

基于改进沙猫群算法的微电网日前优化调度

朱赵晴¹, 方苓璐², 夏焰坤¹, 谢波², 孟志高², 陈建华²

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039; 2. 国网四川省电力公司
成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:微电网系统包括多种分布式能源, 为降低微电网综合发电成本, 提高供电的可靠性和安全性, 合理安排微电网日前调度计划, 以运行成本和环境保护成本最低为目标函数, 首先, 建立由水、光、微型燃气轮机、储能装置组成的微电网日前优化调度模型; 然后, 将反向学习策略和柯西变异算子融入到沙猫群算法中, 提出一种改进沙猫群算法求解上述模型; 最后, 通过与其他算法进行调度的结果对比, 结果表明改进沙猫群算法能更合理地安排各机组的出力计划, 明显降低微电网运行综合成本, 同时减少二氧化碳排放量, 实现了微电网的经济环保优化调度。

关键词:微电网; 日前优化调度; 改进沙猫群算法; 反向学习策略; 柯西变异算子

中图分类号: TM 734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)05-0014-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240503

Day-ahead Optimal Scheduling of Microgrid Based on Improved Sand Cat Swarm Optimization

ZHU Zhaoqing¹, FANG Qinlu², XIA Yankun¹, XIE Bo², MENG Zhigao², CHEN Jianhua²

(1. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China; 2. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Microgrid systems include a variety of distributed energy sources. In order to reduce the integrated generation cost of microgrid, improve the reliability and security of power supply and reasonably arrange the microgrid day-ahead scheduling plan, taking the minimum cost of operation and environmental protection as the objective function, a microgrid day-ahead optimal scheduling model consisting of water, solar, micro gas turbine, and energy storage device is firstly established. And then, the inverse learning strategy and Cauchy variation operator are incorporated into the sand cat swarm optimization (SCSO) algorithm, and an improved sand cat swarm optimization (ISCSO) algorithm is proposed to solve the above model. Finally, by comparing the results of scheduling with other algorithms, the results show that ISCSO can arrange the output plan of each unit in a more reasonable way, which obviously reduces the comprehensive cost of microgrid operation, and at the same time reduces the carbon dioxide emission, and realizes the economic and environmental protection optimal scheduling of microgrid.

Key words: microgrid; day-ahead optimal scheduling; improved sand cat swarm optimization; inverse learning strategy; Cauchy variation operator

0 引言

全球能源危机和温室效应日益严重, 中国于2020年制定“双碳”战略目标, 并贯彻落实绿色发展

基金项目: 四川省科技计划课题(2020YFG0184)

的基本目标。随着人们的环境保护意识不断加强, 传统的发电方式已经无法满足节能减排和建设绿色电力系统的需求, 而以水轮机、光伏、蓄电池、微型燃气轮机等分布式电源构成的微电网能有效改善能源危机和环境污染问题^[1-2]。

“双碳”目标促使绿色能源在电网接入量快速

增长。随着多形态的绿色能源接入电网,因各自运行特性的不同,使得微电网调度变得更加复杂困难,而调度策略的优劣将直接影响微电网运行成本和碳排放量^[3]。合理的调度策略不但能提高电网的稳定性和经济性,有效降低电厂发电成本,还可以减少能源浪费和污染气体的排放。因此,研究碳减排目标下微电网优化调度具有重要的理论和工程价值。而实现微电网高效经济运行的关键在于如何制定策略,合理分配各参与因子的出力^[4-5]。

在实际应用中,随着系统规模和复杂性的迅速增加,特别是当涉及到更多时段、更多决策变量以及更多的不确定性因素时,问题的规模可能超过了求解器的处理能力,而启发式方法可以为模型提供更高的灵活性,能够更容易地适应模型参数的变化,还能够相对较短的时间内提供足够好的解,这对于微电网的日前调度是十分关键的。目前,粒子群、人工鱼群^[6]、蚁群^[7]及灰狼等智能优化算法在微电网调度中得到了广泛应用。文献[8]建立了微电网环保与经济调度模型,采用了改进惯性权重因子和学习因子的粒子群算法对调度模型求解。文献[9]在微电网调度模型中引入需求响应中的可转移负荷,采用了改进灰狼算法对优化模型求解。文献[10]考虑了系统运行和碳交易成本,采用了鲸鱼优化算法求解含需求侧柔性负荷的综合能源低碳经济调度模型。文献[11]建立了机场微电网的优化调度模型,采用了加入非线性变化权重因子的麻雀搜索算法求解。微电网调度是一个多约束的非线性优化问题,考虑到上述种群优化算法在求解优化调度问题时工作量大、效率低、易陷入早熟等缺点,在上述研究的基础上,提出将沙猫群优化算法加以改进后应

