

doi: 10.7690/bgzd.2025.02.016

偏远地区混合能源系统优化配置方法

南 钰, 郑 罡, 武亚非

(国网河南省电力公司开封供电公司互联网部, 河南 开封 475000)

摘要: 为降低系统成本并确保可再生能源的充分消纳, 提出偏远地区混合可再生能源系统的优化配置方法。通过应用多种元启发式算法, 包括鹈鹕优化算法 (pelican optimization algorithm, POA), 对偏远地区微电网系统中的光伏、风机、沼气发电机和蓄电池进行最佳配置研究。结果表明: 改进的 POA 在实现优化目标方面优于其他算法, 且在资源利用和成本最小化方面表现突出。

关键词: 混合可再生能源系统; 鹈鹕优化算法; 微电网优化配置; 光伏

中图分类号: TK61 **文献标志码:** A

Method for Optimizing Configuration of Hybrid Energy System in Remote Area

Nan Yu, Zheng Gang, Wu Yafei

(Internet Department, Kaifeng Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Kaifeng 475000, China)

Abstract: In order to reduce the system cost and ensure the full consumption of renewable energy, the optimal allocation method of hybrid renewable energy system in remote areas is proposed. Through the application of a variety of meta-heuristic algorithms, including the pelican optimization algorithm (POA), the optimal configuration of photovoltaic, wind turbine, biogas generator and battery in the microgrid system in remote areas is studied. The results show that the improved POA is superior to other algorithms in achieving the optimization objectives, and is outstanding in resource utilization and cost minimization.

Keywords: hybrid renewable energy system; pelican optimization algorithm; microgrid optimal configuration; photovoltaic

0 引言

随着对化石燃料消耗和温室气体排放的环境意识日益增强^[1], 可再生能源作为一种清洁能源解决方案在全球范围内得到了大力推广。可再生能源对环境的影响相对较小, 也是分布式发电能源的理想选择, 尤其是在能源需求增长的孤立岛屿地区^[2]。

微电网作为一种混合能源系统, 将传统能源与可再生能源相结合^[3]。它们通常被视为可控的子系统, 从本质上是可再生的分布式能源中发电。在可再生能源的研究中, 风能和太阳能的混合使用被广泛提出, 尽管这 2 种能源在时间和地点上存在显著差异^[4]。微电网的设计需要多个复杂的模型制定和多目标优化, 其最终目标是实现单个组件的最优功能和最小成本; 因此, 对混合微电网的最佳可持续技术经济研究受到了研究人员的高度关注^[5]。

在设计混合可再生能源系统时, 面临的主要挑战包括能源供应的不稳定性、操作控制的复杂性以

及各种能源技术固有的局限性^[6]。为了克服这些问题, 需要通过优化配置各个能源组件, 利用它们之间的互补性来增强系统的稳定性和效率。例如, 当风能或太阳能中的一个供应不足时, 另一个可以提供必要的能量补充^[7]。此外, 考虑到微电网在偏远地区的重要性, 以及它们在环境、经济和技术方面的优势, 如零排放、长寿命、低维护需求等, 开发高效的算法来配置这些系统组件变得尤为重要^[8]。

笔者通过应用多种元启发式算法, 包括鹈鹕优化算法 (POA)^[9], 对微电网系统中的光伏、风机、沼气发电机和蓄电池进行了最佳配置的探索。研究的目标是在确保 25 年内可再生能源充分消纳的前提下, 降低系统成本^[10]。通过比较不同算法的性能发现: 改进的 POA 在实现优化目标方面优于其他算法, 特别是在资源利用和成本最小化方面表现突出^[11]。这表明, 通过精心设计的算法, 可以有效地配置混合可再生能源系统, 以实现更高的能源效率 and 经济效益。

收稿日期: 2024-07-13; 修回日期: 2024-08-21

基金项目: 国网河南省电力公司科技项目 (521790220001)

第一作者: 南 钰 (1990—), 男, 河南人。

1 方法

本研究旨在实现的最佳结果,是在 25 年的寿命周期内,使混合可再生能源系统的选定组件在安装、维护和运行方面的成本降至最低,同时确保在整个周期内可再生能源的充分消纳。所有计算均以小时为单位进行^[12]。

