

# 基于抗冠状病毒优化算法的微电网优化调度

黄荣杰<sup>1</sup>, 林航<sup>1</sup>, 张翼<sup>1</sup>, 阮仲体<sup>2</sup>, 林金阳<sup>1</sup>

(1. 福建理工大学 微电子技术研究中心, 福建 福州 350118;

2. 福建省大数据挖掘与应用技术重点实验室, 福建 福州 350118)

**摘要:** 为提高风光储微电网系统的经济性, 以系统运行成本最低为目标, 在满足微电网安全经济运行的多重约束条件下, 建立了一种新的并网优化调度模型。采用抗冠状病毒优化算法(anti-coronavirus optimization algorithm, ACVO)对该模型进行求解, 得到了光伏机组、风力机组、蓄电池及上级电网的最优出力结果。与粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)和灰狼算法(grey wolf optimization, GWO)对比, ACVO算法使系统日运行成本分别降低了1.45%和4.50%。算例分析验证了所提模型的可行性, 并表明ACVO算法在风光储能系统优化调度中表现出优越的全局搜索能力以及更快的收敛速度, 为实现清洁、可持续能源供应提供了更为可行和高效的解决方案。

**关键词:** 风光储微电网; 优化调度模型; 抗冠状病毒优化算法; 算例分析

中图分类号: TM71

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)03-0283-09

## Optimization of microgrid scheduling based on anti-coronavirus optimization algorithm

HUANG Rongjie<sup>1</sup>, LIN Hang<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, TRONG The Nguyen<sup>2</sup>, LIN Jinyang<sup>1</sup>

(1. Research Center for Microelectronics Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Big Data Mining and Applications, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** In order to improve the economy of the wind-solar-storage microgrid system, a new grid-connected optimal scheduling model is established to minimize the operating cost of the system and meet the multiple constraints of the safe and economic operation of the microgrid. The anti-coronavirus optimization algorithm (ACVO) is used to solve the model, yielding the optimal output for photovoltaic units, wind turbines, batteries, and the main grid. Comparative results with the particle swarm optimization (PSO) and grey wolf optimization (GWO) algorithms show that the ACVO algorithm reduces the daily operating costs by 1.45% and 4.50%, respectively. Case study analysis verifies the feasibility of the proposed model and demonstrates that the ACVO algorithm exhibits superior global search capability and faster convergence speed in the optimization scheduling of wind-solar-storage systems, providing a more feasible and efficient solution for achieving clean and sustainable energy supply.

**Keywords:** wind-solar-storage microgrid; optimization scheduling model; ACVO; case study analysis

风能和太阳能因其资源丰富及清洁可再生等特点近年来得到了广泛的利用。其中风光储能微电网系统利用可再生能源发电供电, 能够充分吸

收消纳可再生能源, 减少环境污染<sup>[1]</sup>。但风能和太阳能等发电形式的间歇性、分散性和不确定性等特点也给微电网系统的安全稳定带来了考

收稿日期: 2024-05-20

基金项目: 福建省自然科学基金面上资助项目(2022J05197); 福建理工大学科技发展基金专项(GY-Z23086); 技术开发横向项目(GY-H-24109)

第一作者简介: 黄荣杰(1999—), 男, 江西九江人, 硕士研究生, 研究方向: 微电网优化调度。

通信作者: 林金阳(1981—), 男, 福建莆田人, 副教授, 博士, 研究方向: 光伏故障诊断、微电网优化等。

验<sup>[2]</sup>。在这一背景下,通过优化调度策略可以更加有效地提高可再生能源的利用率、降低运行成本,同时提升系统的可靠性和稳定性。

近年来,国内外众多学者针对常见的智能优化算法如麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)、灰狼算法(grey wolf optimization, GWO)、鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)等进行改进并构建调度模型对微电网优化调度开展研究。文献[3]将利用折射反向学习机制等策略改进后的麻雀搜索算法用于求解并网型微电网中的容量配比。文献[4]在风光互补发电系统中引入可控负荷以优化储能调度策略,并采用遗传算法求解。文献[5]在考虑电力市场环境的基础上构建了风光储联合优化运行决策模型,以利润最大化为目标分析联合运行的经济效益问题。文献[6]建立了以年均系统成本最小化为目标的混合发电系统容量优化配置模型,利用改进灰狼算法求解。文献[7]针对微网群稳定运行以及运行成本最小化等问题,采用基于 Tent 映射与柯西变异的改进蝙蝠算法进行能量优化。文献[8]首次提出了可削减负荷补偿代价模型,有效减少投资成本。文献[9]提出了风光储能系统的两阶段分布鲁棒优化调度模型,并引入了阶梯型碳交易。而为解决大规模风电和太阳能并网对电网安全稳定运行的影响,文献[10]考虑了多功率约束,提出了互补系统波动率最小化调度模型,并运用天牛须算法(beetle antennae search algorithm, BAS)求解。

以上文献主要侧重于容量优化配置和系统经济性方面,关于处理弃风弃光和削负荷情况的讨论较为有限。本研究综合考虑弃风弃光和削负荷的成本问题,提出了一种新的优化调度模型,旨在最小化系统的总运行成本,同时满足功率平衡等约束条件,以确定微电网中各微源的输出结果。本研究结合实际的风光负荷数据和分时电价,采用抗冠状病毒优化算法(anti-coronavirus optimization algorithm, ACVO)对模型进行求解。

