

基于 MOPSO-GRA 算法的港口微电网优化调度

喻航^{1*}, 李文龙¹, 汤旭晶^{1,2,3}, 吴杭¹, 汪恬¹, 郭威¹

(1. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063;

2. 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;

3. 武汉理工大学 船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘要:随着全球港口绿色低碳转型的深入推进,港口微电网作为集成高比例可再生能源的关键载体,在其实际运行中面临异质优化目标难以兼顾的挑战。现有基于传统多目标粒子群算法的优化调度方法,在协调经济与消纳目标时,常依赖经验设定转化系数,存在主观性强、Pareto 解集筛选依据不足的问题,难以稳定获得全局最优调度方案。针对上述问题,本文提出一种通过在传统多目标粒子群算法(MOPSO)中引入灰色关联度分析(GRA)算法对 Pareto 解集进行评价从而得到最优调度的方法。首先,基于港口微电网高新能源渗透率与源荷特性,构建了以最小化综合运行成本与最大化风光本地自消纳率为核心的多目标优化调度模型。其次,在 MOPSO 算法框架内,引入 GRA 分析作为决策层工具,对迭代产生的 Pareto 最优解集进行客观评价,从而准确地遴选出综合性能最优的调度方案。本文基于宁波舟山港穿山港区微电网示范工程典型日实测数据,对该算法的有效性进行验证,结果表明,相较于传统 MOPSO 的调度算法,所提算法在维持系统运行经济性的同时,显著提升了新能源消纳水平,其中风光本地自消纳率提高了 5.82%,系统综合运行成本降低了约 9%,为港口高密度新能源有效利用提供可行的技术路径。

关键词:港口工程;港口微电网;多目标粒子群;优化调度;自消纳率

中图分类号:U692.3

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.02.010

Optimized scheduling of port microgrids based on MOPSO-GRA algorithm

Yu Hang^{1*}, Li Wenlong¹, Tang Xujing^{1,2,3}, Wu Hang¹, Wang Tian¹, Guo Wei¹

(1. School of Marine Engineering, Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. National Key Laboratory of Waterway Traffic Control, Wuhan 430063, China;

3. Key Laboratory of Ship Power Engineering and Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: With the advancement of global ports' green and low-carbon transformation, port microgrids, as key carriers for integrating high-penetration renewable energy, face the challenge of balancing heterogeneous optimization objectives in practical operation. Existing optimal scheduling methods based on the traditional Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithm often rely on empirically determined conversion coefficients when coordinating economic and energy-consumption objectives. This approach suffers from strong subjectivity and lacks sufficient criteria for screening the Pareto solution set, making it difficult to consistently obtain globally optimal scheduling schemes. To address these issues, this paper proposes a method that introduces Grey Relational Analysis (GRA) into the traditional MOPSO algorithm to evaluate the Pareto solution set and thereby derive the optimal scheduling scheme. First, considering the high penetration of renewable energy and the source-load characteristics of port microgrids, a multi-objective optimization scheduling model is established, aiming to minimize comprehensive operational costs and maximize the local consumption rate of wind and solar power. Second, within the MOPSO framework, GRA is introduced as a decision-making tool to objectively evaluate

收稿日期:2025-02-25

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2601604)资助

作者简介:喻航(1991—),男,博士,研究方向为船舶新能源控制与优化调度。*通信作者:14239@whut.edu.cn

引用格式:喻航,李文龙,汤旭晶,等. 基于 MOPSO-GRA 算法的港口微电网优化调度[J]. 中国航海,2026,49(2):87-94.

Yu H, Li W L, Tang X J, et al. Optimized scheduling of port microgrids based on MOPSO-GRA algorithm[J]. Navigation of China, 2026, 49(2):87-94. (in Chinese)

the Pareto-optimal solution set generated during iterations, thereby accurately selecting the scheduling scheme with the best overall performance. The effectiveness of the proposed algorithm is verified using typical daily measured data from the Chuanshan Port microgrid demonstration project at Ningbo-Zhoushan Port. The results show that, compared to the scheduling algorithm based on traditional MOPSO, the proposed method significantly improves the consumption of renewable energy while maintaining system economic efficiency, achieving a 5.82% increase in the local consumption rate of wind and solar power and an approximately 9% reduction in the system's comprehensive operational costs, providing a feasible technical pathway for the effective utilization of high-density new energy in ports.

Key words: port engineering; port microgrid; multi-objective particle swarm optimization(MOPSO); optimal scheduling; self-consumption rate

随着新能源技术的进一步成熟,港口光伏、风电等分布式能源(Distributed Generation, DG)的发电量和装机容量逐年提升,港口当局和相关企业正积极推进对现有能源结构的改造升级。国内外已经示范多个新能源广泛接入的港口微电网。全球首个零碳码头智慧绿色能源“源、网、荷、储”一体化系统于2021年在天津港建设完毕,并顺利实现并网发电,港区内现有2台4.5 MW风力发电机组、1.43 MWp分布式光伏发电系统,全年发电量预计可达6 GW·h,可节约标准煤约1.8万t^[1];新加坡裕廊港于2016年开始在港区内接入新能源发电系统,安装了大规模的仓库太阳能屋顶,其最高并网功率可达9.8 MW,年均发电量超过120 MW·h,可满足60%的港口电力需求^[2]。

微电网系统包括各类DG、储能系统、负荷及电力电子控制装置^[3],其主要作用是在满足各种约束条件下,优化调度各DG的出力以及微电网和主网之间的功率传输,实现降低运行成本、提高新能源自消纳率等目标^[4],对于传统陆用分布式微电网而言,港口微电网具有如下突出特点^[5-7]。

