

DOI: 10.19666/j.rlfed.202405113

基于改进 NSGA-II 的混合储能系统 容量优化配置

李鑫, 张亚丽, 李松, 邱亚, 仇坤
(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

[摘要] 针对光伏发电在微电网中的间歇性和不稳定性问题, 利用全钒液流电池 (vanadium redox batteries, VRB) 和超级电容 (super capacitors, SC) 组成的混合储能系统平抑独立微电网中的功率波动, 以提高微电网的供电可靠性。考虑到混合储能系统的容量配置问题, 建立最小化混合储能系统年均成本和负荷缺电率的多目标混合储能系统容量优化模型。针对传统精英非支配解排序遗传算法 (non-dominated solution sorting genetic algorithm, NSGA-II) 求解多目标优化问题时局部搜索能力较差, 提出一种基于改进精英保留策略的 NSGA-II。该算法通过引入新的适应度函数进行排序, 合理保留优秀个体, 提升算法的优化效果, 从而提升局部搜索能力, 不断逼近 Pareto 实前沿, 获得更优的容量配置方案。最后, 通过算例验证了所提算法的合理性。

[关键词] 独立微电网; 混合储能; 容量优化配置; 改进 NSGA-II

[引用本文格式] 李鑫, 张亚丽, 李松, 等. 基于改进 NSGA-II 的混合储能系统容量优化配置[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 49-56. LI Xin, ZHANG Yali, LI Song, et al. Capacity optimization allocation of hybrid energy storage system based on improved NSGA II algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 49-56.

Capacity optimization allocation of hybrid energy storage system based on improved NSGA-II algorithm

LI Xin, ZHANG Yali, LI Song, QIU Ya, QIU Kun
(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Against the shortcomings of intermittency and instability of photovoltaic power generation in microgrids, a hybrid energy storage system composed of vanadium redox batteries (VRB) and super capacitors (SC) is utilized to smooth out the power fluctuations in standalone microgrids, thus to improve the power supply reliability of standalone microgrids. Considering the capacity allocation problem of the hybrid energy storage system, a multi-objective hybrid energy storage system capacity optimization model that minimizes the average annual cost of the hybrid energy storage system and the load shortage rate is developed. Aiming at the poor local search ability of the conventional elite non-dominated solution sorting genetic algorithm (NSGA-II) algorithm for solving the multi-objective optimization problem, an NSGA-II algorithm based on the improved elite retention strategy is proposed. By introducing a new fitness function, the algorithm is sorted and reasonably retains the elite individuals, so it improves the optimization effect, thus to enhance the local search ability, continuously approach the Pareto true frontier, and obtain better capacity configuration solutions. Finally, the rationality of the proposed method is verified by arithmetic examples.

Key words: stand-alone microgrids; hybrid energy storage; capacity optimized allocation; improved NSGA-II

随着“双碳”目标的实施, 太阳能光伏产业将继续扩大规模, 并成为实现“双碳”目标的关键。

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62202138)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (62202138)

第一作者简介: 李鑫 (1976), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为复杂系统建模与控制、神经网络学习与控制等, lixin@hfut.edu.cn。

通信作者简介: 张亚丽 (1998), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为储能系统容量优化配置研究, 1447026042@qq.com。

光伏发电以其简便的发电过程和零排放的特性^[1],在可再生能源中占据重要地位。然而,光伏能源对天气存在依赖性,输出功率波动性大^[2]。而储能系统则为解决这一问题提供了有效的解决方案,其可以存储多余电能,适时释放,缓冲光伏功率波动^[3]。目前,由于微电网对储能系统的多样化应用需求,单一储能技术无法完全满足要求^[4-5]。因此,混合储能系统成为备受关注的研究领域。全钒液流电池和超级电容器的组合为混合储能系统提供了高容量、长寿命和高功率输出的特性,提高了供电可靠性,满足了不同负荷需求。然而,储能设备的高昂价格可能增加系统成本,且其配置不当可能导致供电不足,影响设备正常运行。因此,混合储能系统的容量配置问题成为当前学术界关注的焦点。

文献[6]考虑使用传统精英非支配解排序遗传算法(non-dominated solution sorting genetic algorithm, NSGA-II)来优化混合储能系统的容量配置问题。其目标是在保证微电网正常运行的同时,尽可能地降低经济成本。然而,传统 NSGA-II 的搜索精度不高,难以获得最优解。文献[7]使用改进的布谷鸟算法求解光储系统的混合储能容量优化配置问题,建立了单目标经济模型,综合考虑了储能系统的投资建设、运行维护过程,优化目标函数包括年均安装运行成本和年均运维成本,但是优化目标过于单一,不具有多目标性。文献[8-9]尝试通过构建多目标函数来解决系统优化问题,并采用线性加权求和方法将多目标优化问题转化为各目标之加权和求解。然而,目标权重的分配受主观性影响较大,难以确定合理的权重,因此解的优越性难以保证。