1.1 系统架构

混合可再生能源系统的构建旨在减少对非可再生能源的依赖,同时促进可再生能源的利用。鉴于可再生能源的供应具有不可预测性,采用多种能源的组合对于确保系统的稳定性至关重要^[13]。与单一能源系统相比,这种多元化的系统设计能够提供更高的可靠性、成本效益和效率。

在本研究中,所分析的混合可再生能源系统由 4 个关键组成部分构成,其中 3 个为可再生能源:光伏(太阳能)、风能和沼气。第 4 个组成部分是蓄电池系统,形成了一个集成光伏、风机、沼气和蓄电池的混合系统。这些系统组件通过电力电子转换器与 400 V 直流母线相连,如图 1 所示。这种架构旨在优化能源的生成、存储和分配,以实现最大的能源利用效率和系统可靠性^[14]。

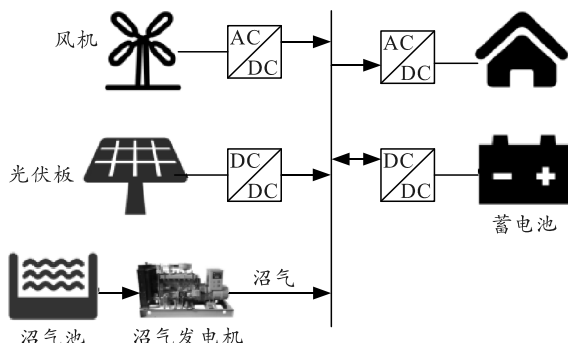


图 1 光伏、风机、沼气和蓄电池混合可再生能源系统

1.2 风机模型

风机利用风的动能来发电,具体输出功率 P_w , W/m^2 取决于该位置的风速 $v(t)$, 表示为:

$$\left. \begin{aligned} P_w(t) &= 0 & v(t) < v_{ci} \\ P_w(t) &= av^3(t) - bP & v_{ci} \leq v(t) < v_r \\ P_w(t) &= P_r & v_r \leq v(t) < v_{co} \\ P_w(t) &= 0 & v(t) \geq v_{co} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: P_r 为风机的额定功率, $a = P_r / (v_r^3 - v_{ci}^3)$, $b = v_{ci}^3 / (v_r^3 - v_{ci}^3)$; v_r 为风机的额定速度; v_{ci} 为风机的切入速度; v_{co} 为风机的切出速度。在风机给定高度处的风速为:

$$v_h = v_r (h/h_r)^\alpha \quad (2)$$

式中: h 为参考高度(约 33 m); 对于本研究的指数项, 取 $\alpha=0.15$ ^[15]。

从风机获得的实际发电量表示为:

$$P_{WG} = P_w A_{WG} \eta_{WG} \quad (3)$$

式中: A_{WG} 为风机总扫面积; η_{WG} 为风机的效率。

1.3 光伏组件模型

除了太阳辐射, 光伏的发电还受到环境温度和辐照条件等因素的影响, 这些特性因组件而异。任意时刻光伏的输出功率由下式确定:

$$\begin{aligned} P_{PV}(t, \beta) &= N_s \cdot N_p \cdot V_{oc}(t, \beta) \cdot FF(t); \\ V_{oc}(t, \beta) &= \{V_{oc-STC} - K_V T_C(t)\}; \\ I_{sc}(t, \beta) &= \{I_{sc-STC} + K_I [T_C(t) - 25]\} \frac{G(t, \beta)}{1000}; \\ T_C(t) &= T_A + (NOCT - 20) \frac{G(t, \beta)}{1000}. \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $P_{PV}(t, \beta)$ 为在考虑倾斜角度为 β 的情况下, 光伏(PV)阵列在第 t 小时的输出; V_{oc} 为 PV 的开路电压; I_{sc} 为 PV 的短路电流; FF 为填充因子; K_V 为开路电压的温度系数; K_I 为短路电流的温度系数; G 为 PV 组件上的太阳总辐照度; T_A 为环境温度; $NOCT$ 为电池标称工作温度。

太阳辐照度的计算方法如下

$$G/D = \begin{cases} 1.0 - 0.09K_T & 0 < K_T < 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604K_T + 4.388K_T^2 - \\ 16.63K_T^3 + 12.33K_T^4 & 0.22 < K_T \leq 0.8 \\ 0.065 & K_T > 0.8 \end{cases} \quad (5)$$