1) 港口新能源资源禀赋丰富

对于陆用微电网而言,港口区域的海岸线较长,风速相对稳定,非常适合建设风电场。此外,港口地区通常空旷,日照充足,适合安装大规模的光伏阵列^[5]。

2) 港口载荷波动性大

港口日常运行中负荷主要集中在货物装卸设备、电动引航设备以及港口办公设施的电力消耗上,而当大型船舶靠港时,港口电网会面临瞬时负荷突增的情况。以中国东部沿海某集装箱港口为例,正常工作时,港口负荷约为3 MW,而当集装箱船和客船靠港期间,其高峰时刻负荷需求达到8.9 MW。

3) 负荷与新能源出力特性难以匹配

新能源出力和港口负荷都具有强波动性,致使负荷与新能源出力特性难以匹配,特别是新能源出力较大而负荷较小时,本地新能源消纳困难,导致大

量弃电现象。例如,洛杉矶港安装了约20 MW的太阳能发电系统,预计年发电量可达30 GW·h,但由于光伏发电与港口用电高峰时段的不匹配,2021年,洛杉矶港报告弃用太阳能电力约4.5 GW·h,占年发电量的15%。

4) 储能配置和调度成本高

由于港口源荷特性匹配性较差,港口微电网通常需要配套储能系统以平衡功率偏差,但储能系统的建设和维护成本较高。同时,频繁的调度操作也会损害储能系统寿命,增加使用成本。

5) 向电网馈电经济性差

当港口微电网的可再生能源发电超过本地消纳能力时,多余的电力需要回馈至主电网。然而,由于回馈电价较低,经济效益不高,这意味着传统馈网消纳优先策略对于港口微电网而言,在经济性上未必最优。

综上所述,港口微电网作为新型能源系统,其新能源消纳能力与运行经济性之间存在显著耦合关系。提升新能源自消纳率在实现可再生能源高效利用、降低外网购电依存度及抑制逆向潮流冲击等方面具有显著优势,但同时也将导致系统运行成本呈增长态势。这种成本-效益的博弈关系决定了港口微电网优化调度需构建多目标协同机制,通过动态权衡自消纳率提升带来成本递增效应,最终实现系统在新能源自消纳率及运行经济性的多维度帕累托最优。

目前,关于微电网多目标优化调度已有一定的研究,文献[8]针对校园微电网运行的经济性和环保性展开MOPSO算法的调度分析,在求解过程中通过引入污染处理系数从而建立了运行成本最低和污染处理成本最低的优化调度模型。文献[9]针对“风光火”一体化模式下的能源基地优化调度问题展开研究,以新能源消纳最大、机组调峰成本最低、系统运行经济性最优为目标进行求解。在对新能源消纳率进行计算时,将弃风、弃光产生的惩罚成本作为目标函数。以上文献虽然都考虑了微电网运行的

多个目标,但其求解过程都是通过转换系数将异类目标转化为经济性指标进行求解的。文献[10]以孤岛微电网的风光消纳率最高和运行成本最低为目标,使用 MOPSO 算法进行多目标求解,但其求解过程没有对 Pareto 解集进行综合分析,而仅将运行成本最低的粒子作为最终解。由于 Pareto 解集中总成本最低的粒子并非风光消纳率最高的粒子,该做法可能在优化经济性的同时劣化了微电网的风光消纳率。分析以上文献可知,传统 MOPSO 算法在求解微电网多目标优化调度问题时,往往是将异类目标转化为经济性指标进行求解,或者直接选择 Pareto 解集中经济性最佳的粒子做最终解,而这两种处理方式都存在局限性。目标转化的求解方式,将会丢失的原始目标信息,失真后的目标无法准确反映微电网优化调度的真实需求,同时转化系数的选择往往具有随机性,这导致优化结果的不确定性和不稳定性,增加了决策的难度和风险。直接选择最佳经济性粒子的方式,在多个目标之间存在冲突时,经济性指标的优化将会导致其他指标的劣化。

针对以上问题,本文引入灰色关联度分析(Grey Relational Analysis, GRA)算法,对 MOPSO 算法求得 Pareto 解集进行评价,解决了传统 MOPSO 算法在多目标优化中的不足。通过无量纲化与关联度权重,避免目标函数的主观加权,从而导致目标函数转化过程中信息的丢失和结果的随机性,实现 Pareto 解集的客观评价。将该算法运用于宁波穿山港区微电网,以其实测数据,在综合考虑了微电网的运行成

本、对风光资源的利用和港区电网可靠性的基础上,以微电网总成本最低和风光自消纳率最高为目标建立优化调度模型,并通过 MOPSO 算法求得 Pareto 解集后用 GRA 算法对解集进行评价,最终得到最优解。

1 港口微电网电力系统结构

宁波舟山港穿山港区电力系统由港口微电网系统和外部电网 110 kV-I 和 II 段组成,外部电网经竹湾变变电站降压后接入微电网竹湾变 10 kV-I 段和 II 段交流母线。为实现 10 kV 母线的互联互通,使两者之间可以产生功率流动,同时避免常规机械式联络开关切换过程中,竹湾变 10 kV 两段母线之间面临的合闸冲击等问题,港口计划在 6#变 10 kV 母线之间建设柔性多状态开关来实现母线间的互联。港区配备两台额定功率 6.25 MW 的双馈异步风力发电机和 3.66 MW 仓库屋顶光伏发电系统来提升新能源发电渗透率,同时港区还配备两套额定容量分别为 3 MW·h、0.8 MW·h 的锂电池储能系统,用于调节港口的功率波动。以上分布式电源都通过 6#变变电站升压后并入竹湾变 10 kV-I 段和 II 段母线中。港区负荷具有多样性和空间分布广泛的特点,导致全面获取港区的负荷数据困难,为了简化其负荷结构,只对港区竹湾变 10 kV 两端母线的总体负荷进行测量。简化后的电力拓扑结构如图 1 所示。

