

DOI: 10.19666/j.rlfed.202405104

基于 SPEA2 的风光柴储独立微电网 多目标容量优化配置

李鑫, 李俊伟, 陈薇, 侯谋, 贾泽峰, 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] 在电力资源相对匮乏而自然风光资源丰富的孤岛等地区, 电力供应的稳定性和成本效益一直是个亟待解决的问题。传统的独立微电网在容量配置时, 大多依赖快速非支配排序遗传算法 (NSGA-II), 该算法在处理真实负载的多目标优化问题时, 局部搜索能力略显不足。为此, 提出了利用改进强度 Pareto 进化算法 (SPEA2) 优化风光柴储独立微电网容量配置, 以经济性成本、失负荷概率、碳排放作为优化目标, 实现更加全面和高效的容量配置。通过导入某孤岛天气与负荷数据, 生成风光柴储独立微电网的真实 Pareto 前沿, 将 SPEA2 和基于指标选择的多目标搜索 (IBEA)、NSGA-II 3 种算法分析结果进行对比, 相较于 NSGA-II, SPEA2 的反世代距离评价 IGD 指标提升 46.83%, 空间评价方法 Spacing 指标提升 60.28%, 真实 Pareto 覆盖率 CPF 指标提升 35.14%, 该算法表现出更加出色的性能。最后根据容量优化的结果合理配置各部分参数, 共同出力满足负荷需求, 为孤岛等电力资源匮乏地区的能源管理提供了新的思路, 也为多能源微电网的优化设计提供了有价值的参考。

[关键词] 微电网; SPEA2; 多目标优化; 风光柴储系统

[引用本文格式] 李鑫, 李俊伟, 陈薇, 等. 基于 SPEA2 的风光柴储独立微电网多目标容量优化配置[J]. 热力发电, 2024, 53(8): 9-19. LI Xin, LI Junwei, CHEN Wei, et al. Multi-objective capacity optimization allocation of wind-PV-diesel-battery stand-alone microgrid based on SPEA2[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(8): 9-19.

Multi-objective capacity optimization allocation of wind-PV-diesel-battery stand-alone microgrid based on SPEA2

LI Xin, LI Junwei, CHEN Wei, HOU Mou, JIA Zefeng, QIU Kun
(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The stability and cost-effectiveness of power supply has been a pressing issue in areas such as isolated islands where power resources are relatively scarce and natural resources is abundant. Conventional stand-alone microgrids mostly rely on the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) for capacity allocation, which has slightly insufficient local search capability when dealing with multi-objective optimization problems with real loads. In order to overcome this limitation, the improved strength Pareto evolutionary algorithm (SPEA2) is used to optimize the capacity allocation of wind-PV-diesel-battery stand-alone microgrid, which takes the economic cost, loss-of-load probability, and carbon emission as the optimization objectives, to achieve a more comprehensive and efficient capacity allocation. By importing the weather and load data of an isolated island and generating the real Pareto frontier of the independent microgrid with wind, PV, diesel and storage, the analysis results of SPEA2 are compared with that of multi-objective search based on indicator selection (IBEA) and NSGA-II algorithms. Compared with the NSGA-II algorithm, the anti generational distance evaluation IGD index

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, 硕士生导师, 主要研究方向为复杂系统建模与控制、全钒液流电池储能建模与控制等, lixin@hfut.edu.cn.

通信作者简介: 李俊伟 (2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为多能源微电网建模及优化, 1755087032@qq.com.

of the SPEA2 increases by 46.83%, the spatial evaluation method Spacing index rises by 60.28%, and the real Pareto coverage CPF index grows by 35.14%, indicating the SPEA2 shows a more excellent performance. Finally, the parameters of each part are reasonably configured according to the results of capacity optimization. It shows that the joint output meets the load demand, which provides a new way of thinking for the energy management of isolated islands and other areas with scarce power resources, and also provides a valuable reference for the optimal design of multi-energy microgrids.

Key words: microgrids; SPEA2; multi-objective optimization; wind-PV-diesel-battery system

在全球化和可持续发展的背景下,随着“双碳”目标的提出,新能源微电网以其独特的技术优势和环保理念,正逐渐成为能源领域一颗璀璨新星^[1-2]。分布式发电能够充分利用可再生能源节能减排,新能源微电网以其灵活、高效、环保的特性,为解决能源危机、减轻环境压力、推动绿色发展提供了全新的思路和方法^[3]。在新能源发电领域,风电与光伏因其经济效益较好、环境损伤较小的优点得到广泛应用,但又考虑到风速、光照强度、温度等环境因素对风、光发电具有决定性影响,选取合适应用场景不仅能提高发电效率,还能有效节约成本。

孤岛独立微电网作为典型电力自治系统,地处偏僻,脱离陆地大电网^[4],在新能源微电网高速发展下供电的手段从单一的柴电型转换为风光柴储多能源型^[5],其同时也是划分孤岛独立微电网与如航空航天、火车高铁等传统独立微电网的显著区别。目前,孤岛独立微电网的研究中已有风力发电系统^[6-9]、光伏发电系统^[10-16]、风光互补发电系统^[17-21]、光储柴发电系统^[22-24]等,对风光柴储独立微电网这种稳定可靠、经济环保的系统的研究较少^[25]。

文献[26]采用快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)对风光互补程度、电量损失率和送电线路利用率3个指标进行多目标优化,但未考虑离网的配置情况;文献[27]以等价年金总成本和负荷缺电率最小化为目标函数,以蓄电池荷电状态、年污染物排放量等为约束条件建立容量配置优化模型;文献[28]以经济性成本最低与弃风量最小为目标,建立包含电、热负荷综合响应的容量配置优化模型,采用粒子群优化算法求解模型;文献[29]建立运行成本、投资成本、年收益目标函数,以经济最优为目标,构建多目标容量配置目标函数。在改进乌鸦搜索算法中引入最优粒子群算法,求解目标函数。本文将在MATLAB仿真平台基于风光柴储独立微电网模型,利用改进强度Pareto进化算法——SPEA2,以经济成本、供电损失率、碳排放作为优化目标函数,考虑多约束条件,求得最优解集。

对比模型的真实 Pareto 前沿和 NSGA-II 的求解效果,本文算法在反世代距离评价指标 IGD、空间评价方法 Spacing、真实 Pareto 覆盖率 CPF 等评价指标方面均有较好的提升,可为风光柴储独立微电网优化模型规划设计提供参考。

1 风光柴储微电网建模

1.1 微电网拓扑结构

风光柴储独立微电网系统由风电、光伏、柴电、储能及各部分相关变换器、直流母线 and 直流负载组成。在独立微电网中柴电、风电和交流负载单元经 AC/AC 变换器接入交流母线,直流负载、光伏和储能系统经 DC/DC 变换器接入直流母线,交流母线可经 DC/AC 变换将电力送到直流母线^[30-31]。其拓扑结构如图 1 所示。