因此,本文提出一种基于改进 NSGA-II 的多目标优化求解方法,通过引入新的适应度函数,改善传统算法搜索精度差的缺陷。该方法基于典型光伏发电出力曲线和日负荷曲线,采用小波包分解将光电原始信号分为高频和低频信号,并分别利用全钒液流电池(vanadium redox batteries, VRB)和超级电容(super capacitor, SC)进行补偿^[10]。随后,建立以储能系统年均投资成本最小和负荷缺电率最小为目标函数的多目标混合储能系统(hybrid energy storage systems, HESS)容量优化模型。针对线性加权求解多目标优化问题中时,其目标权重依赖个人主观判断及传统 NSGA-II 的局部搜索能力较差等问题^[11],采用改进 NSGA-II 进行混合储能系统的多目标容量优化配置,为相关决策者提供多种容量优化方案。

1 光储微电网系统结构及数学模型

1.1 光储微电网系统结构

光能的随机性和波动性导致光伏发电输出功率存在较大的波动^[12],这使得直接供应负载变得困难。引入储能系统到光伏侧可以有效地缓解光伏功率波动的问题。图 1 为独立光伏微网混合储能系统结构。研究中所考虑的储能型光伏系统的拓扑结构包括光伏微源、混合储能系统以及负载单元。其中,混合储能系统由钒电池和超级电容组成, P_{PV} 为光伏单元总功率, P_{VRB} 为钒电池充放电功率, P_{SC} 为超级电容充放电功率, P_{Load} 为负载功率。

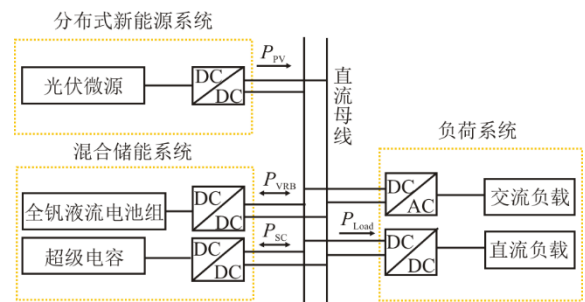


图 1 独立光伏微网混合储能系统结构
Fig.1 Structural diagram of stand-alone photovoltaic microgrid hybrid energy storage system

在系统运行时,光伏单元和储能系统共同为微电网中的负载供电。在不考虑能量损失的情况下,独立微电网中的不平衡功率可以定义为负载需求与光伏发电功率之间的差值^[13]。各单元之间的功率平衡关系^[14]为:

$$P_{Load}(t_i) = P_{PV}(t_i) + P_{VRB}(t_i) + P_{SC}(t_i) \quad (1)$$

本文混合储能系统由 VRB 和 SC 组成。因此混合储能系统功率 P_{hess} 为:

$$P_{hess}(t_i) = P_{VRB}(t_i) + P_{SC}(t_i) \quad (2)$$

1.2 光储微电网系统原理

在独立运行的光伏混合储能系统中,混合储能系统主要用于为负载供电^[15]。其中,全钒液流电池和超级电容从开始到 t_i 时刻累计的充放电电量计算公式^[16-17]为:

$$\begin{cases} E_{VRB}(t_i) = E_{VRB}(0) + \int_0^{t_i} P_{VRB}(t) dt \\ E_{SC}(t_i) = E_{SC}(0) + \int_0^{t_i} P_{SC}(t) dt \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E_{VRB}(0)$ 、 $E_{SC}(0)$ 分别为全钒液流电池和超级电容的初始电量; $E_{VRB}(t_i)$ 、 $E_{SC}(t_i)$ 分别为储能在 $0 \sim t_i$ 时段累计的充、放电电量。

$$\begin{cases} E_{\text{VRB}} = \frac{\max(E_{\text{VRB}}(t_i)) - \min(E_{\text{VRB}}(t_i))}{S_{\text{SOC,VRB,max}} - S_{\text{SOC,VRB,min}}} \\ E_{\text{SC}} = \frac{\max(E_{\text{SC}}(t_i)) - \min(E_{\text{SC}}(t_i))}{S_{\text{SOC,SC,max}} - S_{\text{SOC,SC,min}}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_{VRB} 、 E_{SC} 分别为全钒液流电池和超级电容的额定容量; $S_{\text{SOC,VRB,max}}$ 、 $S_{\text{SOC,VRB,min}}$ 、 $S_{\text{SOC,SC,max}}$ 、 $S_{\text{SOC,SC,min}}$ 分别为全钒液流电池和超级电容的最大和最小荷电状态。

2 混合储能系统多目标容量优化模型

2.1 目标函数

本文采用 2 个指标来建立多目标优化模型, 分别是储能系统的年均投资成本和负荷缺电率, 表征系统的经济性和稳定性。

目标函数为:

$$\begin{cases} \min f_1 = C_{\text{TC}} \\ \min f_2 = f_{\text{LPSP}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: C_{TC} 为储能总投资成本函数; f_{LPSP} 为负荷失电率函数。