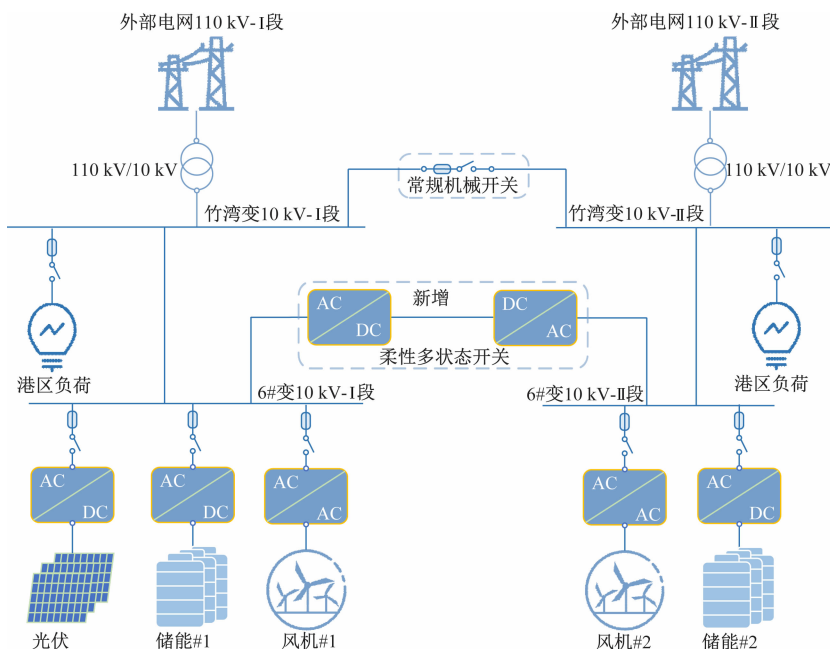


图 1 穿山港港区电力系统拓扑结构

Fig. 1 Power system topology of Chuanshan Port

该微电网系统作为一种集成了风能、光伏、储能等多种分布式能源的系统,其在实现高新能源自消纳率的同时,也面临着系统运行成本和电网互济的经济性问题。同时,在该微电网系统中柔性直流输电设备作为一个关键组成部分,它不仅支持电力在10 kV 两段母线之间的高效传输,还能调节不同电网之间的功率流动。因此,如何合理调度储能电池充放电功率以及柔性直流输电功率,以确保功率的平稳流动并降低购电成本,成为系统优化调度中的一大难题。

2 港口微电网优化调度模型

2.1 优化调度模型目标函数

由于目标港区主要负荷为作业负荷,其大小与港区作业的排班计划和船舶靠离港时间相关,关系到作业效益及生产安全等方面的问题,不适合进行负荷转移或削减,在优化调度算法中不涉及对负载的操作,而只涉及两台储能电池和 SOP 功率的调度。

1) 光伏运行成本

光伏系统的运行成本以维护成本 C_{PV} 为主,且与电网实际接受的光伏输出功率 P_{PV} 成正比^[11],可表示为

$$C_{PV} = c_{PV} P_{PV} \quad (1)$$

式中: c_{PV} 为每 kW·h 光伏的维护成本。

2) 风机运行成本

风机的运行成本同样以维护成本 $C_{WG,i}$ 为主,且与电网实际接受的风机输出功率 $P_{WG,i}$ 成正比^[12],可表示为

$$C_{WG,i} = c_{WG} P_{WG,i} \quad (2)$$

式中 c_{WG} 为每 kW·h 风机的维护成本。

3) 储能电池运行成本

锂电池储能设备的运行成本 $C_{BAT,i}$ 主要包括储能电池的运行维护成本 $C_{pre,i}$ 和使用成本 $C_{use,i}$,考虑到锂电池的使用寿命与充放电次数 N 有关,且充放电次数与电池单次放电深度 D 呈反比,过于频繁的充放电或过高的放电深度将导致储能系统提前更换,增加使用成本,故将初次投入成本 $C_{ins,i}$ 按照放电深度和总充放电次数折算至使用成本后可获得单个调度周期内的使用成本 $C_{use,i}$ ^[13],运行维护成本 $C_{pre,i}$ 与储能系统的功率 $P_{BAT,i}$ 和每 kW·h 下的维护成本 $c_{BAT,i}$ 正相关,可表示为

$$\begin{cases} C_{BAT,i} = C_{pre,i} + C_{use,i} \\ C_{use,i} = \frac{D}{N} C_{ins,i} \\ C_{pre,i} = C_{BAT,i} | P_{BAT,i} | \end{cases} \quad (3)$$

