

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211323

# 基于改进蝙蝠算法的微网群能量优化方法\*

曾志辉<sup>1,2</sup> 李雪强<sup>1,2</sup> 尹路路<sup>1,2</sup> 杨明<sup>1,2</sup>

(1.河南理工大学 焦作 454003; 2.河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室 焦作 454003)

**摘要:** 针对微网群如何稳定运行以及最大程度减少网群运行成本等问题,进行了基于改进蝙蝠算法的微网群能量优化研究。系统以离网运行的两个交流微电网和一个直流微电网构成的微网群作为研究对象,构建包含集中储能系统的微网群架构,利用运行成本和环境影响成本为多目标函数建立优化调度模型,通过二元对比权定法将多目标函数转化为单目标函数,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。结果表明,对比传统的微网群优化方法,该系统能量优化方法具有较好的系统运行稳定性,有效提高了系统经济效益,使得日运行综合成本降低了 14.63%。

**关键词:** 微网群;能量优化;Tent 映射;柯西变异;改进蝙蝠算法

**中图分类号:** TM743 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Energy optimization method of microgrid cluster based on improved bat algorithm

Zeng Zhihui<sup>1,2</sup> Li Xueqiang<sup>1,2</sup> Yin Lulu<sup>1,2</sup> Yang Ming<sup>1,2</sup>

(1. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Henan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Mine Equipment, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of how to run the microgrid cluster stably and how to reduce the operation cost of the microgrid cluster to the greatest extent, the energy optimization of the microgrid cluster based on the improved bat algorithm was studied. The system takes the microgrid cluster composed of two AC microgrids and one DC microgrid operating off grid as the research object, constructs the microgrid cluster architecture including centralized energy storage system, establishes the optimal scheduling model using the operation cost and environmental impact cost as the multi-objective function, and transforms the multi-objective function into a single objective function through the binary comparison weighting method. The improved bat algorithm based on tent mapping and Cauchy variation is used for energy optimization. The results show that compared with the traditional microgrid cluster optimization method, the system energy optimization method has better system operation stability, effectively improves the economic efficiency of the system, and reduces the comprehensive daily operation cost by 14.63%.

**Keywords:** microgrid cluster; energy optimization; Tent mapping; Cauchy variation; improved bat algorithm

## 0 引言

目前,世界传统化石能源发电面临着储量日渐短缺和环境污染导致的气候极端变化等问题,同时我国提出“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要,明确指出要实现“双碳”目标方案,未来以新能源作为主体大规模接入电力系统势必会成为缓解能源危机和实现“双碳”目标的必经之路<sup>[1-2]</sup>。微电网作为对可再生能源的有效消纳和管理系统,是由分布式电源、储能系统、当地负荷等设备有机整合构成,能够

实现自我控制、管理的区域自治性电力系统<sup>[3-4]</sup>。然而微电网在工作过程中可能会出现分布式电源输出功率突然变化、负载的大面积接入或者解除等突发事件,而单一微电网本身容量有限<sup>[5-6]</sup>,对此类事件发生的抗扰动能力较弱。微电网群作为新能源发电网络的一个全新概念,以微电网为基础,同地理位置上毗邻的微电网、分布式发电系统互连,形成微电网群集系统(简称微网群)<sup>[7]</sup>,通过对微网群的能量优化协调控制,能有效缓解微电网运行时的缺陷,大大提升系统运行的可靠性和经济性<sup>[8]</sup>。据此,众多学者针对微网

收稿日期:2022-09-07

\* 基金项目:国家自然科学基金(U1804143)、河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(222102220034)资助

群能量优化协调调度进行了大量的研究,并取得了多项研究成果。

文献[9-10]考虑到多微网的运行成本、环境影响因素,结合改进粒子群优化算法,对多微网调度模型进行求解,验证了所提模型和优化策略的有效性。但文献[9-10]未考虑微网间交互交易时的电价影响,会致使系统经济成本偏高。文献[11]对交互功率控制、双边竞价交易策略进行了分析,采用粒子群算法,达到协调微电网间的交易平等、功率分配。文献[12]提出微网群动态电能交易策略,通过 3 个互联的微网模型,进行运行性分析,验证了所提策略的改进。文献[11-12]研究成果均考虑了微网间交易电价,但均采用竞价交易策略,会出现以恶性竞价来提高系统的经济性的可能。由此提出采用分时电价策略<sup>[13]</sup>,在考虑了微网群内电能交易时价格、提高系统整体稳定性、经济性的同时,避免了竞价交易带来的恶性竞争弊端。

文献[9-12]中大都采用粒子群算法进行能量优化,虽然粒子群算法广泛应用于优化领域,但存在易于发生早熟收敛、局部搜索能力差的缺陷,影响微网群系统调度的准确性和经济性。文献[14]所提的蝙蝠算法在微网群能量优化方向,是一种计算步骤简单、参数设置简易、易于实现的新颖算法,能够随着微型蝙蝠的移动,让局部邻域搜索与全局大范围搜索的比重进行自主调节,具有潜在并行性<sup>[15]</sup>,使得蝙蝠算法在有效性和准确性等方面比粒子群算法更具有明显优势。同粒子群等众多算法相同,采用传统蝙蝠算法解决微网群能量优化过程中存在高维数易陷入局部极值的缺陷<sup>[16]</sup>,为此,本文提出一种改进的蝙蝠算法,对于种群位置初始化加入 Tent 映射<sup>[17]</sup>,增加初始种群的遍历性,以避免系统陷入局部最优,同时对算法速度更新公式中加入柯西变异<sup>[18]</sup>,以增强全局搜索和跳出局部最优的能力。