## 1 风光储能系统数学模型

本研究的优化调度模型是基于由光伏组件、风力发电机和蓄电池构成的微电网。

### 1.1 光伏阵列模型

光伏阵列的输出功率与其标准测试条件下的输出功率、光照强度、工作温度等因素有关,如式

(1)所示<sup>[11]</sup>。

$$P_{pv} = P_b \times \frac{G}{G_b} (1 + k \cdot (T - T_b)) \quad (1)$$

式中, $P_{pv}$ 为光伏阵列输出功率; $P_b$ 为光伏阵列标准测试条件下的标称输出功率; $G$ 为太阳辐照度; $G_b$ 为标准条件下的太阳辐照度; $k$ 为温度系数,通常取 $-0.004 \text{ 7/}^\circ\text{C}$ ; $T_b$ 为标准条件下的温度,通常为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $T$ 为光伏组件工作温度,如式(2)所示。

$$T = T_c + 30 \times \frac{G}{G_b} \quad (2)$$

式中, $T_c$ 为环境温度。

### 1.2 风力发电机模型

将风速等数据作为输入,可根据数学模型预测出风电机组的输出功率,如式(3)所示<sup>[12]</sup>。

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \rho A C v^3 \quad (3)$$

式中, $P_{wt}$ 为风机输出功率; $\rho$ 为空气密度,取 $1.2 \text{ kg/m}^3$ ; $A$ 为转动面积; $C$ 为功率系数,一般取 $0.45$ ; $v$ 为风速。

### 1.3 蓄电池模型

蓄电池荷电状态(state of charge, SOC)能反映蓄电池剩余容量相对于总容量的百分比。当系统输出功率大于负荷时,蓄电池充电;反之,蓄电池放电<sup>[13]</sup>。SOC的表达式为:

$$\text{SOC}(t+1) = \begin{cases} \text{SOC}(t) + P_{\text{bat}}(t) \cdot \eta_c \\ \text{SOC}(t) - P_{\text{bat}}(t) \cdot \eta_r \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\text{SOC}(t+1)$ 和 $\text{SOC}(t)$ 分别为 $t+1$ 和 $t$ 时刻的蓄电池荷电状态; $\eta_c$ 和 $\eta_r$ 为充、放电效率; $P_{\text{bat}}(t)$ 为 $t$ 时刻的充(放)电功率。

## 2 优化调度模型

### 2.1 目标函数

微电网系统在实际运行中会产生运行成本,包括与上级电网交互成本、维护成本、弃风弃光及削负荷成本等,本研究以运行成本最小化为目标函数。

与上级电网交互成本 $C_1$ 的计算如式(5)所示。

$$C_1 = \begin{cases} \sum_{t=1}^{24} P_{\text{grid}}(t) C'(t), P_{\text{grid}}(t) \leq 0 \\ \sum_{t=1}^{24} P_{\text{grid}}(t) C''(t), P_{\text{grid}}(t) > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $t$ 表示当前时刻; $P_{\text{grid}}(t)$ 为与上级电网交互

功率,  $P_{\text{grid}}(t) \leq 0$  时向上级电网购电,  $P_{\text{grid}}(t) > 0$  时向上级电网售电;  $C'(t)$  为购电价格,  $C''(t)$  为售电价格。

维护成本  $C_2$  的计算如式(6)所示。

$$C_2 = \sum_{i=1}^{24} \sum_{i=1}^N [k_i \cdot |P_i(t)|] \quad (6)$$

式中,  $i$  为机组编号,  $k_i$  为机组  $i$  的维护系数;  $N$  为机组数量;  $P_i(t)$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的输出功率。

为了保证上级电网的安全稳定运行,对系统与上级电网的交互功率设置了合理的范围。在风能和光伏发电超过负荷需求且蓄电池充电量及向上级电网售电量均达到最大值时,进行弃风弃光操作;当系统中各电源及向上级电网购电量无法满足负荷需求时则进行削负荷操作。由此产生的弃风弃光和削负荷成本  $C_3$  的计算如式(7)所示。

$$C_3 = \sum_{t=1}^{24} [P_{\text{qi}}(t) \cdot C_{\text{qi}} + P_{\text{xue}}(t) \cdot C_{\text{xue}}] \quad (7)$$

式中,  $P_{\text{qi}}(t)$  为  $t$  时刻的弃风弃光功率;  $C_{\text{qi}}$  为单位弃风弃光成本;  $P_{\text{xue}}(t)$  为  $t$  时刻的削负荷功率;  $C_{\text{xue}}$  为单位削负荷成本。

因此,目标函数可表示为:

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (8)$$

式中,  $C$  为系统运行成本。

## 2.2 约束条件

在任一  $t$  时刻系统的发电量与负荷量相等。功率平衡约束如式(9)所示。

$$P_{\text{load}}(t) = P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{wt}}(t) + P_{\text{bat}}(t) + P_{\text{grid}}(t) \quad (9)$$