用于调度模型求解。沙猫群智能优化算法(sand cat swarm optimization, SCSO)是由 Amir Seyyedabbasi 于 2022 年提出的一种新型种群优化算法。无论是在地面还是地下,沙猫都能凭借它对低频噪声的检测能力来捕捉猎物^[12]。

首先,建立了一种微电网日前优化调度模型,该模型由水轮机、光伏、微型燃气轮机和储能装置组成,并较为详细地介绍了各发电单元的数学模型及各自运行约束条件,确定了以运行成本和环境保护成本最低的目标函数;然后,采用改进沙猫群算法(improved sand cat swarm optimization, ISCSO)算法求解上述模型;最后,通过算例分析比较不同调度策略的经济性和环保性,验证了所提方法的有效性。

1 微电网模型

1.1 微电网系统结构

微电网内部包含光伏、水电、微型燃气轮机及储能设备,通过能量管理中心进行智能控制和自动调度决策,微电网系统结构如图 1 所示。

1.2 分布式能源、储能发电特性

1) 光伏发电的输出受到光照强度、风速和环境温度等因素的影响,导致其具有波动性。光伏的出力模型可以表示为

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

式中: $P_{PV}(t)$ 为 t 时刻的光伏输出功率; P_{STC} 为标准条件下光伏最大输出功率; $G_{ING,t}$ 为 t 时刻的光照强度; G_{STC} 为标准条件下光照强度; k 为功率温度系数; $T_{c,t}$ 为 t 时刻光伏电池温度; T_r 为光伏电池参考温度。

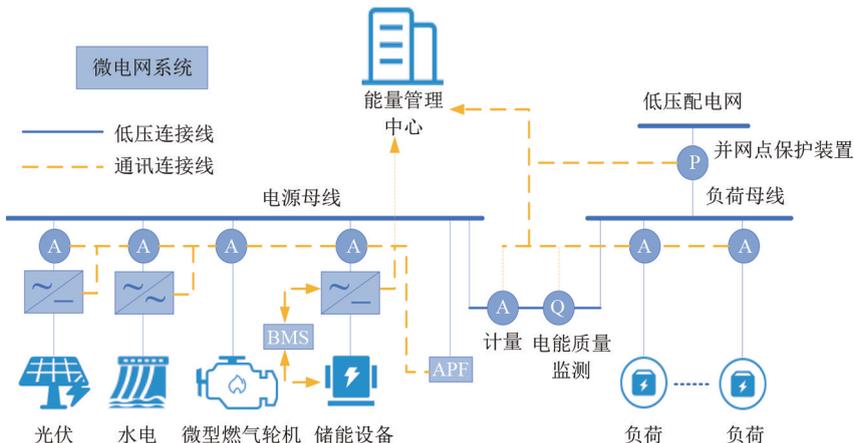


图 1 微电网系统基本结构

$$C_{PV}(t) = K_{PV,OM} P_{PV}(t) \quad (2)$$

式中: $C_{PV}(t)$ 为 t 时刻光伏的运维成本; $K_{PV,OM}$ 为光伏的运维成本系数。

2) 水电机组具备灵活的启停能力, 能够快速调整输出功率, 以适应电力需求的瞬时变化。水电的模型可以表示为

$$C_W(t) = K_{W,OM} P_W(t) \quad (3)$$

式中: $C_W(t)$ 为 t 时刻水电机组的运维成本; $K_{W,OM}$ 为水电机组的运维成本系数; $P_W(t)$ 为 t 时刻水电机组的有功输出功率。

$$C_{W,NF}(t) = K_{W,NF} U_W(t) \quad (4)$$

式中: $C_{W,NF}(t)$ 为 t 时刻水轮机的启停成本; $K_{W,NF}$ 是水轮机的启停成本系数; $U_W(t)$ 为 t 时刻水轮机的启停状态, 1 表示启动, 0 表示停止。

3) 微型燃气轮机以消耗天然气、柴油及汽油等燃料来发电。它具有高效率、可使用燃料种类多、维护成本低以及运行灵活等优点, 因此在发电领域得到广泛应用, 具有较高的发电性价比。微型燃气轮的模型可以表示为

$$\eta_{MT}(t) = 0.075 3 \left[\frac{P_{MT}(t)}{65} \right]^3 - 0.309 5 \left[\frac{P_{MT}(t)}{65} \right]^2 + 0.417 4 \frac{P_{MT}(t)}{65} + 0.106 8 \quad (5)$$