4) 柔性直流输电运行成本

柔性直流输电的运行成本以维护成本 C_{sop} 为主,且与其双向流动的功率 P_{sop} 的绝对值成正比,可表示为

$$C_{sop} = c_{sop} | P_{sop} | \quad (4)$$

式中: c_{sop} 为每 kW·h 下柔性直流输电设备的维护成本。

5) 外部电网交互成本

港区电网与外部电网交互成本 C_G 由交互功率 $P_{G,i}$ (购电为正,售电为负)、购电或售电电度电价 ψ_t 和交互时间 Δt 决定,可表示为

$$C_G = P_{G,i} \psi_t \Delta t \quad (5)$$

港区电网总运行成本可表示为各部分运行成本之和

$$C_{total} = C_{PV} + C_{WG,1} + C_{WG,2} + C_{BAT,1} + C_{BAT,2} + C_{sop} + C_G \quad (6)$$

港区微电网自消纳率为新能源发电量在本地进行消纳的占比,可表示为

$$\lambda = \frac{P_{PV} \Delta t + P_{WG,1} \Delta t + P_{WG,2} \Delta t - P_{G,1} \Delta t - P_{G,2} \Delta t}{P_{PV} \Delta t + P_{WG,1} \Delta t + P_{WG,2} \Delta t} \quad (7)$$

式中: $P_{G,1}$ 和 $P_{G,2}$ 只表示港区微电网向外部电网传输的正功率。

2.2 优化调度模型约束条件

1) 储能电池荷电状态(State of Charge, SOC)及功率约束

锂电池的 SOC 会随着充放电而改变。在 t 时刻储能系统的 SOC 可表示为

$$S_{OC,t} = S_{OC,t-1} - \frac{P_{BAT,t} \Delta t}{E_N} \quad (8)$$

式中 $S_{OC,t}$ 与 $S_{OC,t-1}$ 分别为 t 时刻与 $t-1$ 时刻储能系统的 SOC 值, $P_{BAT,t}$ 为 t 时刻储能系统充放电功率(放电为正,充电为负), Δt 为两次统计的时间间隔, E_N 为储能系统的额定容量。由于锂电池的充放电倍率存在限制,为延长储能系统使用寿命,同时满足电力电子设备及输电线路的功率限制,需要对其 SOC 及充放电功率进行限制:

$$S_{OC,min} \leq S_{OC,t} \leq S_{OC,max} \quad (9)$$

$$P_{BAT,min} \leq P_{BAT,t} \leq P_{BAT,max} \quad (10)$$

式中 $S_{OC,max}$ 和 $S_{OC,min}$ 分别为储能系统 SOC 上下限, $P_{BAT,max}$ 和 $P_{BAT,min}$ 为储能系统充放电功率上下限, $P_{BAT,t}$ 为当前储能系统的输出功率。

2) 柔性直流输电功率约束

港区安装一套柔性直流输电设备,用于控制 10 kV- I 段和 II 段母线之间的功率流动大小和方

向,设柔性直流设备两端功率交互的效率为 η ,则交流馈线 I 段的功率 $P_{SOP,1}$ 和 II 段的功率 $P_{SOP,2}$ 应满足:

$$P_{SOP,1} = \eta P_{SOP,2} \quad (11)$$

且两端的功率还受器件和线路功率约束:

$$P_{SOP_{min}} \leq P_{SOP,i} \leq P_{SOP_{max}} \quad (12)$$

式中, $P_{SOP,i}$ 为当前柔性直流输电功率,由于柔性直流输电的主要目的是将电能从负载相对较小的 10 kV II 段交流母线传输至 I 段,故规定 II 段向 I 段输电功率为正,反之为负。 $P_{SOP_{max}}$ 、 $P_{SOP_{min}}$ 分别为柔性直流输电功率交互的最大和最小值。

3) 电网交互功率约束

当港区电网与外部电网交互时,由于港区配电和变电设备存在功率限制,需保证交互功率小于设备功率上限,防止危害到港区供电设备的安全:

$$P_{G,min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,max} \quad (13)$$

当港口微电网系统正常运行时,竹湾变 10 kV-I 段和 II 段交流母线上的功率分别达到平衡,功率平衡约束可表示为:

$$\begin{cases} P_{PV} + P_{WG,1} + P_{BAT,1} + P_{G,1} + P_{SOP,1} = P_{Load,1} \\ P_{WG,2} + P_{BAT,2} + P_{G,2} = P_{Load,2} + P_{SOP,2} \end{cases} \quad (14)$$

3 MOPSO-GRA 算法

3.1 多目标优化问题

对于单目标优化的问题,任何两个解的优劣都可以依靠单一目标来衡量,而对于微电网自消纳率和微电网运行经济性的多优化目标,目标优化问题的函数表示为

$$F(\mathbf{X}_i) = \min f_n(\mathbf{X}_i) \quad n = 1, 2 \quad (15)$$

式中: \mathbf{X}_i 为含有两台储能电池和 SOP 功率的向量, $\min_1(\mathbf{X}_i)$ 表示微电网运行成本 C_{total} 最小值。为使目标优化的两个目标函数都是以最小值为最优,在求解过程中不直接使用自消纳率 λ 为目标函数,而是使用 $1 - \lambda$ 代替,即 $\min f_2(\mathbf{X})$ 表示 $1 - \lambda$ 的最小值。

但由于微电网运行成本 C_{total} 和自消纳率 λ 无法同时达到最优,故多目标优化的解是一个解集,其解集如图 2 所示,从图中可以看出, $F(\mathbf{X}_i)$ 的经济性优于且新能源自消纳率劣于 $F(\mathbf{X}_{i+1})$,而 $F(\mathbf{X}_i)$ 的经济性劣于但新能源自消纳率优于 $F(\mathbf{X}_{i-1})$ 。故可知解集中的任一解对于其他解而言都有其独特优势,这样的解集成为 Pareto 解集^[14]。