2.1.1 目标函数 1: 储能年均投资成本最小

储能年均投资成本由储能电池年均购置成本 C_1 、年均维护成本 C_{OM} 、年均更换成本 C_{R} 和年均回收残值 C_{RES} 组成。

$$C_{\text{TC}} = C_1 + C_{\text{OM}} + C_{\text{R}} - C_{\text{RES}} \quad (6)$$

储能系统的年均购置成本的计算公式为:

$$\begin{cases} C_1 = (C_{\text{BAT}} + C_{\text{PCS}} + C_{\text{BOP}}) \frac{i \cdot (1+i)^y}{(1+i)^y - 1} \\ C_{\text{BAT}} = C_{\text{SC,E}} E_{\text{SC}} + C_{\text{SC,P}} P_{\text{SC}} + \\ C_{\text{VRB,E}} E_{\text{VRB}} + C_{\text{VRB,P}} P_{\text{VRB}} \\ C_{\text{BOP}} = C_{\text{SC,B}} E_{\text{SC}} + C_{\text{VRB,B}} E_{\text{VRB}} \\ C_{\text{PCS}} = C_{\text{SC,PS}} P_{\text{SC}} + C_{\text{VRB,PS}} P_{\text{VRB}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_{BAT} 为储能装置单体成本; C_{BOP} 为辅助设备成本; C_{PCS} 为 DC/DC 以及 DC/AC 成本; $C_{\text{SC,E}}$ 和 $C_{\text{VRB,E}}$ 分别为全钒液流电池和超级电容的单位容量成本; $C_{\text{SC,P}}$ 和 $C_{\text{VRB,P}}$ 分别为全钒液流电池和超级电容的单位功率成本; $C_{\text{SC,B}}$ 和 $C_{\text{VRB,B}}$ 分别为全钒液流电池和超级电容辅助装置的单位容量成本; $C_{\text{SC,PS}}$ 和 $C_{\text{VRB,PS}}$ 分别为 DC/DC 以及 DC/AC 的单位功率成本; i 为贴现率; y 为工程周期, 年。

储能系统的年均维护成本 C_{OM} 的计算公式为:

$$\begin{cases} C_{\text{OM,VRB}} = \gamma E_{\text{VRB}} \\ C_{\text{OM,SC}} = \gamma E_{\text{SC}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: γ 为容量运维成本的系数。

当储能设备的使用寿命不足以覆盖实际工程项目的整个周期时, 需要考虑更换储能设备。 N 年后, 储能系统的年均更换成本的计算公式为:

$$C_{\text{R}} = \sum_{k=1}^z C_{\text{BAT}} \frac{1}{(1+i)^{km}} \frac{i(1+i)^y}{(1+i)^y - 1} \quad (9)$$

式中: z 为电池在工程中更换的次数; m 为电池单体的寿命周期。

储能系统的年均回收残值成本计算公式为:

$$C_{\text{RES}} = \sum_{k=1}^z \sigma_{\text{RES}} \cdot C_1 \frac{1}{(1+i)^{km}} \quad (10)$$

式中: σ_{RES} 为储能装置的回收残值率。

2.1.2 目标函数 2: 储能系统负荷失电率最小

在光伏独立微电网运行时, 光伏发电单元和储能系统共同为负载供电。因此, 本文关注的是光储系统保障负载正常运行使用的的能力。因此采用负荷缺电率 (loss of power supply probability, LPSP) 来表征系统供电可靠性^[18-19]。其表达式为:

$$f_{\text{LPSP}} = \frac{\sum_{i=1}^N [P_{\text{Loads}}(t_i) - (P_{\text{PV}}(t_i) + P_{\text{hess}}(t_i))] \Delta t}{\sum_{i=1}^N P_{\text{Loads}}(t_i) \Delta t} \quad (11)$$

式中: $P_{\text{Loads}}(t_i) - (P_{\text{PV}}(t_i) + P_{\text{hess}}(t_i)) > 0$; $P_{\text{Loads}}(t_i)$ 、 $P_{\text{PV}}(t_i)$ 和 $P_{\text{hess}}(t_i)$ 分别为 t_i 时刻负荷、光伏和混合储能的功率; N 为总采样点数。显然 f_{LPSP} 越小, 供电可靠性越高^[20]。

2.2 约束条件

1) 储能单元充放电功率约束

$$\begin{cases} -P_{\text{VRB}} \leq P_{\text{VRB}}(t_i) \leq P_{\text{VRB}} \\ -P_{\text{SC}} \leq P_{\text{SC}}(t_i) \leq P_{\text{SC}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{VRB}}(t_i)$ 和 $P_{\text{SC}}(t_i)$ 分别为 t_i 时刻储能电池的实时功率。