$$C_{MT,OM}(t) = K_{MT,OM} P_{MT}(t) \quad (6)$$

$$C_{MT,F}(t) = C_1 \frac{1}{V_{LH}} \frac{P_{MT}(t)}{\eta_{MT}(t)} \quad (7)$$

$$C_{MT,E}(t) = \sum_{i=1}^n (C_i \gamma_{MT,i}) P_{MT}(t) \quad (8)$$

$$C_{MT,NF}(t) = K_{MT,NF} U_{MT}(t) \quad (9)$$

式中: $\eta_{MT}(t)$ 为 t 时刻微型燃气轮机的运行效率; $P_{MT}(t)$ 为燃气轮机的有功输出功率; $C_{MT,OM}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机的运维成本; $K_{MT,OM}$ 是燃气轮机的运维成本系数; $C_{MT,F}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机的燃料成本; C_1 为当地天然气价格; V_{LH} 为天然气低位热值, kWh/m^3 ; $C_{MT,E}(t)$ 为 t 时刻微型燃气轮机的污染物处理成本; C_i 为处理 i 类污染物成本系数; $\gamma_{MT,i}$ 为微型燃气轮机正常运行时产生的 i 类污染物排放量; $C_{MT,NF}(t)$ 为 t 时刻微型燃气轮机的启停成本; $K_{MT,NF}$ 为微型燃气轮机的启停成本系数; $U_{MT}(t)$ 为 t 时刻微型燃气轮机的启停状态, 1 表示启动, 0 表示停止。

4) 为了确保电网的稳定运行, 太阳能发电的波动性和随机性需要通过加装储能装置来解决。蓄电

池作为一种响应速度快的储能设备, 可以将微电网所产生的多余电能储存起来。当微电网所产生的电能无法满足负荷需求时, 蓄电池能够迅速释放储存的电能, 以保持微电网系统的供需平衡, 确保电力稳定供应。这样的安排进一步提高了整个微电网系统的安全性和稳定性。蓄电池的充放电模型可以表示为

$$S_{OC}(t) = \begin{cases} S_{OC}(t-1) + P_{bat}(t)/\eta^-, P_{bat}(t) \leq 0 \\ S_{OC}(t-1) + P_{bat}(t)\eta^+, P_{bat}(t) > 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$C_{bat,OM}(t) = K_{bat,OM} P_{bat}(t) \quad (11)$$

式中: $S_{OC}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的剩余容量; $P_{bat}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的充放电功率; η^+ 为蓄电池充电效率; η^- 为蓄电池放电效率; $C_{bat,OM}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的维护成本; $K_{bat,OM}$ 是蓄电池的运维成本系数。

1.3 微电网目标函数及约束条件

1.3.1 目标函数

微电网调度是一个多约束的非线性优化问题, 目标函数中引入罚函数可将等式约束和不等式约束问题转换为非约束类问题, 罚函数刻画了约束条件违反的程度。

$$\min C_T = \sum_{t=1}^T (C_f(t) + C_{OM}(t) + C_{grid}(t) + C_E(t)) + \sum_k^K \sigma p(k) \quad (12)$$

$$C_{OM}(t) = C_{PV}(t) + C_W(t) + C_{MT,OM}(t) + C_{bat,OM}(t) + C_{W,NF}(t) + C_{MT,NF}(t) \quad (13)$$

$$C_{grid}(t) = C_C(t) \times C_{CP}(t) - C_S(t) \times C_{SP}(t) \quad (14)$$

$$C_E(t) = C_{MT,E}(t) + C_{grid,E}(t) \quad (15)$$

$$C_{grid,E}(t) = \sum_{i=1}^n (C_i \gamma_{grid,i}) C_{CP}(t) \quad (16)$$

式中: C_T 为微电网的总运行费用; T 为调度的时间段; $C_f(t)$ 为各分布式电源在 t 时刻消耗的燃料费用, 本模型中只含有微型燃气轮机需要燃料, 故 $C_f(t) = C_{MT,F}(t)$; $C_{OM}(t)$ 为各发电单元在 t 时刻的维护费用; $C_{grid}(t)$ 为微电网和配电网的电能交易费用; $C_C(t)$ 、 $C_S(t)$ 分别为在 t 时刻微电网的购、售电价; $C_{CP}(t)$ 、 $C_{SP}(t)$ 分别为在 t 时刻微电网的购、售电能; $C_E(t)$ 为微电网在 t 时刻的环境保护成本; $C_{grid,E}(t)$ 为微电网购入电能部分的污染物处理成本; $\gamma_{grid,i}$ 为微型燃气轮机正常运行时产生的 i 类污染物排放

量; $p(k)$ 为第 k 个违规量; K 为等式和不等式约束违规量的个数; σ 为罚参数,一般取正数,表示惩罚的力度,求函数最小值时, σ 越大表示违规量 $p(k)$ 越接近于0。

1.3.2 约束条件

为了保障微电网运行的安全性和稳定性,需要对各发电单元模型进行必要的约束。

1) 功率平衡约束

$$P_L(t) = P_{PV}(t) + P_W(t) + P_{MT}(t) + P_{bat}(t) + P_{grid}(t) \quad (17)$$

$$P_{grid}(t) = C_{GP}(t) - C_{SP}(t) \quad (18)$$

2) 水轮机出力约束

$$\begin{cases} P_W^{\min}(t) \leq P_W(t) \leq P_W^{\max}(t) \\ |P_W(t) - P_W(t-1)| \leq r_W \end{cases} \quad (19)$$