3.2 MOPSO-GRA 算法

针对 Pareto 解集中解的选取问题,本文以港口

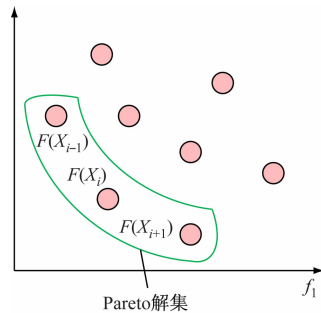


图 2 Pareto 解集示意

Fig. 2 Pareto optimal solution diagram

微电网多目标优化调度为研究对象,提出一种基于 MOPSO 与 GRA 的协同优化框架,其流程框图如图 3 所示。

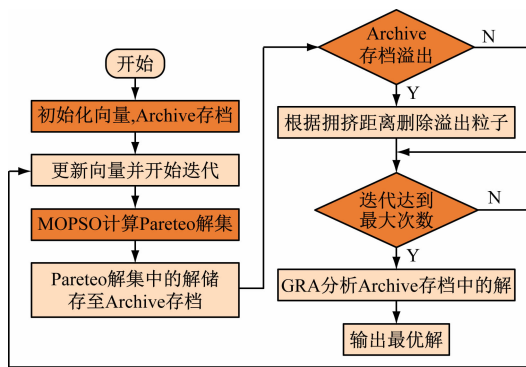


图 3 MOPSO-GRA 算法流程框图

Fig. 3 Flowchart of the MOPSO-GRA algorithm

首先初始化向量 \mathbf{X}_i ,并将 Archive 存档数置零。而后更新向量,并开始迭代,通过 MOPSO 算法得到 Pareto 解集,并将解集中的解储存至 Archive 存档,但由于实际应用中 Archive 存档的数量有限为 N ,若更新一次向量 \mathbf{X}_i 后的 Pareto 最优数量为 M ($M > N$),则需删除 $M - N$ 个向量来保证 Archive 存档不溢出。删除的向量通过引入拥挤距离来判断,以图 4 为例,此时 i 向量的拥挤距离 d 如式(16)所示,其中 $|\Delta f_1(i)|$ 表示该向量前后目标函数的绝对值之差, $|\Delta f_2(i)|$ 同理,Archive 存档中拥挤距离最小的解将会被删除。

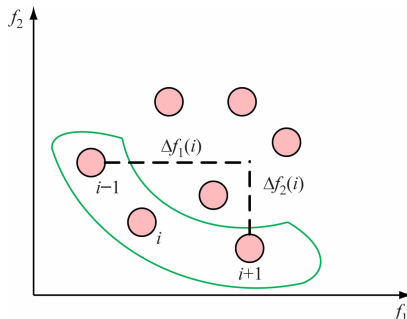


图 4 拥挤距离计算示意

Fig. 4 Congestion distance calculation diagram

$$d = \frac{|\Delta f_1(i)|}{f_1(i)} + \frac{|\Delta f_2(i)|}{f_2(i)} \quad (16)$$

当使用 MOPSO 计算达到最大迭代次数时,得到的是存储 Pareto 解集的 Archive 存档,由前文的分析可知 Pareto 解集中的解并没有优劣之分,故需一种用于研究系统行为和各个向量之间相互关系的数学方法来选取最优解,即为调度输出结果。本文通过引入 GRA 来选取最佳向量,港区风光出力与负荷的强波动性导致目标函数值分布离散,而 GRA 通过灰色关联度矩阵有效识别解集中的“均衡解”,避免传统方法可能偏向极端解。

GRA 相较于其他选取方法的优势为:熵权法依赖目标数据的差异性,若目标函数值分布集中(如自消纳率接近饱和),其权重分配可能失效,而 GRA 通过灰色系数直接反映目标间关联强度,适应性更强。对比主成分分析(Principal Component Analysis, PCA) 需目标间存在显著线性相关性,而港口场景中经济性与自消纳率呈现复杂非线性关系,GRA 更适合此类场景。TOPSIS 方法通过设定理想解和负理想解来进行比较,但在多个冲突目标同时存在时,如何设置理想解及负理想解可能存在较大主观性,容易引发不确定性,而 GRA 能够更加有效地处理目标之间的冲突。

4 算例分析

4.1 设计

本试验聚焦 MOPSO-GRA 算法在微电网优化调度中的数值分析优势,通过定时间尺度的评估体系,揭示其在多目标协调能力上的优势。试验使用采集到的目标港区某天 8:00~19:30 点的源荷数据,采样时间间隔为 5 min,经过平均值(每 30 min 计算一次)计算后的风光出力情况和负荷情况如图 5。

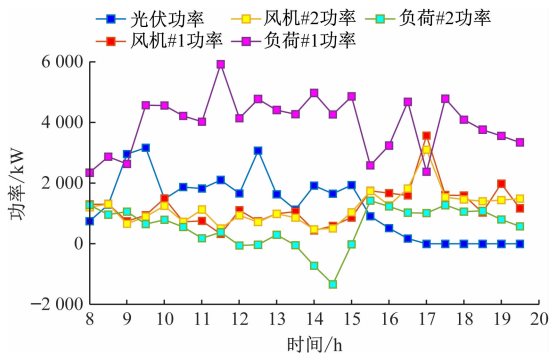


图 5 微电网源荷数据

Fig. 5 The source and load data of the microgrid

本通过 matlab2021b 编程,港区内两台风机的参数完全相同,两台储能锂电池的初始 SOC 都为

0.6,正常工作时的 SOC 范围为 0.2~0.8,额定容量分别为 3 MW·h 和 0.8 MW·h,当天平均充放电次数 $N=100$,初次投入成本 $C_{ins,i}$ 为 20 万元,柔性直流输电的效率 $\eta=0.98$,港区设备的其他参数如表 1 所示。

