



基于自适应蚁群算法的岛礁混合发电系统电源容量优化方法

李维波 彭智明 张浩 张茂杰 方华亮

Optimization method for island and reef hybrid power generation systems' power capacity based on adaptive ant colony algorithm

LI Weibo, PENG Zhiming, ZHANG Hao, ZHANG Maojie, FANG Hualiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03505>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[船舶微电网锂电池储能系统容量配置多目标优化方法](#)

Multi-objective optimization method of energy storage system capacity allocation for marine microgrid lithium battery

中国舰船研究. 2020, 15(6): 22–28 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01769>

[基于优化功率分配的光伏混合储能系统能量管理策略](#)

Energy management strategy of photovoltaic hybrid energy storage system based on optimal power distribution

中国舰船研究. 2021, 16(2): 168–175 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01869>

[破冰船柴电混合动力系统优化设计及敏感性分析](#)

Optimization design and sensitivity analysis of diesel/battery hybrid propulsion system for polar icebreaker

中国舰船研究. 2021, 16(5): 127–136 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02260>

[智能船舶动力系统设备的自适应阈值方法](#)

Adaptive threshold method for intelligent ship power system equipment

中国舰船研究. 2021, 16(1): 167–173 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01951>

[基于混合储能的船舶电力系统功率波动平抑控制策略](#)

Power fluctuation control strategy of ship power system based on hybrid energy storage system

中国舰船研究. 2021, 16(4): 190–198 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02006>

[船舶电站容量与机组配置的辅助设计软件](#)

Ship power capacity and unit configuration aided design software

中国舰船研究. 2020, 15(6): 66–71 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01822>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03505>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 李维波, 彭智明, 张浩, 等. 基于自适应蚁群算法的岛礁混合发电系统电源容量优化方法 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(4): 139–147.

LI W B, PENG Z M, ZHANG H, et al. Optimization method for island and reef hybrid power generation systems' power capacity based on adaptive ant colony algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(4): 139–147 (in both Chinese and English).

基于自适应蚁群算法的岛礁混合发电系统电源容量优化方法



扫码阅读全文

李维波¹, 彭智明¹, 张浩¹, 张茂杰¹, 方华亮²

1 武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070

2 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072

摘要: [目的] 针对岛礁混合发电系统电源容量配置存在的问题, 提出一种基于自适应蚁群算法(ACA)的优化方法。[方法] 采用自适应蚁群算法作为核心优化工具, 对岛礁混合发电系统的电源容量进行配置。通过采用自适应蚁群算法模拟蚁群寻食过程, 在搜索空间中以可再生能源发电量作为信息素, 通过全局搜索找到最优解, 实现对可再生能源的充分利用。并以外伶仃岛为目标岛礁, 搭建“风光柴储”微电网混合发电系统模型, 采用自适应蚁群算法优化配置其容量。[结果] 算法仿真结果表明, 相较于改进灰狼算法和人工蜂群算法, 自适应蚁群算法能够有效降低微电网混合发电系统的运行成本和对环境的污染, 确保供电稳定性。[结论] 所做研究能够有效增加微电网混合发电系统的供电稳定性, 减少运行成本与环境污染, 从而实现对能源的高效利用。

关键词: 混合发电系统; 自适应蚁群算法; 容量配置; 动态信息素; 经济性

中图分类号: U665.14

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03505

Optimization method for island and reef hybrid power generation systems' power capacity based on adaptive ant colony algorithm

LI Weibo¹, PENG Zhiming¹, ZHANG Hao¹, ZHANG Maojie¹, FANG Hualiang²

1 School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

2 School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: [Objectives] Aiming to address the existing challenges in the power capacity configuration of island and reef hybrid power generation systems, this paper proposes an optimization method based on the adaptive ant colony algorithm (ACA). [Methods] An ACA is used as the core optimization tool to configure the power capacity of an island and reef hybrid power generation system. The process of ants foraging is simulated by employing the ACA and using the power generation of renewable energy as dynamic pheromones in the search space. The optimal solution is then found through global search, achieving the full utilization of renewable energy. Taking Wai Lingding Island as the target island, a 'wind-solar-diesel-storage' microgrid hybrid power generation system model is constructed, and the ACA is used to optimize its capacity configuration. [Results] The simulation results of the algorithm indicate that, compared to the improved Grey Wolf algorithm and Artificial Bee Colony algorithm, the ACA can effectively reduce the operational costs and environmental pollution of the microgrid hybrid power generation system, while ensuring the stability of the power supply. [Conclusions] The results of this study can effectively increase the power supply stability of the microgrid hybrid power generation system, reduce operating costs and environmental pollution, and thus achieve efficient utilization of energy resources.

Key words: hybrid power generation system; adaptive ant colony algorithm (ACA); capacity configuration; dynamic pheromone; economy

收稿日期: 2023-08-11 修回日期: 2023-10-17 网络首发时间: 2024-06-03 16:39

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1506802)

作者简介: 李维波, 男, 1973年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 电力电子技术在能源系统中的应用。

E-mail: liweibo@whut.edu.cn

彭智明, 男, 1998年生, 硕士生。研究方向: 新能源系统优化控制技术。E-mail: 844986164@qq.com

*通信作者: 李维波

0 引言

随着可再生能源技术的迅速发展,越来越多的岛礁地区开始尝试使用混合发电系统替代传统的柴油发电系统。然而,如何有效进行电源容量配置以实现经济效益和环境友好性的最优平衡,成为一个迫切需要解决的问题。基于这一现实需求,本文将针对岛礁混合发电系统的电源容量配置问题,提出一种基于自适应蚁群算法(adaptive ant colony algorithm, ACA)的优化方法,以降低微电网混合发电系统的运行成本,减少环境污染,确保供电稳定性^[1-3]。