式中,  $P_{\text{load}}(t)$ 、 $P_{\text{pv}}(t)$ 、 $P_{\text{wt}}(t)$ 、 $P_{\text{bat}}(t)$  和  $P_{\text{grid}}(t)$  分别为  $t$  时刻的负荷量、光伏发电功率、风机发电功率、储能电池功率及购售电功率。

光伏功率约束如式(10)所示。

$$P_{\text{pv}}(t)_{\min} \leq P_{\text{pv}}(t) \leq P_{\text{pv}}(t)_{\max} \quad (10)$$

式中,  $P_{\text{pv}}(t)_{\min}$  和  $P_{\text{pv}}(t)_{\max}$  分别为  $t$  时刻光伏发电功率的最小值和最大值。

风力功率约束如式(11)所示。

$$P_{\text{wt}}(t)_{\min} \leq P_{\text{wt}}(t) \leq P_{\text{wt}}(t)_{\max} \quad (11)$$

式中,  $P_{\text{wt}}(t)_{\min}$  和  $P_{\text{wt}}(t)_{\max}$  分别为  $t$  时刻风机功率的最小值和最大值。

储能电池功率约束如式(12)所示。

$$P_{\text{bat}}(t)_{\min} \leq P_{\text{bat}}(t) \leq P_{\text{bat}}(t)_{\max} \quad (12)$$

式中,  $P_{\text{bat}}(t)_{\min}$  和  $P_{\text{bat}}(t)_{\max}$  分别为  $t$  时刻储能电池功率的最小值和最大值。

购售电功率约束如式(13)所示。

$$P_{\text{grid}}(t)_{\min} \leq P_{\text{grid}}(t) \leq P_{\text{grid}}(t)_{\max} \quad (13)$$

式中,  $P_{\text{grid}}(t)_{\min}$  和  $P_{\text{grid}}(t)_{\max}$  分别为  $t$  时刻系统与上级电网交互功率的最小值和最大值。

为提高储能电池的使用寿命,应最大限度避免过度充放电, SOC 应满足如式(14)所示的约束。

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\max} \quad (14)$$

式中,  $\text{SOC}_{\min}$  和  $\text{SOC}_{\max}$  分别为当前储存的电量占其总容量的最小比值和最大比值。

## 3 抗冠状病毒优化算法

抗冠状病毒优化算法(ACVO)<sup>[14]</sup>借鉴了免疫系统的原理,以在复杂且动态的环境中寻找最佳解决方案。算法处理不确定性的能力和适应性使其成为解决微电网优化调度问题的理想选择。

### 3.1 算法原理

ACVO 算法从参数初始化开始工作,使用社交距离、隔离疑似人员和隔离确诊人员 3 种操作来更新种群。若满足终止条件,算法将停止;否则继续进行总体更新过程。

#### 3.1.1 初始化

初始化是指种群在解空间  $Q$  中随机分配,定义为:

$$Q = [Q_1, Q_2, \dots, Q_N] \quad (15)$$

式中,  $N$  为总人口数;种群中的每个解  $Q_i \in Q$  被称为 1 个人,表示多维空间中的 1 个点,被编码为 1 组实值变量和 1 个表示健康状况的整数变量,如式(16)所示。

$$Q_i = [Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{in}, z] \quad (16)$$

式中,  $Q_{in}$  包括第  $n$  个变量的可能值;  $z$  表示人的健康状态,其定义为:

$$z = \begin{cases} 1, & Q_i \text{ 是健康人员} \\ 0, & Q_i \text{ 是疑似人员} \\ -1, & Q_i \text{ 是确诊人员} \end{cases} \quad (17)$$

此外,每个变量  $Q_{in}$  初始化如式(18)所示。

$$Q_{in} = (Q_{\max,n} - Q_{\min,n}) \times b + Q_{\min,n} \quad (18)$$

式中,  $b \in [0, 1]$  为均匀分布随机数;  $Q_{\min,n}$  和  $Q_{\max,n}$  分别为第  $n$  维  $Q_i$  的下界和上界。

在 ACVO 中,适应度函数赋予健康个体更高的适应度,而赋予弱个体和受感染个体的适应度更低。

### 3.1.2 保持社交距离

在每次迭代中选择  $g$  个人参与社交距离操作以减少人际接触,算法引导种群走向最优个体。位置更新公式为:

$$Q_i^{t+1} = Q_i^t + \Delta_1^t + \Delta_2^t \quad (19)$$

式中,  $Q_i^t$  表示第  $i$  个人的位置,  $t$  为当前迭代次数;  $\Delta_1$  控制  $Q_i$  与其他个体之间的局部距离,  $\Delta_1$  定义为:

$$\Delta_1^t = \alpha_{in}^t \times z d_{in}^t \times W(-1, 1) \quad (20)$$

式中,  $W(-1, 1)$  是生成 +1 或 -1 的均匀随机数生成器;  $z d_{in}^t$  表示个体之间应保持的最小物理距离。其中  $z d_{in}^t$  定义为:

$$z d_{in}^t = \begin{cases} \Delta - d_{in}^t, & d_{in}^t < \Delta \\ d_{in}^t, & d_{in}^t \geq \Delta \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $d_{in}^t$  表示  $Q_i$  和  $Q_n$  之间的当前距离;  $\Delta$  是设定的安全物理距离,可灵活设置。

