

“海上田园”背景下的渔排多微电网经济运行优化策略

郭昊文, 陈思妍, 罗浩, 黄靖

(福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118)

摘要: 针对“海上田园”渔排多微电网系统, 提出了微电网群系统模型, 并针对其在无大电网支持的特殊环境下维持电力所面临的供应稳定性和经济效益的挑战, 提出了两个经济性目标函数, 综合考虑了微电网间的功率调度及其经济效益。应用非支配排序遗传算法 II (NSGA-II) 和基于分解的约束多目标进化算法 (CMOEA/D) 对目标函数求解。结果表明, CMOEA/D 算法在追求经济最优解方面表现出较高的效率和准确度, 在最优解的质量和迭代时间上都比 NSGA-II 算法表现更优, 验证了所提模型和算法的有效性。

关键词: 多微电网; 多目标优化; NSGA-II; CMOEA/D; 优化策略

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)04-0379-08

Optimization strategy of economic operation of fishery microgrids under the background of “marine pastoral fields”

GUO Haowen, CHEN Siyan, LUO Hao, HUANG Jing

(School of Electronic, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: For the aquaculture raft microgrid system in the “marine pastoral fields”, a model of microgrid cluster systems is proposed. Addressing the challenges of maintaining stable power supply and economic benefits in the special environment without the support of a large grid, two economic objective functions are introduced, which take into account the power dispatching between microgrids and their economic benefits. The non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) and the constraint multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition (CMOEA/D) are applied to solve the objective functions. Results indicate that the CMOEA/D algorithm demonstrates higher efficiency and accuracy in pursuing economically optimal solutions, outperforming the NSGA-II algorithm in both the quality of the optimal solutions and the iterative time, thereby verifying the effectiveness of the proposed model and algorithms.

Keywords: microgrids; multi-objective optimization; NSGA-II; CMOEA/D; optimization strategy

全球对可持续能源和生态保护的需求催生了“海上田园”模式。结合海洋养殖与可再生能源, 采用微电网连接海洋和陆地能源可以提高能源效率, 促进生态可持续发展。优化“海上田园”中微电网的经济运行, 不仅能增强能源使用效率, 还有助于海洋环境保护和蓝色经济增长, 展现创新的能源获取和生态保护模式^[1]。

随着对可再生能源探索的加深, 海岛微电网

的离网运行能力成为了全球能源研究的焦点。这些在偏远海岛地区的微电网通过独立运行的能源系统不仅能满足当地的电力需求, 也促进了可持续发展目标的实现。文献[2]建立了一个考虑孤岛微电网运行性能的多目标优化调度模型, 综合考虑了微电源的发电成本、环境管理成本和电力供应可靠性。文献[3]提出了一种综合考虑经济性和灵活性的海岛微电网优化调度策略, 利用风

收稿日期: 2024-03-07

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划 (202310388022); 福建理工大学科研发展基金专项 (GY-Z23080)

第一作者简介: 郭昊文 (1998—), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 研究方向: 电力电子与电力传动。

光氢储系统降低购售电费用和弃风弃光惩罚;同时通过模型预测控制提高系统对可再生能源和负荷不确定性的适应性,增强系统的经济性和灵活性。

陆地上的多微电网系统亦是当前能源研究的重点。多微电网系统的优势在于能够通过与主电网的互联,不仅可以优化能源的分配和提高电网的整体稳定性,还能有效地整合各种资源。例如,文献[4]构建了一个考虑经济和环境因素的多微电网鲁棒优化调度模型,解决了微电网间功率互动和预测不确定性问题;通过拉丁超立方抽样和MOBCC算法,获取多情景下的最优解。文献[5]从微电网群的角度出发,提出了一个分布式的最优调度策略,提高了可再生能源的接纳和系统操作的可靠性。文献[6]提出了一种在期望场景下对多微电网进行稳健经济调度的两阶段方法,先进行日前优化以最小化成本和制定初始计划,然后根据实际情况调整,以提高系统在不确定性条件下的经济性和鲁棒性。

尽管当前对陆地多微电网和海岛微电网系统的研究已取得了一些成果,但还不能完全满足海

洋渔排微电网的特殊需求。海洋渔排微电网不像陆地上的多微电网,没有与大型电网连接的可能性;与海岛微电网系统的区别在于,海洋渔排微电网采用了多微电网的连接方式,要求微电网能够独立于传统电网之外,自主运维能源系统。基于上述研究,本课题提出了渔排微电网模型及其优化调度策略,关注微电网间的协同调度和独立电力采购的经济性,采用 NSGA- II 和 CMOEA/D 两种算法应对其能源管理的复杂性,为特殊环境下微电网规划和管理提供借鉴。

1 微电网

1.1 微电网结构

本课题提出一个用于偏远海域的海上三渔排微电网集群系统。这些微电网独立于主电网运行,利用它们之间的信息交换和能量传输来共同满足渔排的电力需求。主要电力来源包括太阳能光伏发电和风力发电;辅以备用柴油发电机和储能设备以确保电力供应的连续性;同时考虑了电动渔船(electric fishing vessel, EF)的充电需求。微电网的组成如图 1 所示。