式中 K_T 为小时清除指数, 是倾斜光伏模块的光束(G)和漫射(D)分量之间的比值。

从图 2 可以推导出表示任意时刻斜面上光束辐射与水平面上光束辐射之比的几何因子 R_b 。

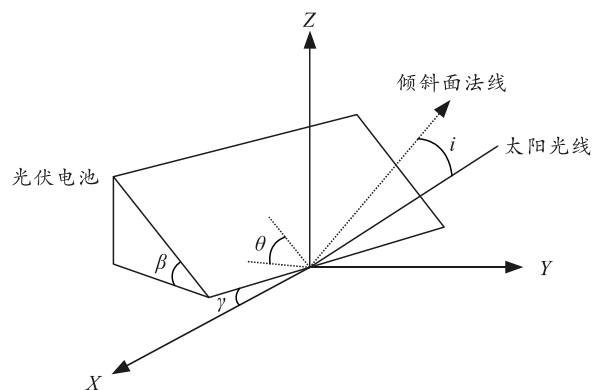


图 2 倾斜光伏板与太阳之间的角度

$$R_b = \frac{\cos(\varphi + \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\varphi + \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta} \quad (6)$$

式中： φ 为安装位置的纬度； β 为 PV 组件的倾角； ω 为时角，表示太阳的角位移量； δ 为赤纬角，代表太阳在中午时相对于赤道的位置。赤纬角如下式：

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (7)$$

式中 n 为一年中某一天。考虑 PV 的倾角，每小时总辐射可由下式求得：

$$G(t, \beta) = (G - D)R_b + D \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + G \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (8)$$

式中 ρ_g 为地面反射率。PV 发电机组的总输出功率可由下式确定：

$$P_{\text{array}(t, \beta)} = \eta_{\text{PV}} N_S N_P P_{\text{PV}}(t, \beta) \quad (9)$$

1.4 沼气发电机模型

厌氧消化是一种有价值的废物管理过程，它利用微生物分解可生物降解的材料，产生可作为可持续能源利用的沼气，是偏远地区可再生能源的一个典型代表。沼气发电机是一种利用沼气作为燃料进行发电的设备，当沼气进入沼气发电机后，在沼气内燃机中燃烧，产生高温高压的燃气，然后推动活塞运动，通过连杆带动曲轴旋转，从而驱动发电机产生电力。沼气发电机模型的输出功率由以下公式确定：

$$\text{Gas}_{\text{produced}} = \text{Foodwaste} * \text{Gas}_{\text{productionrate}} \quad (10)$$

$$P_{\text{Biogas}} = (V_{\text{Bio}} * \text{Cal}_{\text{Bio}} * \eta_{\text{Bio}}) / 860 \quad (11)$$

式中： V_{Bio} 为供给沼气发动机的沼气体积； Cal_{Bio} 为沼气热值； η_{Bio} 为沼气发动机效率； P_{Biogas} 为沼气发动机产生的功率。

1.5 储能电池模型

可再生能源是间歇性的，给发电带来了不确定性。为了确保稳定可靠的电力供应系统，必须有一个储能系统，可以储存多余的能量并根据需要释放。电池的充电或放电状态可以通过瞬时充电安全状态来确定^[16]。下列公式可以用来确定在任何给定时间的充电安全状态。

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{bat}}^*(t) &= (P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WG}}(t) - P_{\text{Load}}(t)) / V_{\text{bat}}(t) \\ \text{SOC}(t) &= \text{SOC}(t-1) \cdot (1 - \sigma \cdot \Delta t / 24) + \\ &\quad I_{\text{bat}}(t) \cdot \Delta t \cdot \eta_{\text{bat}} / C_{\text{bat}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中： σ 为电池的自放电率， σ 依赖于累积电荷，在本研究中假设其值为 0.2%。此外，充电效率固定为 0.8，而放电效率设置为 1。 I_{bat} 为电池电流； C_{bat} 为电池标称容量； η_{bat} 为充电效率； $I_{\text{bat}}(t)$ 为并入电池产生； $P_{\text{Load}}(t)$ 为第 t^{th} 小时的负载需求。