在详细考察前人研究成果的基础上^[4],对多种优化算法进行了综合评价。赵静艺^[1]提出采用一种改进果蝇算法对微电网分布式电源容量进行统筹规划。吴瑞鹏等^[2]提出的混合储能和可再生能源系统中所使用的超级电容荷电状态二次反馈方法增强了系统的反馈机制。黄云云等^[3]和张栋华等^[4]分别提出改进灰狼算法和量子行为粒子群算法,为微电网的优化配置问题提供了新的解决策略。但是,这些研究成果普遍面临一个共同的挑战,即在全局和局部搜索平衡性、多变量收敛性等方面存在不足。而自适应蚁群算法在全局搜索和局部搜索的平衡性上具有明显的优势,尤其是对复杂的岛礁混合发电系统而言,这一平衡性可确保这一方法更加稳健、可靠。

本文将在充分综合考虑岛礁地区特有的负荷特性,如周期性负荷波动和突发负荷变化的基础上,仔细分析年光照统计数据和实时燃油价格,以确保所提解决方案不仅经济高效,还能符合当前严格的“双碳”政策要求。首先,在研究中采集大量实时的风力、太阳辐射和负荷数据,以便在算法设计阶段进行更为精确的模型参数调整;然后,在电源和储能装置选型时,评估各种设备的基本输出特性,并详细考虑其在不同运行状态下的功率限制和效率变化,以便在多种候选方案中做出更为明智的决策。

1 光风柴蓄混合发电系统模型

1.1 光伏电池模型设计

光伏电池是将太阳的辐射能转换成化学能或是直接转换成电能,即光伏效应,光伏电池的输出功率需要根据当地的平均辐射量而定^[5-6]。其中,当地每分钟的辐射量可根据农业气象大数据系统得到。光伏阵列输出功率 P_{PV} 的表达式为

$$P_{\text{PV}} = \eta_{\text{PV}} \cdot V_{\text{PV}} \cdot I_{\text{PV}} \quad (1)$$

式中: η_{PV} 为光伏阵列的能量转换效率,一般取值 80% 左右; V_{PV} 为太阳能电池的额定电压; I_{PV} 为太阳能电池的输出电流。

在实际应用中,考虑到当地负荷情况,为获取更大的功率,太阳能光伏电池板常采用串并联的光伏阵列模式^[7]。研究与实践表明,光伏阵列的输出功率大多受太阳辐射与温度的影响。

光伏阵列在不同外部条件下的输出功率 P_{PV} 的表达式为

$$P_{\text{PV}} = P_{\text{STC}} \frac{G_{\text{AC}}}{G_{\text{STC}}} [1 + \delta(\theta - \theta_t)] \quad (2)$$

式中: P_{STC} 为在固定测试条件下光伏电池的额定输出功率; G_{AC} 为光伏阵列置放点的光照强度; G_{STC} 为固定测试中的辐射光照强度; δ 为功率温度系数; θ 为放置点处光伏板的表面温度; θ_t 为参考温度,参照同行方法,本文取值 25 ℃^[8-11]。

图 1 给出了相同温度条件下不同光照强度的光伏阵列功率-电压($P-U$)特性曲线。

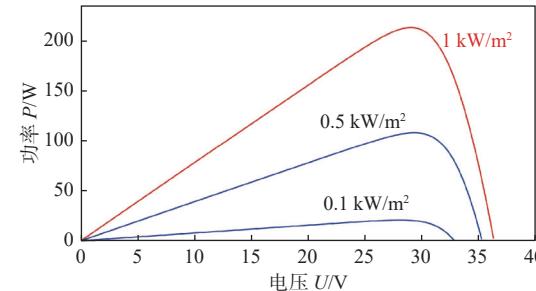


图 1 不同光照强度下光伏阵列的 $P-U$ 特性曲线

Fig. 1 $P-U$ characteristic curves of photovoltaic arrays under different light intensities

图 2 所示为相同光照强度下不同温度的光伏阵列 $P-U$ 特性曲线。

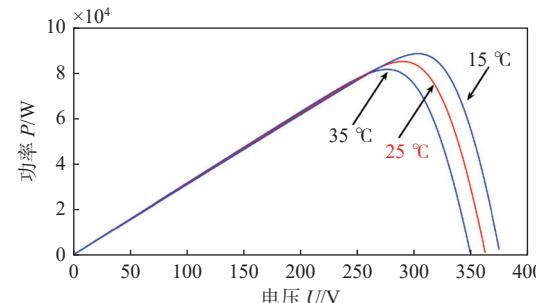


图 2 不同温度下光伏阵列的 $P-U$ 特性曲线

Fig. 2 $P-U$ characteristic curves of photovoltaic arrays at different temperatures

由图 1 和图 2 所示曲线可知,对于光伏供电而言,需要采用最大功率点跟踪(MPPT)算法进行跟踪。

1.2 蓄电池模型设计

在所研究的岛礁独立型混合发电系统中, 蓄电池主要起克服瞬时电网波动的作用, 可起到削峰填谷并极大地改善电能质量的作用。因铅酸电池具有应用广泛、电动势能高、充放电可逆性好、使用温度范围广、原材料丰富廉价等优点, 故本文将以铅酸电池作为该独立型混合发电系统的储能设备开展相关研究^[12]。

在充放电的过程中, 蓄电池的荷电状态(state of charge, SOC) S 可以表示为:

$$S(t + \Delta t) = S(t) + [P_{\text{BESS}}(t) / U_{\text{BUS}}] \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中: S 为蓄电池的荷电状态; $P_{\text{BESS}}(t)$ 为蓄电池的充放电功率; U_{BUS} 为系统直流总线电压; t 为初始采样时间; Δt 为当前计算时间与初始采样时间的间隔。