$\alpha_{in}^t$  为  $Q_n$  对  $Q_i$  的感染效应,定义为:

$$\alpha_{in}^t = e^{-(d_{in}^t/\Delta)} \quad (22)$$

$\Delta_2$  控制  $Q_i$  与最佳个体  $Q^*$  之间的全局距离,定义为:

$$\Delta_2^t = \lambda_{in}^t \times H \times (Q^* - Q_i^t) \quad (23)$$

式中,  $\lambda_{in}^t$  为  $Q^*$  对  $Q_i$  的感染效应。  $H$  是步长,它可以调整  $Q_i$  向  $Q^*$  的移动量。根据 Levy 分布计算  $H$ ,如式(24)所示<sup>[15]</sup>。

$$H = \frac{\mu \Gamma(\mu) \sin\left(\frac{\pi \times \mu}{2}\right)}{\pi} \cdot \frac{1}{j^{1+\mu}}, j \geq j_0 > 0 \text{ 且 } j_0 = 0.1 \quad (24)$$

式中,  $\Gamma(\mu)$  表示标准伽马分布,  $\mu$  设为 1.5。变量  $j$  定义为:

$$j = \frac{M}{|N|^{1/\mu}}, M \sim U(0, \delta^2) \text{ 且 } N \sim U(0, 1) \quad (25)$$

式中,  $M$  和  $N$  为高斯分布;  $U(0, \delta^2)$  表示均值为 0 且方差为  $\delta^2$  的正态分布;  $U(0, 1)$  为标准正态分布。

随着算法的进行,个体间的物理距离增加;因此,个体之间的疾病传播减少,疫情爆发减慢。

### 3.1.3 隔离疑似人员

隔离疑似人员的操作模拟对疑似患者在隔离阶段应采取的行动。为了确定可疑人员,首先根据个体的适应度进行降序排序。选出适应度最低的  $s$  个个体组成隔离名单  $P = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_s\}$ ,以

确定其是否被感染。参数  $s$  定义为:

$$s^t = \lceil \{1 - [1 - (\lambda^t)^2] m^t\} R_0 \rceil \quad (26)$$

式中,  $s^t$  为迭代  $t$  次时的有效繁殖数,它计算了疑似个体的数量。  $m^t$  是参与社交距离策略的人口比例,  $\lambda$  是正常比例。  $R_0$  是基本繁殖数,表示一个初级感染者平均导致的二次感染病例数。若  $s > 1$ ,感染人数将增加;若  $s < 1$ ,感染病例数将减少。为实现  $s < 1$  的目标,算法应随迭代过程增加  $m$  的值,并同时减少  $\lambda$ 。  $m$  和  $\lambda$  的定义分别如式(27)(28)。

$$m^t = \frac{t}{T} \quad (27)$$

$$\lambda^t = 1 - \frac{t}{T} \quad (28)$$

算法从每个疑似个体  $Q_i \in P$  中随机选取  $k$  个变量,通过式(29)进行更新。算法以解的维度  $D$  和  $k$  作为输入,在区间  $[1, D]$  上使用离散均匀分布生成  $k$  个伪随机整数。  $k$  的计算如式(29)所示。

$$k = \lceil r_1 \times D \rceil \quad (29)$$

式中,  $r_1$  是一个小的均匀随机数。所选变量更新公式为:

$$q_{ik}^{t+1} = q_{ik}^t + W(-1, 1) \times \text{rand} \quad (30)$$

式中,  $\text{rand}$  为  $[0, 1]$  的随机数。隔离  $s_d$  天后,如果  $Q_i$  的适应度大于或等于第一天的适应度,则  $Q_i$  可以返回种群;否则,必须进一步治疗,如式(31)所示。

$$\begin{cases} Q^{t+1} = \{Q^t\} \cup \{Q_i^t\}, & F_i^{qs} \geq F_i^{qe} \\ I^{t+1} = \{I^t\} \cup \{Q_i^t\}, & \text{其他} \end{cases} \quad (31)$$

式中,  $Q$  表示种群,  $I$  是隔离列表。  $F_i^{qs}$  和  $F_i^{qe}$  分别表示个体在第一天和最后一天的适应度。

### 3.1.4 隔离确诊人员

此操作模拟为治疗隔离  $s_d$  天后确定感染的个体而采取的措施。为了模拟这一过程,算法从每个确诊人员  $Q_i \in I$  中随机选取  $k'$  个变量,并通过式(32)进行更新。  $k'$  的公式为:

$$k' = \lceil r_2 \times D \rceil \quad (32)$$

式中,  $r_2$  是一个均匀的随机数。变量更新公式为:

$$q_{in}^{t+1} = \frac{1}{2} \times [q_{in}^t + (\gamma \times q_n^{*t})] \quad (33)$$

式中,  $q_{in}^t$  和  $q_n^{*t}$  分别表示  $Q_i$  和最优个体在第  $t$  次迭代时的第  $n$  个元素。  $\gamma$  是比例因子,定义为<sup>[16]</sup>:

$$\gamma^o = 1 - \frac{o}{h_d} \quad (34)$$

式中,  $h_d$  为最大隔离时间,  $o$  的取值范围为  $1 \sim h_d$ 。在结束后, 如果个体的适应度大于或等于第一天的适应度, 则认为此人健康并返回种群; 否则, 应继续治疗, 如式 (35) 所示。

$$\begin{cases} Q^{t+1} = \{Q^t\} \cup \{Q_i^t\}, F_i^{he} \geq F_i^{qs} \\ I^{t+1} = \{I^t\} \cup \{Q_i^t\}, \text{其他} \end{cases} \quad (35)$$