串联和关联电池如图 3 所示。

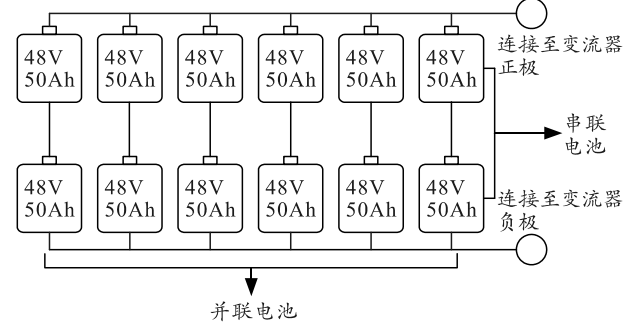


图 3 串联和并联电池

电池的充电状态 (state of charge, SOC) 对于维持系统内的最佳能量平衡至关重要，借助下述公式建立电池模型。

$$\left. \begin{aligned} N_{\text{bat}} &= N_{S_{\text{bat}}} \times N_{P_{\text{bat}}} \\ N_{S_{\text{bat}}} &= V_{\text{BUS}} / V_{\text{bat}} \\ C_n &= N_{P_{\text{bat}}} \times C_{\text{bat}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

电池蓄系统的总电量 (C_n) 由电池的标称电量和并联连接的电池数量 ($N_{P_{\text{bat}}}$) 决定。串联电池的数量 ($N_{S_{\text{bat}}}$) 取决于直流母线电压 (V_{BUS})，可以从方程中计算出来。为了保证电池的寿命，引入最大充电量和最大、最小充放电容量的概念，使用以下公式进行计算。

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{max}} &= C_n \times V_{\text{bat}} / 1000 \\ E_{\text{cap}_{\text{max}}}(t) &= (\text{SOC}_{\text{max}} - \text{SOC}(t)) \times E_{\text{max}} \\ E_{\text{cap}_{\text{min}}}(t) &= (\text{SOC}(t) - \text{SOC}_{\text{min}}) \times E_{\text{max}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2 目标函数公式

本研究旨在通过优化混合可再生能源系统的配置，实现成本最小化和供电损失率的最小化。通过构建一个目标函数，将供电损失概率与经济成本相结合，以确保在几乎不发生供电损失的前提下，系统成本达到最低。这样，能够在确保高供电可靠性的基础上，进一步优化系统经济性，实现成本效益和可靠性的双重目标。

在本研究中，假设混合可再生能源系统的预期使用寿命为 25 年。在此期间内，考虑了包括光伏、风机和蓄电池在内的所有相关成本。这不仅包括了

这些组件的初始安装成本，还涵盖了整个使用周期内的维护费用。通过这种方式，目标函数综合考虑了系统的经济性和可靠性，以寻找最佳的系统配置。目标函数如下：

$$\begin{aligned} \text{Minimize } f(N_{PV}, N_{WG}, N_{bat}, \beta, h, N_{bio}) = & \\ & [N_{PV}(C_{PV} + 25M_{PV})N_{WG}(C_{WG} + 25M_{WG} + \\ & hC_h + 25hM_h) + N_{bat}(C_{bat} + V_{bat}C_{bat}) + (25 - \\ & Y_{bat} - 1)M_{bat} + N_{bio}(C_{biogenerator} + 25M_{biogenerator}) + \\ & C_{digester} + 25M_{digester}] \end{aligned} \quad (15)$$

约束条件如下：

$$\begin{aligned} N_{WG} > 0; N_{PV} > 0; N_{bat} > 0; \\ N_{bio} > 0; 90^\circ \geq \beta \geq 0; 120 \geq h \geq 40. \end{aligned}$$

式中： N_{PV} 为光伏的数量； N_{WG} 为风机的数量； N_{bat} 为电池的数量； N_{bio} 为沼气发电机的数量； C_{PV} 为光伏的资金成本； C_{WG} 为风机的资金成本； C_{bat} 为蓄电池的资金成本； $C_{biogenerator}$ 为沼气发电机的资金成本； M_{PV} 为光伏的年维护成本； M_{WG} 为风机的年维护成本； M_{bat} 为蓄电池的年维护成本； $M_{biogenerator}$ 为沼气发电机的年维护成本； $M_{digester}$ 为沼气池的年维护成本； C_h 为风机塔单位高度的资金成本； M_h 为风机塔单位高度的年维护成本； V_{bat} 为混合可再生能源系统寿命期内电池预期的更换次数。