2) 储能单元 SOC 约束

$$\begin{cases} -S_{\text{SOC,VRB,min}} \leq S_{\text{SOC,VRB}}(t_i) \leq S_{\text{SOC,VRB,max}} \\ -S_{\text{SOC,SC,min}} \leq S_{\text{SOC,SC}}(t_i) \leq S_{\text{SOC,SC,max}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $S_{\text{SOC,VRB}}(t_i)$ 和 $S_{\text{SOC,SC}}(t_i)$ 分别为 VRB 和 SC 在 t_i 时刻的实时荷电状态。

3) 储能单元电量约束

$$\begin{cases} S_{\text{SOC,VRB,min}} E_{\text{VRB}} \leq E_{\text{VRB}}(t_i) \leq S_{\text{SOC,VRB,max}} E_{\text{VRB}} \\ S_{\text{SOC,SC,min}} E_{\text{SC}} \leq E_{\text{SC}}(t_i) \leq S_{\text{SOC,SC,max}} E_{\text{SC}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $E_{\text{VRB}}(t_i)$ 、 $E_{\text{SC}}(t_i)$ 分别为 VRB 和 SC 在 t_i 时刻的实时电量状态。

2.3 评价指标

反世代距离 (inverted generational distance, IGD) 衡量了真实的 Pareto 前沿面上的个体与算法得到的个体集合之间的最小距离^[21]。因此, IGD 值越小, 说明算法最优解集的分布性和收敛性越好^[22], IGD 的计算公式为:

$$IGD(O, D) = \frac{\sum_{s \in P} d(s, O)}{|D|} \quad (15)$$

式中: $d(s, O)$ 为 s 与 Pareto 近似解集 O 中所有点之间的欧几里德距离最小值; D 为理论上真实 Pareto 前沿点集; $|D|$ 代表真实 Pareto 前沿点集中点的个数, 本文采用枚举法获得真实 Pareto 前沿, 并均匀取 50 个点。

3 基于改进 NSGA-II 的容量配置

3.1 改进 NSGA-II

NSGA-II 是一种基于遗传算法的演化算法, 主要用于解决多目标优化问题^[23]。其利用快速非支配排序和拥挤度距离排序来进行多目标优化, 降低了算法的计算复杂度, 并确保了解空间中解的多样性和覆盖性。NSGA-II 主要包含以下内容。

1) 非支配排序

根据个体的适应度和支配关系, 将所有个体进行非支配排序并划分等级, 等级数字越低表明个体所处的优先级越高^[24]。

2) 拥挤度距离

对于同一等级中的个体, 使用拥挤度距离作为指标进一步衡量其在解空间中的稀疏性和分布情况, 以评价个体的优劣。在同等级的情况下, 拥挤度距离越大的个体排序越靠前。

3) 精英保留策略

通过将父辈的优秀非支配解集合并到当前种群中, 增加优秀个体进入新种群的机会, 有利于优秀解的传承和保存, 加快种群进化^[25]。

为了改进传统 NSGA-II 存在的易陷入局部最优解和局部搜索能力较差等问题, 本文从以下 3 个方面对 NSGA-II 进行了改进。

3.1.1 引入局部搜索操作

为了寻找更优方案, 在非支配排序等级为 1 的点周围进行局部搜索, 把搜索后的个体同之前的个体进行比较, 保留性能较好的个体, 从而寻找到更优的解, 以保证解的均匀分布和广泛性。

首先根据目标函数 1 或目标函数 2 进行排序, 假设非支配排序等级为 1 的点 $A(x_1, x_2, x_3, x_4)$ 有相邻点 $B(y_1, y_2, y_3, y_4)$, 则搜索范围为以 A 为中心, 半径为 $x_i - y_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的圆, $x_i = x_i \pm (x_i - y_i) \times \text{rand}()$, 产生新点 A' , 对 A 点和 A' 进行非支配排序, 若 A' 能够支配 A , 则 A' 替代 A 成为更优的解。

3.1.2 改进的精英保留策略

在同一前沿等级下, 需要使用拥挤距离进一步衡量个体的优劣。图 2 为优劣对比示意。由图 2 可知, 点 b 的拥挤度大于点 a 的拥挤度, 因此点 b 优于点 a , 排序靠前。但是从 Pareto 前沿上分析, 显然点 a 是优于点 b 的, 但是由于拥挤度排序中点 a 靠后, 保留到新种群的可能性较小, 不利于算法后期局部寻优, 因此引入新的适应度函数, 提升算法后期的寻优能力。