式中,  $F_i^{qs}$  和  $F_i^{he}$  分别为  $Q_i$  在隔离第一天及最后一天的适应度。

### 3.1.5 终止

在满足终止条件之前, 采用上述操作更新种群, 直到所有个体的状态均为健康状态或达到终止条件时, 算法终止。

## 3.2 算法流程

本研究采用 ACVO 算法对模型进行求解, 算法包括 8 个具体步骤。

第 1 步: 对算法参数进行初始化, 并输入光伏、风电、负荷等初始数据。

第 2 步: 生成初始种群并计算个体的适应度。

第 3 步: 判断是否满足终止条件, 若满足则跳至第 8 步, 若不满足则跳至第 4 步。

第 4 步: 执行保持社交距离操作。

第 5 步: 执行隔离疑似人员操作。

第 6 步: 执行隔离确诊人员操作。

第 7 步: 判断是否满足终止条件, 若满足则跳至第 8 步; 若不满足则跳至第 3 步。

第 8 步: 输出最终结果。

## 4 算例分析

### 4.1 测试函数集

为了评估算法的可行性, 各算法的参数设置如表 1 所示, 并运用 MATLAB 2022b 软件完成仿真。选取 3 个典型测试函数进行测试,  $F_1$  为单峰基准函数, 不存在局部最大或最小值, 只有一个全局最小值, 算法收敛速度越快就能够更快找到全局最小值,  $F_2$  为多峰基准函数, 具有多个局部极小值和一个全局极小值。  $F_3$  为固定维多峰测试函数, 在特定的维度上有多个局部最小值。  $F_2$  和  $F_3$  函数可以测试算法在搜索过程中跳出局部最优解及全局搜索能力。

表 1 算法参数

Tab.1 Algorithm parameters

算法	参数
GWO	$N=50, r_1, r_2 \in [0, 1]$
SSA	$PD=20\%, R_2=0.8, SD=20\%$
ACVO	$R_0=2.5, \Delta=2, s_d=5, h_d=10, r_1, r_2 \in [0, 0.5]$

各测试函数的具体指标如表 2 所示。

表 2 测试基准函数指标

Tab.2 Test benchmark function indicators

函数	函数表达式	维度	搜索范围	最优值
$F_1$	$f(x) = \sum_{i=1}^n ix_i^4 + \text{rand}[0, 1)$	30	$[-1.28, 1.28]$	0
$F_2$	$f(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	30	$[-600, 600]$	0
$F_3$	$f(x) = \sum_{i=1}^{11} \left[ a_i - \frac{x_1(b_i^2 + b_1x_2)^2}{b_i^2 + b_1x_3 + x_4} \right]^2$	4	$[-5, 5]$	0.000 3

为了减少随机性的影响, 将 ACVO、GWO、SSA 3 个算法各运行 15 次后对比测试结果, 如表 3 所示。分别用 Mean、Best 和 Std 表示平均值、最优值和方差, 各函数最好的结果均在表中加粗以标记。图 1 所示为 3 种不同算法针对各测试函数的收敛曲线图。

表 3 测试结果

Tab.3 Test results

函数	算法	Mean	Best	Std
$F_1$	ACVO	<b>9.494 2E-04</b>	<b>9.075 6E-05</b>	<b>3.694 9E-07</b>
	GWO	3.562 5E-03	6.026 1E-04	1.536 2E-05
	SSA	5.794 9E-03	5.794 9E-03	1.026 6E-05
$F_2$	ACVO	<b>4.137 9E-10</b>	<b>0</b>	<b>1.712 2E-18</b>
	GWO	2.284 2E-02	0	4.065 1E-04
	SSA	2.507E-01	1.476 2E-01	9.789 4E-03
$F_3$	ACVO	<b>6.212 7E-04</b>	<b>3.123 4E-04</b>	<b>2.128 3E-08</b>
	GWO	6.462 2E-03	3.719 2E-04	9.209E-05
	SSA	8.809 4E-04	4.740 5E-04	1.105 2E-07

表 4 各微源参数

Tab.4 Parameters of each micro-source

微源	额定功率/ kW	出力上下限/ kW	维护系数/ (元·kWh <sup>-1</sup> )
光伏	50	0/50	0.009 6
风机	60	0/60	0.029 6
蓄电池	25	-25/25	0.004
上级电网	—	-30/30	—

作为储能装置的蓄电池容量设定为 230 kWh,充放电效率均为 90%。为了避免过充过放对电池的损耗,本研究将蓄电池的最小和最大 SOC 分别设定为 10%和 90%<sup>[17]</sup>。

分时电价是根据不同时间段设定的电价策略。当系统出力不足时,可以在电价低廉时购电;当满足负荷需求时,将多余的电量存入蓄电池。在电价较高或负荷较大时,蓄电池可以放电以减少成本。各时间段的购售电价格如表 5 所示<sup>[17]</sup>。