为方便判断蓄电池的使用寿命, 引入了放电深度(depth of discharge, DOD)概念。所谓放电深度, 指蓄电池在满电状态下被放电的程度, 常用剩余电量的百分比来表示, 即

$$S_{\text{min}} = S_{\text{max}} \cdot (1 - D) \quad (4)$$

式中: S_{min} 为最小荷电状态; S_{max} 为最大荷电状态; D 为放电深度。蓄电池的使用寿命与放电深度 D 之间的关系如表1所示。

表1 放电深度与电池寿命之间的关系

Table 1 Relationship between discharge depth and battery life

放电深度D/%	充放电循环次数
100	200
80	350
50	700
20	1 200

分析表1并结合研究与工程实践, 可知要延长电池寿命, 需严格避免对电池的深度放电。

1.3 风力发电机模型设计

风力发电就是把风的动能转换成机械能, 然后再把机械能转换成电能。风力发电机的输出功率是随风速的变化而不断变化的, 其表达式为

$$P_{\text{WT}}(v) = \begin{cases} 0, & v \leq v_{\text{ci}} \text{ 或 } v \geq v_{\text{co}} \\ \frac{v^3 - v_{\text{ci}}^3}{v_{\text{R}}^3 - v_{\text{ci}}^3} P_{\text{R}}, & v_{\text{ci}} \leq v \leq v_{\text{R}} \\ P_{\text{R}}, & v_{\text{R}} \leq v \leq v_{\text{co}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_{WT} 为风机实时输出功率; P_{R} 为风机额定功率; v 为风机轮毂高处的实时风速; v_{ci} 为切入风

速; v_{R} 为额定风速; v_{co} 为切出风速。

分析式(5), 可知风力发电机的输出功率是一个分段式函数, 而风力发电机组常用的发电机有鼠笼式异步发电机、绕线式异步发电机、双馈异步发电机、永磁或电励磁同步发电机等^[13]。本文将以外伶仃岛的独立微电网工程作为目标岛礁进行分析, 该电网选用的是双馈异步发电机的风力发电机组。

图3所示为基于双馈异步发电机的风力发电机组在不同风速下的功率输出曲线图。

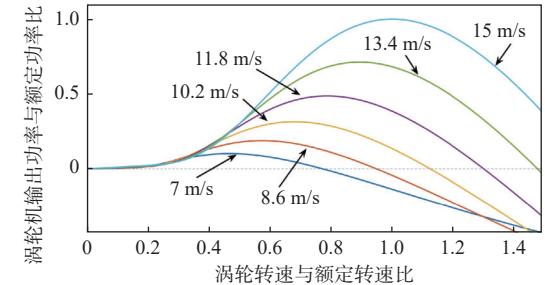


图3 风力发电机组在不同风速下的功率输出曲线

Fig. 3 Power output curves of wind turbines at different wind speeds

双馈异步发电机的转子绕组具有可调节频率的三相电源激励, 与其他类型的发电机相比, 其是通过双馈变频器的四象限运行, 能极大地提高双馈风力发电机的运行转速范围。与同步机交-直-交系统相比, 双馈异步发电机有变频装置容量小、重量轻等优点, 这是因为双馈发电机转子绕组允许电源直接向转子供电, 简化了变流结构, 降低了变频器的容量需求, 同时也降低了岛礁混合发电系统的造价成本^[14]。

1.4 柴油发电机模型设计

目前, 柴油发电机组在岛礁微电网系统里不可或缺, 尤其是在蓄电池、风电和光伏板不能及时供应能源时, 它能够保证供电系统的接续性。柴油发电机组一般由柴油机、同步发电机、转速和电压调节器几个模块组成, 其组成框图如图4所示。图中: ω 为柴油机的实际转速; ω_{ref} 为柴油机的参考转速; V 为同步发电机的实际电压; V_{ref} 为同步发电机的参考电压。

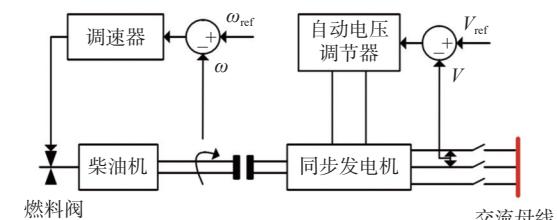


图4 柴油发电机组的组成框图

Fig. 4 Composition block diagram of diesel generator set

柴油发电机组一般不会在低于额定功率 30% 的情况下长期运行,否则会带来一些不足,如增加机油消耗。柴油机易于漏油、积碳、增大故障率及缩短大修周期。因此,本文所述岛礁混合发电系统将柴油发电机设为备用电源。为方便讨论,在选取柴油发电机时,需先做如下假设^[15]:

- 1) 柴油发电机的容量高于微网负荷;
- 2) 柴油发电机被用于给蓄电池充电时,其输出电流要低于蓄电池所要求的最大输入电流。

2 光风柴蓄混合发电系统容量优化配置模型

研究表明,混合发电系统的电源为非线性,因此,按照传统配置容量的方式较难实现对各个分布式电源的容量配置,会增加整个系统运行控制的难度。对于光风柴蓄混合发电系统而言,其容量配置的关键在于找到最适合其负荷与外部条件的各个电源容量的最佳组合方法。

由前期的研究^[1,4]可知,使用自适应蚁群算法较为合适,尤其是根据微电网和载荷数据,选取该算法的最大迭代次数和蚂蚁数目等关键性参数后,能够迅速找到全局最优解而非局部最优解。