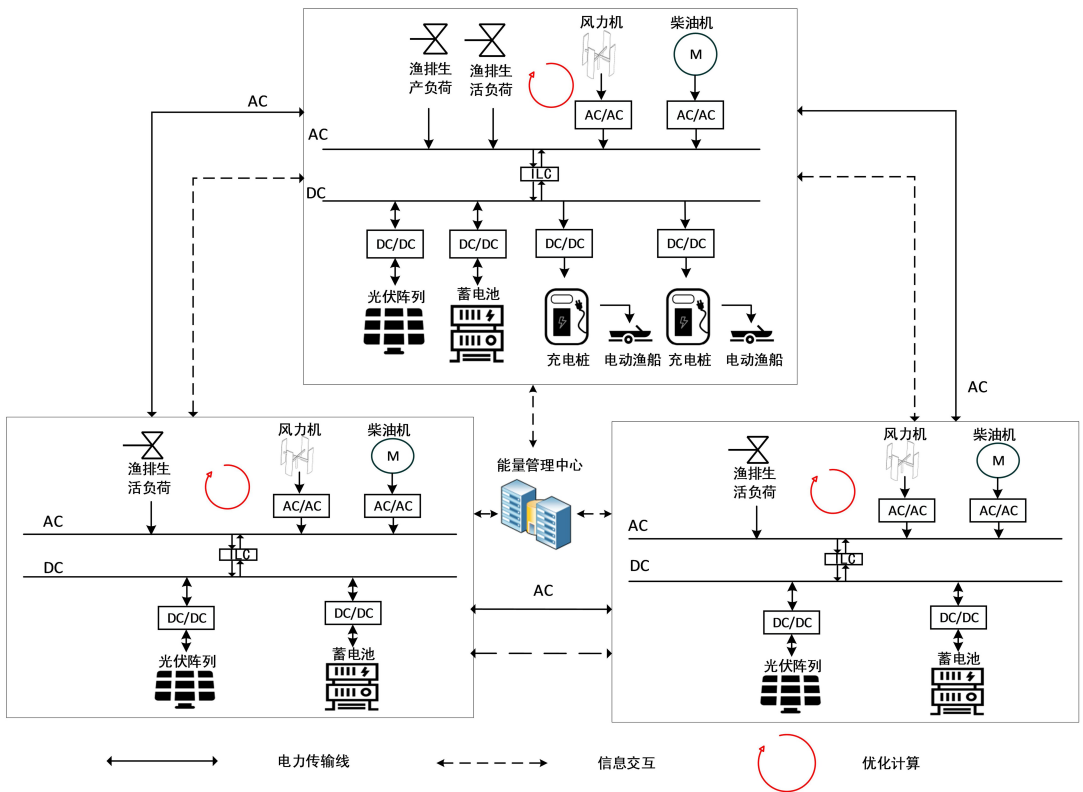


图 1 微电网群系统的主要结构

Fig.1 Main structure of a microgrid cluster system

如图1所示,微电网的主要结构包括交流子微电网、直流子微电网以及内部连接环节(ILC)。风机、燃气轮机等分布式发电源(DG)通过交流至交流(AC/AC)变换器接入交流母线;光伏和储能装置则通过直流至直流(DC/DC)变换器连接到直流母线;ILC主要由双向交流至直流(AC/DC)变换器组成,这种配置支持交流与直流之间的动态功率双向交换,可以有效应对可再生能源的出力波动和间歇性,确保微电网的稳定运行。在多个微电网间实现能量互通时,本课题采用交流母线连接方式,这种方式的技术成熟、控制器成本低,可靠性也较高。

1.2 多微电网数学模型

1.2.1 光伏发电

光伏电池板的输出取决于模块平面接收的太阳辐射能量,受当地的气候条件、安装方法、模块类型等因素影响^[7]。光伏的输出可以通过额定功率、实际辐照度和环境温度估计,在标准测试环境下^[8],光伏电池的输出功率模型可近似描述为:

$$P_{PV,t} = P_{STC} \frac{G(t)}{G_{STC}} [1 + k(T(t) - T_{STC})] \quad (1)$$

式中, $P_{PV,t}$ 为光伏电池输出的有功功率; P_{STC} 为标准测试条件下的最大输出功率; G_{STC} 为标准测试条件下的光照强度; k 是温度系数; T_{STC} 为标准测试条件下的测试温度强度; $G(t)$ 为测试时的光照强度与 $T(t)$ 分别为表面温度。

1.2.2 Savonius 风力发电系统

在海上养殖平台的特殊环境中,风力是关键能源,特别是无太阳能供电时,风力能源更显重要。考虑到平台空间限制和海洋特性,课题采用适应低风速的Savonius型垂直轴风力机,其设计简洁、稳定可靠,可与太阳能或电池系统结合,为养殖平台提供稳定、经济、环保的电力解决方案,适合在各种海洋条件下工作^[9]。

风力涡轮发电机的输出功率 $P_{WT,t}$ 可用式(2)描述。

$$P_{WT,t} = \begin{cases} 0; & \text{if } V \leq V_{ci} \\ a_1 V^2 + b_1 V + c_1; & \text{if } V_{ci} < V < V_r \\ P_{WT_r}; & \text{if } V \geq V_r \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_{WT_r} 为风力发电机输出的额定功率; V_{ci} 、 V_r 分别为风速的下限、上限; V_r 、 V 分别为额定风速和实际风速; a_1 、 b_1 、 c_1 为风力发电机的实际参数。