表 1 设备参数

Tab. 1 Equipment parameter

设备	功率/kW		运行成本/ (元/kW·h)
	下限	上限	
光伏	0	3 660	$c_{PV}=0.08$
风机	0	6 250	$c_{WG}=0.11$
储能#1	-2 500	2 500	$c_{BAT,1}=0.02$
储能#2	-800	800	$c_{BAT,2}=0.02$
柔直	-4 000	4 000	$c_{sop}=0.01$
外部电网	-30 000	30 000	买电 $\psi_i=0.38$ 卖电 $\psi_i=0.26$

MOPSO-GRA 算法相关设置为粒子群大小 100,权重系数 $i\omega$ 为 0.5,学习因子 C_1 和 C_2 为 0.4,0.8,Archive 存档最大值为 100,迭代次数为 200,变异概率为 10%,变异扰动为 $\pm 30\%$,灰色分析权重矩阵 $\omega=[0.5,0.5]$,在计算成本时,假定各设备当前功率在此后半小时不变。

4.2 调度结果

将前文的优化调度模型及算法运用于上述场景,得到的 Archive 存档如图 6 所示。从图中可以看出,随着迭代次数的增加,Archive 存档中的非支配解和当前迭代次数的非支配都逐渐收敛,趋向于更优化的区间,表明算法已找到较优解。在 Archive 存档中,新能源自消纳率越高的粒子总运行成本也更高,符合对前文微电网自消纳率与经济性矛盾的分析。

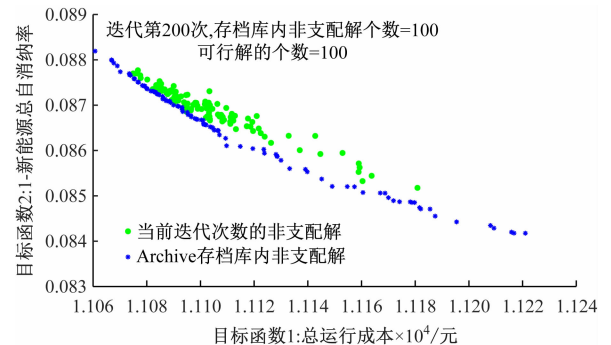


图 6 MOPSO-GRA 算法的 Archive 存档

Fig. 6 Archive storage of the MOPSO-GRA algorithm

使用 MOPSO-GRA 得到的调度结果如图 7~图 9 所示,从图中可以看出竹湾变 10 kV-II 段的负荷

较小,且在大部分时间里,风机的发电功率超过了负荷需求。考虑到外部电网卖电电价通常低于买电电价,因此通过优化调度策略,微电网系统选择将 II 段的多余电能通过柔性直流输电传输至 I 段,避免直接向电网出售电能,从而降低系统的运营成本。同时由于柔性直流输电的运行成本与其传输功率呈正相关。因此,过高的传输功率将导致微电网运行成本的增加。通过优化调度,柔性直流输电的平均功率为 1 191.68 kW,仅为 I 段平均负荷的 30%。在 9:30、12:30、17:00 等风光发电较为充足的时段,为了进一步提升微电网的新能源自消纳率,优化调度策略确保两套储能系统都处于充电状态,以便充分吸纳该时段的新能源,减少外部电网的电力依赖。然而,在 9:00 时,尽管风光发电功率较高,但此时储能#2 系统的 SOC 值已接近 80%,因此优化调度策略让储能#2 系统开始放电,以降低其 SOC,避免过度充电,从而延长储能系统的使用寿命。