2.1 优化目标函数

考虑到不同电源使用年限和运维周期等不同的因素,为方便讨论,引入了年平均成本法(average annual cost method, AACM)概念,即将各个电源的购置成本、维护成本和燃料成本的总费用作为优化目标函数,则平均成本 A 的表达式为:

$$\min A(x) = \min \{C_C(x) + C_M(x) + C_F(x)\} \quad (6)$$

式中: C_C 为年平均购置成本; C_M 为维修成本的年均化; C_F 为燃料成本的年均化^[16]; x 代表不同电源的配置或规模。由于购买成本仅在第 1 年出现,因此需要将初期购买成本进行年平均化处理,此时,引入了资金回收系数(capital recovery factor, CRF),其表达式为:

$$C = \frac{i(1+i)^n}{i(1+i)^n - 1} \quad (7)$$

式中: C 为资金回收系数; i 为折旧率; n 为系统使用年限。

可以推演得到系统的年平均购置成本 C_C 为:

$$C_C = C(n_{PV} \cdot C_{C,PV} + n_{WT} \cdot C_{C,WT} + n_{BAT} \cdot C_{C,BAT} + n_{COE} \cdot C_{C,COE}) + C_O \quad (8)$$

式中: n_{PV} 为所采用光伏电池数量; n_{WT} 为所采用风电机组数量; n_{BAT} 为所采用蓄电池数量; n_{COE} 为

所采用的柴油机数量(注意, n 需要向上取整); $C_{C,PV}$ 为光伏电池组运行前的所有前置费用; $C_{C,WT}$ 为风力机组运行前的所有前置费用; $C_{C,BAT}$ 为蓄电池运行前的所有前置费用; $C_{C,COE}$ 为柴油发电机组运行前的所有前置费用; C_O 为柴油机的年均油费,其表达式为^[1]:

$$C_O = a \cdot (k_1 P_S + k_2 P_{Pe}) \quad (9)$$

式中: a 为柴油价格; k_1 为每千瓦时实际输出功率的燃油消耗量, $k_1 = 0.246 \text{ L/kW}$; k_2 为每千瓦时额定输出功率的燃油消耗量, $k_2 = 0.0845 \text{ L/kWh}$; P_S 为柴油发电机的实际输出功率; P_{Pe} 为柴油发电机的额定输出功率。

2.2 约束条件

为优化配置所述岛礁混合发电系统的容量,不仅要考虑当地的负荷情况,还要根据分布式电源的物理特性和操作特点进行约束。现将 4 种约束条件分别阐述如下。

约束条件 1: 微电网系统供需平衡。

独立的微电网系统运行时,需满足输出功率大于等于负荷的条件,即

$$P_{WT}(t) \pm P_{PV}(t) \pm P_{BAT}(t) + P_{COE}(t) = P_L(t) - P_{sh-L}(t) \quad (10)$$

式中: $P_{WT}(t)$ 为 t 时刻风力发电机的放电功率; $P_{PV}(t)$ 为 t 时刻光伏电池的充放电功率; $P_{BAT}(t)$ 为 t 时刻蓄电池组的充放电功率; $P_{COE}(t)$ 为 t 时刻柴油发电机的放电功率; $P_L(t)$ 为 t 时刻系统中的复合功率; $P_{sh-L}(t)$ 为 t 时刻系统中的缺电负荷功率^[17]; “+”表示释放功率; “-”表示吸收功率。

约束条件 2: 分布式电源输出功率限制。

分布式电源的实时输出功率应该介于自身最大输出功率 $P_{A,max}$ 与最小输出功率 $P_{A,min}$ 之间,即

$$\{P_{A,min} \leq P_A(t) \leq P_{A,max}\} \quad (11)$$

式中, $P_A(t)$ 为系统中各分布式电源在 t 时刻的实时输出功率。

约束条件 3: 蓄电池储能系统的容量约束。

对于蓄电池的保护,需要让蓄电池的荷电状态 $S(t)$ 在任何时候都介于最大值 S_{max} 与最小值 S_{min} 之间^[17],即

$$S_{min} \leq S(t) \leq S_{max} \quad (12)$$

上式中,蓄电池荷电状态最大值 S_{max} 与最小值 S_{min} 可以根据式(3)和式(4)计算获得。

约束条件 4: 分布式电源数量限制。

需要综合考虑光伏电池组、风力发电机组、

蓄电池组和柴油发电机组的输出特性、容量大小与占地面积等多种因素,才能确定该混合发电系统中各个电源配置数量的范围^[1],即

$$\begin{cases} 1 \leq N_{WT} \leq N_{WT,max} \\ 1 \leq N_{PV} \leq N_{PV,max} \\ 1 \leq N_{BAT} \leq N_{BAT,max} \\ 1 \leq N_{COE} \leq N_{COE,max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: N_{WT} 为风力发电机组实际数量; $N_{WT,max}$ 为风力发电机组最大安装数量; N_{PV} 为光伏电池组实际数量; $N_{PV,max}$ 为光伏电池组最大安装数量; N_{BAT} 蓄电池组实际数量; $N_{BAT,max}$ 蓄电池组最大安装数量; N_{COE} 柴油发电机组实际数量; $N_{COE,max}$ 为柴油发电机组最大安装数量。

3 自适应蚁群算法

3.1 蚁群算法

蚁群算法是于 20 世纪 90 年代提出的一种仿生算法,最开始时,被用于解决经典的旅行商问题。该算法的最短路径 $p_{ij}^k(t)$ 表达式为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{k \in \omega_k} [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta} \\ 0, \text{ 其他} \end{cases} \quad (14)$$

式中: τ_{ij} 为弗洛蒙浓度值; η_{ij} 为能见度值,在旅行商问题中, η_{ij} 为任意两个城市的距离,其中 i, j 指旅行商问题中的任意两个城市; α 和 β 分别为弗洛蒙浓度和能见度权重的控制系数; k 为第 k 只蚂蚁; ω_k 为第 k 只蚂蚁待访问节点的集合; t 为当前迭代次数。