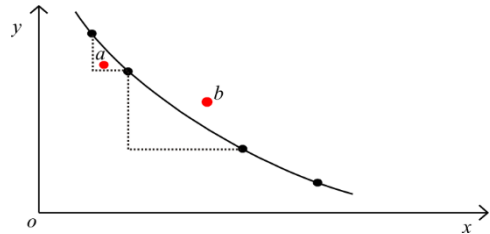


图 2 优劣对比示意

Fig.2 Comparison of advantages and disadvantages

首先根据目标函数进行排序, 若当前点位于前后 2 点的连线左侧, 则予以保留, 确保进入新一代种群, 其余点仍然根据支配关系和拥挤度距离正常进行精英保留。

3.1.3 自适应交叉和变异概率

1) 自适应交叉算子

交叉概率对种群多样性和算法收敛性有重要影响。前期种群的分散度较高, 可以采用较小的种群交叉概率; 后期种群不断向最优 Pareto 前沿收敛, 此时可以增大交叉概率, 防止种群陷入局部最优。自适应交叉算子计算公式为:

$$P_c = P_{c, \min} + \frac{i_i}{i_{i, \max}} (P_{c, \max} - P_{c, \min}) \quad (16)$$

式中: P_c 为交叉概率, $P_c \in [P_{c, \min}, P_{c, \max}]$; $P_{c, \min}$ 和 $P_{c, \max}$ 分别为交叉概率极小和极大值, 本文中 $P_{c, \min}$ 为 0.5, $P_{c, \max}$ 为 1.0; i_i 为当前循环代数; $i_{i, \max}$ 为最大循环代数。

2) 自适应变异算子

随着算法的进行, 种群可能会过度聚集在某些

区域，导致搜索陷入局部最优解。而变异操作可以有效扩大种群的搜索范围，在后期通过扩大变异概率，可以增加算法的探索性，避免算法早熟。自适应变异公式为：

$$P_m = P_{m,\min} + \frac{i_t}{i_{t,\max}}(P_{m,\max} - P_{m,\min}) \quad (17)$$

式中： P_m 为变异概率， $P_m \in [P_{m,\min}, P_{m,\max}]$ ； $P_{m,\min}$ 和 $P_{m,\max}$ 分别为变异概率极值，本文中 $P_{m,\min}$ 为 0.1， $P_{m,\max}$ 为 0.7。

3.2 基于改进 NSGA-II 的容量配置优化流程

本文采用改进 NSGA-II 迭代寻优，在满足负荷需求和系统约束的条件下，逼近真实 Pareto 前沿。优化配置问题的自变量选取钒电池和超级电容的额定容量、额定功率^[26]，即 $x=(E_{VRB}, P_{VRB}, E_{SC}, P_{SC})$ 。改进 NSGA-II 优化流程如图 3 所示。

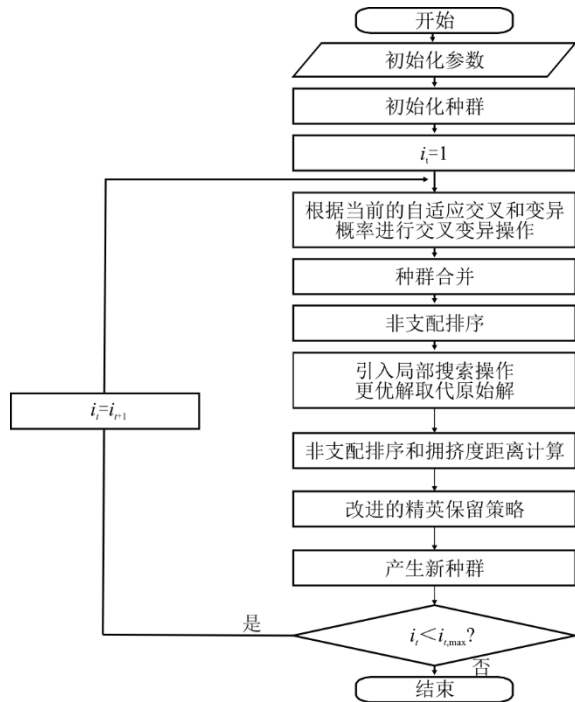


图 3 改进 NSGA-II 优化流程
Fig.3 Optimization flow of the improved NSGA-II algorithm

该算法主要步骤如下：

- 1) 输入光伏和负荷数据，初始化种群；
- 2) 交叉和变异产生新的个体；
- 3) 进行快速非支配排序策略和拥挤度计算，以确定个体之间的优劣关系和分布情况；
- 4) 进行局部搜索操作，寻求更优解；
- 5) 使用改进的精英保留策略，合理选择新种

群，以确保优秀个体的传承和保存；

判断是否达到目标条件 ($i_t < i_{t,\max}$)，如果达到目标条件则终止计算，得到 Pareto 最优解，不满足则返回步骤 3)。

4 算例分析

4.1 基础数据和参数设置

以偏远地区某独立微电网 1 年的光伏出力功率数据和某户家庭总负荷功率数据为基础，光伏装机容量为 8 kW，数据采样间隔为 5 min。采用 k-means 聚类算法进行聚类分析，获取光伏典型日和负荷典型日数据，本文选择出现概率最高的场景进行分析，典型日光伏、负荷功率变化曲线如图 4 所示。其中，混合储能系统基本参数见表 1^[7]。利用混合储能系统调节能量，平衡孤立微电网的供需。小波包分解法具有获取数据细节特征的优点，利用小波包分解方法进行功率分配，得到低频、高频功率分量，钒电池 VRB 补偿低频部分，超级电容 SC 补偿高频部分^[27]。