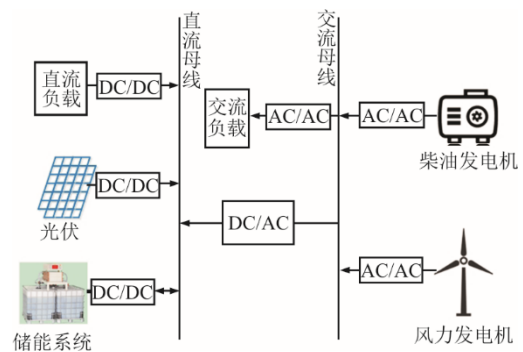


图 1 风光柴储微电网拓扑结构

Fig.1 Topology diagram of the wind-PV-diesel-battery microgrid

1.2 分布式发电模型

1.2.1 风电建模

在风光柴储独立微电网中,风力发电机是将清洁绿色的风能转化为电能的主要分布式电源^[32]。其功率输出通常是非线性的。当风速 v 小于切入风速 V_c 时,风机处于关闭状态,不出力;当风速 v 大于切入风速 v 且小于额定风速 V_r 时,风机出力与风速三次幂成线性关系;当风速 v 大于额定风速 V_r 且小于切出风速 V_f 时,将采取适当措施限制风机输出功率,以防风机发电过载损坏,此时风机出力为额定

功率；当风速 v 大于等于切出风速 V_f 时，关闭风机系统保证安全^[33]。风机输出功率 $P_{wt}(v)$ 表达式为：

$$P_{wt}(v) = \begin{cases} 0, & (v < V_c) \cup (v \geq V_f) \\ \frac{1}{2} C_p \rho A_{wt} v^3, & V_c \leq v < V_r \\ P_{Rwt}, & V_r \leq v < V_f \end{cases} \quad (1)$$

式中： v 为风速，m/s； V_c 为切入风速； V_r 为额定风速； V_f 为切出风速； P_{Rwt} 为风力发电机额定功率，W； C_p 为风力发电机性能系数，定义为一个风机的输出功率除以最大风功率，理论最大值为贝兹极限； ρ 为空气密度，kg/m³； A_{wt} 为转子扫过的面积^[34]，m²。

1.2.2 光伏建模

光伏发电技术作为利用太阳能最有效的方式之一，具备安全、环保的优点。实际光伏系统的输出功率受天气、安装位置影响较大。对光伏系统的处理需注重光照强度和环境温度因素。光伏板的输出功率 P_{pv} 为：

$$P_{pv} = V_{oc} I_{sc} F_{loss} \quad (2)$$

$$V_{oc} = V_{stc} - K_v T_c \quad (3)$$

$$I_{sc} = \frac{I_{stc} + K_i (T_c - 25)}{1000} S_p \quad (4)$$

$$T_c = T_a + \frac{T_{NOC} - 20}{800} S_p \quad (5)$$

式中： V_{oc} 为工作温度下的开路电压，V； I_{sc} 为工作温度下的短路电流，A； F_{loss} 为填充因子，参数值与光伏电池性质有关； V_{stc} 为标准状态下的开路电压，V； I_{stc} 为标准状态下的短路电流，A； K_v 为开路电压温度系数； K_i 为短路电流温度系数； T_a 为环境温度，℃； T_c 为光伏板工作温度，℃； T_{NOC} 为额定电池工作温度，℃； S_p 为垂直于光伏板倾斜表面的太阳辐射有效分量。

1.2.3 柴油发电机建模

在风光柴储独立微电网中，柴油发电机一般用作备用能源，配置一定数量的柴油发电机很有必要，其只会在可再生能源出力小于负荷要求，同时储能系统出力不能满足需求时工作。柴油作为一种化石燃料，燃烧时会产生有害污染物和温室气体，故配置柴油发电机一定程度上提高了系统的可靠性，但也直接影响了经济性和环保性。柴油发电机输出功率 P_{dg} 与单位时间耗油量 F_{dg} 的关系^[35]为：

$$F_{dg} = \gamma_1 P_{Rdg} + \gamma_2 P_{dg} \quad (6)$$

式中： P_{Rdg} 为柴油发电机的额定功率，W； γ_1 、 γ_2 为燃料消耗系数，本文分别取 0.10 和 0.25。

1.2.4 储能建模

在风光柴储独立微电网中，储能系统主要有 2 个方面的作用：1) 当可再生能源发电量大于负荷需求时，储能系统将盈余电量储存；2) 当天气环境较为恶劣时，发电量无法满足负荷需求，储能系统放电满足负荷需求。

需要注意的是储能系统的荷电状态 (SOC)，考虑到安全与系统寿命，应使储能 SOC 处于正常工作范围内。单位时间储能系统 S_{soc} 根据可再生能源与负荷需求之间的关系变化：

$$S_{soc}(t+1) = S_{soc}(t) + \frac{P_{bat} \Delta t \eta_{bat}}{V_{bus} C_n} \quad (7)$$

式中： P_{bat} 为系统输入/输出功率（正值表示充电模式，负值表示放电模式）^[36]，W； V_{bus} 为直流母线电压，V； η_{bat} 为双向充放电效率； C_n 为储能系统的总额定容量，Ah。

1.3 微电网运行策略

考虑到孤岛的自然资源丰富，为了节约成本并减少碳排放，制定以下运行策略。

1) 风力发电机组、光伏阵列首先出力满足负荷需求，若 $P_{wt} + P_{pv}$ 大于负荷 P_{load} ，且储能系统的荷电状态 S_{soc} 大于下限小于上限，则盈余的电力给储能系统充电。

2) 若在天气环境较差时，风力发电机组、光伏阵列出力不能满足负荷需求， $P_{wt} + P_{pv}$ 小于 P_{load} ，且储能系统的荷电状态 S_{soc} 大于下限小于上限，则储能系统放电满足负荷需要。

3) 当储能系统出力时荷电状态 S_{soc} 小于下限或放电功率达到最大值仍不能满足需求，则 $P_{load} - P_{wt} - P_{pv} - P_{bat}$ 的部分由柴油发电机承担出力。

2 微电网容量优化配置方法

2.1 目标函数

本文从经济性、可靠性以及环保性 3 个方面建立风光柴储独立微电网容量优化配置目标函数^[37]，采用时间序列模拟方法计算运行过程的目标值。

2.1.1 经济性

成本指标是经济性评估中最基本的指标之一，通过最小化成本，可以有效提升解决方案的经济性。成本指标的优化不仅涉及直接成本，还包括间接成本、维护成本、运营成本以及处置成本等方面。通过综合考虑这些不同类型的成本，可以更全面地评估解决方案的经济性，并为决策提供更可靠的依