当弗洛蒙浓度控制系数 $\alpha = 0$ 时,蚂蚁完全根据城市距离 ij 做选择。但是,由每一步局部最优解组成的方案并不是全局最优解,当能见度权重控制系数 $\beta = 0$ 时,蚂蚁完全根据弗洛蒙浓度 τ_{ij} 做出判断,致使蚂蚁做出快速收敛,然而这并非为最优解。因此,在蚁群算法的实际应用中,需要选择合适的 α, β 和能见度值 η_{ij} ^[6,10,18]。

但对于岛礁环境的供电系统而言,优化算法需要兼顾计算效率、收敛速度以及全局寻优能力。计算效率用于确保算法能够快速求解,收敛速度避免无效搜索,全局寻优则是为了跳出局部最优从而获得最优解。然而,基础蚁群算法在这些方面存在明显的不足,难以满足岛礁系统的需求。受此启发,引入自适应蚁群算法,通过自适应调节参数来达到更好的优化效果。

3.2 自适应蚁群算法

自适应蚁群算法是一种改进的蚁群算法,其通过自适应地动态调整算法的参数和策略,不断优化算法的性能,来适应不同的问题和实际应用环境。相对于基本蚁群算法,自适应蚁群算法具有更好的优化效果和更高的搜索速度^[6,18]。

本文所用自适应蚁群算法是在基础蚁群算法的框架下进行关键性的改进而得来,其思路是:通过引入随机性和岛礁环境反馈机制,并针对基础蚁群算法中容易陷入局部最优解和收敛速度慢的缺点,采用自适应地调整相关算法参数来进行优化。

进一步地,自适应蚁群算法还引入了启发式信息素,这是一种自适应的弗洛蒙更新策略。该更新策略解决了一个核心问题,即在基础蚁群算法中,高弗洛蒙浓度的路径会被频繁选择,从而会降低算法的全局搜索能力。通过调整弗洛蒙的挥发系数,自适应蚁群算法能够在保持搜索速度的同时增强其全局搜索的能力。这样,算法在寻找最优解的过程中就能达到更好的平衡。

据此,本文所采用的自适应蚁群算法提出了一种自适应的变化值方法,以解决混合发电系统中电源容量配置的优化问题。

其中, $t+1$ 时刻信息素更新的表达式为:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho \cdot \phi(m, C_{tij})) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t+1) \cdot F(C_{tij}) \quad (15)$$

式中: ρ 为弗洛蒙的挥发系数,其取决于前一次循环后的弗洛蒙浓度变化值 $\Delta\tau_{ij}$; $\phi(m, C_{tij})$ 为一个考虑了收敛次数和当前路径的总成本的函数; τ_{ij} 为在时间 t 时的弗洛蒙浓度; $\Delta\tau_{ij}(t+1)$ 为在时间 $t+1$ 时的弗洛蒙增量,通常由这一代的蚂蚁路径长度决定; $F(C_{tij})$ 为一个反映了路径的总成本对解的优越性影响的函数,因为更低的总成本可能意味着更高的优越性。式(15)的含义是,新的弗洛蒙浓度是由原来的弗洛蒙自然挥发以及新的弗洛蒙增量共同决定的。其中,弗洛蒙的自然挥发和新的弗洛蒙增量均受路径总成本的影响,这使得算法在优化风光柴储系统时能够更好地考虑不同组件的成本。

在风光柴储系统的优化过程中,自适应蚁群算法通过监控各电源组件解的分布,实时调整信息量,保障了搜索过程中解空间的多样性,进而增强了对全局最优解的寻找能力。与基本的蚁群算法相比,此改进算法在风光柴储系统中具有更出色的稳定性和收敛性,以及对全局最优解的搜

索能力。

3.3 基于自适应蚁群算法的电源配置流程

采用本文所提的自适应蚁群算法对微电网分布式电源的最佳配置容量进行求解。以风力发电机、蓄电池和太阳能电池作为优化目标,以供需平衡、能量约束和容量限制作为约束条件,采用自适应蚁群算法配置微电网分布式电源容量,其配置流程如下:

- 1) 确定优化目标和约束条件,即系统总成本最小化。
- 2) 将系统的变量表示出来,如电池容量、光伏发电功率、负荷等。
- 3) 根据自适应蚁群算法的思路,设计启发式信息素和估计函数来引导搜索。
- 4) 初始化蚂蚁,将其随机分布在可行解空间上。
- 5) 根据微电网的实时状态、电源及能源成本以及个体记忆来决策,如增加/减少电源容量、选择不同类型的电源等。
- 6) 计算每个蚂蚁的适应度函数值,该函数应反映总成本、稳定性等。
- 7) 更新与全局最优解和局部最优解相关的信息素,可引入动态调整机制以加速收敛。
- 8) 根据信息素的指引,继续迭代搜索,直至满足停止条件,比如达到最大迭代次数或是达到多目标函数的最优解。
- 9) 输出最优解,即可获取岛礁分布式电源容量的配置方案。

总之,基于自适应蚁群算法的微电网分布式电源容量配置流程包括环境建模、启发式信息素设计、估计函数构建、自适应蚁群算法迭代搜索以及输出最优解等步骤。

4 算例分析

4.1 混合发电系统基础电源选择

本文将以珠海市外伶仃岛作为项目实施点,来优化配置混合发电系统的电源容量,用以验证所提自适应蚁群算法在配置混合发电系统电源容量方面的有效性和合理性。通过查阅农业气象大数据,可以得到外伶仃岛的全年风速与辐射强度,将该历史数据导入 Matlab 软件,得到外伶仃岛一年内风速和光辐射量随时间变化的曲线分别如图 5 和图 6 所示。

