

基于Levy飞行粒子群优化算法的微电网优化调度

陈文梅^{1*}, 陈永黄², 陈小燕³

¹广东岭南建设集团有限公司, 广东 广州

²广东远恒电力建设有限公司, 广东 肇庆

³广东成就能源工程有限公司, 广东 佛山

收稿日期: 2025年7月1日; 录用日期: 2025年7月24日; 发布日期: 2025年8月5日

摘要

为合理分配微电网中各微电源的出力情况, 使微电网更加经济的运行。提出一种基于Levy飞行粒子群优化算法(LFPSO), 在考虑功率平衡和各微电源出力约束的情况下, 建立以经济成本和环境成本作为目标函数的微电网调度模型, 并采用LFPSO对模型求解。最后通过实例仿真, 验证了LFPSO比其他先进算法具有更好的收敛速度和精度, LFPSO能够有效降低微电网运行的总费用, 验证了所提算法的有效性。同时对储能装置采用2种不同的控制策略进行充放电管理, 以研究分析对微电网优化调度的影响, 使微电网更加经济安全的运行。

关键词

微电网, 粒子群优化算法, Levy飞行, 储能装置

Optimization Scheduling of Microgrid Based on Levy Flight Particle Swarm Optimization Algorithm

Wenmei Chen^{1*}, Yonghuang Chen², Xiaoyan Chen³

¹Guangdong Lingnan Construction Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²Guangdong Yuanheng Electric Power Construction Co., Ltd., Zhaoqing Guangdong

³Guangdong Achievement Energy Engineering Co., Ltd., Foshan Guangdong

Received: Jul. 1st, 2025; accepted: Jul. 24th, 2025; published: Aug. 5th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 陈文梅, 陈永黄, 陈小燕. 基于 Levy 飞行粒子群优化算法的微电网优化调度[J]. 应用数学进展, 2025, 14(8): 17-27. DOI: 10.12677/aam.2025.148367

Abstract

In order to reasonably allocate the output of various micro-sources in a microgrid and enable more economical operation, this paper proposes a microgrid scheduling model based on the Levy Flight Particle Swarm Optimization (LFPSO) algorithm. The model considers power balance and output constraints of each micro-source, establishing economic and environmental costs as the objective functions. LFPSO is employed to solve the model. Simulation results demonstrate that LFPSO outperforms other advanced algorithms in terms of convergence speed and accuracy, effectively reducing the total operating costs of the microgrid and validating the effectiveness of the proposed algorithm. Additionally, two different control strategies for energy storage devices are implemented for charge and discharge management to analyze their impact on microgrid optimization scheduling, ensuring more economical and secure operation of the microgrid.

Keywords

Microgrid, Particle Swarm Optimization Algorithm, Levy Flight, Energy Storage Device

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着能源危机的加剧和环境污染问题的日益严峻,提高能源利用效率并降低污染已成为亟需解决的关键挑战。微电网作为一种新型的分布式能源系统,为应对这些问题提供了有效的技术手段。它被视为整合可再生能源的重要平台,使可再生能源能够更便捷地接入配电网,并实现分布式发电与负荷的协调运行,从而提升能源管理的灵活性和效率[1]。

目前,国内外学者都比较集中在对微电网的多目标优化调度的研究,也取得了很大的突破。有的采用配备储能系统,则可以对其进行缓解,使微电网中风电的输出功率更加平滑,能源利用效率进一步地提高。文献[2]中为提高微电网的经济效益,根据风光发电效率与负荷的大小,以此为依据,来调节蓄电池的充放管理,效果明显有所提升,文献[3]提出微电网环境下考虑 AC/DC 换流成本,用灰狼优化算法求解,优化表明改进算法有效进行经济调度。文献[4]对粒子群算法进行改进,建立经济效益的目标函数,改进后的粒子群收敛明显加快。文献[5]采用传统遗传算法来求解微电网多目标调度问题,但该方法容易陷入局部最优。

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO) [6]是一种群智能优化算法,具有参数少、易于实现、适应性强等优点且在功率预测、故障诊断等领域已成功应用。然而,尽管这些改进方法具有一定可行性,PSO 仍存在容易陷入局部最优的缺陷。针对上述问题,本文提出一种基于 Levy 飞行粒子群优化算法(LFPSO),通过引入 Levy 飞行策略,在算法迭代时通过远距离移动扩大搜索范围,有效避免了算法陷入局部最优。最后,采用基准测试集以及实际工程案例验证了 LFPSO 的有效性。

2. LFPSO 算法的设计

2.1. PSO 算法

PSO 算法属于群体智能优化算法,一组随机粒子通过不断迭代优化寻找最优解。假设有一个 n 维搜

索空间有 i 个粒子, 第 i 个粒子可以用一个 n 维向量 $X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n})$ 来表示。该粒子的速度则由另一个 n 维向量 $V_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n})$ 表示。每个粒子的适应度根据优化问题的目标函数进行评估。第 i 个粒子之前访问过的最佳位置记为个体最佳位置 $P_i = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,n})$ 。整个群体中个体的最佳位置则记为全局最佳位置 $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$ 。在每一步中, 粒子的速度和新位置将根据以下两个方程确定:

$$V_i = w * V_i + c_1 * r_1 * (P_i - X_i) + c_2 * r_2 * (G - X_i) \quad (1)$$

$$X_i = X_i + V_i \quad (2)$$

其中, w 为惯性权重, c_1 、 c_2 分别为加速度系数, r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。 P_i 、 G 分别为个体最优值和全局最优值。