表 5 各时间段购售电价格

Tab.5 Prices of electricity purchased and sold in different time periods

时间段	购电价格/元	售电价格/元
0:00-6:00 23:00-24:00	0.4	0.25
7:00-10:00 16:00-19:00	0.72	0.52
11:00-15:00 20:00-22:00	0.95	0.76

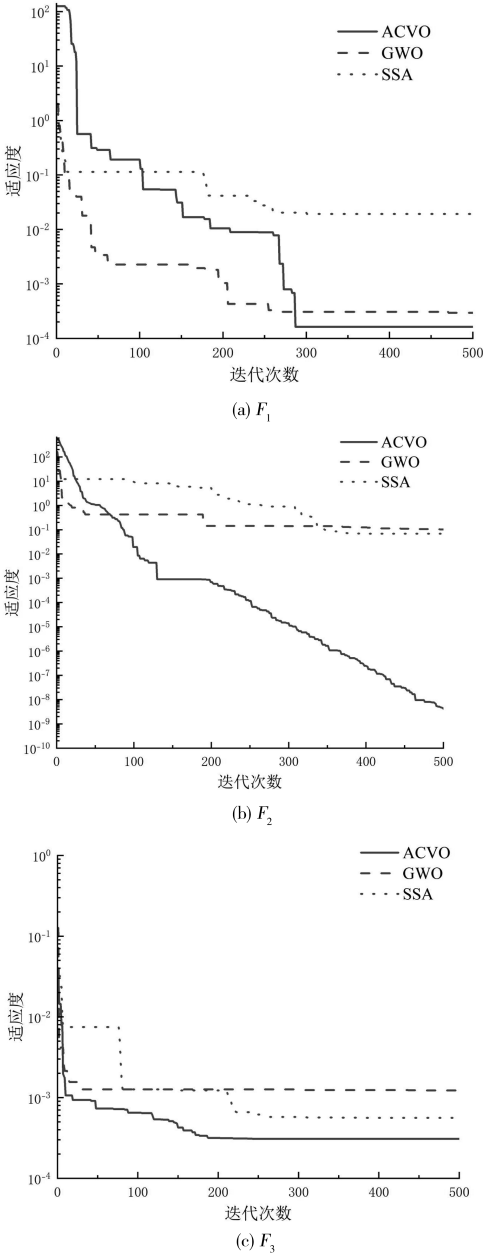


图 1 收敛曲线图

Fig.1 Convergence diagram

由表 3 可知,ACVO 在平均值、最优值及方差方面相对于 GWO、SSA 算法优势明显,表明 ACVO 算法具有更好的全局搜索能力和稳定性。由图 1 收敛曲线也可以进一步看出 ACVO 算法搜索效率更高、收敛质量更好,即算法最终找到的解的质量更高。

4.2 基础参数

本研究建立的并网型风光储微电网的部分参数设置如表 4 所示。

4.3 结果分析

为验证 ACVO 算法的优越性,采用某地典型日的风光负荷数据,对微电网的各分布式电源进行优化调度,调度周期为 1 d,时间间隔为 1h。1 d 内的温度、光照强度及风速等气象数据变化情况如图 2 所示。