图 7 所示为外伶仃岛夏季用电量最大的一天的用电负荷曲线图。

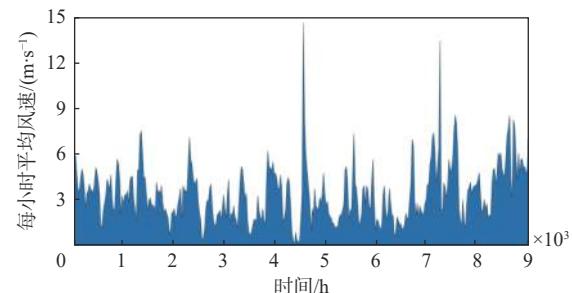


图 5 一年内每小时风速变化曲线图

Fig. 5 Hourly wind speed changes within a year

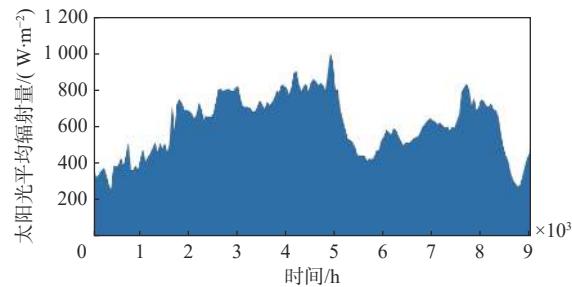


图 6 一年内光辐射量变化曲线图

Fig. 6 Light radiation per hour changes within a year

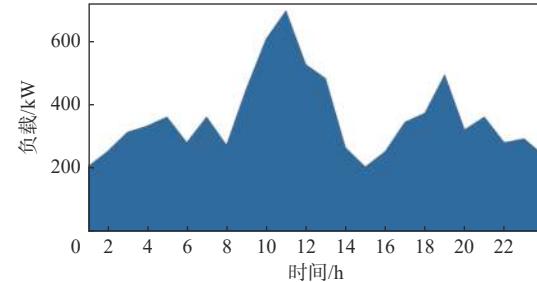


图 7 夏季用电量最大的一天的用电负荷曲线图

Fig. 7 Hourly electricity load within a day of maximum summer demand

由图 5~图 7 可知,根据所得到的农业气象大数据信息,即可对该混合发电系统中各个分布式电源进行选型,并按风力发电机每年维护费用一般为其购买成本的 1%、安装费用为购买成本的 15%、风力发电机寿命为 20 年等约束条件进行算法分析。风力发电机的其他关键性参数如表 2 所示。

表 2 风力发电机的关键性参数

Table 2 Key parameters of wind turbines

参数	数值
额定功率/kW	20
额定风速/(m·s⁻¹)	12
安全风速/(m·s⁻¹)	45
启动风速/(m·s⁻¹)	3
购买成本/元	68 500

太阳能电池选择的是半柔性高效单晶电池,预计其安装成本为购买成本的 10%,维护成本一般为购买成本的 1%,使用寿命为 25 年。其他关键性参数如表 3 所示。

表3 光伏电池的关键性参数

Table 3 Key parameters of photovoltaic cells

参数	数值
额定功率/W	100
开路电压/V	21.4
最大允许电流/A	6.08
转换效率/%	21
购买成本/元	13

蓄电池选择的是铅酸蓄电池,预计其安装成本为购买成本的10%,维护成本一般为购买成本的1%,使用寿命为5年。其他关键性参数如表4所示。

表4 蓄电池的关键性参数

Table 4 Key parameters of battery

参数	数值
额定容量/Ah	200
额定电压/V	12
放电深度D/%	80
能量转换效率/%	85
购买成本/元	1 300

在新能源不足的情况下,柴油机就需要满足总体负荷要求,所以柴油机的额定功率需大于负荷的最大功率。本算例所选用柴油机的额定功率为800 kW,购买成本为120 000元,维修费用为购买成本的2%,使用寿命约为9 000 h,耗油量设置为0.265 L/kWh,0#柴油目前在珠海的售价为7.38元/L。

4.2 算法仿真与结果分析

本文中算例在软件Matlab 2021中进行,利用自适应蚁群算法对该混合发电系统进行电源容量优化配置。自适应蚁群算法的最大迭代次数为200,蚂蚁数目为1 000只。结合外伶仃岛的环境资源情况与用电负荷,以1 h为采样时间,对系统进行动态仿真。

图8所示为蓄电池采用循环充电运行方案时系统的年均化费用曲线。

图9所示为循环充电运行方案下的电池荷电状态曲线。

图10所示为蓄电池采用负荷跟踪运行方案时系统的年均化费用曲线。

图11所示为负荷跟踪运行方案下的电池荷电状态曲线。

由图9~图11可知,采用循环充电运行方案能够最大限度地利用柴油发电机的输出功率,从

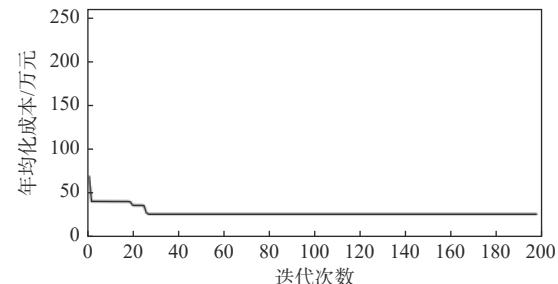


图8 循环充电运行方案下系统的年均化费用曲线

Fig. 8 The average annual cost curve of the system under the cyclic charging operation scheme