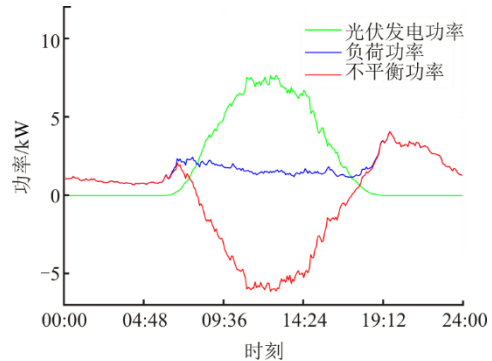


图 4 典型日光伏、负荷功率变化曲线
Fig.4 Change curves of typical daily PV and load power

表 1 混合储能系统基本参数
Tab.1 Basic parameters of hybrid energy storage systems

项目	VRB 数值	SC 数值
单位容量成本/(元·(kW·h) ⁻¹)	1 500	27 000
单位功率成本/(元·kW ⁻¹)	6 500	1 500
运维成本/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.050 0	0.013 4
辅助设备单位容量成本/(元·(kW·h) ⁻¹)	186	620
能量转换装置成本 Cps/(元·kW ⁻¹)	2 500	2 500
回收残值率	0.05	0.05
充放电效率	0.75	0.95
循环寿命/a	8	20
项目周期/a	20	20
初始 SOC	0.4	0.4
SOC 范围	0.10~0.90	0.05~0.95
贴现率	0.05	0.05

相较于小波分解仅能够对低频信号进行处理的局限性，小波包分解可以进一步分解高频信号，分辨率更高，能够更精准的进行能量分配和优化配置。采用小波包分解算法对混合储能出力的分解结果如图 5 所示。

4.2 算例分析

本文实验平台采用 MATLAB/Simulink，采用标准 NSGA-II和改进 NSGA-II对混合储能系统的多目标优化模型进行求解，得到最优 Pareto 解集。设置种群规模为 50，最大迭代次数为 200。2 种算法寻优结果见表 2。

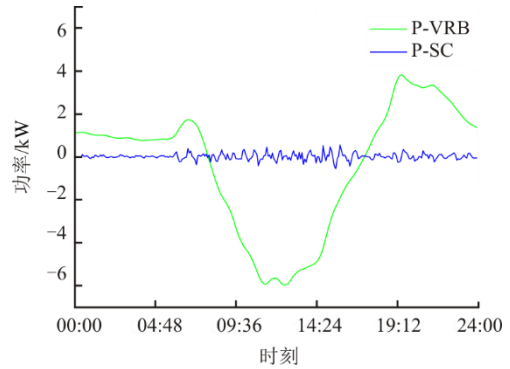


图 5 VRB 和 SC 的功率变化曲线
Fig.5 Change curves of power of VRB and SC

表 2 2 种算法寻优结果
Tab.2 Optimization results of the two algorithms

方法	VRB 额定容量/(kW·h)	VRB 额定功率/kW	SC 额定容量/(kW·h)	SC 额定功率/kW	年均成本/元 (波动率 0.02)	全寿命周期成本/元 (波动率 0.02)	IGD	平均运行时间/s	平均迭代代数
传统 NSGA-II	35.342	4.645	0.098	0.224	17 314.047	346 281	0.168	27.202	152.527
改进 NSGA-II	35.304	4.583	0.092	0.228	17 210.777	344 215	0.065	23.512	103.167

由表 2 可见，在负荷缺电率为 2%的条件下，改进 NSGA-II 得到储能系统年均投资成本为 17 210.777 元，而采用传统 NSGA-II 得到的成本费用为 17 314.047 元，可知改进 NSGA-II 使成本费用降低，并且有效减少了算法的迭代次数，加快了寻优速度。因此，改进 NSGA-II 优化效果和寻优能力更强。

算法所得的 Pareto 解集中解的分布情况如图 6 所示。由图 6 可知，2 种算法的 Pareto 解集在空间上分布的均匀度以及广泛度相差不大。但是改进的 NSGA-II 的解集明显位于常规 NSGA-II 的曲线下方，因此改进算法在收敛性上优于传统算法。对于相同负荷失电率的情况，改进的 NSGA-II 相较于常规的 NSGA-II，能够实现更低的成本。