3) 微型燃气轮机出力约束

$$\begin{cases} P_{MT}^{\min}(t) \leq P_{MT}(t) \leq P_{MT}^{\max}(t) \\ |P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1)| \leq r_{MT} \end{cases} \quad (20)$$

4) 线路传输功率约束

$$P_{grid}^{\min}(t) \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{\max}(t) \quad (21)$$

5) 储能装置约束

$$\begin{cases} P_{bat}^{\min}(t) \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat}^{\max}(t) \\ S_{OC}^{\min}(t) \leq S_{OC}(t) \leq S_{OC}^{\max}(t) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_W^{\max}(t)$ 、 $P_W^{\min}(t)$ 分别为水轮机出力上下限; $P_{MT}^{\max}(t)$ 、 $P_{MT}^{\min}(t)$ 分别为微型燃气轮机出力的上、下限; r_W 和 r_{MT} 分别为水轮机组和微型燃气轮机爬坡功率上限; $P_{grid}^{\max}(t)$ 、 $P_{grid}^{\min}(t)$ 分别为线路传输功率上、下限; $P_{bat}^{\max}(t)$ 、 $P_{bat}^{\min}(t)$ 分别为储能装置出力上下限; $S_{OC}^{\max}(t)$ 、 $S_{OC}^{\min}(t)$ 分别为储能装置的容量上、下限。

2 基于改进沙猫群算法的微电网日前调度模型

2.1 沙猫群算法

根据沙猫群的觅食行为,将沙猫觅食行动分为搜索猎物和攻击猎物两个阶段。具体参数及公式详见文献[12]。

2.2 改进沙猫群算法

考虑到原有的沙猫群算法开发能力强但全局搜索能力较弱^[13-14],为了让沙猫个体能更好地寻到最优位置,增强算法全局搜索能力,在沙猫群算法中加入反向学习策略^[15]。

$$\vec{P}'_{os}(t) = u_b(t) + \text{rand}(0,1) \times (l_b(t) - \vec{P}_{osb}(t)) \quad (23)$$

$$\vec{P}_{os}(t+1) = \vec{P}'_{os}(t) + b \times (\vec{P}_{osb}(t) - \vec{P}'_{os}(t)) \quad (24)$$

$$b = \left(N_{\max} - \frac{N_c}{N_{\max}} \right)^{N_c} \quad (25)$$

式中: $\vec{P}'_{os}(t)$ 为当次迭代时最优位置的反向解; $u_b(t)$ 、 $l_b(t)$ 分别为上、下界; $\vec{P}_{osb}(t)$ 为目前最优位置; $\vec{P}_{os}(t+1)$ 为沙猫选择的新位置; b 为信息交换控制参数^[16]; N_c 为当前迭代次数; N_{\max} 为最大迭代次数。

为了进一步提升算法的寻优性能,引入柯西变异算子,在最优位置进行扰动变异得出新解,有效降低算法出现早熟收敛的情况^[17]。

$$\vec{P}_{os}(t+1) = \vec{P}_{os}(t) + C(0,1) \times \vec{P}_{os}(t) \quad (26)$$

式中, $C(0,1)$ 为标准柯西分布。

2.3 基于改进沙猫群算法的微电网日前优化调度流程

基于改进沙猫群算法(improved sand cat swarm optimization, ISCSO)的微电网日前优化调度流程如图2所示。

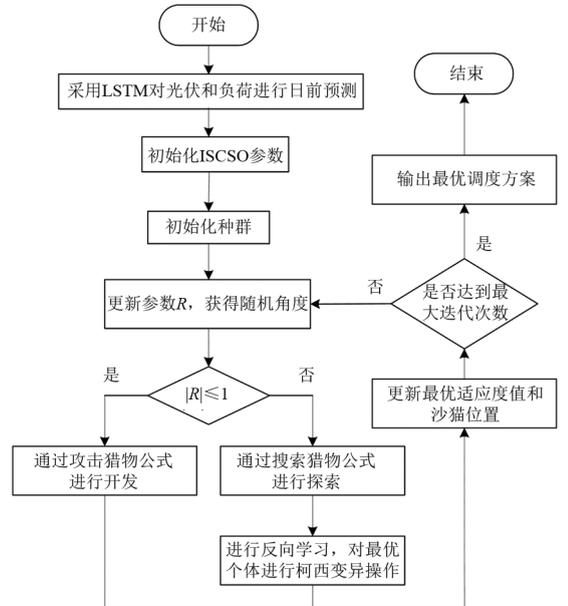


图2 基于ISCSO算法的流程

其主要步骤如下:

1) 采用长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)根据已知连续数据对接下来一天的光伏出力和负荷情况进行日前预测;

2) 设定 ISCSO 算法的参数, 如初始化种群规模、最大迭代次数和优化变量的上下限等;

3) 初始化种群;

4) 更新参数 R , 获得随机角度, R 为控制沙猫搜索阶段和攻击阶段之间无缝转换的主要参数;

5) 通过搜索猎物公式或攻击猎物公式进行探索或开发;

6) 根据机组相关成本和储能参数, 计算以运行成本和环境保护成本最低的目标函数, 将其作为沙猫个体的适应度值;

7) 更新最优适应度值和沙猫位置;

8) 迭代计算所有沙猫的适应度值。

3 算例分析

根据四川某地区的实际情况, 建立了一个包含水、光、微型燃气轮机和储能装置的微电网调度模型。微电网中各个发电单元参数数值见表 1; 微电网其他参数数值见表 2; 各分布式能源污染物排放系数及治理费用见表 3; 各时段时间划分及微电网与配电网交易时购售电价见表 4; 储能参数数值见表 5。

表 1 发电单元参数

参数名称	光伏	水电	燃气轮机	配电网
功率上限/kW	预测值	200	180	150
功率下限/kW	0	90	3	0
爬坡功率上限/(kW·min ⁻¹)	0	1.67	0.67	0
爬坡功率下限/(kW·min ⁻¹)	0	0.83	0.16	0
运维单价/(元·(kWh) ⁻¹)	0	0.01	0.031	0

表 2 微电网其他参数

参数	数值
水轮机启停成本/元	1.94
微型燃气轮机启停成本/元	3.68
微型燃气轮机热量损失系数	0.15
天然气低热值/(kWh·m ⁻³)	9.7
天然气单价/(元·m ⁻³)	2.5
蓄电池自放电率	0.001

表 3 污染物排放系数及治理费用

污染物类型	治理费用/(元·kg ⁻¹)	污染物排放系数/(g·kWh ⁻¹)			
		光伏	水电	燃气轮机	配电网
CO ₂	0.3	0	0	390	960
SO ₂	6.3	0	0	0.003	26.3
氮氧化物	8.5	0	0	0.2	13.1

表 4 典型日各时段时间划分及购售电价

时段	时间划分	购电价格/(元·kWh ⁻¹)	售电价格/(元·kWh ⁻¹)
峰段	10:00—12:00	1.33	0.93
	15:00—21:00		
平段	7:00—10:00	0.83	0.58
	12:00—15:00		
	21:00—23:00		
谷段	23:00—次日 7:00	0.33	0.23

表 5 储能参数(蓄电池)

参数	数值	参数	数值
最大容量/kWh	80	最小容量/kWh	20
最大输入功率/kW	50	最大输出功率/kW	50
充放率	0.9	初始储能容量/kWh	50

3.1 典型日光伏出力和负荷预测曲线

为验证模型和改进沙猫群算法的有效性, 根据已知四川某地区夏季 7 月份里连续 72 h 光伏出力及负荷的实际情况, 预测接下来 24 h 内光伏出力和负荷情况。

采用长短期记忆时序预测法对光伏和负荷进行预测^[18], 结果如图 3、图 4 所示。由图可以看出预测负荷最高峰在用电高峰时期, 相应地, 光伏也是在正午时分发电量最高, 符合实际情况。

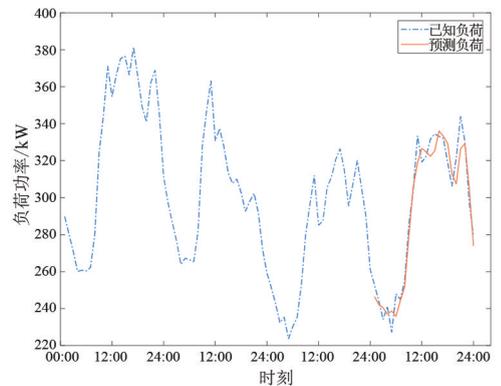


图 3 负荷预测曲线

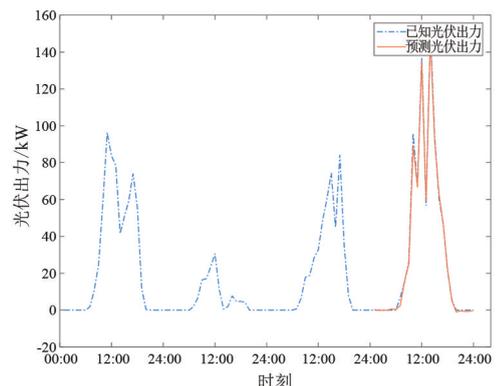


图 4 光伏出力预测曲线

为了评价该预测模型的准确性,采用了拟合优度 (R^2)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 这 3 个指标进行评估。结果如表 6 所示。