据。以微电网系统年成本 η_{ACS} 最小为目标函数，包括微电网的年度资本成本、电池替换成本、运行维护成本^[35]，其计算公式如式(8)一式(13)所示：

$$\eta_{ACS} = C_{cap} + C_{rep} + C_{main} \quad (8)$$

$$C_{cap} = \left(\begin{array}{l} (C_{c-wt} + C_{c-tower} H_{tower}) N_{wt} + \\ C_{c-pv} N_{pv} + C_{c-dg} N_{dg} + C_{c-bat} N_{bat} \end{array} \right) \zeta_{crf} \quad (9)$$

$$C_{rep} = C_{r-bat} N_{bat} \zeta_{sff} \quad (10)$$

$$C_{main} = (C_{m-wt} + C_{m-tower} H_{tower}) N_{wt} + \\ C_{m-pv} N_{pv} + C_{m-dg} N_{dg} T_{dg} + \\ C_{m-bat} N_{bat} + C_{fuel} F_{dg} \quad (11)$$

$$\zeta_{crf} = \frac{r(1+r)^{Y_{life}}}{(1+r)^{Y_{life}} - 1} \quad (12)$$

$$\zeta_{sff} = \frac{r}{(1+r)^{Y_{rep}} - 1} \quad (13)$$

式中： C_{cap} 为年度资本成本； C_{rep} 为电池置换成本， C_{main} 为运行维护成本； C_{c-i} ($i=wt, tower, pv, dg, bat$) 为风机及其塔架、光伏、柴油机、储能的单位初始投资成本； C_{r-bat} 为单位电池置换成本； C_{m-i} 为风机及其塔架、光伏、柴油机、储能的单位运行维护成本； T_{dg} 为柴油发电机运行时间； C_{fuel} 为单位燃料价格； ζ_{crf} 为等年值初始投资成本系数； ζ_{sff} 为等年值电源置换费用； Y_{life} 为各部分的寿命，年； Y_{rep} 为各部分替换之前的寿命，年。

2.1.2 可靠性

功率供应缺失概率 (η_{LPSP}) 反映微电网提供的电力无法满足实际负荷需求的程度，其常作衡量微电网系统可靠性的指标，通常以百分比的形式表示。较低的失负荷概率意味着系统更加可靠，用户经历停电或供电不足更少，而较高的失负荷概率则表示系统存在较大的供电不足风险。通常会设定失负荷概率的目标，以确保系统具有足够的可靠性。例如，某个地区的失负荷概率目标可能是每年不超过 10% 的时间出现停电或供电不足情况。定义为：

$$\eta_{LPSP} = \frac{\sum_{t=1}^T P_{available}(t) < P_{load}(t)}{T} \quad (14)$$

式中： T 为全年总小时数； $P_{available}$ 为风光柴储微电网总输出功率， W 。

2.1.3 环保性

在多目标优化中，环保性的指标通常用于评估

和衡量方案或系统对环境的影响程度。碳排放是一个评价环保性的重要指标，指生产或活动过程中释放到大气中的二氧化碳等温室气体的量。本文选取二氧化碳排放量作为衡量环保性的参考指标，碳排放指标即为：

$$\eta_{Emission} = \sum_{t=1}^T F_{dg}(t) \eta_{emission} \quad (15)$$

式中： $\eta_{emission}$ 为燃料排放因子。

2.2 约束条件

风光柴储独立微电网约束条件主要包括各部分的数量约束、出力大小约束、储能系统容量约束。

1) 各部分的数量约束

$$N_{min-wt} \leq n_{wt} \leq N_{max-wt} \quad (16)$$

$$N_{min-pv} \leq n_{pv} \leq N_{max-pv} \quad (17)$$

$$N_{min-dg} \leq n_{dg} \leq N_{max-dg} \quad (18)$$

$$N_{min-bat} \leq n_{bat} \leq N_{max-bat} \quad (19)$$

式中： N_{min-wt} 、 N_{max-wt} 分别为风力发电机最小和最大装机数量； N_{min-pv} 、 N_{max-pv} 分别为光伏板最小和最大装机数量； N_{min-dg} 、 N_{max-dg} 分别为柴油发电机最小和最大装机数量； $N_{min-bat}$ 、 $N_{max-bat}$ 分别为储能系统最小和最大装机数量。

2) 各部分的出力约束

$$P_{min-wt} \leq P_{wt}(t) \leq P_{max-wt} \quad (20)$$

$$P_{min-pv} \leq P_{pv}(t) \leq P_{max-pv} \quad (21)$$

$$P_{min-dg} \leq P_{dg}(t) \leq P_{max-dg} \quad (22)$$

$$-P_{max-bat} \leq P_{bat}(t) \leq P_{max-bat} \quad (23)$$

式中： P_{min-wt} 、 P_{max-wt} 分别为风力发电机最小和最大发出功率， W ； P_{min-pv} 、 P_{max-pv} 分别为光伏板最小和最大发出功率， W ； P_{min-dg} 、 P_{max-dg} 分别为柴油发电机最小和最大发出功率， W ； $-P_{max-bat}$ 、 $P_{max-bat}$ 分别为储能系统最大放电功率和最大充电功率， W 。

3) 储能系统容量约束

$$S_{SOC,min} \leq S_{SOC}(t) \leq S_{SOC,max} \quad (24)$$

式中： $S_{SOC,min}$ 、 $S_{SOC,max}$ 分别为储能系统荷电状态的下限和上限值。

3 SPEA2 算法设计

3.1 SPEA2 原理

改进强度 Pareto 进化算法 (strength pareto evolutionary algorithm 2, SPEA2) 是一种用于解决多目标优化问题的进化算法，它基于 Pareto 最优解

概念和遗传算法，并在 SPEA 的基础上做了改进。帕累托前沿 (Pareto front) 是多目标优化问题中的重要概念，它描述了在多个目标之间不存在可以同时改进情况下的解集合。具体来说，如果存在一个解在某一目标上的改进必然伴随着另一目标上的恶化，那么这个解就位于帕累托前沿上。

本文利用 SPEA2 求解多目标问题，旨在克服 NSGA-II 在风光柴储独立微电网多目标优化中的一些局限性，并提供更好的性能和结果。其主要特点和改进包括：

1) 健壮性和精确度 SPEA2 使用一个外部存档来存储非支配解，存档会定期更新以保持解的多样性和质量。这种存档机制有助于保持解的稳定性，并能更好地探索解空间；同时为存档中的每个个体分配一个强度值，该值表示该个体支配的解的数量。此外，每个个体的健康度由其支配它的解的强度总和决定。这种健康度评估机制可以提供更精确的健康度信息，有助于有效地引导种群进化。

2) 多样性保持机制 通过聚类技术来保持存档中解的多样性，有助于防止算法过早收敛于局部最优解。通过维持多样性，SPEA2 可以在多目标优化的不同区域探索更多潜在的最优解。

3) 精细的环境选择 在每一代的环境选择过程中，会基于健康度和距离的综合评估来决定哪些个体被保留在存档中。这种选择机制确保了优质解的保留，同时又不会损失过多的种群多样性。

4) 可扩展性和收敛性能 与 NSGA-II 相比，SPEA2 在处理具有较大种群规模和高维目标空间的问题时，通常显示出更好的可扩展性与收敛性。

此外，为了更好地衡量算法间的优劣性，本文引入反世代距离评价指标 δ_{IGD} 、空间评价方法 $\delta_{Spacing}$ 、真实 Pareto 覆盖率 δ_{CPF} 3 项多目标优化评价方法。