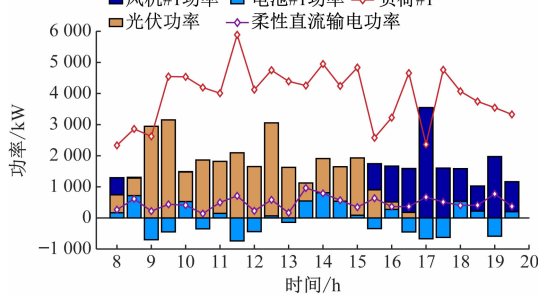


图7 竹湾变 10 kV-I 段调度结果

Fig. 7 Dispatch result of 10 kV-I of Zhuwan transformer

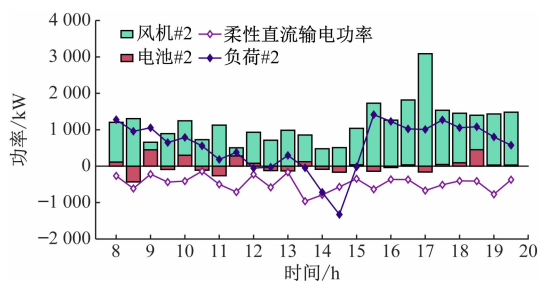


图8 竹湾变 10 kV-II 段调度结果

Fig. 8 Dispatch result of 10 kV-II of Zhuwan transformer

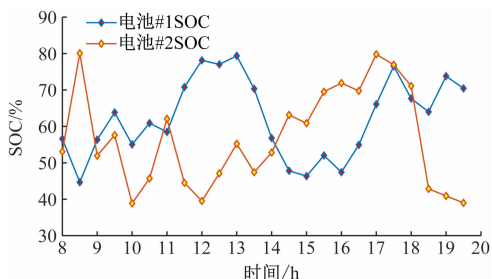


图9 储能系统 SOC 变换曲线

Fig. 9 The SOC variation curve of the energy storage system

通过以上分析可知,优化调度策略不仅有效降低了微电网的运行成本,还通过合理调配可再生能源和储能系统的使用,显著提高了微电网的新能源自消纳率。在该优化调度策略下,系统在该时段的总成本仅 10 838 元,而新能源自消纳率达到了 91.32%,充分体现了该策略在提升经济性和能源利用效率方面的优越性。

4.3 对比分析

为了更好地说明 MOPSO-GRA 算法对微电网运行成本和新能源消纳率的优化,设计对照,引入非新能源自消纳的惩罚机制,以量化新能源的经济损失,带入 4.1 节中的调度场景,并使用 MOPSO 算法进行求解。惩罚成本可以表示为

$$C_{\text{penalty}} = c_{\text{penalty}} \cdot (1 - \lambda) \cdot E_{\text{total}} \cdot \Delta t \quad (22)$$

式中: C_{penalty} 为惩罚成本, E_{total} 为总新能源发电量, λ 为新能源总自消纳率, $c_{\text{penalty}} = 0.03$,惩罚系数,表示每 kW·h 新能源非自消纳的惩罚成本。

引入惩罚成本后,得到的 Archive 存档如图 10 所示,其中惩罚成本和运行成本相加最小值及为所需粒子。

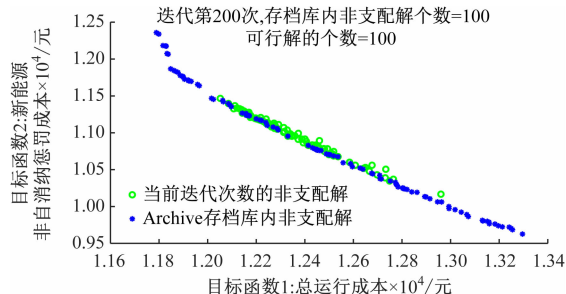


图10 MOPSO 惩罚机制的 Archive 存档

Fig. 10 Archive storage of the MOPSO with penalty mechanism

将 MOPSO 惩罚机制的非自消纳惩罚成本折算回新能源自消纳率,并与 MOPSO-GRA 算法对比,得到该段时间的总运行成本和新能源自消纳率如表 2 所示。MOPSO-GRA 算法在不依赖惩罚机制的情况下,通过 GRA 对 Pareto 解集进行客观评价,实现了运行成本与新能源消纳率的高效协同优化,而 MOPSO 惩罚机制的惩罚系数选取具有主观性,不同微电网的惩罚系数具有随机性,这种主观性和随机

表2 调度周期内总运行成本和新能源自消纳率

Tab.2 Total operating cost within the scheduling period and renewable energy self-consumption rate

求解算法	总运行成本/元	平均新能源消纳率/%
MOPSO-GRA	10 838	91.32
MOPSO 惩罚机制	11 816	85.50

性将会导致算法对经济性与消纳率的敏感性失衡,进而劣化解的综合性能。

5 结论

本文以宁波穿山港港区电网稳定运行为约束和实测数据为算例,以微电网总运行成本和总新能源消纳率为目标函数,建立微电网优化调度模型,采用MOPSO-GRA算法求解所提出的模型并分析,得出以下结论:

1) MOPSO-GRA算法求解过程中不将异类目标转化为经济性指标,而是直接对多类目标综合分析排序得到最终解,避免了转化系数的随机导致结果的劣化,以及转换过程中原始目标信息的丢失。

2) MOPSO-GRA算法能同时对微电网运行成本和新能源消纳率进行优化,且相较于引入惩罚机制的MOPSO求解算法,MOPSO-GRA算法求解得到的微电网总运行成本更低,全新能源自消纳率更高。