1.2.3 蓄电池系统

蓄电池储能系统是混合能源系统中非常重要的组成部分,它可以平滑分布式发电的波动,提高系统的可调度性和可靠性^[10]。当其他出力不足时蓄电池能够补充需求,当负荷较低时,蓄电池能够存储多余的电量备用,起到削峰填谷的作用^[11]。荷电状态(SOC)通常用来表示电池的剩余容量,是微电网运行优化中的关键变量之一。

$$\begin{cases} \text{SOC}_{SB,t} = \text{SOC}_{SB,t-1} + \frac{P_{SB,t} \cdot \eta_{CH}}{E_r} \\ \text{SOC}_{SB,t} = \text{SOC}_{SB,t-1} + \frac{P_{SB,t}}{E_r \cdot \eta_{DIS}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\text{SOC}_{SB,t}$ 和 $\text{SOC}_{SB,t-1}$ 分别为蓄电池 t 时段和 $t-1$ 时段的荷电状态; $P_{SB,t} > 0$ 表示的是充电功率; $P_{SB,t} < 0$ 表示的是放电功率; E_r 表示蓄电池总的额定容量; η_{CH} 表示充电效率; η_{DIS} 表示放电效率。

1.2.4 柴油机系统

柴油发电机的燃料成本 $F_{DE,t}$ 可以通过其输出有功功率的二次函数来表达,模型可表示为:

$$F_{DE,t} = a_2 P_{DE,t}^2 + b_2 P_{DE,t} + c_2 \quad (4)$$

式中, a_2 、 b_2 、 c_2 为柴油发电机的参数, $P_{DE,t}$ 为柴油发电机输出的有功功率。

2 多目标优化调度策略

多微电网系统的能量优化调度是多微电网系统能量管理的一个重要策略。在综合考虑多微电网系统的燃料成本、运行维护成本、能量交互成本,电机启停成本等前提下,建立多微电网系统的经济运行模型。

2.1 目标函数

微电网群的运行成本 F_1 可用式(5)表示。

$$\min F_1 = \sum_{i=1}^{24} \left[\sum_{i=1}^N (F_{DE,t}^i + F_{DM,t}^i + F_{AB,t}^i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{EX,t}^{i,j} \right] \quad (5)$$

式中, N 代表微电网数量, i 、 j 分别代表第 i 、 j 个微电网, $F_{DE,t}^i$ 为微电网 i 的柴油机运行费用, $F_{DM,t}^i$ 为运维费用, $F_{AB,t}^i$ 为弃光费用, $F_{EX,t}^{i,j}$ 为微电网 i 、 j 间交换功率费用,具体计算如式(6)~(8)所示。

$$F_{AB,t}^i = (P_{PV,t}^i - P_{PV,t}^j) \times C_{AB} \quad (6)$$

$$F_{DM,t}^i = \sum_{i=1}^N K_{Mi} \times P_{GEN,t}^i \quad (7)$$

$$F_{EX,t}^{i,j} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N P_{EX,t}^{i,j} \times C_{EX} \quad (8)$$

式中, $P_{PV,t}^i$ 表示微电网 i 的实际光伏电站的出力; $P_{PV,t}^i$ 表示其光伏电站预测出力; C_{AB} 为单位弃光费用; K_{Mi} 为运行维护费用; $P_{GEN,t}^i$ 为微电源 i 的发电功率, 包括微电网 i 中风力发电机、光伏发电、柴油发电机和储能设备的输出功率; $P_{EX,t}^{i,j}$ 为微电网 i 与微电网 j 之间的交换功率; C_{EX} 为单位交换功率费用。

2.2 单微电网成本最优

微电网运行最先需要考虑的因素是经济性。在忽略需求侧响应的前提下, 以微电网 3 为例, 建立其经济性优化模型, 可以通过如式 (9) (10) 所示的目标函数表示。

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^{24} \left[(F_{DE,t}^i + F_{DM,t}^i + F_{AB,t}^i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{BUY,t}^{i,j} \right] \quad (9)$$

$$F_{BUY,t}^{i,j} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N P_{EX,t}^{i,j} \times C_{BUY} \quad (10)$$

式中, F_2 为微电网 3 的运行成本, $F_{BUY,t}^{i,j}$ 为微电网 i, j 间售购电的费用, $P_{EX,t}^{i,j} < 0$ 为售电, $P_{EX,t}^{i,j} > 0$ 为购电。

2.3 约束条件

2.3.1 微电网内功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{LOAD,t}^1 = P_{GEN,t}^1 + P_{EX,t}^{1,2} + P_{EX,t}^{1,3} \\ P_{LOAD,t}^2 = P_{GEN,t}^2 - P_{EX,t}^{1,2} + P_{EX,t}^{2,3} \\ P_{LOAD,t}^3 + P_{EF,t} = P_{GEN,t}^3 - P_{EX,t}^{1,3} - P_{EX,t}^{2,3} \\ P_{GEN,t}^i = P_{SB,t}^i + P_{PV,t}^i + P_{WT,t}^i + P_{DE,t}^i \end{cases} \quad (11)$$

式中, $i=1, 2, 3$, $P_{DE,t}^i$ 代表微电网 i 中柴油机出力功率; $P_{SB,t}^i$ 代表蓄电池的充放电功率; $P_{PV,t}^i$ 为光伏出力功率; $P_{WT,t}^i$ 为风电出力功率; $P_{GEN,t}^i$ 为微电源 i 的发电功率, $P_{LOAD,t}^i$ 为微电网 i 的系统负荷; $P_{EF,t}$ 为电动渔船充电负荷。