δ_{IGD} 用于衡量近似帕累托前沿 PF 与真实帕累托前沿 PF* 之间的距离和分布情况，考虑了多样性和收敛性。对于真实的最优帕累托前沿中的每个解 y ，找到与其最近的 PF 中的解 x ，计算其欧氏距离，取平均值。如果 PF* 的数量大于 PF 数量，那么 δ_{IGD} 就能最完整地表达 PF 的性能， δ_{IGD} 值越好，代表算法多样性和收敛性越好。其计算公式为：

$$\delta_{IGD} = \frac{\sum_{y \in PF^*} d(y, x)}{|PF^*|} \quad (25)$$

式中：PF 为近似帕累托前沿；PF* 为真实帕累托前

沿；|PF*| 代表 PF* 中的解数量。

$\delta_{Spacing}$ 用于衡量评估算法生成的解的分散程度，度量每个解到其他解的最小距离的标准差。 $\delta_{Spacing}$ 值越小，说明解集越均匀。其计算公式为：

$$\delta_{Spacing} = \sqrt{\frac{1}{|P|-1} \sum_{i=1}^{|P|} (\bar{d} - d_i)^2} \quad (26)$$

式中：P 为当前解集； \bar{d} 为所有 d_i 的均值。

δ_{CPF} 用于衡量近似帕累托前沿与真实帕累托前沿之间的一致性和覆盖程度。其计算公式为：

$$\delta_{CPF} = \frac{|\{b \in PF^* \mid \exists a \in PF: a > b\}|}{|PF^*|} \quad (27)$$

式中： δ_{CPF} 为 PF 中的解被 PF* 的某个解支配的百分比， δ_{CPF} 值越大，PF 的性能越好。

3.2 算法流程

1) 初始化种群 生成初始种群 P_0 ，并建立一个空的档案 (外部非支配解集) $\bar{P} = \emptyset$ ，记 $t=0$ 。

2) 适应度值分配 计算 P_t 和 \bar{P}_t 中个体的适应度值。为了确保在相同的档案中没有个体支配其他个体并且具有相同的适应度值，需要同时考虑支配当前个体的解以及被当前个体支配的解。 P_t 和 \bar{P}_t 中每个个体都被赋予强度值 $S(i)$ 来表示支配解的数目，其定义为：

$$S(i) = |\{j \mid j \in P_t + \bar{P}_t \wedge i > j\}| \quad (28)$$

式中： P_t 为进化种群； \bar{P}_t 为外部种群。

每个个体的原始适应度 $R(i)$ 为：

$$R(i) = \sum_{j \in P_t + \bar{P}_t \wedge i > j} S(j) \quad (29)$$

原始适应度取决于支配该个体的个体强度值。非支配个体原始适应度为 0，如果一个个体的原始适应度很高，说明它被很多个体支配 (而支配它的个体又支配很多其他个体)。SPEA2 的 $R(i)$ 如图 3 所示。

但是这样的适应度分配机制仍存在缺陷，当个体间没有互相支配关系时，该机制失效。因此结合密度信息区分具有相同原始适应度的个体，将每个个体 i 在目标空间中到 P_t 和 \bar{P}_t 中其他个体 j 的距离都计算并储存在列表中，按升序排列后取第 k 个对应的欧氏距离为 σ_{k-i} ，对于个体 i 密度 $D(i)$ 定义为：

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_{k-i} + 2} \quad (30)$$

$$k = \sqrt{N_{P_t} + N_{\bar{P}_t}} \quad (31)$$

式中： N_{P_t} 为进化种群大小； $N_{\bar{P}_t}$ 为外部种群大小。可以看出，当个体间的欧氏距离减小，则 $D(i)$ 增大，个体越密集，因此能描述出个体 i 的分布情况，有助于找到分布好的解集。

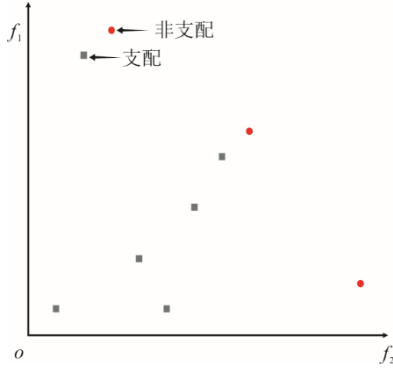


图 2 $R(i)$ 示例
Fig.2 Calculation example of $R(i)$

3) 环境选择 将所有非支配个体从 P_t 和 \bar{P}_t 复制到下一代 \bar{P}_{t+1} 中。若此时 \bar{P}_{t+1} 等于 $N_{\bar{P}_t}$ ，环境选择完成；否则有下列 2 种情况：

a) $\bar{P}_{t+1} < N_{\bar{P}_t}$ 时，从 P_t 和 \bar{P}_t 中根据适应度排序后选择前 $N_{\bar{P}_t} - |\bar{P}_{t+1}|$ 个被支配个体复制到 \bar{P}_{t+1} 中。

b) $\bar{P}_{t+1} > N_{\bar{P}_t}$ 时，使用档案截断法移除个体，直至 $N_{\bar{P}_t} = |\bar{P}_{t+1}|$ ：如果对所有个体 j 均有 $i \leq j$ ，则个体 i 将被剔除（即拥有最小欧氏距离的个体会被剔除）。即为：

$$\begin{aligned} i \leq j &: \Leftrightarrow \forall 0 < k <: \sigma_{k,i} = \sigma_{k,j} \vee \\ & \exists 0 < k <: \left[\left(\forall 0 < l < k : \sigma_{l,i} = \sigma_{l,j} \right) \right] \\ & \wedge \sigma_{k,i} < \sigma_{k,j} \end{aligned} \quad (32)$$

4) 终止条件 当迭代次数 t 达到最大迭代次数 g_{en} 后，算法便终止，此时 \bar{P}_{t+1} 个体即为 Pareto 最优解集。

5) 交配选择 在 \bar{P}_{t+1} 中用替换的二进制锦标赛选择个体填满交配池。

6) 交叉变异 在交配池中应用重组和突变生成新的种群，迭代次数 $t=t+1$ ，转到步骤 2) 适应度值分配。

SPEA2 算法流程如图 3 所示。

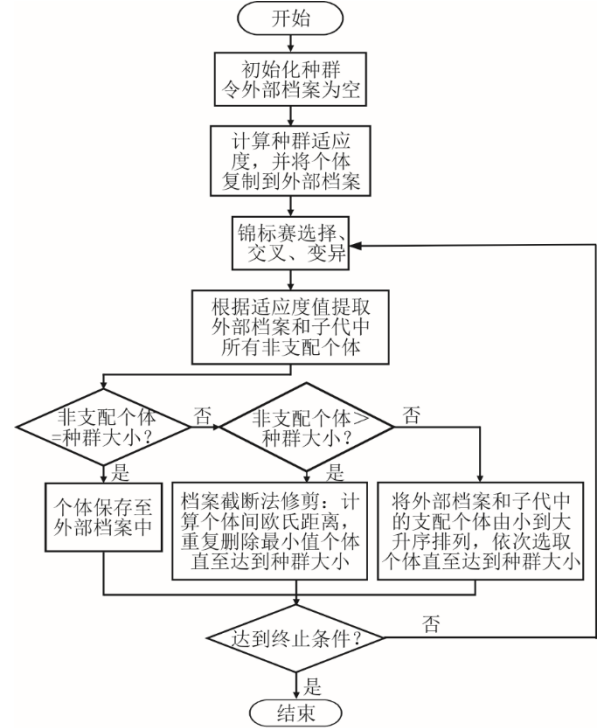


图 3 SPEA2 算法流程
Fig.3 Flowchart of the SPEA2 algorithm

4 算例分析

4.1 算例描述

基于前文建立的风光柴储独立微电网出力模型，导入某位于偏远海域孤岛地区全年 8 760 h 的天气数据和负荷需求数据，天气数据和负荷需求数据如图 4—图 7 所示。风力发电机、光伏板、柴油发电机及储能系统相关参数见表 1—表 2。