从表 6 可以看出,负荷和光伏出力预测效果较好,拟合系数 R^2 均达到 0.95 以上,同时均方误差较小,预测精度能满足实际需求。本节研究仅以夏季典型时段实际数据为例,验证了所提模型的有效性。该模型在针对不同场景时预测结果的有效性还需进一步讨论,将对此进行后续研究。

表 6 负荷和光伏预测结果

类型	R^2	MAE/kW	RMSE/kW
负荷预测	0.954	6.870	8.282
光伏出力预测	0.998	1.421	2.246

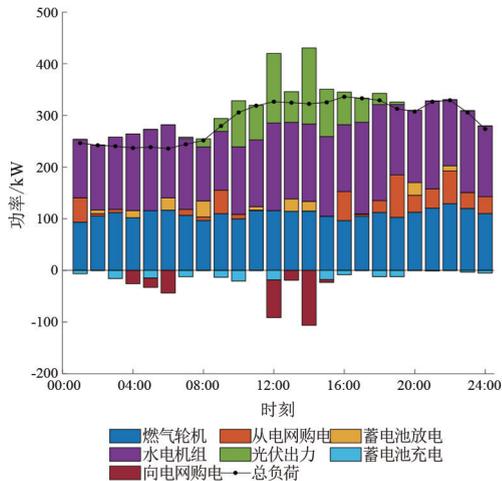
3.2 优化调度分析

以 24 h 为一个调度周期,优化调度时长为 1 h。采用了传统粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)、灰狼算法 (grey wolf optimizer, GWO)、秃鹰搜索算法 (bald eagle search, BES)、沙猫群算法 (SCSO) 和所提 ICSO 算法这 5 种方法,以运行成本和环境保护成本最低为目标函数对微电网模型进行求解。种群大小均设置为 100,最大迭代次数均设置为 500。图 5 展示了这 5 种方法优化得到的日前调度安排情况。表 7 给出不同方法在一天 24 h 内的调度运行结果。

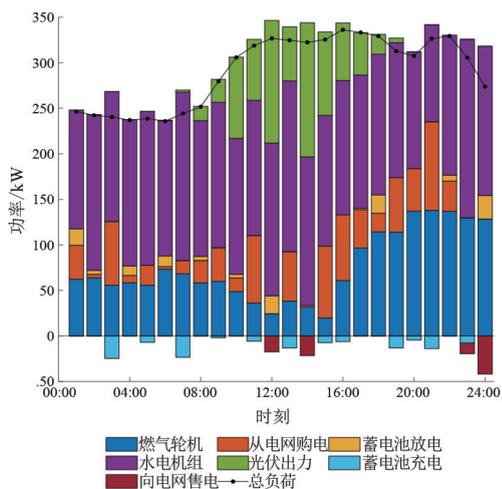
结合图表可以看出,PSO 方法和 BES 方法在整个调度周期都使微型燃气轮机保持在 100 kW 上下出力,因此燃料成本较高,碳排放量较大。GWO 方法在优先使用光伏出力的情况下,主要采用向配电网购电配合水电机组和燃气机组出力的策略以满足负荷需求。而在峰段时购电价格高达 1.33 元/kWh,GWO 方法在这段时间的购电量达到了 408.57 kW,花费 542.58 元,占总购电成本的 67.23%,同时向配电网出售余电较少,售电收入不高。SCSO 方法主要依靠水轮机发电,较少使用微型燃气轮机,为维持电负荷平衡特向配电网大量购电,但其购电具有随机性,并未区分峰平谷时段进而择优购电,导致使用该方法进行日前调度时其碳排放量和向配电网购电成本在 5 种方法中最高,其经济效益不高且对环境危害较大。

ICSO 方法在满足负荷需求后,在谷段充分比

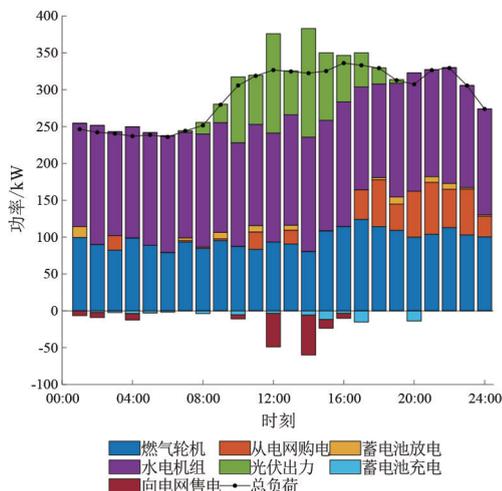
较各发电单元运行维护成本和与配电网交易的价格,使其效益最大化。考虑到蓄电池提供单位功率时费用比向配电网购电时低,在谷段时水轮机组和微型燃气轮机合理配合工作,先将蓄电池充满电,再