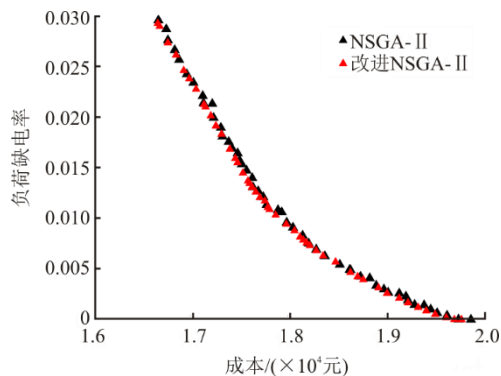


图 6 混合储能多目标容量优化配置结果
Fig.6 The multi-objective capacity optimization allocation

results of hybrid energy storage

由表 2 可知，传统 NSGA-II 得到的全寿命周期成本费用为 346 281 元，而改进 NSGA-II 得到的全寿命周期成本为 344 215 元，改进算法成本低于传统算法，IGD 值也更小，证明了改进算法得到的最优解集的收敛性更好，整体优化结果更为合理。通过分析 Pareto 前沿，权衡系统经济性与波动性，使用者可以根据需要选择不同的配置方案。

5 结 论

针对独立光伏混合储能系统，采用小波包对混合储能系统功率即不平衡功率进行分解，并建立了以储能系统年均投资成本最小和负荷缺电率最小为目标的多目标容量配置模型，对系统中混合储能装置容量进行了优化配置。通过算例求解表明，改进的 NSGA-II 相较于传统 NSGA-II 具有更高的收敛精度，更容易跳出局部最优解，同时储能配置的全生命周期成本费用也降低了，波动率减小，进一步验证了改进 NSGA-II 在混合储能系统容量优化配置方面的优越性。

[参考文献]

[1] 吕航, 柴小亮, 徐松晓, 等. 分布式光伏发电并网系统混合储能容量自适应规划方法[J]. 无线电工程, 2023, 53(11): 2708-2714.

- LYU Hang, CHAI Xiaoliang, XU Songxiao, et al. Adaptive planning method for hybrid energy storage capacity of distributed photovoltaic power generation grid-connected system[J]. *Radio Engineering*, 2023, 53(11): 2708-2714.
- [2] 李建林, 王思佳, 周毅, 等. 计及多典型天气特征的光储容量配置技术研究[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(3): 80-89.
LI Jianlin, WANG Sija, ZHOU Yi, et al. A study on optical storage capacity allocation technology considering multi typical weather scenarios[J]. *Journal of Modern Power System and Clean Energy*, 2022, 38(3): 80-89.
- [3] 曾志辉, 刘云鹏, 韦延方, 等. 基于改进蝙蝠算法的混合储能系统容量优化配置[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(5): 130-136.
ZENG Zhihui, LIU Yunpeng, WEI Yanfang, et al. Optimal capacity allocation of hybrid energy storage system based on improved bat algorithm[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2023, 42(5): 130-136.
- [4] 李瑞民. 集成分布式可再生能源的混合储能系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 1.
LI Ruimin. Research on hybrid energy storage system integrating distributed renewable energy sources[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 1.
- [5] 马速良, 武亦文, 李建林, 等. 面向多服务目标需求的集中式电池储能优化配置方法研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(7): 75-86.
MA Suliang, WU Yiwen, LI Jianlin, et al. Research on optimal configuration of centralized battery energy storage for multiple service objectives[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(7): 75-86.
- [6] 周成伟, 李鹏, 俞斌, 等. 风光储微电网储能系统容量优化配置[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(12): 56-61.
ZHOU Chengwei, LI Peng, YU Bin, et al. Optimal configuration for energy storage system capacity of wind-solar-storage microgrid[J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(12): 56-61.
- [7] 李鑫, 王娟, 邱亚, 等. 基于 VMD 的混合储能容量优化配置[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(2): 88-96.
LI Xin, WANG Juan, QIU Ya, et al. Optimal allocation of hybrid energy storage capacity based on variational mode decomposition[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2022, 43(2): 88-96.
- [8] 吴成明, 扬臻辉. 基于改进鲸鱼算法的混合储能系统容量优化配置[J]. *电工材料*, 2024(1): 84-89.
WU Chengming, YANG Zhenhui. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system based on improved whale algorithm[J]. *Electrical Engineering Materials*, 2024(1): 84-89.
- [9] 赵娜, 张莲, 王士彬, 等. 并网型风光氢储微电网容量优化配置[J]. *湖南电力*, 2023, 43(4): 48-55.
ZHAO Na, ZHANG Lian, WANG Shibin, et al. Capacity optimization configuration of grid-connected wind-solar-hydrogen-storage microgrid[J]. *Hunan Electric Power*, 2023, 43(4): 48-55.
- [10] 陈敬峰. 含混合储能的独立型微电网系统控制与优化调度策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 1.
CHEN Jingfeng. Research on control and optimization scheduling strategy for stand-alone microgrid with hybrid energy storage system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 1.
- [11] 李建林, 许璐, 马凌怡. 光储充一体化系统容量优化配置方法研究[J]. *电气应用*, 2022, 41(9): 71-77.
LI Jianlin, XU Lu, MA Lingyi, et al. Research on optimal capacity configuration method of PV-energy storage-charging integrated system[J]. *Electrotechnical Application*, 2022, 41(9): 71-77.
- [12] 王子鹏. 直流微电网协调控制策略研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022: 1.
WANG Zipeng. Distributed control strategy for DC microgrids[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2022: 1.
- [13] 周超凡. 光伏混合储能系统的容量规划及控制策略研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022: 1.
ZHOU Chaofan. Research on capacity planning and control strategy of photovoltaic hybrid energy storage system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022: 1.
- [14] 邓坤. 微电网储能容量鲁棒优化配置研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2023: 1.
DENG Kun. Study on robust optimal allocation of microgrid energy storage capacity[D]. Guizhou: Guizhou University, 2023: 1.
- [15] 赵超, 王斌, 孙志新, 等. 基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(1): 256-262.
ZHAO Chao, WANG Bin, SUN Zhixin, et al. Optimal configuration optimization of islanded microgrid using improved grey wolf optimizer algorithm[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2022, 43(1): 256-262.
- [16] 周芹. 独立光伏系统混合储能容量优化配置的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021: 1.
ZHOU Qin. Study on optimal allocation of hybrid energy storage capacity for stand-alone photovoltaic systems[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021: 1.
- [17] 黄云云, 吴健, 王斌, 等. 基于改进灰狼算法的混合发电系统优化设计[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 775-781.
HUANG Yunyun, WU Jian, WANG Bin, et al. Sizing optimization of hybrid generation system based on improved grey wolf optimization[J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(6): 775-781.
- [18] 高峰, 闫涛, 唐巍, 等. 独立风/光/储混合微电网多目标电源容量优化配置[J]. *智能电网*, 2016, 4(8): 802-810.
GAO Feng, YAN Tao, TANG Wei, et al. Multi-objective optimal capacity configuration of standalone wind-solar-battery hybrid microgrid[J]. *Smart Grid*, 2016, 4(8): 802-810.
- [19] 杨丽君, 黄凯婷, 孔晓磊, 等. 考虑柔性负荷的并网型微电网系统容量优化配置[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(2): 309-316.
YANG Lijun, HUANG Kaiting, KONG Xiaolei, et al. Capacity optimization configuration of grid-connected microgrid system considering flexible load[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(2): 309-316.
- [20] 潘华, 邓长虹, 吴之奎, 等. 基于多应用场景独立微电网储能系统优化配置[J]. *电源技术*, 2016, 40(6): 1269-1272.
PAN Hua, DENG Changhong, WU Zhikui, et al. Optimal design of energy storage system for independent microgrid based on multi-application situation[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(6): 1269-1272.