综上,以两个交流、一个直流微电网构成的微网群为研究对象,在离网状态下,采用分时电价策略,建立以微网群运行成本和环境影响为目标的优化模型,再以两者的综合经济成本最小为目标函数,并采用改进蝙蝠算法对经济成本进行优化,验证所提策略和所采用优化算法的有效性。

## 1 矩微网群能量调度策略

### 1.1 微网群架构

在微网群架构中,风电、光电等分布式电源是具有间歇性的。为了对微网群的功率波动进行缓冲,确保各子网在系统内平稳运行,储能系统具有十分重要的地位。在交、直流微电网中,为控制微网平稳运行,储能系统需分别被设计成电流源和电压源。针对所研究对象由两个交流、一个直流微电网构成,若储能系统采用两种不同的设计,很难实现即插即用,系统的操作难度、不稳定性同时都会增加,因此提出在微网群架构中采用集中储能配置方案<sup>[19]</sup>。采用的微网群架构如图 1 所示,由交流微网 1(MG1)、交流微网 2(MG2)、直流微网 3(MG3)与集中储能系统构成。

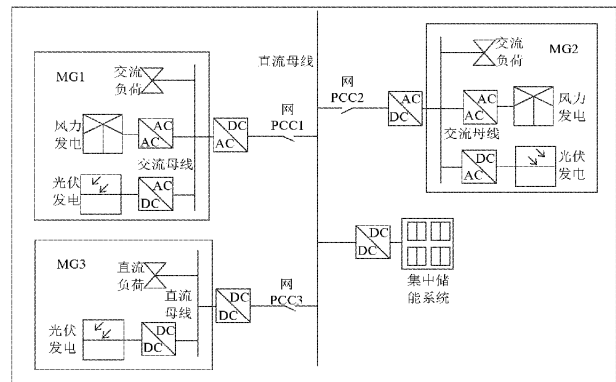


图 1 微网群架构

### 1.2 能量调度策略

如图 1 所示微网群架构,微网群处在离网运行状态,为提高新能源发电的利用率,让各微电网之间优先进行能量交互利用。为避免各微网间能量交互调度出现恶性竞争现象,导致系统出现不稳定,因此不宜采用各微网之间交易的竞价机制,而应根据微网群实际运行状况,采用分时电价制定相应调度策略,具体如图 2 所示。

系统根据 MG1、MG2、MG3 的净输出功率(即各微电网的风光发电输出功率-各微电网内的负荷消耗功率=各微电网净输出功率)的大小,将各子网净输出功率分别分为  $P_{AB}$ 、 $P_{AS}$ 、 $P_{BS}$  三种情况,其中  $P_{AB}$  恒大于 0,  $P_{AS}$  恒小于 0,  $P_{BS}$  部分大于 0:

1)子网净输出功率  $P_{AB}$  恒大于 0

这时各微电网内部实现了能量平衡,则只需要考虑向集中储能系统进行充电。

2)子网净输出功率  $P_{AS}$  恒小于 0

此时各微电网内部均未能实现能量平衡,此时根据各微电网功率的缺电量大小,大的优先进行调节。具体是根据分时电价判断集中储能系统成本和可去负荷成本的大小,若集中储能系统成本比可去负荷成本小,则先向集中储能系统取电,看内部能量是否平衡,若没有平衡,再减少可去负荷;若集中储能系统成本比可去负荷成本大,则先减少可去负荷,看内部能量是否平衡,若没有平衡,再向集中储能系统取电。

3)子网净输出功率  $P_{BS}$  部分大于 0

此时部分微电网内部能量平衡,部分内部不平衡,根据各微电网功率缺电量大的优先进行调节,进行微网间的功率交互,看各微网内部是否能量平衡,若没有平衡,则继续进行调节。此后调度步骤同上“子网净输出功率恒小于 0”情况。