2.3.2 分布式电源出力约束

微电网的光伏出力大小和风电出力大小都要在一定范围内, 即:

$$0 \leq P_{PV,t}^i \leq P_{PV,t}^{i,max} \quad (12)$$

$$0 \leq P_{WT,t}^i \leq P_{WT,t}^{i,max} \quad (13)$$

式中, $P_{PV,t}^{i,max}$ 和 $P_{WT,t}^{i,max}$ 为微电网 i 中光伏出力和风电出力的上限功率。

2.3.3 柴油发电机爬坡约束

$$P_{DE,t}^{i,min} \leq P_{DE,t}^i < P_{DE,t}^{i,max} \quad (14)$$

式中, $P_{DE,t}^{i,min}$ 和 $P_{DE,t}^{i,max}$ 分别为微电网 i 中柴油机的

有功出力的上限和下限。

2.3.4 蓄电池容量约束

$$SOC_{SB,t}^{i,min} \leq SOC_{SB,t}^i \leq SOC_{SB,t}^{i,max} \quad (15)$$

$$P_{SB,discharge,t}^{i,min} \leq P_{SB,t}^i \leq P_{SB,charge,t}^{i,max} \quad (16)$$

式中, $SOC_{SB,t}^i$ 代表微电网 i 中蓄电池所带的电荷量; $SOC_{SB,t}^{i,min}$, $SOC_{SB,t}^{i,max}$ 分别为蓄电池最小和最大剩余电量。 $P_{SB,discharge,t}^{i,min}$ 和 $P_{SB,charge,t}^{i,max}$ 分别为蓄电池最小放电功率和最大充电功率。

2.3.5 交换功率约束

$$P_{EX,t}^{i,j,min} \leq P_{EX,t}^{i,j} \leq P_{EX,t}^{i,j,max} \quad (17)$$

式中, $P_{EX,t}^{i,j,max}$ 和 $P_{EX,t}^{i,j,min}$ 为微电网 i 和微电网 j 交换功率的上下限功率。

3 求解算法

NSGA-II 和 CMOEAD 算法在处理多约束、非线性和多目标优化问题上提供了更加高效和先进的机制。

3.1 CMOEA/D 算法

CMOEA/D 算法, 即基于分解的约束多目标进化算法, 专门处理带约束的多目标优化问题, 通过将其分解成若干单目标子问题来优化^[12]。首先定义一组均匀分布的参考点, 作为多目标问题分解的基础, 每个参考点对应一个子问题, 引导优化方向。这些参考点帮助算法专注于最小化解与其对应参考点间的聚合距离, 有效指导搜索过程。

在算法执行期间, 参考点根据种群的实时表现和问题特征可动态调整, 提升搜索效率和适应性。算法不断更新, 逐步逼近 Pareto 最优前沿, 直至满足迭代次数或其他终止条件, 最终输出接近 Pareto 前沿的解集。这种方法不仅提高了解的质量, 还确保了算法在处理多目标和约束条件时的高效性和适应性, 为复杂优化问题提供了一种有效解决方案。

3.2 NSGA-II 算法

NSGA-II 算法, 即非支配排序遗传算法, 提出一种快速非支配排序, 使 Pareto 支配排序的时间复杂度较 NSGA 降低; 还提出一种拥挤度和拥挤度比较算子, 并引入精英策略, 增加了 Pareto 解集的多样性, 扩大了采样空间。因此 NSGA-II 算法在多目标优化问题中被广泛应用, 也适用于本研究模型^[13]。NSGA-II 算法的优越性能, 主要归功于它的两个核心机制: 非支配排序和拥挤度计算。

3.2.1 非支配排序

在非支配排序中, 每个解 i 都被赋予两个属

性:支配计数 n_i 和被 i 支配的解的集合 S_i 。 i 和 j 如果对于所有目标 k 都满足 $f_k(i) \leq f_k(j)$, 则称 i 支配 j 。

3.2.2 拥挤度计算

拥挤度是指解在目标函数空间中的分布密度。对于一个特定的非支配层,拥挤度是通过计算每个解在每个目标函数上的相邻解之间的距离来确定的。具体地,对于每个目标 k ,拥挤度距离 d_i 的计算如式(18)所示。

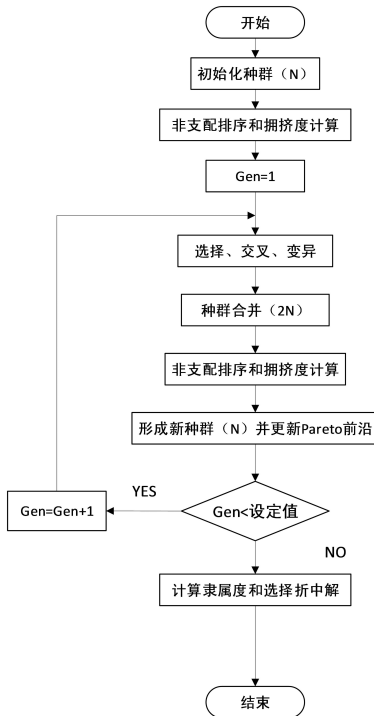
$$d_i = d_i^+ \frac{f_k(i+1) - f_k(i-1)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} \quad (18)$$