- [21] 崔恒薇, 丁炜超, 魏鹏, 等. 基于外部存档更新及截断的 NSGA-II 改进算法[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 282-292.
CUI Hengwei, DING Weichao, WEI Peng, et al. NSGA-II improved algorithm based on external archive updating and truncation[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 50(2): 282-292.
- [22] 张磊, 毕晓君, 王艳娇. 基于重新匹配策略的 ε 约束多目标分解优化算法[J]. 电子学报, 2018, 46(5): 1032-1040.
ZHANG Lei, BI Xiaojun, WANG Yanjiao, et al. An ε -constrained multi-objective decomposition optimization algorithm based on a rematching strategy[J]. Chinese Journal of Electronics, 2018, 46(5): 1032-1040.
- [23] 夏田林. 考虑能耗的多目标 CSPS 系统优化问题研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022: 1.
XIA Tianlin. Research on multi-objective optimization problem of CSPS system considering energy consumption[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022: 1.
- [24] 许悦, 瞿凯平, 张孝顺, 等. 帕累托部落进化算法及其在电力系统多目标优化发电调度中的应用[J]. 新型工业化, 2018, 8(2): 11-23.
XU Yue, QU Kaiping, ZHANG Xiaoshun, et al. Pareto tribe evolution and its application on multi-objective generation dispatch[J]. The Journal of New Industrialization, 2018, 8(2): 11-23.
- [25] 王启翔. 两种高维多目标进化算法的改进[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022: 1.
WANG Qixiang. Improvement of two high-dimensional multi-objective evolutionary algorithms[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2022: 1.
- [26] 杨建波. 平抑风电功率波动的混合储能控制策略及其容量配置研究[D]. 福州: 福州大学, 2019: 1.
YANG Jianbo. Study on hybrid energy storage control strategy and its capacity allocation for smoothing wind power fluctuation[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2019: 1.
- [27] 郑新昊. 直流微电网混合储能控制系统的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021: 1.
ZHENG Xinhao. Research on hybrid energy storage control system for DC microgrids[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2021: 1.

(责任编辑 杜亚勤)