参考文献

- [1] 张念祖,解琨. 基于 Fuzzy-ism 模型的港口创新发展路径研究——以天津港为例[J]. 物流科技, 2022, 45(18): 126-130.
Zhang N Z, Xie K. Research on the innovative development path of ports based on the Fuzzy-ism model: a case study of Tianjin Port [J]. Logistics Technology, 2022, 45(18): 126-130. (in Chinese)
- [2] FANGSTON, Zhao C H, Ding Z H, et al. Integrated port energy system for carbon neutrality (I): typical system structure and key issues [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 114-135.
- [3] 张翔. 含分布式电源的微电网储能优化配置研究[D]. 汉中:陕西理工大学,2024.
Zhang X. Research on the optimal allocation of energy storage in microgrids with distributed generation [D]. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [4] 孙印涵. 考虑光伏与储能接入的配电网保护策略研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2023.
Sun Y h. Research on protection strategies for distribution networks considering photovoltaic and energy storage integration [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [5] Huang Y, Zhang Z, Liu J. Optimization of port microgrid operation considering renewable energy consumption and cost [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5434-5443.
- [6] Li L F, Zhong M, Zhao H W, et al. Multi-scenario planning method for port self-consistent new energy system considering the coupling of transportation demand and energy load [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 44(5): 177-193.
- [7] Li L, Zhang Y, Zhao H. Development of integrated renewable energy systems for ports: a case study of Shanghai Port [J]. Renewable Energy, 2020, 155: 284-295.
- [8] 王盼宝,徐殿国,谭岭玲,等. 基于改进 MOPSO 的多能互补型微电网多元优化运行策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 130-140.
Wang P B, Xu D G, Tan L L, et al. Multi-objective optimization operation strategy for multi-energy complementary microgrids based on improved MOPSO [J]. Southern Power Grid Technology, 2022, 16(10): 130-140. (in Chinese)
- [9] 黄源烽,郝飞,滕井玉,等. 多能互补能源基地多目标多时间尺度优化调度研究[J]. 内蒙古电力技术, 2024, 42(4): 32-41.
Huang Y F, Hao F, Teng J Y, et al. Research on multi-objective and multi-time-scale optimal scheduling of multi-energy complementary energy bases [J]. Inner Mongolia Electric Power Technology, 2024, 42(4): 32-41. (in Chinese)
- [10] 欧阳婷,张会林. 基于 MOPSO 算法的孤岛微电网优化调度[J]. 电子测量技术, 2020, 43(20): 58-62.
Ouyang T, Zhang H L. Optimal scheduling of islanded microgrids based on the MOPSO algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(20): 58-62. (in Chinese)
- [11] 任德江. 水风光互补的冷热电多能联供微网运行优化研究[D]. 广州:广东工业大学,2020.
Ren D J. Research on the operation optimization of a combined cooling, heating, and power microgrid with water-wind-solar complementarity [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [12] 李瑞月. 风光联合系统储能容量优化配置技术研究[D]. 北京:华北电力大学,2022.
Li R Y. Research on the optimal configuration technology of energy storage capacity in wind-solar hybrid systems [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022. (in Chinese)

- [9] Zhang G Q, Bian W Z, Zhang X K, et al. Robust adaptive saturation-tolerance control for USVs formation via a novel L1-VS guidance [J]. *Ocean Engineering*, 2024,298:117304.
- [10] 吴天昊, 王欣, 李海滨. 考虑时变时滞特性的船舶航向自适应控制[J]. *中国航海*, 2024,47(3):28-35.
Wu T H, Wang X, Li H B, et al. Adaptive control of ship heading considering time varying and time-delay characteristics[J]. *Navigation of China*, 2024,47(3):28-35. (in Chinese)
- [11] 李应森, 陈明, 王焕清, 等. 非线性系统有限时间自适应动态面容错控制[J]. *控制理论与应用*, 2022,39(8):1489-1496.
Li Y S, Chen M, Wang H Q, et al. Finite-time adaptive dynamic surface fault-tolerant control for nonlinear systems[J]. *Control Theory and Technology*, 2022,39(8):1489-1496. (in Chinese)
- [12] Wang R Q, Li D L, Miao K Y. Optimized radial basis function neural network based intelligent control algorithm of unmanned surface vehicles[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020,8(3):210.
- [13] Mu D D, Wang G F, Fan Y S, et al. Adaptive course control based on trajectory linearization control for unmanned surface vehicle with unmodeled dynamics and input saturation[J]. *Neurocomputing*, 2019,330:1-10.
- [14] Li J Q, Zhang G Q, Zhang W J, et al. Cooperative path following control of USV-UAVs considering low design complexity and command transmission Requirements [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024,9(1):715-724.
- [15] Zheng Y X, Zhang L, Huang B, et al. Dynamic event-triggered formation maneuver in cooperative marine surface vehicles control over directed communication networks[J]. *Ocean Engineering*, 2023,281:114622.
- [16] Fossen T I. *Guidance and control of marine ocean vehicles*[M]. USA:Wiley, 1998.
- [17] Li J Q, Zhang G Q, Zhang W J, et al. Robust control for cooperative path following of marine surface-air vehicles with a constrained inter-vehicles communication [J]. *Ocean Engineering*, 2024,308:118240.
- [18] Guo Q, Zhang X K, Meng Y, et al. Fixed-time adaptive path-following control of autonomous surface vehicles with asymmetric output performance and feasibility constraints [J]. *Ocean Engineering*, 2023,288:115999.
- [19] Huang C F, Zhang X K, Zhang G Q. Decentralized event-triggered cooperative path-following control for multiple autonomous surface vessels under actuator failures [J]. *Applied Ocean Research*, 2021,113:102751.
- [20] Zhang G Q, Han J, Li J Q, et al. APF-based intelligent navigation approach for USV in presence of mixed potential directions: Guidance and control design [J]. *Ocean Engineering*, 2022,260:111972.
- [21] Ning J, Ma Y F, Li T S, et al. Event-triggered based trajectory tracking control of under-actuated unmanned surface vehicle with state and input quantization [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024,9(2):3127-3139.

~~~~~

(上接第 94 页)

- [13] 邢毓华,任甜甜. 改进 MOPSO 在微电网优化调度中的应用研究[J]. *太阳能学报*,2024,45(6):191-200.  
Xing Y H, Ren T T. Application of improved MOPSO in optimal scheduling of microgrids [J]. *Solar Energy Journal*, 2024,45(6):191-200. (in Chinese)
- [14] 闫志彬,康健,郑伟,等. 基于改进粒子群算法的微电网优化调度策略分析[J]. *微型电脑应用*,2023,39(9):75-78.  
Yan Z B, Kang J, Zheng W, et al. Analysis of optimal scheduling strategy for microgrids based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. *Microcomputer Applications*, 2023,39(9):75-78. (in Chinese)