优化过程通常从设定初始条件开始，这些条件包括太阳辐射强度、风速、电力负荷需求以及食物浪费等。接下来，需要设定种群规模和算法参数。

然后，会随机生成 N_{PV} 、 N_{WG} 、 N_{bat} 、 β 、 h 和 N_{bio} 等具有定义约束的 6 个解集变量。这些解集变量会被输入到相应的模型中，以计算发电量。

在这个过程中，需要判断发电量是否能够满足需求。如果发电量有剩余，那么这些多余的能量会被储存起来；如果发电量不足，那么不足的部分将由电池来补充。如果出现持续的能量不足，就会记录未满足的能量需求。这种监测会持续一整年，以计算电力供应损失的概率。

如果在一年的时间里，电力供应损失的概率为 0，那么就可以计算适应度函数。这个迭代过程会一直重复，直到达到预设的最大迭代次数。通过这种方式，可以不断优化电力系统的运行，以确保电力供应的稳定性和效率。

3 结果和分析

3.1 算法分析

本研究的主要目标是确定最有效的优化算法，该算法可以在利用有限资源和最小化费用的同时实现最低的最佳成本。较低的最佳成本意味着更好的优化算法^[10]。实验包括鱼鹰优化算法(osprey optimization algorithm, OOA)、斑马优化算法(zebra optimization algorithm, ZOA)、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)和 POA 算法^[17]，进行比较评估，4 种算法的概述如表 1 所示。每一种算法都进行了连续 30 次的独立模拟，这 30 次不同的运行中，每一次都由 300 次迭代组成，种群数量为 150^[18]。

表 1 算法概论

算法名称	理论基础	优点	缺点	代表性公式
OOA	模拟鱼鹰捕食行为，包括盘旋、俯冲和攻击	较强的全局搜索能力；适合处理复杂的优化问题	可能在解空间较大时陷入局部最优	俯冲位置更新： $x_{\text{new}} = x_{\text{current}} - \text{rand} \cdot (x_{\text{current}} - x_{\text{prey}})$
ZOA	模拟斑马群体行为，包括群体动态和信息共享	强调群体合作；适合多峰值问题	对于某些问题可能需要较长时间收敛	群体动态更新： $x_i^{\text{new}} = x_i + \text{rand} \cdot (x_{\text{best}} - x_i)$
PSO	模拟鸟群或鱼群的社会行为，通过个体经验和群体经验指导搜索	快速收敛；适合连续空间优化问题	易受局部最优影响；参数选择对性能影响大	个体位置更新： $x_i^{\text{new}} = x_i + v_i$
POA	模拟鹈鹕捕食行为，包括盘旋、俯冲和吞咽	简单直观，易于实现；对非线性问题适应性强	可能遇到早熟收敛；搜索效率在多维空间可能降低	位置更新： $x_i^{\text{new}} = x_i + \text{rand} \cdot (x_{\text{best}} - x_i)$

从图 4 和表 2 可以看出：POA 算法的最佳成本最低，为 13.01 万元。

表 2 算法性能比较

算法类别	最佳成本/万元	差值/%
OOA	14.85	14.14
ZOA	14.86	14.21
POA	13.01	0
PSO	13.80	6.07

这表明 POA 算法在利用有限资源和最小化费用的情况下，在实现预期的优化目标方面优于其他算法。与其他算法相比，POA 算法在寻找最优解方面表现出更高的效率，从而降低了成本。