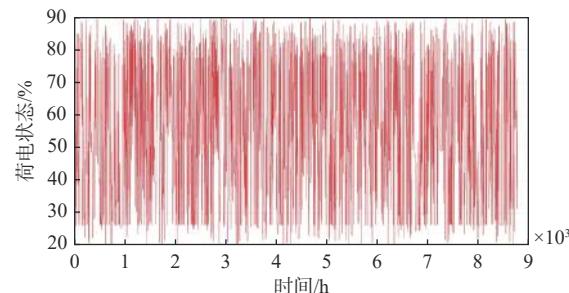


图9 循环充电运行方案下的蓄电池荷电状态

Fig. 9 Battery state of charge under cyclic charging operation scheme

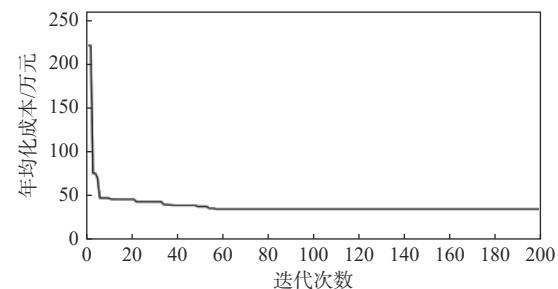


图10 负荷跟踪运行方案下系统的年均化费用曲线

Fig. 10 The average annual cost curve of the system under the load tracking operation scheme

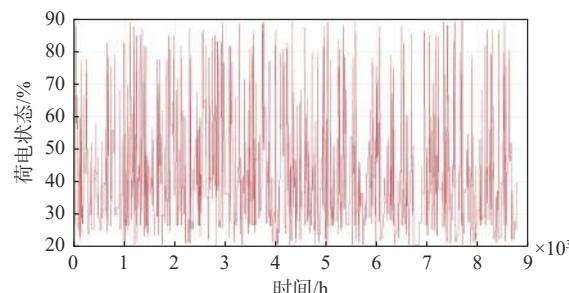


图11 负荷跟踪运行方案下的蓄电池荷电状态

Fig. 11 Battery state of charge under load following operation scheme

而有效减少可再生能源发电设备的数量。当然,也存在柴油发电机因工作时间较长而导致污染治理与燃料成本的大幅度增加,从而不利于整个发电系统的节能减排的问题。

将蓄电池采用循环充电运行方案和负荷跟踪运行方案所得结果进行对比,结果如表5所示。

表 5 两种方案的优化结果

Table 5 Optimization results of two schemes

参数	运行方案	
	循环充电	负荷跟踪
N_{WT} /个	3	4
N_{BAT} /个	35	47
N_{PV} /个	249	395
柴油机工作时长/h	519	319
年均化成本/元	276 471	358 450

由表 5 所示 2 种方案的优化结果可知, 采用循环充电运行方案的费用要比采用负荷跟踪方案的费用低 81 979 元, 经济效应得到了明显提升。这 2 种方案最主要的差距在于柴油发电机输出功率的利用率方面。

为了验证自适应蚁群算法对混合发电系统容量配置的优化性能, 分别利用改进灰狼算法和人工蜂群算法求解混合发电系统容量的配置问题并进行对比研究。根据前述研究结论, 蓄电池采用循环充电方案, 然后将改进灰狼算法和人工蜂群算法结果与自适应蚁群算法结果进行对比(表 6)。基于这 3 种不同算法的仿真系统的初始状态、输入数据的范围和精度、迭代次数、停止准则等相关参数均相同。运行后, 得到这 3 种算法在迭代过程中的收敛曲线如图 12 所示。

表 6 3 种算法的优化结果

Table 6 Optimization results of three algorithms

参数	自适应蚁群算法	改进灰狼算法	人工蜂群算法
N_{WT} /个	3	4	6
N_{BAT} /个	35	28	42
N_{PV} /个	249	323	487
环境成本/元	3 791	4 192	3 473
年均化成本/元	276 457	318 791	451 880

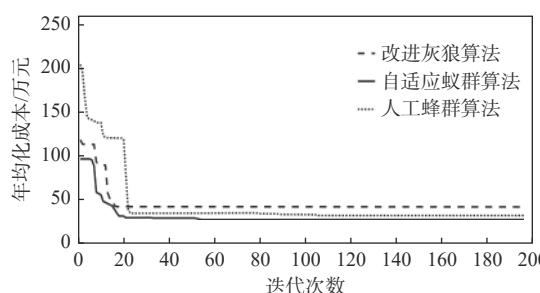


图 12 3 种算法各自寻优迭代过程

Fig. 12 Optimization iteration process of each of the three algorithms

由图 12 所示 3 种算法的收敛曲线以及表 6 所示 3 种算法的优化结果可知: 自适应蚁群算法的收敛速度快、经济性最好; 改进灰狼算法的迭代次数相比自适应蚁群算法约高 70% (速度更

慢), 年均化成本高 42 334 元; 人工蜂群算法的迭代速度虽最快, 但易陷入局部最优, 从而导致其经济性不如自适应蚁群算法和改进灰狼算法, 且人工蜂群算法的年均化成本相比自适应蚁群算法约高 175 423 元。

究其原因, 是风光柴储之类的微网电源容量的优化问题存在多个局部最优, 导致改进灰狼算法和人工蜂群算法易陷入局部最优而无法跳出, 因其不像自适应蚁群算法那样可以充分利用历史信息, 指导搜索机制。故而本文所述方法对风光柴储这类混合发电系统容量的优化更具优势和普适性。

另外, 因问题的解空间复杂多模, 故不适合仅通过个体群体的竞争来求解。相比而言, 自适应蚁群算法的信息素机制更适合这类问题, 因问题可能不存在一个明确的最优搜索方向。而改进灰狼算法和人工蜂群算法则更依赖于朝显著的最优方向集中搜索。综上所述, 自适应蚁群算法能够较好地平衡全局寻优能力与收敛速度, 满足微电网系统容量最佳配置与较高经济性的需求。

5 结语

本文主要针对混合发电系统的容量配置优化, 特别针对珠海市外伶仃岛丰富的可再生能源特点进行了深入研究, 并基于其特点为混合发电系统选定了合适的分布式电源类型。同时为确保系统的经济性, 也为混合发电系统选择了最佳的能量运行策略。

为解决微电网系统中的供电可靠性与经济性问题, 引入了自适应蚁群算法。与传统的蚁群算法相比, 该算法具有可动态更新信息素的策略, 能更好地克服局部最优问题并提高收敛速度。该算法在迭代前、后期均展现出了卓越的搜索能力。

结合各分布式电源的特性及供需平衡, 构建了一个多目标优化模型, 优化目标为最小化年均化系统成本。通过应用自适应蚁群算法, 成功获得了混合发电系统的最佳容量配置, 保证了其可靠、经济的运行。

尽管本文只进行了初步的理论分析与仿真, 但取得的成果展现出了明显应用潜力, 可为实际应用提供有力的理论支持。未来, 将进一步完善算法效率和系统约束, 以适应实际系统需求。

参考文献:

- [1] 赵静艺. 基于果蝇优化算法的混合发电系统最优容量配置 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.