## 2 微网群能量优化调度模型

微网群离网运行时,在微网群能量优化策略下,考虑正常情况下的 24 h 内各时段运行状况和对环境的影响两类目标函数,进行优化,实现微网群系统的经济性。

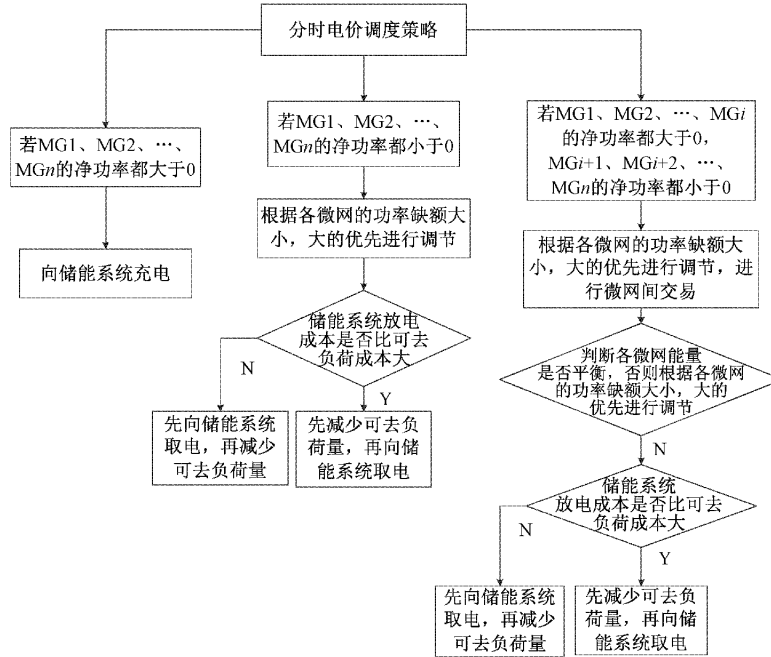


图2 能量优化策略

2.1 目标函数

1) 运行成本

运行成本包含微网群的日常运行维护成本、微网间的能量交易成本、储能系统与微电网之间的交易成本、可去负荷的补偿成本,其数学模型如式(1):

$$M_1 = \sum_{t=1}^T C_{Batav} |P_{Bat}(t)| + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n C_{DGav} P_{DG_i}(t) + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \{ \sum_{j=1, j \neq i}^n [C_{exb}(t) P_{exji}(t) - C_{exs}(t) P_{exij}(t)] \} + \sum_{t=1}^T C_{Bate}(t) \frac{|P_{Bat}(t)|}{2} + \sum_{t=1}^T C_x(t) P_x(t) \quad (1)$$

式中:  $C_{Batav}$  表示储能系统运行维护单位平均成本,取 0.049 元/kW;  $|P_{Bat}(t)|$  表示储能系统在  $t$  时整体出力绝对值;  $C_{DGav}$  表示单微网内所有分布式电源运行维护的单位平均成本,取 0.055 元/kW;  $P_{DG_i}(t)$  表示微网  $i$  内所有分布式电源在  $t$  时出力;  $C_{exb}(t)$ 、 $C_{exs}(t)$  表示微网间交易的购售电价;  $P_{exji}(t)$ 、 $P_{exij}(t)$  表示微网  $i$  从其他微电网的购、售电能;  $C_{Bate}(t)$  表示储能系统与微电网的购售交易电价的差值;  $C_x(t)$  表示可去负荷的单位补偿成本;  $P_x(t)$  表示  $t$  时的可去负荷量。

2) 环境影响成本

由于研究的微网群系统中大多采用的是清洁能源,故在环境影响成本只需考虑储能装置中会产生污染物的燃料电池的环境污染物成本,具体数学模型如式(2):

$$M_2 = \sum_{t=1}^T [(C_{CO_2} \gamma_{CO_2} + C_{SO_2} \gamma_{SO_2} + C_{NO_x} \gamma_{NO_x}) |P_{Bat}(t)|] \quad (2)$$

式中:  $C_{CO_2}$ 、 $C_{SO_2}$ 、 $C_{NO_x}$  分别为  $CO_2$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$  的单位环境

治理成本,分别取 0.012 3、1.25、2.5(元/kg);  $\gamma_{CO_2}$ 、 $\gamma_{SO_2}$ 、 $\gamma_{NO_x}$  表示每千瓦下  $CO_2$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$  污染物的排放量,分别取 0.725、0.000 003、0.000 2 kg/kW。

3) 综合成本

综合成本由运行和环境影响成本构成,其数学模型如式(3):

$$M = 2\omega_1 M_1 + 2\omega_2 M_2 \quad (3)$$

由于单目标函数求解简便,且多目标函数的解是由单目标函数的解构成。针对上述经济性和环保性两个目标函数  $M_1$  和  $M_2$ ,使用二元对比权重分析法<sup>[20]</sup>将其转换为单目标函数  $M$ ,其中  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  表示目标的各自权重值,且两个权重值之和为 1。

2.2 约束条件

1) 各微网内功率平衡约束

$$P_{Load_i}(t) = P_{DG_i}(t) + P_{Bati}(t) + P_{exi}(t) \quad (4)$$

式中:  $P_{Load_i}(t)$  表示负荷使用的预测值;  $P_{Bati}(t)$  表示  $t$  时刻微网  $i$  与储能系统能量交互值;  $P_{exi}(t)$  表示  $t$  时刻微电网  $i$  与其他微电网的交互值。

2) 子网间功率交互约束

$$0 \leq P_{exji}(t) \leq D_1 P_{exji}^{max}(t) \quad (5)$$

$$0 \leq P_{exij}(t) \leq D_2 P_{exij}^{max}(t) \quad (6)$$

式(5)、(6)中,  $P_{exji}^{max}(t)$ 、 $P_{exij}^{max}(t)$  分别表示子网  $i$  在  $t$  时购电上限值;  $D_1$ 、 $D_2$  分别表示与其他子网购电的控制量。

3) 功率交互状态互斥约束

$$D_1 + D_2 \leq 1 \quad (7)$$

式(7)中,  $D_1$ 、 $D_2$  是均为 0 或 1 的变量。当  $D_1$ 、 $D_2$  都

为 0 时,表示微网  $i$  和其他微网间没有能量的交互,当  $D_1$ 、 $D_2$  其中一个为 1 时,表示微网  $i$  和其他微网间存在能量的交互。