式中, $f_k(i+1)$ 和 $f_k(i-1)$ 是在目标 k 上紧邻解 i 的解的目标函数值, f_k^{\max} 和 f_k^{\min} 分别是该目标函数的最大值和最小值。

3.3 模糊 topsis 决策方法

首先,收集或计算每个调度方案在 3 个目标上的性能值,设有 n 个调度方案 $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$, 每个方案在 3 个目标上的性能值组成决策矩阵 X , 由于由于 3 个目标都是最小化目标,可以采用式(19)标准化公式^[14]:

$$r_{ij} = \frac{\min(X_j)}{x_{ij}} \quad (19)$$



(a) NSGA-II 算法流程

式中, x_{ij} 是方案 α_i 在目标 C_j 上的原始性能值, 而 $\min(X_j)$ 是第 j 个方案个目标所有方案中的最小值。

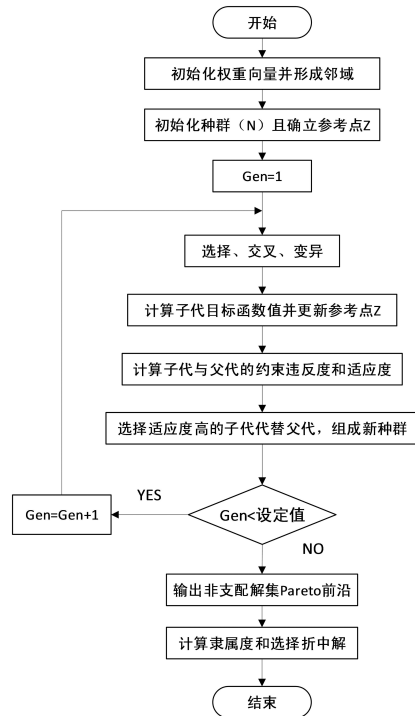
根据实际问题 and 数据情况,选择每个指标中模糊指标值的最大和最小值来确定模糊正理想值 M^+ 和模糊负理想值 M^- 。再选择备选决策集中的每一个决策,并计算每个指标在 M^+ 上的隶属度 μ 。通过比较每个决策计算出的 μ 值,如果 μ 值较大,则代表方案更接近理想决策。在具有 N 个评估指标和 $j=1, 2, \dots, J$ 决策指标的模糊指标矩阵中,决策 $i=1, 2, \dots, N$ 与模糊正负理想值 d_i^+ 和 d_i^- 之间的距离可以表示为:

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{i \times j} (r_{ij} - M_j^+)^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{i \times j} (r_{ij} - M_j^-)^2} \end{cases} \quad (20)$$

最后选择最佳决策,如果决策 i 隶属于隶属度为 u_i 的模糊正理想,那么:

$$\mu_i = \frac{d^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (21)$$

通过设置 d_i^+, d_i^- 找到 pareto 解集中隶属度最高的点。算法流程如图 2 所示。



(b) CMOEA/D 算法流程

图 2 NSGA-II 和 CMOEA/D 算法流程图

Fig.2 Flowchart of NSGA-II and CMOEA/D algorithms

4 算例分析

4.1 算例参数

本研究选取福建某地渔排微电网数据,采用 MATLAB 进行建模。构建的多微电网系统由 3 个微电网组成,微电网群结构如图 1 所示,计算周期为 1 d,从当日 6:00 到次日 6:00。各微电网的分布式电源出力上下限和运维费用 K_{Mi} 见表 1。微电网各自购售电单价如表 2。

表 1 分布式电源参数

Tab.1 Distributed power supply parameters

微电源 $P_{GEN,i}^i$ 类型	$P_{min}/$ kW	$P_{max}/$ kW	运行维护费用/ 元 · (kW · h) ⁻¹
柴油发电机	0	180	0.085
蓄电池	-180	180	0.130
微电网 1 光伏	0	130	0.035
微电网 1 风机	0	60	0.010
微电网 2 光伏	0	100	0.035
微电网 2 风机	0	40	0.010
微电网 3 光伏	0	400	0.035
微电网 3 风机	0	100	0.010

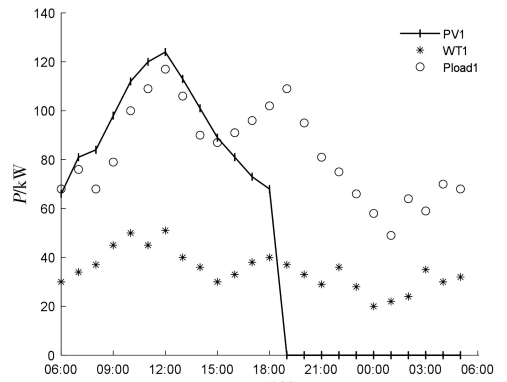
表 2 电网间电价

Tab.2 Inter-grid electricity price

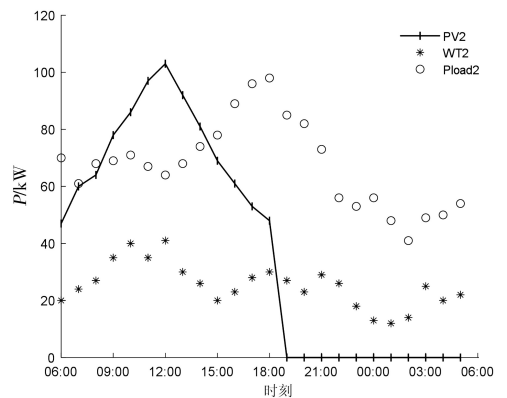
项目	购电电价/ 元 · (kW · h) ⁻¹	售电电价/ 元 · (kW · h) ⁻¹
微电网 1	0.46	0.43
微电网 2	0.47	0.43
微电网 3	0.49	0.45