ZHAO J Y. Optimal capacity allocation of hybrid power

- systems based on drosophila optimization algorithm[D]. Changsha: Hunan University, 2015 (in Chinese).
- [2] 吴瑞鹏, 张程翔. 基于混合储能的风光储联合发电系统优化研究 [J]. *应用能源技术*, 2022(3): 47–51.
WU R P, ZHANG C X. Research on optimization of wind-solar-storage hybrid generation systems based on hybrid energy storage[J]. *Applied Energy Technology*, 2022(3): 47–51 (in Chinese).
- [3] 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 Y Y, WU J, WANG B, et al. Sizing optimization of hybrid generation system based on improved grey wolf optimization[J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2021, 49(6): 775–781 (in Chinese).
- [4] 张栋华, 李征, 蔡旭. 基于量子行为粒子群算法的微电网优化配置 [J]. *计算机仿真*, 2014, 31(8): 120–124, 208.
ZHANG D H, LI Z, CAI X. Micro-grid optimization allocation problem based on quantum-behaved particle swarm optimization[J]. *Computer Simulation*, 2014, 31(8): 120–124, 208 (in Chinese).
- [5] 刘慧文, 王生铁, 刘广忱, 等. 风光柴储微电网容量优化配置的运行策略 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(9): 453–460.
LIU H W, WANG S T, LIU G C, et al. Operation strategy of optimal capacity configuration for microgrid with WT-PV-DE-BES[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2022, 43(9): 453–460 (in Chinese).
- [6] 潘晗. 自适应推荐机制的多蚁群算法及应用研究 [D]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.
PAN H. The application and research of multi-colony ant colony algorithm based on adaptive recommendation mechanism[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2021 (in Chinese).
- [7] 汪宇航, 李琰, 应飞祥, 等. 计及可靠性成本的风光储微电网储能容量协同优化 [J]. *电测与仪表*, 2023, 60(5): 59–65.
WANG Y H, LI Y, YING F X, et al. Collaborative optimization for energy storage capacity of wind-solar-battery micro-grid considering reliability cost[J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2023, 60(5): 59–65 (in Chinese).
- [8] 刘玉城, 王宁. 基于滑模优化与神经控制的船载风力发电系统最大功率跟踪方法 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(增刊1): 122–128.
LIU Y C, WANG N. Maximum power tracking method of shipborne wind power generation system based on sliding mode optimization and neural control[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(Supp 1): 122–128 (in Chinese).
- [9] KUMAR R, GUPTA R A, BANSAL A K. Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy system using biogeography based optimization algorithm[J]. *Swarm & Evolutionary Computation*, 2013, 8: 33–43.
- [10] 许明乐, 游晓明, 刘升. 基于统计分析的自适应蚁群算法及应用 [J]. *计算机应用与软件*, 2017, 34(7): 204–211.
XU M L, YOU X M, LIU S. Self-adaptive ant colony algorithm based on statistical analysis and its application [J]. *Computer Applications and Software*, 2017, 34(7): 204–211 (in Chinese).
- [11] 陈辉, 李维波, 孙万峰, 等. 基于优化功率分配的光伏混合储能系统能量管理策略 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(2): 168–175.
CHEN H, LI W B, SUN W F, et al. Energy management strategy of photovoltaic hybrid energy storage system based on optimal power distribution[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(2): 168–175 (in both Chinese and English).
- [12] 方斯顿, 王鸿东, 张军军. 船舶大容量储能系统应用研究综述 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(6): 22–35.
FANG S D, WANG H D, ZHANG J J. A review of shipboard large-scale energy storage systems[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(6): 22–35 (in Chinese).
- [13] 马艺玮. 独立微电网分布式电源优化配置与协调控制 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
MA Y W. Optimal sizing and coordinated control of distributed generation units in islanded microgrid[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [14] 刘艳平. 风光储混合发电系统容量优化及协调控制方法 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
LIU Y P. Optimal sizing and coordination control of hybrid wind/PV/storage power system[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014 (in Chinese).
- [15] 侯慧, 甘铭, 吴细秀, 等. 混合动力船舶能量管理研究综述 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(5): 216–229.
HOU H, GAN M, WU X X, et al. Review of hybrid ship energy management[J]. *Chinese Ship Research*, 2021, 16(5): 216–229 (in Chinese).
- [16] 徐亮, 郭力峰, 李玮, 等. 船舶电站容量与机组配置的辅助设计软件 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(6): 66–71.
XU L, GUO L F, LI W, et al. Ship power capacity and unit configuration aided design software[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(6): 66–71 (in Chinese).
- [17] 朱丽. 风光柴蓄混合发电系统的协调控制策略研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
ZHU L. Research on control system of wind-solar-diesel-Battery hybrid power generation[D]. Changsha: Hunan University, 2013 (in Chinese).
- [18] 张金标, 陈科. 并行设计任务调度的自适应蚁群算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2010, 22(6): 1070–1074.
ZHANG J B, CHEN K. An adaptive ant colony algorithm for concurrent design task planning problem[J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2010, 22(6): 1070–1074 (in Chinese).