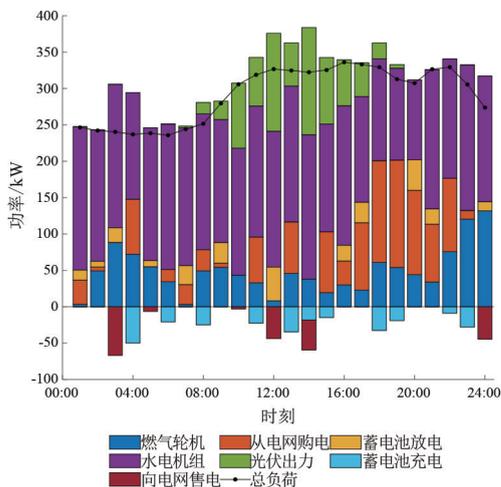
(a) PSO方法调度结果



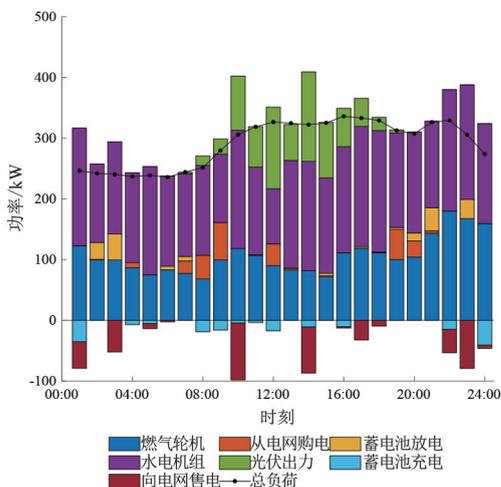
(b) GWO方法调度结果



(c) BES方法调度结果



(d) SCSSO方法调度结果



(e) ISCSO方法调度结果

图 5 不同方法得到的日前调度结果

表 7 5种方法的结果比较

参数	PSO	GWO	BES	SCSO	ISCSO
运行时间/s	275.15	398.80	244.18	183.84	161.89
购电成本/元	452.33	807.06	458.01	1204.80	243.29
售电金额/元	140.27	35.02	85.19	79.18	237.21
燃料成本/元	2 314.38	1 596.30	2 065.27	1 098.15	2 104.50
运维成本/元	125.44	102.96	117.78	87.65	127.79
环境成本/元	591.38	674.67	550.53	778.72	445.96
碳排放量/kg	1 500.23	1 487.14	1 375.79	1 543.91	1 240.19
综合成本/元	3 343.26	3 145.97	3 106.41	3 090.15	2 684.33

将富余电能向配电网售卖。在上午 10:00 左右,光伏出力开始增大,而此时属于用电高峰期,ISCSO 方法首先考虑了向配电网售电,其次再将蓄电池充电时间转移到用电平段和谷段,降低成本的同时通过向配电网售电获得部分收益。

ISCSO 方法充分考虑了微电网与配电网分时段购售电价和各发电单元出力情况,更加合理安排了

各机组和储能装置的工作情况,且运行时间最短,表明了 ISCSO 搜索能力更强大,求解速度更快,使得在满足负荷需求的情况下,微电网运行综合成本最低,降低了碳排放量的同时提高了微电网的经济性和稳定性。

图 6 为采用以上不同算法求解微电网优化调度结果的适应度曲线图。由图可知,所提算法相较于其他算法在寻优方面表现优异,在第 50 次迭代后,ISCSO 算法已趋于收敛,而 SCSSO 算法大约在第 100 次迭代后才逐渐趋于收敛,表明 ISCSO 算法收敛速度更快。此外,SCSSO 算法的成本优化结果为 3 090.15 元,ISCSO 算法的成本优化结果为 2 684.33 元,表明了改进后的 ISCSO 算法全局探索能力得到了提高,优化结果精度更高。

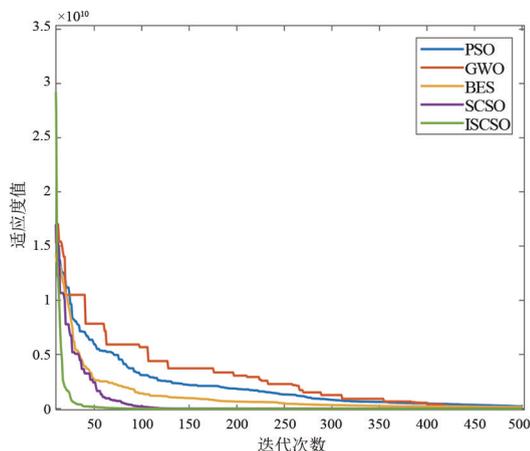


图 6 不同算法的适应度曲线

除此之外,再使用 CPLEX 求解器计算得到的综合成本为 1 350.03 元,碳排放量 1 682.89 kg,而 ISCSO 方法调度结果综合成本为 2 684.33 元,碳排放量为 1 240.19 kg。因此可以根据实际情况安排,对碳排放量和综合成本进行取舍,择优选择方法。