每个微电网均配备相同参数的蓄电池和柴油发电机,蓄电池的额定容量 E_r 为 800 kW · h,蓄电池荷电状态(SOC)限制为 0.1~0.9;充放电效率为 0.9; C_{AB} 取 1.5 元/kWh; C_{EX} 取 0.7 元/kWh; P_{EX} 限制在 -75 kWh~75 kWh。在标准测试环境下,温度 $T(t)$ 为 25 °C,光照强度 $G(t)$ 为 1 000 W/m²,风力发电机的实际参数 $a_1 = 3.4, b_1 = -12, c_1 = 9.2; P_{WTr} = 130$ W; $V_{ci} = 3.5$ m/s; $V = 17.5$ m/s。柴油机系统中的参数 $a_2 = 0.001 5, b_2 = 0.15, c_2 = 6.1$ 。

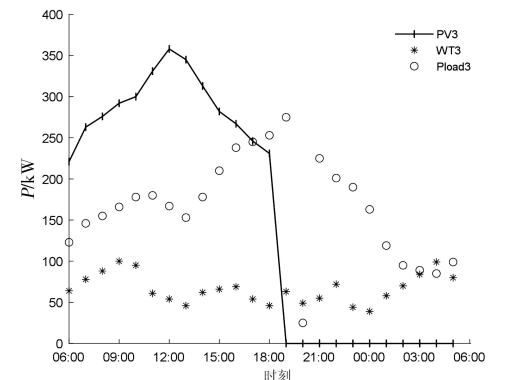
3 个微电网的 24 h 日负荷预测数据以及风光发电的功率如图 3 所示,24 h 内电动渔排负荷曲线如图 4 所示。



(a) 微电网 1



(b) 微电网 2



(c) 微电网 3

图 3 微电网日负荷曲线及风光发电的功率

Fig.3 Microgrid daily load curve and wind and solar energy generation power

4.2 计算结果比较与分析

由于决策变量的维度较大,本研究采用的 CMOEA/D 和 NSGA-II 算法参数设置为:变异因子取 0.9,交叉因子取 1/360,交叉分布指数为 20,变异分布指数为 20。3 个算法在找到最优解时的参数对比如表 3 所示。

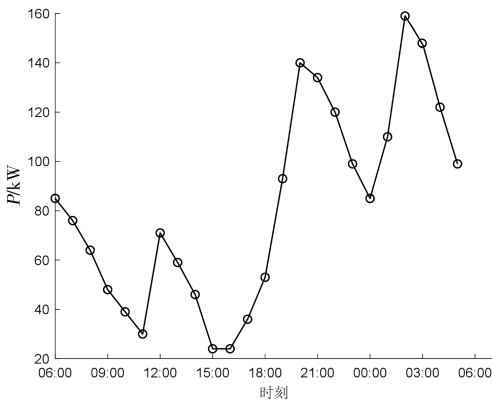


图 4 电动渔船负荷曲线

Fig.4 Load curve of electric fishing boat

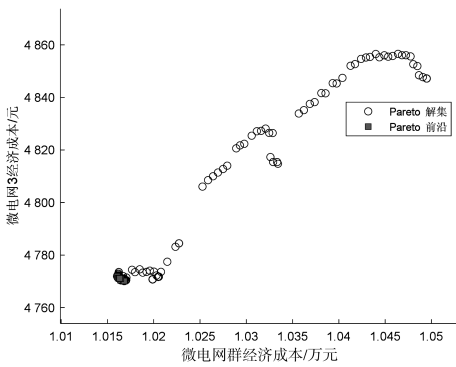
根据表 3 可以对 3 种多目标优化算法进行比较。MOPSO 算法在求解该模型时似乎陷入了局部最优解,未能找到全局最优解,这导致了惩罚度不为 0,因此,仅仅从局部最优解的角度来看,其结果可能不具备太大实际意义。相比之下,CMOEA/D 算法在更少的迭代次数内取得了更好的结果,效率更高。

图 5 和图 6 展示了 CMOEA/D 算法和 NSGA-II 在多目标优化问题中生成的广泛 Pareto 解集,其中各个解以黑色圆圈表示,而位于 Pareto 前沿的最优解则用灰色方块突出标示,展现了 CMOEA/D 算法的搜索能力和收敛性。

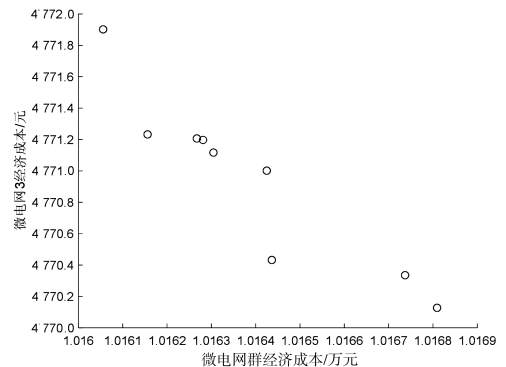
表 3 算法最优解时的结果参数对比

Tab.3 Comparison of result parameters of algorithm's optimal solution

算法	迭代次数/次	种群数量/个	迭代时间/s	目标函数值 1/元	目标函数值 2/元	惩罚度
NSGA2	1 400	1 400	5 349.53	11 923.0	5 725.63	0
CMOEA/D	1 250	1 250	3 133.15	10 164.4	4 770.43	0
MOPSO	1 400	1 400	422.84	7 020.9	2 606.96	8 600