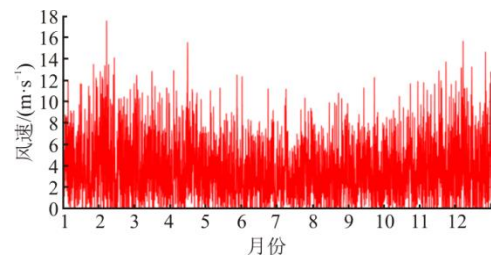


图 4 全年风速数据
Fig.4 Wind speed data for the whole year

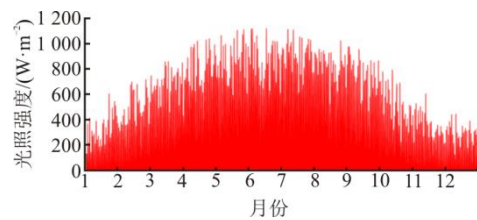


图 5 全年光照强度数据
Fig.5 Light intensity data for the whole year

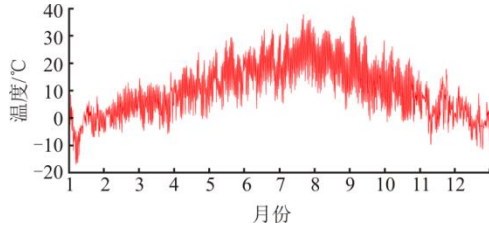


图 6 全年温度数据

Fig.6 Temperature data for the whole year

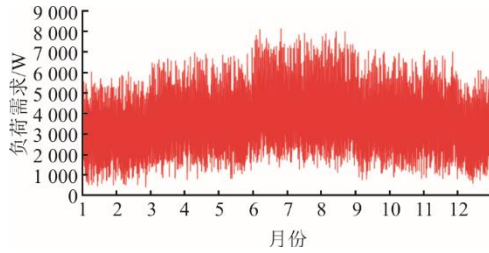


图 7 全年负荷数据

Fig.7 Load data for the whole year

表 1 风光柴储各部分成本参数

Tab.1 Cost parameters of each component of the wind-PV-diesel-battery microgrid

电源类型	电源购置成本/元	运行维护成本/元	电池置换成本/元
风力发电机	21 849	362	
风机塔架	1 812	18	
光伏板	21 754	217	
柴油发电机	10 978	1.23	
储能系统	913	9.1	913

表 2 风光柴储各部分其他参数

Tab.2 Other parameters of each component of the wind-PV-diesel-battery microgrid

参数	数值	参数	数值
V_{oc}/V	21	$V_f/(m \cdot s^{-1})$	12
I_{sc}/A	7	$V_f/(m \cdot s^{-1})$	20
$T_{NOC}/^{\circ}C$	43	Y_{wt}/a	25
K_v	0.05	Y_{pv}/a	25
K_i	0.003 8	Y_{dg}/a	25
$V_c/(m \cdot s^{-1})$	4	Y_{bat}/a	5

4.2 仿真结果与比较

4.2.1 算法比较

为了突出 SPEA2 求解模型的优越性,本文对照基于指标选择的多目标搜索 (IBEA) 算法、NSGA-II 对风光柴储独立微电网的容量优化配置的效果,结合模型的真实 Pareto 前沿以及 δ_{IGD} 、 $\delta_{Spacing}$ 、 δ_{CPF} 3 项多目标优化评价方法综合考量算法。种群规模是指任意一代中的个体总数,规模越大越可能找到全局解,但运行时间也相对较长,本文设置种群规模 $P_{opSize}=100$,最大进化代数 $gen=50$,风力发电机、光伏板、柴油发电机和储能系统的配置数上限分别为 20、40、10、30 台。真实 Pareto 前沿以及 IBEA

算法、NSGA-II 和 SPEA2 算法与前沿的结果对比如图 8—图 11 所示。

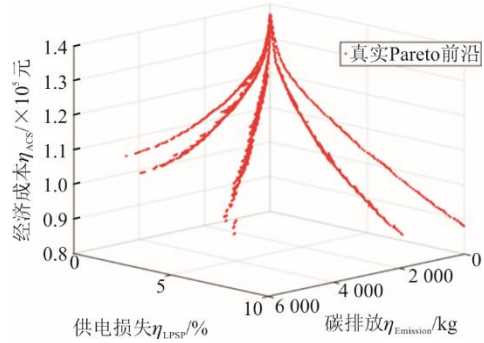


图 8 真实帕累托前沿

Fig.8 The real Pareto front

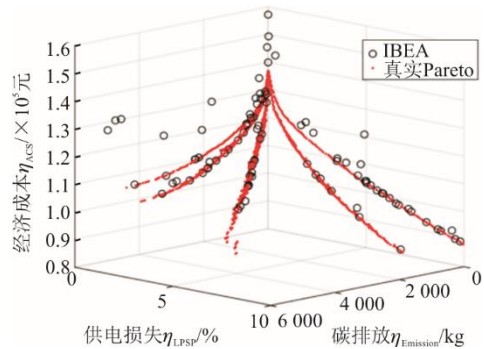


图 9 IBEA 算法求解

Fig.9 Solution of the IBEA algorithm

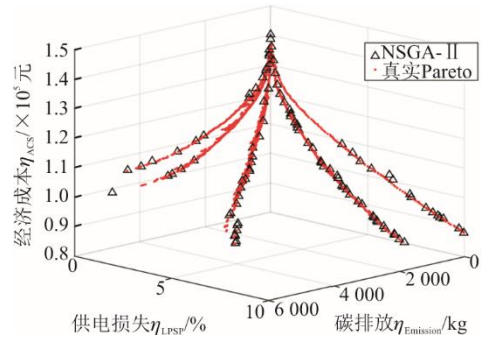


图 10 NSGA-II 求解

Fig.10 Solution of the NSGA-II algorithm

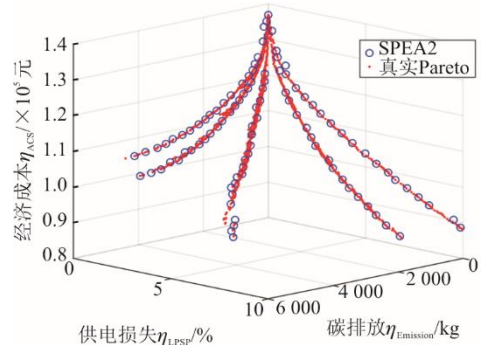


图 11 SPEA2 求解

Fig.11 Solution of the SPEA2 algorithm

从图 8—图 11 可以看出：IBEA 算法由于采用了基于指标的评价方法，在求解本文容量优化配置模型中收敛速度慢，特别是存在大量局部最优解时，并且倾向于收敛到某个局部帕累托前沿，而忽视其他潜在的优质解，导致算法缺乏多样性；NSGA-II 同样存在陷入局部最优解的问题，算法效率较低；SPEA2 在应对该场景时，明显表现出较好的收敛性能，充分维护种群的多样性，在非支配排序中考虑了个体之间的密度信息，因此对于包含多个局部最优解的多模态问题具有较好的适应性。多目标算法指标对比见表 3。