4) 储能系统荷电状态约束

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{Bati}(t) \leq P_{Bati}^{\max}(t) \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{Bat}(t) = 0 \quad (10)$$

式(8)~(10)中,  $SOC_{\min}$ 、 $SOC_{\max}$  表示储能系统荷电状态的最小、最大值;  $P_{Bati}^{\max}(t)$  表示储能系统与微网  $i$  能量交互上限值;在离网状态下,要维持微网群系统更加安全稳定运行,就要考虑储能系统在一天内的出力后,其电量保持和初始值相同,式(10)目的就是限制储能系统始、末值要保持一致。

5) 可去负荷约束

$$P_x^{\min}(t) \leq P_x(t) \leq P_x^{\max}(t) \quad (11)$$

式中:  $P_x^{\min}(t)$ 、 $P_x^{\max}(t)$  表示可去负荷的下限值、上限值。

### 2.3 确定权系数

二元对比权重分析法,是进行权重系数值确定的重要方法,对于综合成本公式中的  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  的确定采用此方法<sup>[20]</sup>。设在域  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$  中任选  $u_i$  与  $u_j$  两个元素进行比较,其中  $i, j \in \{1, 2, \dots, m\}$  且  $i \neq j$ 。定义  $F_{u_j}(u_i)$  为  $u_i$  以  $u_j$  为参考时具有的重要度,其实际含义为“以元素  $u_j$  为基准,元素  $u_i$  所具有的优势”,  $F_{u_j}(u_i)$  意义与  $F_{u_j}(u_i)$  类似,但两者各自独立,选取评估指标时互不影响。评估指标如表 1 所示。

表 1 定性评估指标

元素 $u_i$ 与 $u_j$ 相比较	$F_{u_j}(u_i)$
$u_i$ 与 $u_j$ 具有相同的优势	1
$u_i$ 与 $u_j$ 具有稍微强的优势	3
$u_i$ 与 $u_j$ 具有较强的优势	5
$u_i$ 与 $u_j$ 具有非常强的优势	7
$u_i$ 与 $u_j$ 具有绝对强的优势	9
$u_i$ 与 $u_j$ 处于两个相邻判断之间	2、4、6、8 之一

根据各元素之间的评估指标得出权重比的矩阵  $W_m = (a_{ij})$ , 其中,  $a_{ij}$  按照式(12)计算:

$$a_{ij} = \frac{F_{u_j}(u_i)}{F_{u_i}(u_j)} \quad (12)$$

矩阵  $W_m = (a_{ij})$  必须满足以下 3 个条件:

- 1)  $a_{ij} = 1$
- 2)  $a_{ij}a_{ji} = 1$
- 3)  $W_m$  的最大特征值  $\geq m$  值

通过  $W_m$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$ , 对其进行相容度判定,公式如式(13)所示。

$$\epsilon = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (13)$$

当  $\epsilon \leq 0.1$  时,则  $W_m$  满足相容性;否则为不满足,则需要重新计算评估。

求权重向量  $Q$ 。设  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_m)^T$ , 其中,  $q_i$  按照式(14)计算:

$$q_i = \left( \prod_{j=1}^m t_{ij} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (14)$$

按式(15)做归一化,算出最终的权重向量。

$$Q' = \left( \frac{q_1}{\sum_{i=1}^m q_i}, \frac{q_2}{\sum_{i=1}^m q_i}, \dots, \frac{q_m}{\sum_{i=1}^m q_i} \right) \quad (15)$$

通过上述过程,考虑环境的重要性要略微高于运行成本,则分别取  $F_{u_2}(u_1) = 5$ ,  $F_{u_1}(u_2) = 7$ , 最后算得  $Q'$  的第 1 个权重向量值即  $\omega_1 = 0.42$ 、第 2 个权重向量值即  $\omega_2 = 0.58$ 。

## 3 微网群能量优化算法

### 3.1 蝙蝠算法

根据蝙蝠仿生原理,蝙蝠算法包含搜索的脉冲频率、脉冲音强和发射脉冲的频度 3 个要素。其中,飞行速度的快慢由搜索脉冲频率决定,接受位置更新后的概率由脉冲音强和频度决定,避免过早陷入局部最优<sup>[14]</sup>。蝙蝠算法的步骤如下<sup>[21]</sup>:

步骤 1) 设置蝙蝠种群大小  $nPop$ 、最大脉冲音强  $A$ 、最大脉冲频度  $r0$ 、脉冲频率上限  $f_{\max}$ 、下限  $f_{\min}$ 、音强衰减系数  $\alpha$ 、频度增加系数  $\gamma$ , 设置位置向量的维数  $nVar$ 、最大迭代次数  $MaxIt$ 。

步骤 2) 初始化单元蝙蝠位置  $S_i (i = 1, 2, \dots, nVar)$ , 同时根据目标函数,计算出蝙蝠位置的适应度值,找到处于最佳位置的个体  $S_{best}$ 。蝙蝠位置初始化如式(16)所示。

$$S_i = W_{\min} + (W_{\max} - W_{\min}) \text{rand}(1, nVar) \quad (16)$$

式中:  $W_{\max}$ 、 $W_{\min}$  表示蝙蝠所在位置区域的上下限值,  $\text{rand}(1, nVar)$  表示随机生成一维包含  $nVar$  个数值范围在(0,1)的向量矩阵。