(a) Pareto解集



(b) Pareto前沿

图 5 CMOEA/D 的 Pareto 解集

Fig.5 Pareto solution set of CMOEA/D

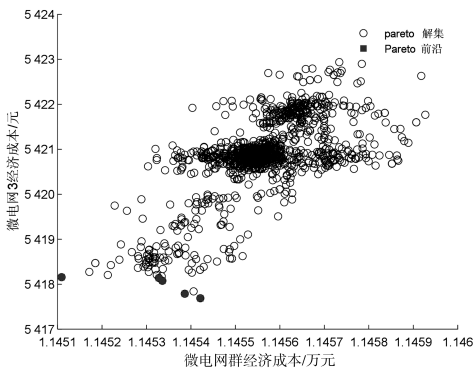


图 6 NSGA-II 的 Pareto 解集

Fig.6 Pareto solution set of NSGA-II

此时,3 个微电网的最优调度结果如图 7 所示。从图 3 可知微电网 1、2、3 在 24 h 各个时间点的能源分配情况。柴油发电机、储能电池、光伏电池和风力机的色块表示了各自的能量输出或输入。

PEX 1-2 表示微电网 1 向微电网 2 供电的情况;PEX 2-1 表示微电网 2 向微电网 1 供电的情况;PEX 1-3 表示微电网 1 向微电网 3 供电的情况;PEX 3-1 表示微电网 3 向微电网 1 供电的情况;PEX 2-3 表示微电网 2 向微电网 3 供电的情况;PEX 3-2 表示微电网 3 向微电网 2 供电的情况。PEX 1-2、PEX 2-1、PEX 1-3、PEX 3-1、PEX 2-3 和 PEX 3-2 为正值时表示供电,负值时表示购电。

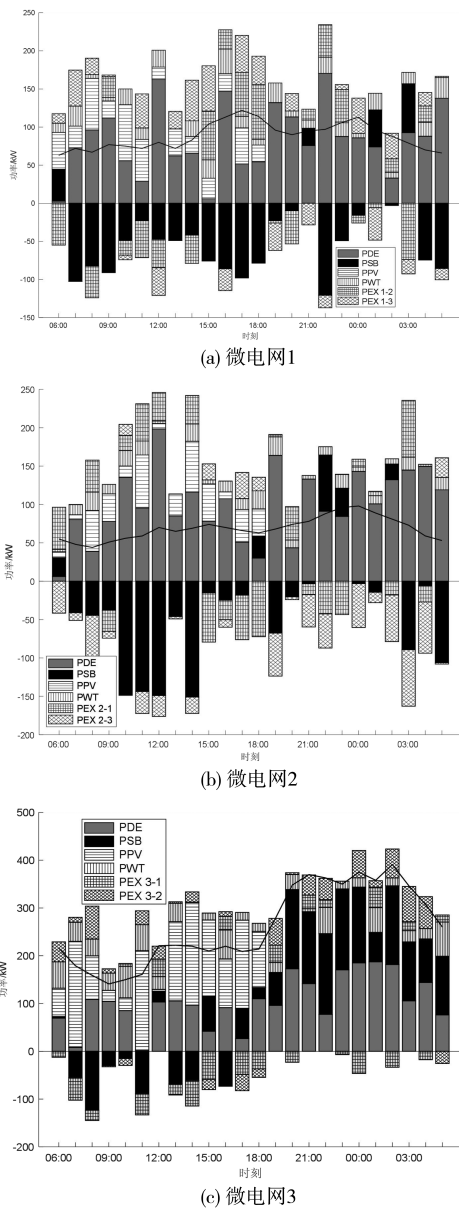


图 7 微电网 1、2、3 出力优化结果

Fig.7 Output optimization results of microgrid 1, 2, 3

微电网 1 和 2 实施全天候的能源混合策略,充分利用日间的光伏和风力发电,在资源较少的早晨和晚上则依靠电池储能平滑能量供应,必要时启动柴油发电机增强供电。此外,它们通过能量交换与邻近微电网灵活互补,显示出动态的能源管理效率。同时,微电网 3 也充分利用日间的光伏产出,覆盖自身需求外还额外储电并向其他微电网售电,提升能源利用率。在日照减弱时,依赖储存电力和必要的柴油发电或购电保障稳定供电,通过晚间的蓄电池放电及适时交易,确保全天候的能源供需匹配,展现出其能源管理的高效与灵活性。

5 结论与展望

本研究通过对“海上田园”渔排微电网群系统的深入分析和优化,验证了提出的经济性目标函数和优化调度策略的有效性。通过对比 NSGA-II 和 CMOEA/D 两种算法的应用成果,本研究明确展示了 CMOEA/D 算法在确保偏远海洋环境下微电网群经济效益和电力供应稳定性方面的显著优势。具体而言,CMOEA/D 算法在优化过程的效率和解的质量上均优于 NSGA-II,为微电网群提供了一种更为高效和可靠的经济优化调度方案。未来研究应聚焦于提升可再生能源,特别是光伏与风能的利用率,包括研发先进优化算法或改进现有算法应对其波动性和不确定性。进一步研究应考虑整合多类储能技术,增强系统整体弹性与可靠性;实地试验及长期评估将验证算法性能,为海洋可再生能源应用提供经验,助力渔排微电网效率和可持续发展,同时促进环境保护。