表 3 多目标算法指标对比
Tab.3 Indexes of the multi-objective algorithms

多目标算法	δ_{IGD}	$\delta_{Spacing}$	δ_{CPF}
IBEA	195.230	720.827	0.487
NSGA-II	164.932	177.483	0.703
SPEA2	87.692	70.498	0.950

从表 3 可以看出，SPEA2 相较于其他 2 个多目标优化算法取得了较大提升，对于常用的 NSGA-II δ_{IGD} 指标提升 46.83%， $\delta_{Spacing}$ 指标提升 60.28%， δ_{CPF} 指标提升了 35.14%。

为了更直观展现算法效果，分别将 SPEA2 和 NSGA-II 就风光柴储独立微电网的经济成本和碳排放双目标问题求解和三目标问题求解进行比较，结果如图 12 所示。由图 12 可以看出：在本系统问题中 SPEA2 解集对于 NSGA-II 解集具有支配效果，相同经济成本下能够有效降低碳排放指标；同时，在三目标解集图 12b)中可以看出，SPEA2 的解集分布相较于 NSGA-II 更加均匀，能够充分适应包含多个局部最优解的场景。通过双目标和三目标问题的比较，验证了 SPEA2 对于风光柴储独立微电网的容量优化配置有着优越的求解性能。

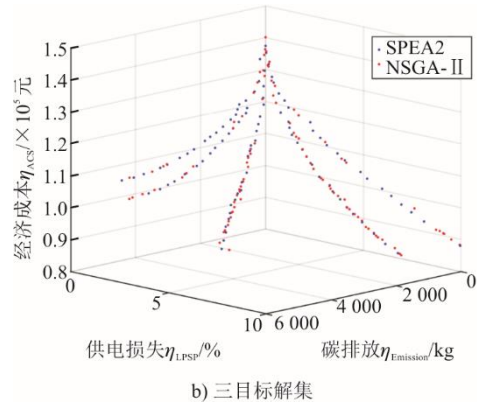
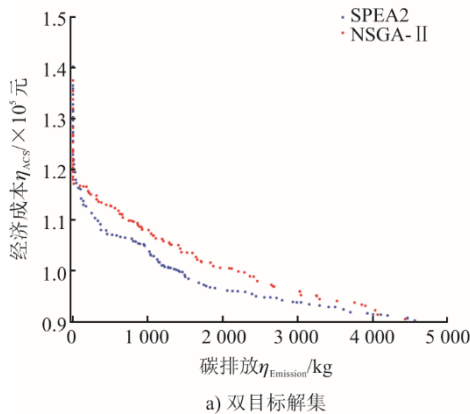


图 12 SPEA2 和 NSGA-II 求解比较
Fig.12 Solving of the SPEA2 and NSGA-II

4.2.2 容量配置结果

图 13 为 SPEA2 求解风光柴储独立微电网的三维最优 Pareto 前沿，表征 3 个目标两两间的关系的二维 Pareto 前沿如图 14 所示。由图 13 可见，经济性指标 η_{ACS} 与功率供应损失概率 η_{LPSP} 和碳排放 $\eta_{Emission}$ 2 个目标具有明显的负相关关系；可由图 14 看出，碳排放的降低会带来经济成本的增加，同样降低 LPSP 指标使得 η_{ACS} 值变大。这意味着要使系统的碳排放降低、可靠性提高必然以花费更高的成本。因此，没有任何一种方案能使 3 个目标同时最小，一个最优的容量配置只能是权衡 3 个目标后得到的结果。

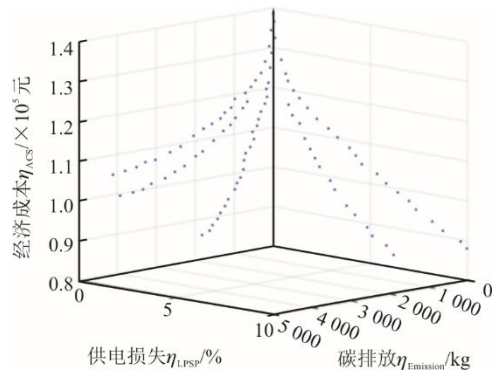
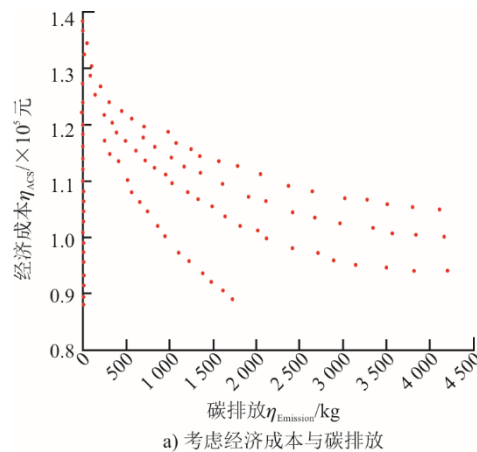


图 13 微电网系统三维 Pareto 前沿
Fig.13 The 3D Pareto front for microgrid systems



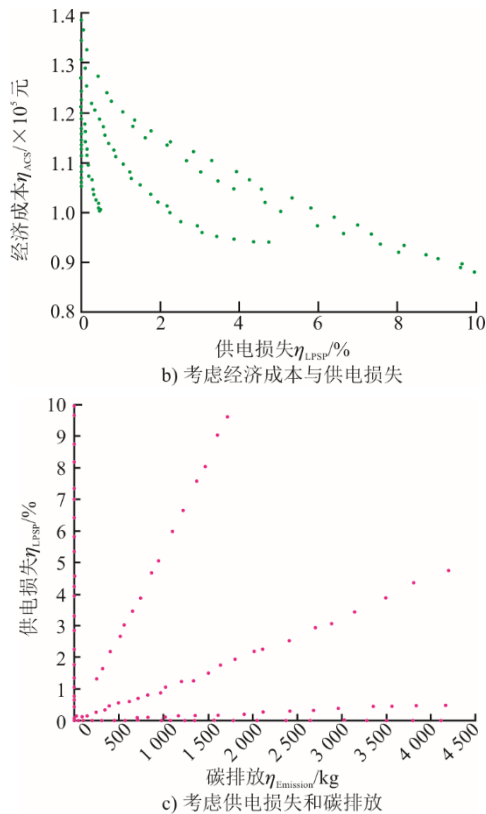


图 14 微电网系统二维 Pareto 前沿
Fig.14 The 2D Pareto front for microgrid systems

表 4 考虑可靠性的容量配置最优结果
Tab.4 Optimal results for capacity allocation considering reliability