步骤 3) 初始化单元蝙蝠的脉冲频率,计算单元蝙蝠的飞行速度,更新蝙蝠的位置,更新公式如式(17)~(19)所示。

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \text{rand} \quad (17)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (S_i^{t-1} - S_{best}) f_i \quad (18)$$

$$S_i^t = S_i^{t-1} + v_i^t \quad (19)$$

式(17)~(19)中,  $\text{rand}$  是随机因子,在(0,1)区间均匀分布。 $v_i^{t-1}$ 、 $v_i^t$  为第  $i$  只蝙蝠在  $t-1$  和  $t$  时刻的飞行速度,  $S_i^{t-1}$ 、 $S_i^t$  表示位置。

步骤 4) 在每次迭代中,对于单元蝙蝠生成随机数  $\text{rand}1$ , 若  $\text{rand}1 > r(i)$ , 则选择当前最佳解,进行局部扰动。 $r(i)$  为第  $i$  只蝙蝠的脉冲频度。局部扰动如式(20)所示。

$$S_i^t = S_{best} + 0.1r_i^t \text{rand}(1, nVar) \quad (20)$$

步骤5)计算扰动后蝙蝠新适应度,若新适应度优于自身最优适应度或  $rand2 < r(i)$ ,就用扰动后的新位置替换旧位置进行保存,同时更新脉冲频率和音强,如式(21)、(22)所示。

$$r_i^{t+1} = r_0[1 - \exp(-\gamma t)] \quad (21)$$

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (22)$$

步骤6)看是否达到结束条件,是则停止搜索,输出全局最优解对应单元蝙蝠的位置和适应度值;否则跳回步骤3)继续进行搜索。

### 3.2 改进蝙蝠算法

#### 1) Tent 映射初始化种群

Tent 映射作为一种非线性的自然现象,以其序列具有遍历性、随机性等优点,被广泛用于优化搜索问题,因此采用 Tent 映射序列初始化策略代替蝙蝠算法中随机生成种群的方法。Tent 映射表达式如式(23)所示。

$$x_{n+1} = \begin{cases} \mu x_n, & 0 < x_n < 0.5 \\ \mu(1 - x_n), & 0.5 < x_n < 1 \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $x_n, x_{n+1} \in (0, 1)$ ,  $x_n = rand(1, nVar)$ ,为 Tent 参数,  $\mu$  通常值取为 2。

将所得  $x_{n+1}$  代入算法步骤2)中,如式(24)所示。

$$S_i = W_{\min} + (W_{\max} - W_{\min})x_{n-1} \quad (24)$$

#### 2) 柯西变异

柯西变异来源于连续型概率分布的柯西分布,采用适宜随机变量来产生柯西变异因子,用于蝙蝠算法的步骤3)中,对  $t$  时刻的速度变量加入柯西变异因子,改变蝙蝠飞行速度,增强跳出局部最优的能力。变异公式如式(25)所示。

$$mutation(Ca) = (2 - \tan(\pi(u - 0.5))) \quad (25)$$

式中:  $u = 0.5 + rand(0.8525 - 0.5)$ ,  $mutation(Ca)$  即表示柯西变异因子,将其带入式(18),如式(26)所示。

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (S_i^{t-1} - S_{best})f_i + mutation(Ca) \quad (26)$$

### 3.3 算法仿真对比

为验证所提算法的优异性,采用3种测试函数进行仿真对比分析,测试函数具体参数如表2所示。

表2 测试函数

函数名称	函数公式	维度	最佳值
Sphere 函数	$\sum_{i=1}^n x_i^2, x \in [-100, 100]$	30	0
Rastrigin 函数	$\sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10],$ $x \in [-5.12, 5.12]$	30	0
Ackley 函数	$-20\exp(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}) -$ $\exp(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)) +$ $20 + e, x \in [-32, 32]$	30	0

现设置蝙蝠算法、粒子群算法和改进蝙蝠算法进行仿真对比,设置算法的最大迭代次数为1000,种群大小为200,对测试函数所对应的每种算法都测试10次,求取优化结果的平均值、标准差值作为评价标准,仿真结果如表3所示,每个测试函数的仿真迭代收敛曲线如图3所示。

表3 仿真结果

测试函数	评价标准	粒子群算法	蝙蝠算法	改进蝙蝠算法
Sphere 函数	平均值	$6.77 \times 10^{-3}$	$1.72 \times 10^{-3}$	$2.23 \times 10^{-14}$
	标准差值	$7.31 \times 10^{-3}$	$1.64 \times 10^{-3}$	$1.21 \times 10^{-14}$
Rastrigin 函数	平均值	$1.21 \times 10^{-2}$	$7.76 \times 10^{-3}$	$7.99 \times 10^{-15}$
	标准差值	$1.22 \times 10^{-2}$	$3.17 \times 10^{-3}$	$2.14 \times 10^{-15}$
Ackley 函数	平均值	$4.21 \times 10^{-2}$	$1.67 \times 10^{-3}$	$3.56 \times 10^{-13}$
	标准差值	$2.52 \times 10^{-2}$	$1.57 \times 10^{-3}$	$2.36 \times 10^{-13}$