参考文献:

- [1] 郑廷裕,丘雨晨,雷美容. 宁德打造“风、光、储、充、用”微电网示范项目清洁能源续能“海上田园”[J]. 中国电力企业管理,2023(25):43-45.
- [2] YANG M, SUN L, WANG J X. Multi-objective optimization scheduling considering the operation performance of islanded microgrid[J]. IEEE Access, 2020, 8: 83405-83413.
- [3] 叶清泉,林厚飞,金建新,等. 考虑经济性和灵活性的海岛微电网优化调度策略[J]. 浙江电力,2022,41(3):54-64.
- [4] 马丽叶,刘美思,尹钰,等. 主动配电网中多微网鲁棒环境经济调度研究[J]. 太阳能学报,2020,41(11):1-10.
- [5] 何力,吕红芳. 考虑经济性的多微电网优化调度研究[J]. 发电技术,2018,39(5):397-404.
- [6] SANG B, LIU L S, ZHANG T, et al. Two-stage robust economic dispatch of multi-microgrids under expected scenario[C]// 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC). Xi'an: IEEE, 2020:1263-1269.

种不同工况下进行了 12 组迁移策略的验证,结果 6%,表明了该方法的有效性。
显示故障分类的平均精度较传统方法可提高约

参考文献:

- [1] SUN Y J, WANG J, WANG X H. Fault diagnosis of mechanical equipment in high energy consumption industries in China: a review[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 186: 109833.
- [2] LI Z X, LI J M, DING W M, et al. A sparsity-enhanced periodic OGS model for weak feature extraction of rolling bearing faults[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 169: 108733.
- [3] ZHANG S, ZHANG S B, WANG B N, et al. Deep learning algorithms for bearing fault diagnostics—a comprehensive review [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 29857–29881.
- [4] HUANG T, ZHANG Q, TANG X A, et al. A novel fault diagnosis method based on CNN and LSTM and its application in fault diagnosis for complex systems[J]. *Artificial Intelligence Review*, 2022, 55(2): 1289–1315.
- [5] ZHU J, CHEN N, SHEN C Q. A new deep transfer learning method for bearing fault diagnosis under different working conditions[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(15): 8394–8402.
- [6] CAO Z J, MA L J, LONG M S, et al. Partial adversarial domain adaptation[M] // *Computer Vision-ECCV 2018*. Cham: Springer International Publishing, 2018: 139–155.
- [7] GRETTON A, SRIPERUMBUDUR B, SEJDINOVIC D, et al. Optimal kernel choice for large-scale two-sample tests[C] // *Proceedings of the 25th International Conference on Neural Information Processing Systems-Volume 1*. Lake Tahoe, Nevada: ACM, 2012: 1205–1213.
- [8] BEN-DAVID S, BLITZER J, CRAMMER K, et al. A theory of learning from different domains[J]. *Machine Learning*, 2010, 79(1): 151–175.
- [9] CAO X C, WANG Y, CHEN B Q, et al. Domain-adaptive intelligence for fault diagnosis based on deep transfer learning from scientific test rigs to industrial applications[J]. *Neural Computing and Applications*, 2021, 33(9): 4483–4499.
- [10] CHOUDHARY A, MIAN T, FATIMA S. Convolutional neural network based bearing fault diagnosis of rotating machine using thermal images[J]. *Measurement*, 2021, 176: 109196.
- [11] 王功鹏, 段萌, 牛常勇. 基于卷积神经网络的随机梯度下降算法[J]. *计算机工程与设计*, 2018, 39(2): 441–445, 462.
- [12] SMITH W A, RANDALL R B. Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: a benchmark study[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 64: 100–131.

(责任编辑: 陈雯)

(上接第 386 页)

- [7] 马月, 吕永刚, 温友超, 等. 海上光伏电站基础结构的综述[J]. *科技与创新*, 2023(20): 92–95.
- [8] 曾胜财, 兰祥武. 海上渔排离网型光伏电站设计与应用[J]. *海峡科学*, 2023(10): 39–42, 69.
- [9] 熊礼俭. 风力发电新技术与发电工程设计、运行、维护及标准规范实用手册[M]. 北京: 中国科技文化出版社, 2005.
- [10] 陈恒安, 管霖, 卢操, 等. 新能源发电为主电源的独立微网多目标优化调度模型和算法[J]. *电网技术*, 2020, 44(2): 664–674.
- [11] 毛晓明, 陈深, 吴杰康, 等. 分时电价机制下含蓄电池微网的优化调度[J]. *电网技术*, 2015, 39(5): 1192–1197.
- [12] JAIN H, DEB K. An evolutionary many-objective optimization algorithm using reference-point based nondominated sorting approach, part II: handling constraints and extending to an adaptive approach[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 602–622.
- [13] 陶思钰, 黄民翔. 基于 NSGA-II 算法的并网型微网多目标调度[J]. *华东电力*, 2013, 41(8): 1678–1682.
- [14] ZHAO W T, WANG Z S, SONG W H, et al. Multi-objective optimal operation of microgrid based on NSGA-III algorithm [C] // *2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)*. Shanghai: IEEE, 2022: 877–881.

(责任编辑: 方素华)