J]. Sustainability, 2021, 13: 1-27.
- [5] 李咸善, 邹芳, 李鑫燕, 等. 独立微电网微源多目标分层优化配置方法研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 170-178.
- [6] SONG, LIN, DE, et al. An Energy Optimal Dispatching Model of an Integrated Energy System Based on Uncertain Bilevel Programming[J]. Energies, 2020, 13(2): 477.