方案	$\eta_{LPSP}/\%$	$N_{wt}/\text{台}$	$N_{pv}/\text{台}$	$N_{dg}/\text{台}$	$N_{bat}/\text{台}$	$\eta_{ACS}/\text{元}$	$\eta_{Emission}/\text{kg}$
1	0	7	28	4	13	108 204	2 707.4
2	1.14	9	29	2	16	108 558	1 129.3
3	2.21	11	29	1	16	111 699	416.3

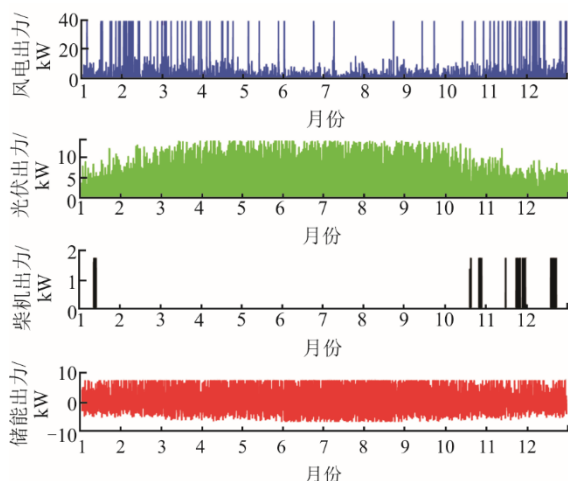


图 15 各部分全年出力情况
Fig.15 Full year's output for each component

5 结 语

本文基于现有的对风光柴储独立微电网的研

究分析，分别对风力发电机、光伏、柴油发电机和储能系统建模，并利用出力模型及其约束条件构建系统，并根据 NSGA-II 在多能源微电网系统中存在的易陷入局部最优解、解集缺乏多样性、效率较低等问题，提出了基于 SPEA2 的风光柴储独立微电网容量优化配置，利用该算法收敛性好、种群多样性强、对多个局部最优解具有良好适应性等优点，优化了系统多目标求解问题，进而得出更优的配置效果，不仅有效满足了孤岛在能源管理方面的需求，同时提高了系统的经济性、可靠性和环境友好性。

在得到最后一代 Pareto 解集中，有 100 种非支配的容量配置方案。就理论而言，解之间没有优劣之分，但实际中可以根据对目标的侧重选择更优的容量配置方案。本文优先考虑可靠性指标，即根据 η_{LPSP} 选择最优解。当限定在小于 1%、2%、3% 范围内时可以从图 13 中 Pareto 前沿选择 3 个解，并得到 3 种系统最优容量配置方案，如表 4 所示。

为了验证模型有效性，本文以方案 2 为例，限制 η_{LPSP} 小于 2% 时进行 1 年的仿真，并观察系统各部分的运行情况。风光柴储各部分月度出力情况如图 15 所示。由图 15 可以看出，光伏板和风机的输出主要与天气情况有关，即当光照充足或风速较大时，它们的输出功率就大。储能系统在 1 年内基本都在进行充放电的操作，而柴油发电机则是负载需求较高时出力。当可再生能源发电不足时，作为储能系统的电池组会首先放电直至最大功率或最大放电深度，然后柴油发电机才会工作以满足剩余的负载需求。当这些需求大于柴油发电机额定功率时，柴油发电机将以额定功率输出，此时将会计算 η_{LPSP} 值。

[参 考 文 献]

- [1] 孙秀娟, 张鹏飞, 卞晓雪. 计及多类型需求响应的光伏微网储能容量优化配置[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(9): 108-114.
SUN Xiujuan, ZHANG Pengfei, BIAN Xiaoxue. Battery storage optimization for capacity configuration of

- photovoltaic-based microgrid with multi-type demand response[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(9): 108-114.
- [2] 廖政侃. 基于电力系统灵活资源成本最小化的风光容量配比方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1.
LIAO Zhengkan. Proportional allocation method of wind power and photovoltaic capacity based on minimizing cost of flexible resource in power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1.
- [3] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(14): 1-10.
LI Jianlin, MA Huimeng, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(14): 1-10.
- [4] KOJIMA T, FUKUYA Y. Microgrid system for isolated islands[J]. *Fuji Electric Review*, 2011, 57(4): 125-130.
- [5] MUN H, MOON B, PARK S, et al. A study on the economic feasibility of stand-alone microgrid for carbon-free island in Korea[J]. *Energies*, 2021, 14(7): 1913.
- [6] 梁亮, 李建林, 惠东. 大型风电场用储能装置容量的优化配置[J]. *高电压技术*, 2011, 37(4): 930-936.
LIANG Liang, LI Jianlin, HUI Dong. Optimization configuration for capacity of energy storage system in large-scale wind farm[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(4): 930-936.
- [7] 王钊, 潘再平, 徐泽禹. 带非线性负载的双馈式风力发电机孤岛控制策略[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(8): 1791-1798.
WANG Zhao, PAN Zaiping, XU Zeyu. Island control strategy for doubly-fed wind turbines with nonlinear loads[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2015, 36(8): 1791-1798.
- [8] 熊鹏, 赵陆林, 黄志城. 离网小型风力发电系统的建模与仿真研究[J]. *科技资讯*, 2023, 21(21): 58-62.
XIONG Peng, ZHAO Lulin, HUANG Zhicheng. Research on the modeling and simulation of the off-grid small-scale wind power generation system[J]. *Science & Technology Information*, 2023, 21(21): 58-62.
- [9] 钟永, 葛庆, 周唯. 离网型微电网中混合储能容量优化配置[J]. *科技创新与应用*, 2023, 13(17): 98-101.
ZHONG Yong, GE Qing, ZHOU Wei. Optimal allocation of hybrid energy storage capacity in off-grid microgrids[J]. *Technology Innovation and Application*, 2023, 13(17): 98-101.
- [10] DAUENHAUER P, LOUIE H. Effects of load estimation error on small-scale off-grid photovoltaic system design, cost and reliability[J]. *Electronic and Electrical Engineering*, 2016, 34: 30-43.
- [11] 徐少华, 李建林. 光储微网系统并网/孤岛运行控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(34): 25-33.
XU Shaohua, LI Jianlin. Grid-connected/island operation control strategy for photovoltaic/battery micro-grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(34): 25-33.
- [12] 李鑫, 王娟, 陈薇, 等. 考虑电池性能的独立光储系统能量管理策略[J]. *控制工程*, 2021, 28(8): 1598-1607.
LI Xin, WANG Juan, CHEN Wei, et al. Energy management control strategy for independent photovoltaic energy storage system considering battery performance[J]. *Control Engineering of China*, 2021, 28(8): 1598-1607.
- [13] 朱云智, 冯文博, 高耀, 等. 基于交错并联 Boost 电路的离网光伏发电系统优化研究[J]. *工业控制计算机*, 2022, 35(11): 136-138.
ZHU Yunzhi, FENG Wenbo, GAO Yao, et al. Optimisation of off-grid photovoltaic power generation system based on interleaved Boost circuit[J]. *Industrial Control Computer*, 2022, 35(11): 136-138.
- [14] 张睿超, 王登甲, 刘艳峰, 等. 青藏高原离网光伏供暖系统容量配置优化研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 53(6): 828-834.
ZHANG Ruichao, WANG Dengjia, LIU Yanfeng, et al. The system form and case analysis of off-grid photovoltaic heating in Tibet Plateau[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 53(6): 828-834.
- [15] 王佳晗, 薛红, 李泽. 基于积分调节的光伏孤岛运行与负荷跟踪控制[J]. *电力电子技术*, 2023, 57(12): 90-93.
WANG Jiahua, XUE Hong, LI Ze. Photovoltaic island operation and load tracking control based on integral regulation[J]. *Power Electronics*, 2023, 57(12): 90-93.
- [16] 侯宝华, 李建军, 罗继东. 并网光伏阵列发电最大功率点孤岛检测方法[J]. *计算机仿真*, 2021, 38(8): 70-74.
HOU Baohua, LI Jianjun, LUO Jidong. Islanding detection method for maximum power point of grid connected photovoltaic array[J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(8): 70-74.
- [17] GUO Y, MING B, HUANG Q, et al. Variation-based complementarity assessment between wind and solar resource in China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 278: 116726.
- [18] 付宏力, 奥淇仑, 王陶. 基于改进 NSGA-II 算法的风光互补发电系统储能控制优化[J]. *能源与节能*, 2024(5): 1-4.
FU Hongli, AO Qilun, WANG Tao. Energy storage control optimization of wind solar complementary power generation system based on improved NSGA-II algorithm[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2024(5): 1-4.
- [19] 万庆祝, 袁润娇, 李伊梦, 等. 风光储参与电网预防-紧急控制策略研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(4): 404-415.
WAN Qingzhu, YUAN Runjiao, LI Yimeng, et al. Research on power grid prevention-emergency control strategy with wind and solar storage participation[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2024, 45(4): 404-415.
- [20] 王杨, 杨俊丰, 赵焱, 等. 基于储能 SOC 和风光功率裕度调节的风光储联合调频策略[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(4): 150-158.
WANG Yang, YANG Junfeng, ZHAO Yi, et al. A joint frequency modulation strategy for wind/solar/storage based on SOC of energy storage and wind and solar power margin regulation[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(4): 150-158.
- [21] 张坤, 王胜豪, 李智, 等. 区域电网风光最优配比及储能优化配置研究[J]. *东北电力技术*, 2024, 45(4): 23-28.
ZHANG Kun, WANG Shenghao, LI Zhi, et al. Research on optimal ratio of wind and PV and energy storage optimization configuration in regional power grid[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2024, 45(4): 23-28.
- [22] 杨秀媛, 黄丹, 申洪. 多能源互补独立电力系统的控制策略仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(4): 156-162.