3.2 改进 POA 算法

在本研究中，为了进一步提高 POA 的性能，笔

者对原始算法进行了一些关键的改进。改进的目标是增强算法的全局搜索能力和局部搜索精度，以更有效地找到最优解。以下是对 POA 算法进行改进的主要方面。

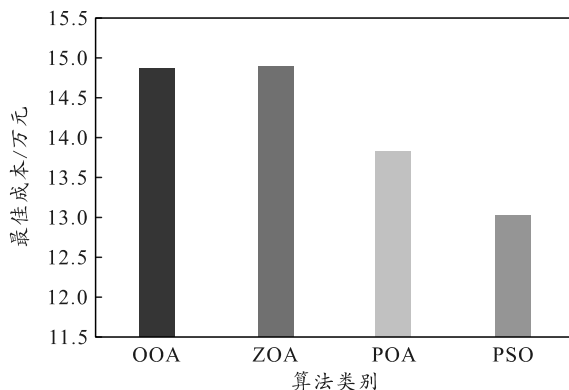


图 4 不同配置算法下的最佳成本对比

3.2.1 Logistic 混沌映射策略

随着 POA 算法的迭代次数的增加，将导致鹌鹑种群的多样性降低，引入 Logistic 混沌映射初始化种群，将能够有效提高初始解的质量，从而增加鹌鹑种群的多样性，进而从整体上提高算法的收敛速度和精度。Logistic 混沌映射的公式为：

$$Y_{n+1}=aY_n(1-Y_n)。(16)$$

式中： $Y_n \in [0, 1]$ ； $a \in [0, 4]$ 。

在 Logistic 混沌映射中，当 a 和 4 越接近时， Y 在 $[0, 1]$ 中越接近于平均分布；当 $a=4$ 时，表现为完全混沌状态，且处于极限的映射分布均匀性状态。

3.2.2 e 指数余弦因子控制策略

POA 通过步长因子 I 控制算法搜索范围。步长因子 I 在每次算法迭代中随机为 1 或 2，这种随机性导致算法稳定性、平衡性不足。为了解决该问题，提出一种基于 e 指数函数与余弦函数的非线性收敛因子，笔者称之为 e 指数余弦因子。表达式如：

$$h=\mu \cdot \exp(\cos(t \cdot \pi / T)-\theta)+\sigma。(17)$$

式中： t 为迭代次数； T 为最大迭代次数； μ 为 1.5； θ 为 0.7； σ 为 0.2。

用 e 指数余弦因子 h 代替随机数 I ，则位置更新公式变为：

$$x_{i,j}=\begin{cases} x_{i,j}+\text{rand} \cdot (p_j-h \cdot x_{i,j}), & F_p < F_i \\ x_{i,j}+\text{rand} \cdot (p_j-h \cdot x_{i,j}), & \text{else} \end{cases}。(18)$$

迭代前期 h 较大，增大全局搜索范围，后期 h 逐渐减小，鹌鹑可以在局部范围精确地搜索最优解。通过 e 指数余弦因子 h 代替因子 I 可以调节算法前

后期的搜索能力，提高算法收敛速度与寻优精度。

3.2.3 算法改进效果对比

为了验证改进后的 POA 算法在混合可再生能源系统优化配置中的有效性^[19]，进行了 3.1 中的实验。所有算法均在相同的初始条件下运行，以确保比较的公正性。结果如图 5 所示。

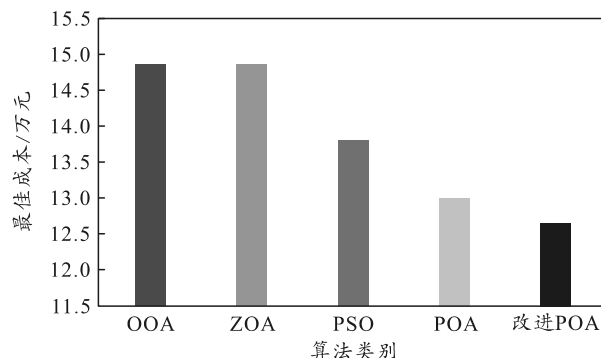


图 5 改进 POA 的最佳成本

改进后的 POA 算法在混合可再生能源系统的优化配置中表现出了显著的性能提升。这些改进不仅提高了算法的收敛速度和解的质量，而且增强了算法的稳定性和鲁棒性，使其成为解决此类优化问题的一个有力工具^[20]。

3.3 混合可再生能源系统的最佳配置

根据计算结果，在表 2 给出了不同算法的最佳混合可再生能源系统组合。表 3 中的配置仅针对 30 次独立运行中获得的最佳成本。

表 3 优化混合可再生能源系统的规模

算法	最佳成本/ 万元	N_{WG} 个数	N_{PV} 个数	N_{bat} 个数	N_{bio} 个数
OOA	14.85	6	10	6	9
ZOA	14.86	12	20	4	8
PSO	13.80	21	18	8	3
POA	13.01	4	32	2	10
改进 POA	12.65	4	32	2	10