在表3对3种测试函数的仿真结果中,对比平均值和标准差值可以明显发现改进蝙蝠算法寻优的精确度要远高于粒子群算法和蝙蝠算法;图3为 Sphere、Rastrigin 和 Ackley 测试函数对3种算法的仿真对比图,可明显观察到,改进蝙蝠算法的收敛的速度和精确度远胜于粒子群和蝙蝠算法的收敛速度和精确度。由此,可验证了所提算法的有效性。

## 4 算例分析

### 4.1 算例基础数据

为验证所提算法的有效性,对离网互联的3个微电网

的能量优化调度进行仿真分析,其中 MG1 包含 4 kW 的光伏发电、1 kW 的风力发电系统;MG2 包含 4 kW 的光伏发电、4 kW 的风力发电系统;MG3 包含 2 kW 的光伏发电系统;集中储能系统 35 kW。选取算例时间共 24 时段,每时段为 1 h。微网群同时段的发电预测曲线、负荷需求预测曲线取自河南某电力高校实验数据,如图 4、5 所示。仿真的分时电价分布表如表 4 所示<sup>[13]</sup>。

### 4.2 优化调度分析

图 6~8 表示 MG1、MG2、MG3 进行功率交互的实际图,图中值大于 0 表示该微电网已实现自身能量平衡并可以向其他微电网供给的电量,值小于 0 表示其他微电网向

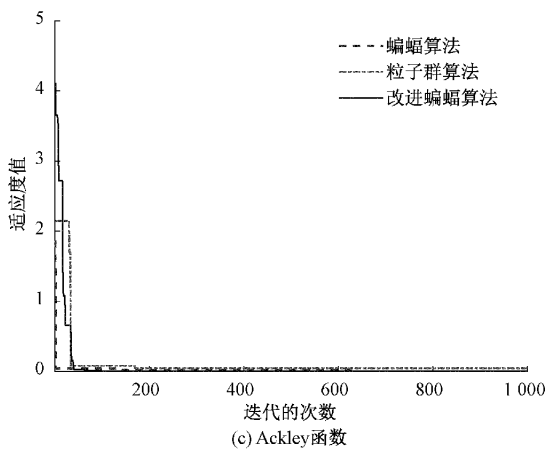
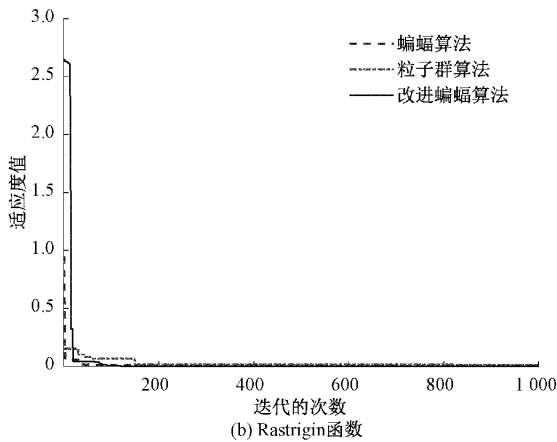
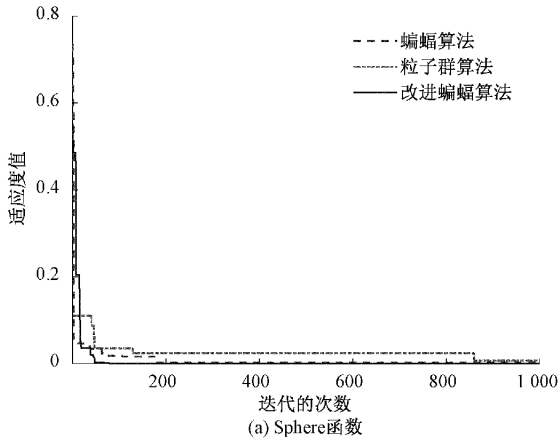


图 3 测试函数仿真图

其供给的电量。

由图 6~8 可知,在 1:00~7:00 时段之间,微电网 2 在能实现内部能量平衡的同时,可以向微电网 1 和微电网 3 进行供电,对比可再生能源出力预测曲线和负荷需求预测曲线,可以发现此时微电网 1 缺电量较大,所以此时微电网 1 的功率交互图均为负值,微电网 2 向其进行的供电,对微电网 3 的供电是在满足微电网 1 能量平衡后进行的;在 9:00~16:00 时,微电网 1 能实现自己的能量平衡,并向缺电量大的微电网 2 进行供电,实现其内部平衡,如 16 时未