根据图 2 中所列的温度、光照强度及风速等数据及前文建立的数学模型可得到光伏、风机的出力。风光负荷数据曲线如图 3 所示。

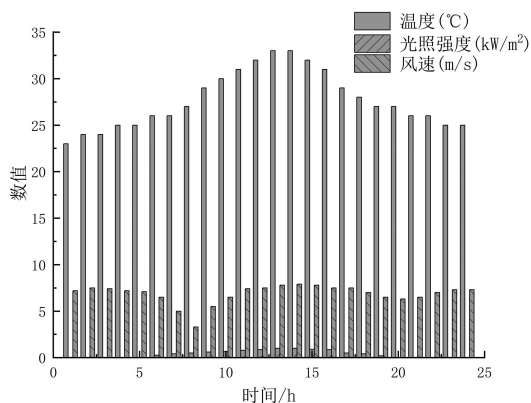


图 2 温度、光照强度及风速变化图

Fig.2 Temperature, light intensity and wind speed variation map

本研究设定要求。

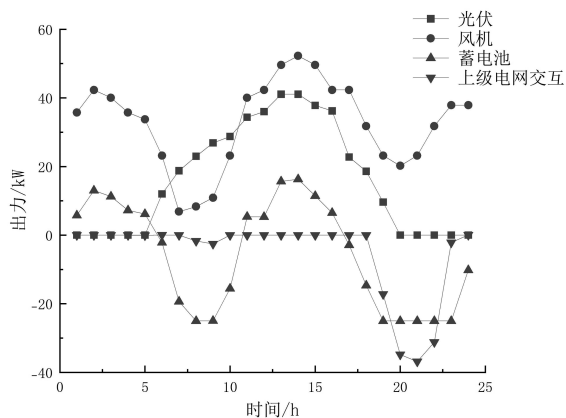


图 4 优化调度结果

Fig.4 Optimal scheduling results

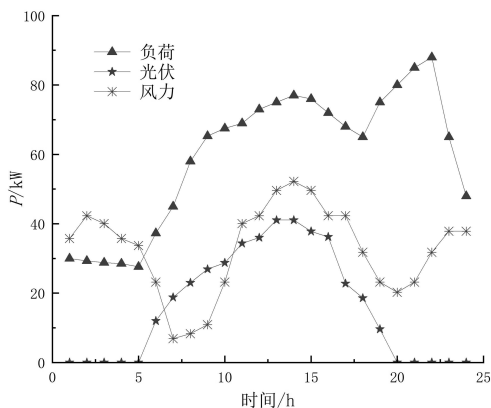


图 3 风光负荷数据变化曲线

Fig.3 Change curve of wind-light load data

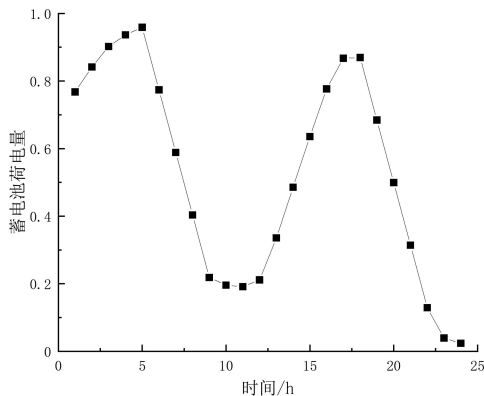


图 5 蓄电池荷电量变化

Fig.5 Change of battery charge

利用 ACVO 算法对模型求解后得到的优化调度结果如图 4 所示。从图 4 可见,0 : 00-5 : 00 时,负荷较低,光伏不出力但风机持续出力,蓄电池在此过程中不断充电,并可将多余的电量进行售卖。5 : 00-10 : 00 时,负荷在不断增加,光伏、风机同时出力,但由于光伏、风机出力较小,蓄电池在该时段不断放电。10 : 00-16 : 00 时,负荷迎来第一个高峰期,光伏、风机同时出力且出力较大,因此蓄电池在此过程中不断吸收多余的电量。16 : 00-19 : 00 时,负荷较之前有所降低,但该时段光伏、风机出力也在降低,因此蓄电池放电。19 : 00-22 : 00 是 1 d 中负荷需求最大的时段,需要购买大量电量。22 : 00-24 : 00 时,蓄电池持续放电以保证其荷电量控制在合理范围内,从而达到延长蓄电池使用寿命的目的。

蓄电池荷电量变化如图 5 所示,由图 5 可见蓄电池的荷电量基本上维持在 10% ~ 90%,符合

为进一步验证 ACVO 算法的优越性,对比其与 GWO、PSO 算法的收敛曲线,如图 6 所示。从图 6 可见,ACVO 算法经过 156 次迭代后即达到了全局最优,相较于 GWO 和 PSO 算法,其收敛速度更快,收敛精度也更高。

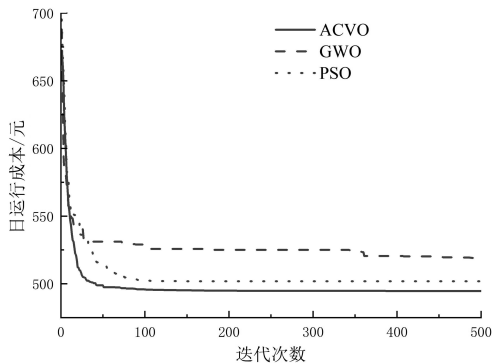


图 6 不同算法收敛曲线图

Fig.6 Convergence curves of different algorithms

表 6 不同算法求解结果

Tab.6 Results of different algorithms

算法	成本 1/ 元	成本 2/ 元	成本 3/ 元	成本 4/ 元	成本 5/ 元	成本 6/ 元	成本 7/ 元	成本 8/ 元	成本 9/ 元	成本 10/ 元	耗时/ s
ACVO	494.842 5	494.833 5	494.533 4	494.857 9	494.807 6	494.550 6	494.837 3	494.821 9	494.998 6	494.852 3	15.36
GWO	517.574 9	520.251 1	516.082 3	519.791 4	517.669 2	515.452 9	516.649 5	519.804 6	517.138 7	519.759 3	20.95
PSO	501.899 1	501.898 6	500.899 2	501.900 1	502.211 3	501.898 6	501.900 1	501.898 7	502.122 3	501.998 6	21.11

表 6 显示了 3 种算法在各运行 10 次后得到的运行成本及总消耗时间。为了减少误差,取 10 次结果的平均值作为最终运行成本。根据表 6 的数据可知,ACVO、PSO 和 GWO 算法的日运行成本分别为 494.693 5、501.962 7、518.017 4 元。与 PSO 和 GWO 相比,ACVO 算法的日运行成本分别降低了 1.45% 和 4.50%。此外,ACVO 算法的总耗时也分别减少了 27.3% 和 26.7%。综上,ACVO 算法在寻优精度和效率方面具有明显优势。

## 5 结论

1) 本研究将抗冠状病毒优化算法 (ACVO)

应用于风光储微电网系统优化调度研究中,构建了一个新的优化调度模型,优化模型不仅以最小化运行成本为目标函数,还同时考虑了功率平衡、各微源出力约束及蓄电池荷电状态 (SOC) 等关键约束条件,确保系统的稳定性与高效运行。