4 结 论

所建立的微电网模型中包含水轮机、光伏、微型燃气轮机和蓄电池。采用 LSTM 算法对负荷和光伏出力进行日前预测,以运行成本和环境保护成本最低为目标函数,利用改进沙猫群算法求解所建模型。通过 Matlab 仿真对比分析采用 PSO、GWO、BES 和 SCSSO 算法的调度结果。结果表明,引入反向学习策略和柯西变异算子改进传统沙猫群算法后,ISCSO

(下转第 43 页)

作者简介:

刘雪原(1994),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化;

陈玉敏(1997),女,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化;

魏阳(1987),女,博士研究生,高级经济师,主要研究方向为碳中和技术创新;

孟拓(1999),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为碳反演与碳计量;

(上接第20页)

算法的全局优化能力得到了改善,具有快速收敛和强大搜索能力等特点;同时,该方法能考虑日前需求,合理安排各机组出力,具有一定的有效性和可靠性,为微电网的安全可靠、经济环保运行提供了参考。

参考文献

- [1] ALOTAIBI I, ABIDO M A, KHALID M, et al. A comprehensive review of recent advances in smart grids: A sustainable future with renewable energy resources [J]. Energies, 2020, 13(23):6269.
- [2] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1):1-18.
- [3] 桑博,张涛,刘亚杰,等. 多微电网能量管理系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10):3077-3093.
- [4] HIRSCH A, PARAG Y, GUERRERO J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90:402-411.
- [5] 全年,李燕青,申宏威,等. 基于改进黑洞算法的微电网优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(5):113-119.
- [6] 何力,吕红芳,李俊甫,等. 基于模拟退火算法改进的人工鱼群算法(SA_AFSA)的微电网能量优化调度研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(9):36-43.
- [7] 李国庆,翟晓娟,李扬,等. 基于改进蚁群算法的微电网多目标模糊优化运行[J]. 太阳能学报, 2018, 39(8):2310-2317.
- [8] 李兴莘,张靖,何宇,等. 基于改进粒子群算法的微电网多目标优化调度[J]. 电力科学与工程, 2021, 37(3):1-7.
- [9] 续一臣,王海云. 基于改进灰狼算法的微电网优化调度[J]. 计算机仿真, 2023, 40(3):96-102.

刘悦(1974),男,高级政工师,主要研究方向为电气工程及其自动化;

周奇(1999),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为碳监测与碳计量;

向银太(1981),男,高级工程师,主要研究方向为电气工程及其自动化;

李茜(1988),女,博士,副教授,主要研究方向为碳监测与碳计量、综合能源系统运行与控制、能源系统智能感知等。 (收稿日期:2024-03-26)

- [10] 薛开阳,楚瀛,凌梓,等. 考虑柔性负荷的综合能源系统低碳经济优化调度[J]. 可再生能源, 2019, 37(8):1206-1213.
- [11] 宋扬,石勇,刘宝泉,等. 基于改进麻雀搜索算法的机场微电网优化调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3):33-40.
- [12] SEYYEDABBASI A, KIANI F. Sand cat swarm optimization: a nature-inspired algorithm to solve global optimization problems [J]. Engineering with Computers, 2022, 39(4):2627-2651.
- [13] 贾鹤鸣,王琢,文昌盛,等. 改进沙猫群优化算法的无人机三维路径规划[J]. 宁德师范学院学报(自然科学版), 2023, 35(2):171-179.
- [14] LI Y M, WANG G C. Sand cat swarm optimization based on stochastic variation with elite collaboration [J]. IEEE Access, 2022, 10:89989-90003.
- [15] 毛清华,张强. 融合柯西变异和反向学习的改进麻雀算法[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(6):1155-1164.
- [16] 何庆,林杰,徐航. 混合柯西变异和均匀分布的蝗虫优化算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(7):1558-1568.
- [17] 赵超,王斌,孙志新,等. 基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1):256-262.
- [18] HALPERN-WIGHT N, KONSTANTINOU M, CHARALAMBIDES A G, et al. Training and testing of a single-layer LSTM network for near-future solar forecasting [J]. Applied Sciences, 2020, 10(17):5873.

作者简介:

朱赵晴(2000),女,硕士研究生,研究方向为电力系统及电能质量分析研究;

方芬璐(1984),女,硕士,高级工程师,主要从事电力规划技术工作;

夏焰坤(1984),男,博士,教授,研究方向为电力系统及电能质量分析研究。

(收稿日期:2023-12-06)