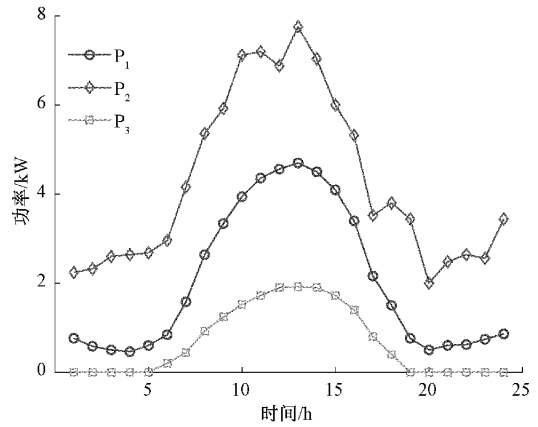


图 4 可再生能源出力预测图

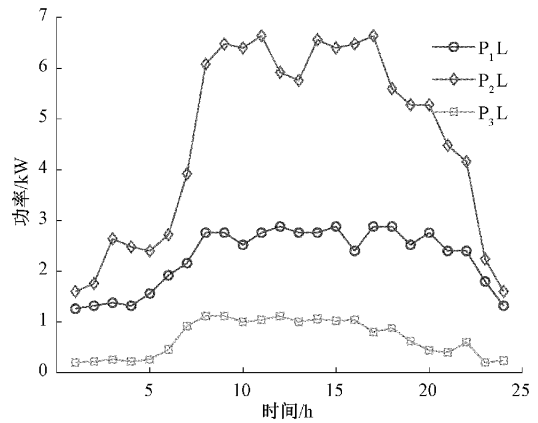


图 5 负荷需求预测图

表 4 分时电价分布表

时期	时间	$C_{\text{exb}}$ (元/kW)	$C_{\text{exs}}$ (元/kW)	$C_z$ (元/kW)	$C_{\text{Rate}}$ (元/kW)
高峰期	11:00~15:00	0.83	0.65	0.83	0.5
	18:00~21:00				
平峰期	7:00~11:00	0.49	0.38	0.49	0.5
	15:00~18:00				
低峰期	21:00~23:00	0.17	0.13	0.17	0.5
低峰期	23:00~7:00	0.17	0.13	0.17	0.5

能实现微电网 2 平衡,此时仍需微电网 3 进行供给能量; 23:00~24:00 时,微电网 2 可输出能量用于平衡微电网 1 和微电网 3,同样按各自缺电量大小进行先后调度,具体如功率交换图所示;其他时间节点未有微网间能量交互,对比可再生能源出力预测曲线和负荷需求预测曲线,可知由于 3 个子微电网同时刻的净输出功率都大于 0 或者都小于 0,无法进行微网间的能量互济,固其值为 0。

如图 9 所示,按照所提能量优化调度策略,以改进蝙蝠算法进行调度优化,图中可以观测出每时刻的微网群内部的能量均能实现达到平衡状态,即各子网及整个微网群

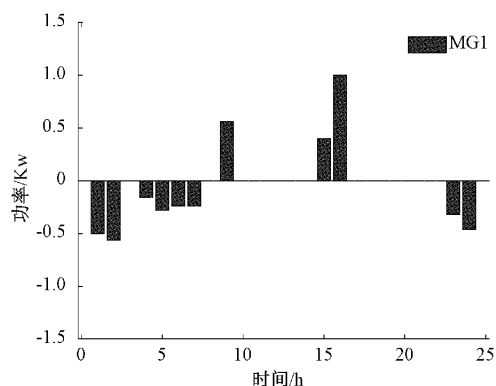


图6 MG1 功率交互图

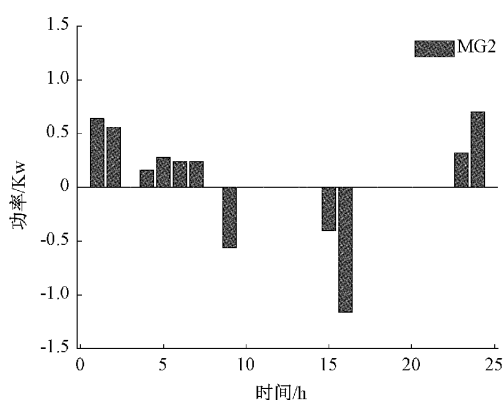


图7 MG2 功率交互图

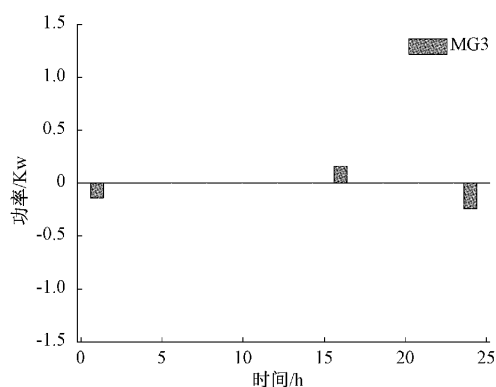


图8 MG3 功率交互图

所产生的能量能与各子网的负荷进行了平衡,提高系统的稳定性。

如图10所示,在对微网群进行优化过程中分别采用蝙蝠算法、粒子群算法和改进蝙蝠算法,得出综合成本图。

由图10可知,粒子群算法在15时之前,各时段综合成本大都高于原始蝙蝠算法和改进蝙蝠算法成本,在15时及其之后时间段内,其部分综合成本虽低于另外两种算法成本,但对于整体综合成本而言均略高于其他两种算法成本;改进蝙蝠算法在12时之前各时段综合成本稍大于蝙蝠算法成本,12时刻后各时段综合成本明显小于蝙蝠算法