- YANG Xiuyuan, HUANG Dan, SHEN Hong. Research on control strategy of multi-energy complementary isolated power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 156-162.
- [23] 钟诚, 初文昊, 李晓明, 等. 考虑储能寿命的光储柴微电网优化调度[J]. 电气应用, 2023, 42(11): 9-15.
ZHONG Cheng, CHU Wenhao, LI Xiaoming, et al. Optimal dispatch of photovoltaic storage diesel microgrid considering energy storage life[J]. Electrotechnical Application, 2023, 42(11): 9-15.
- [24] 张庆岭, 牟超. 海洋风光柴储发电系统性能研究[J]. 海洋技术学报, 2021, 40(1): 96-101.
ZHANG Qingling, MOU Chao. Research on the performance of solar-diesel-battery microgrid system[J]. Journal of Ocean Technology, 2021, 40(1): 96-101.
- [25] 王家林, 张春燕, 艾胜, 等. 岛礁风光柴储多能源独立微电网建模分析[J]. 海军工程大学学报, 2024, 36(2): 79-86.
WANG Jialin, ZHANG Chunyan, AI Sheng, et al. Modeling and analysis of multi-energy isolated microgrid with wind-PV-diesel-storage in islands and reefs[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2024, 36(2): 79-86.
- [26] 郝巍. 基于NSGA-II的并网型风光储系统最优配置[J]. 云南电力技术, 2023, 51(5): 6-9.
HAO Wei. Research on multi-objective optimal configuration of grid connected wind and solar energy storage system based on NSGA-II configuration[J]. Yunnan Electric Power, 2023, 51(5): 6-9.
- [27] 陈金阳, 雷勇, 曹晓燕, 等. 基于混合NSGA-II算法的基站电源容量配置优化[J]. 电气传动, 2022, 52(16): 55-62.
CHEN Jinyang, LEI Yong, CAO Xiaoyan, et al. Optimal sizing of base station power supply based on hybrid NSGA-II algorithm[J]. Electric Drive, 2022, 52(16): 55-62.
- [28] 李家珏, 刘子祎, 白伊琳, 等. 基于风电场景概率的电热混合储能优化配置[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 172-182.
LI Jiajue, LIU Ziyi, BAI Yilin, et al. Optimized configuration of electro-thermal hybrid energy storage capacity based on wind power scenario probabilistic[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 172-182.
- [29] 李明, 尹晓宇, 董小菱, 等. 电力物联网光伏微网多目标容量配置优化研究[J]. 电子设计工程, 2024, 32(5): 165-168.
LI Ming, YIN Xiaoyu, DONG Xiaoling, et al. Research on multi-objective capacity allocation optimization of photovoltaic microgrid in power internet of Things[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(5): 165-168.
- [30] 王晓声, 孙凯, 李运帷. 交直流混合微网中双向接口变换器控制综述[J]. 电源学报, 2016, 14(2): 70-79.
WANG Xiaosheng, SUN Kai, LI Yunwei. Review of control strategies for bidirectional interfacing converters in hybrid AC/DC microgrid[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(2): 70-79.
- [31] 杨冠东. 光伏交直流混合微电网控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019: 1.
YANG Guandong. Research on control strategy of photovoltaic AC/DC hybrid microgrids[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019: 1.
- [32] 刘慧文. 独立运行风光柴储微电网多目标容量优化配置研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2022: 1.
LIU Huiwen. Research on multi-objective optimal capacity configuration for stand-alone microgrid with WT-PV-DE-BES[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2022: 1.
- [33] 刘佳. 大规模风电接入的电力系统小干扰稳定及控制方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2020: 1.
LIU Jia. Research on small signal stability and control method for power system with large scale wind power[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2020: 1.
- [34] 郑晓坤. 军民共建区域级能源互联网配置优化方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020: 1.
ZHENG Xiaokun. Research on the optimization allocation method for the military and civilian co-construction regional energy internet[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020: 1.
- [35] 毛涛涛. 移动光伏拖动系统的源荷配置关键技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018: 1.
MAO Taotao. Research on key technology of power and load configuration in movable photovoltaic system[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018: 1.
- [36] 史志超. 基于多目标进化算法的混合可再生能源系统规划研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2018: 1.
SHI Zhichao. Sizing study on hybrid renewable energy systems using multi-objective evolutionary algorithm[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018: 1.
- [37] 路小娟, 郭琦, 董海鹰. 基于CMOPSO的混合储能微电网多目标优化研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(1): 279-286.
LU Xiaojuan, GUO Qi, DONG Haiying. Multi objective optimization of hybrid energy storage micro grid based on CMOPSO algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(1): 279-286.

(责任编辑 杜亚勤)