通过优化配置，能够显著降低系统的总体成本。改进 POA 算法得到的最佳成本为 12.65 万元，远低于其他算法得到的成本。这表明在最佳配置中，光伏、风机、沼气发电机和蓄电池的组合显示了它们之间的互补性。这种互补性有助于提高系统的整体性能和可靠性，同时也减少了对单一能源的依赖，增加了系统的灵活性和鲁棒性，可以有效地减少系统的成本，提高经济性。

4 结论

笔者专注优化混合可再生能源系统的配置，特别强调了系统组件选择的重要性，这并非一个随机

过程,而是需要基于特定场地条件进行细致考量。通过应用多种元启发式算法,笔者对微电网系统中的光伏、风机、沼气发电机和储能电池进行了最佳配置的探索。

在这些算法中,改进的鹌鹑优化算法表现出了卓越的性能,不仅在实现预定的优化目标上超越了其他所有算法,而且在有限资源的利用和成本最小化方面也显示出了显著的优势。与其他备选算法相比,改进鹌鹑优化算法在快速实现经济效益方面更为出色。通过这种方法,可以期待在未来的研究中实现更高效、更经济、更可靠的混合可再生能源系统配置。

参考文献:

- [1] ELMOUNTASER M, EL-FATIH A B. Optimal sizing of a standalone hybrid renewable energy system for a restaurant in Saudi Arabia[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172(3): 3033–3046.
- [2] KUMAR M, SINGH M. A review of optimization techniques for renewable energy based hybrid systems[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2017, 9(3): 033304.
- [3] 于晓丹. 基于改进蚁群算法的微电网多目标优化调度[J]. *红水河*, 2024, 43(5): 115–121.
- [4] KHATIB T, MOHAMED A, SOPIAN K, et al. Optimization of hybrid renewable energy systems: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76(2): 1056–1064.
- [5] 李洪美, 李香凡, 林志芳, 等. 计及车网互动的热电联供微电网优化调度[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(9): 63–73.
- [6] KOUTROULIS E, KOLOKOTSA D. Methodologies for overall assessment of standalone renewable energy systems: A critical review[J]. *Applied Energy*, 2016, 177(6): 836–849.
- [7] KUMAR S, SINGH S P. A review on multi-objective optimization of hybrid renewable energy systems[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2015, 7(4): 043135.
- [8] CHEDID H A R, RAHMANS. A decision support technique for the design of hybrid solarwind power systems[J]. *IEEE transactions on Energy conversion*, 1998, 13(5): 76–83.
- [9] 张伟, 陈思, 李强. 微电网中可再生能源与储能系统的优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(12): 45–51.
- [10] 吴伟, 张建华, 刘畅. 基于多目标优化的微电网储能系统配置研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(9): 45–52.
- [11] KANNAN K, BASKAR S. A new optimization algorithm for solving hybrid renewable energy system size optimization problem[J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2016, 8(3): 035503.
- [12] SAHOO S, PANIGRAHI S. A review on hybrid renewable energy systems for standalone applications: A decision-making framework[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81(4): 1498–1515.
- [13] SARAVANAN K, JOTHIMANI L, RAMALINGAM S. Optimal sizing of hybrid renewable energy systems-A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 59(5): 950–966.
- [14] ABOUZEID A A. Techno-economic optimization of hybrid renewable energy systems: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76(8): 102–114.
- [15] YANG H, ZHOU W, FANG Z. Optimal configuration of standalone hybrid renewable energy systems: A review[J]. *Applied Energy*, 2016, 168(2): 706–719.
- [16] MEHRABIAN A R, LUCAS C. A review of optimization methodologies applied to renewable energy systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006, 10(3): 241–251.
- [17] ABUR M. Optimal renewable resources mix for microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(4): 1815–1824.
- [18] 袁昊, 刘宇航, 孙洁, 等. “双碳”背景下新能源并网储能容量优化配置方法[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(9): 134–140.
- [19] MOLINA-GARCIA A, PEREZ-FERRAO L, MUNOZ-CLEMENTE R. A review of the integration of renewable energy systems in smart grids[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76(3): 104–113.
- [20] 岳嘉和, 陈果, 宋涛, 等. 基于碳指标的建筑能源优化配置研究[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(6): 170–177.