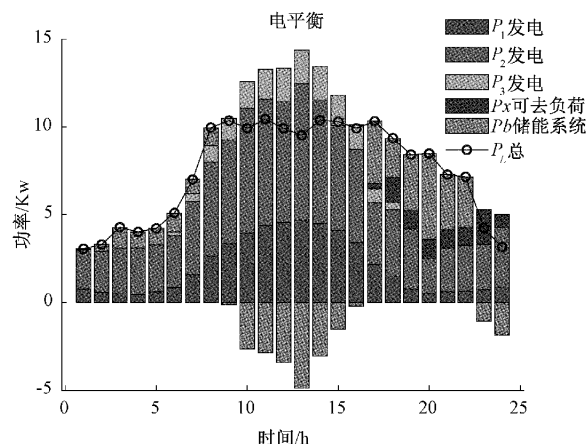


图9 基于改进蝙蝠算法的微网群能量平衡

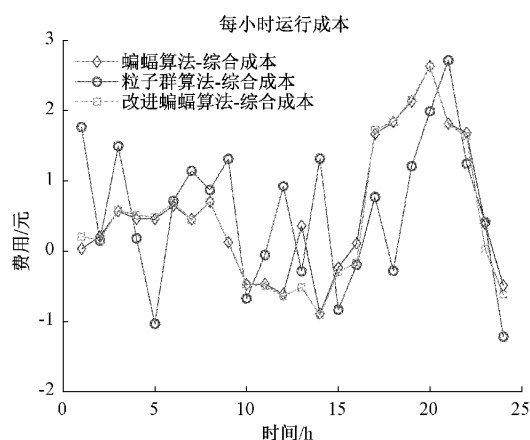


图10 微网群各时刻综合成本图

成本,整体综合成本呈现降低态势。最终优化后,蝙蝠算法使得整体综合成本较之于粒子群算法降低了3.81%,改进后的蝙蝠算法使得整体综合成本较之于蝙蝠算法降低了11.25%。

## 5 结论

本文以两个交流微电网和一个直流微电网构成的微网群为研究对象,针对所研究的微网群系统,采用分时电价制定的调度策略,在综合考虑运行成本和对环境的影响因素下,使用基于Tent混沌映射和柯西变异的改进蝙蝠算法进行优化,达到微网群运行时整体综合成本最低的目的,最终的优化结果显示改进蝙蝠算法计算的整体综合成本比传统粒子群算法、蝙蝠算法计算的成本更低,使得整体利益分别提高14.63%、11.25%,验证了本文所用方法的有效合理性,提高了微网群整体的经济性。

## 参考文献

- [1] 舒印彪,张丽英,张运洲,等.我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(6):1-14.
- [2] 陈胜,卫志农,顾伟,等.碳中和目标下的能源系统转型

- 与变革:多能流协同技术[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9):3-12.
- [3] 柴英博,解璞. 多元直流微网能量协调控制策略[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(2):47-52.
- [4] 刘迎澍,陈曦,李斌,等. 多微网系统关键技术综述[J]. 电网技术, 2020, 44(10):3805-3820.
- [5] 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):3077-3092.
- [6] 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.
- [7] 支娜,肖曦,田培根,等. 微网群控制技术研究现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4):107-115.
- [8] 赵波,秦如雯. 微电网群体体系架构及能量协同优化运行的 SoS 方法初探[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6):1886-1895.
- [9] 吴红斌,孙瑞松,蔡高原. 多微网互联系统的动态经济调度研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(5):1426-1433.
- [10] 李云龙,田书,马亚光. 含多微网的主动配电网分层优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6):88-93.
- [11] 何黎君,程杉,陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11):10-17.
- [12] 练小林,李晓露,陆一鸣,等. 可交易能源框架下的微网群动态电能交易策略[J]. 电力建设, 2020, 41(6):18-27.
- [13] 赵紫嫣. 微网群协调控制与能量优化[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2019.
- [14] YANG X S. A new metaheuristic bat inspired algorithm[C]. Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization(NICSO 2010), Springer, 2010.
- [15] 罗荇子,汪飒,谭阳红,等. 改进小生境蝙蝠算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化报, 2017, 29(10):35-51.
- [16] 马迎东,王文栋,温强. 基于混沌搜索策略蝙蝠算法的输电网规划[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15):17-21.
- [17] 刘超. 基于反向混沌人工搜索群算法的微网系统能量优化调度[D]. 天津:河北工业大学, 2019.
- [18] 唐延强,李成海,宋亚飞,等. 自适应变异麻雀搜索优化算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, DOI: 10.13700/j. bh. 1001-5965. 2021. 0282.
- [19] 周小平. 微电网功率协调控制关键技术研究[D]. 长沙:湖南大学, 2018.
- [20] 蓝达成,崔双喜,樊小朝,等. 计及蓄电池寿命的微网群优化调度模型[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2021, 46(2):72-81.
- [21] 杜健健,万晓冬. 基于蝙蝠算法的多无人机协同侦察任务规划[J]. 电子测量技术, 2019, 42(7):40-43.

#### 作者简介

曾志辉,博士,副教授,主要研究方向为微电网、大功率开关电源技术、储能技术等。

E-mail: zzh@hpu.edu.cn

李雪强,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电气传动、微网群能量优化调度。

E-mail: 2697817834@qq.com