2) 利用 ACVO、PSO 和 GWO 算法对模型进行求解,结果显示,与 PSO 和 GWO 算法相比,ACVO 算法在全局搜索能力及收敛速度方面均表现出更优异的性能,能够更加有效地获得系统日运行成本最小时的各出力源最优出力结果。

## 参考文献:

- [1] 周成伟. 基于风光储微电网下的储能容量优化配置研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2023.
- [2] 李琼慧,叶小宁,胡静,等. 分布式能源规模化发展前景及关键问题[J]. 分布式能源,2020,5(2):1-7.
- [3] 马纪梅,张欣彤,张政林,等. 基于改进麻雀搜索算法的微网容量优化配置[J]. 电子测量技术,2022,45(8):76-82.
- [4] 翁詠,张建华,蔡炯晖,等. 并网型风光互补发电系统储能优化调度研究[J]. 电力设备管理,2021(5):133-135,196.
- [5] 刘佳楠,熊宁,朱文广,等. 电力市场环境风光储联合运行优化策略[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(1):11-15.
- [6] 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.
- [7] 曾志辉,李雪强,尹路路,等. 基于改进蝙蝠算法的微网群能量优化方法[J]. 电子测量技术,2023,46(10):53-60.
- [8] 李东东,徐连连,刘翔,等. 考虑可削减负荷参与的含风光储微网经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(2):35-41.
- [9] 赵毅,王维庆,闫斯哲. 考虑阶梯型碳交易的风光储联合系统分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(6):127-136.
- [10] LI Q H, WANG Z Y, WEI A X. Research on optimal scheduling of wind-PV-hydro-storage power complementary system based on BAS algorithm[C] // Proceedings of the 2nd International Seminar on Computational Intelligence, Engineering and Technology. 2018: 665-670.
- [11] 黎嘉明,郑雪阳,艾小猛,等. 独立海岛微网分布式电源容量优化设计[J]. 电工技术学报,2016,31(10):176-184.
- [12] LIU B X, LUND J R, LIAO S L, et al. Optimal power peak shaving using hydropower to complement wind and solar power uncertainty[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 209: 112628.
- [13] 卢美玲. 家庭光伏发电系统经济效益优化调度模型研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
- [14] EMAMI H. Anti-coronavirus optimization algorithm[J]. Soft Computing, 2022, 26(11): 4991-5023.
- [15] MUTHUPERUMAL PERIYAPERUMAL R, RAMASAMY G, AZEES M, et al. FACVSP0: fractional anti corona virus

student psychology optimization enabled deep residual network and hybrid correlative feature selection for distributed denial-of-service attack detection in cloud using spark architecture[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2022, 36(7): 1647-1669.

- [16] GSRE S, GANESHAN R, JINGLE I D J, et al. FACVO-DNFN: Deep learning-based feature fusion and distributed denial of Service attack detection in cloud computing[J]. Knowledge-Based system, 2023, 261.
- [17] 王汉字. 基于改进麻雀搜索算法的微电网优化调度[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2022, 36(6): 59-63.

(责任编辑: 方素华)

(上接第 219 页)

间距离为 3.1 m 时, 顶管直径对右线隧道内力影响较大。

4) 从顶管直径和距离与邻近盾构隧道最大变形值的关联度分析可发现, 顶管直径与盾构隧道距离的关联度

均大于 0.5, 且顶管直径的敏感度大于距离, 实际顶管工程中应首先考虑顶管直径大小对临近既有盾构隧道的影响。

## 参考文献:

- [1] 黄建华, 鲍锋, 王蕴晨, 等. 并行差异断面顶管施工对地表变形的影响[J]. 地质科技通报, 2021, 40(6): 185-192.
- [2] 安关峰, 王谭, 司海峰, 等. 施工顺序及不同管材对双层顶管隧道施工引起地表沉降的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 119-126.
- [3] 刘刚, 孙逸文, 冯成军. 大直径顶管施工对既有地铁区间隧道的影响分析[J]. 特种结构, 2020, 37(6): 60-65.
- [4] REN D J, XU Y S, SHEN J S, et al. Prediction of ground deformation during pipe-jacking considering multiple factors[J]. Applied Sciences, 2018, 8(7): 1051.
- [5] 袁晓玉. 滨海区顶管施工对既有盾构隧道影响研究[D]. 福州: 福建工程学院, 2023.
- [6] LIN X T, CHEN R P, WU H N, et al. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 89: 78-90.
- [7] JIAO N, SUN S, LIU J Y, et al. Analysis of existing railway deformation caused by double shield tunnel construction in soil-rock composite stratum[J]. Energy Reports, 2023, 9: 159-165.
- [8] 韩国良. 顶管施工引起的地面变形问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [9] 焦义, 梁禹, 冯金勇, 等. 多因素影响下顶管施工引起土体变形计算研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 192-199.
- [10] ZANG Y W, GAN P L, YAN J J, et al. Effects of construction sequences and volume loss on perpendicularly crossing tunnels[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 1-12.
- [11] 马险峰, 陈飞, 吴冰, 等. 顶管电缆隧道施工对邻近建筑物和地下管线的扰动影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 9074-9080.

(责任编辑: 陈雯)