2.2. LFPSO 算法

尽管 PSO 简单高效, 但存在因过早收敛而陷入局部最小值的问题, 以及全局搜索能力较弱的缺点。为解决这些问题, 本文将 PSO 与 Levy 飞行相结合提出 LFPSO 算法。Levy 飞行是一种利用确定步长的随机行走方法[7]。通过引入 Levy 飞行, 粒子群在搜索空间中能够进行更高效的搜索, 因为粒子可以进行长距离跳跃, 从而跳出局部最优。由此, 等式(2)被修改为如下:

$$X_i = (X_i + V_i) * (1 + \text{Levy}(n)) \quad (3)$$

其中:

$$\text{Levy}(n) = a * \frac{r_a * \sigma}{|\gamma|^{\frac{1}{\beta}}} \quad (4)$$

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) * \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) * \beta * 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}} \right)^{1/\beta} \quad (5)$$

其中: $r_a \in [0, 1]$; γ 、 β 服从正态分布; n 为维度; $a = 0.01$ 为步长因子; Γ 标准伽函数。

2.3. 算法性能测试

为了测试 LFPSO 优越性, 除采用测试函数测试以外, 还将 LFPSO 同其他几种算法进行对比。对比算法有 PSO、CSOAOA [8]、GWO [9] 和 NAPS0 [10]。为测试 LFPSO 的性能, 将算法在 5 个测试函数中进行测试, 测试函数及其变量范围如表 1 所示。

Table 1. Standard test functions

表 1. 标准测试函数

函数	变量范围	Fmin
$F_1(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$	$[-100, 100]$	0
$F_2(x) = \sum_{i=1}^n ([x_i + 0.5])^2$	$[-100, 100]$	0
$F_3(x) = \sum_{i=1}^n i x_i^4 + \text{random}[0, 1)$	$[-1.28, 1.28]$	0

续表

$F_4(x) = 0.1 \left\{ \sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_i + 1)] \right. \\ \left. + (x_n - 1)^2 [1 + \sin^2(2\pi x_n)] \right\} + \sum_{i=1}^n u(x_i, 5, 100, 4)$	$[-50, 50]$	0
$F_5(x) = \frac{\pi}{n} \left\{ 10 \sin(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10 \sin^2(\pi y_{i+1})] + (y_n - 1)^2 \right\} \\ + \sum_{i=1}^n u(x_i, 10, 100, 4)$		
$y_i = 1 + \frac{x_i + 1}{4}$	$[-50, 50]$	0
$u(x_i, a, k, m) = \begin{cases} k(x_i - a)^m & x_i > a \\ 0 & -a < x_i < a \\ k(x_i + a)^m & x_i < -a \end{cases}$		

统计每个算法在测试函数上独立重复运行 30 次的结果, 30 次运行结果平均值(Mean)如表 2 所示。为更好研究算法性能, 算法运行 30 次标准差(Std)也记录在表 2 中。

Table 2. The running results of different algorithms on the test function

表 2. 不同算法在测试函数上的运行结果

测试函数		LFPSO	PSO	CSOAOA	GWO	NAPSO
F ₁	Ave	6.355E-330	3.23E-112	7.201E-04	6.552E-33	3.252E-229
	Std	5.655E-329	7.320E-111	6.892E-03	5.565E-32	3.554E-202
F ₂	Ave	4.326E-233	2.535E-102	2.478E-102	3.566E-32	2.804E-208
	Std	4.356E-233	1.475E-101	9.119E-102	7.143E-32	5.780E-223
F ₃	Ave	4.232E-184	1.712E-108	1.148E-98	2.982E-23	5.623E-163
	Std	4.262E-184	3.906E-106	8.172E-95	3.002E-26	1.439E-155
F ₄	Ave	7.250E-184	3.426E-100	4.825E-56	7.122E-02	4.293E-147
	Std	6.959E-180	6.352E-100	1.325E-15	2.012E-02	4.523E-120
F ₅	Ave	7.895E-123	1.450E-104	7.966E-78	1.021E-22	1.622E-99
	Std	6.978E-105	6.262E-103	2.002E-69	1.855E-23	6.546E-89

由表 2 可知, 5 种算法在不同测试函数下的平均值和标准差存在显著差异。LFPSO 在 F1 和 F2 上表现优异, 平均值极小, 标准差也较小, 表明其稳定性和准确性较高。PSO 在所有函数中表现较差, 尤其在 F1 和 F2 上, 平均值较大。CSOAOA 在 F1 和 F2 上表现一般, 但在 F3 上有较好表现。NAPSO 在 F4 和 F5 上表现较好, GWO 在 F4 上有较小的标准差, 显示出较好的稳定性。整体来看, LFPSO 在多个函数上表现突出。

图 1 中给出了 5 种算法收敛曲线。在收敛速度和精度方面, LFPSO 在大约 300~500 次迭代以内就能收敛到一个接近最优解的值。这也使 LFPSO 更清楚地突出了其优势。从测试函数整体上来看, LFPSO 比其他几种算法具有更高的搜索效率和收敛速度, 且处理过程较为稳定, 可以取得非常有竞争力的结果。

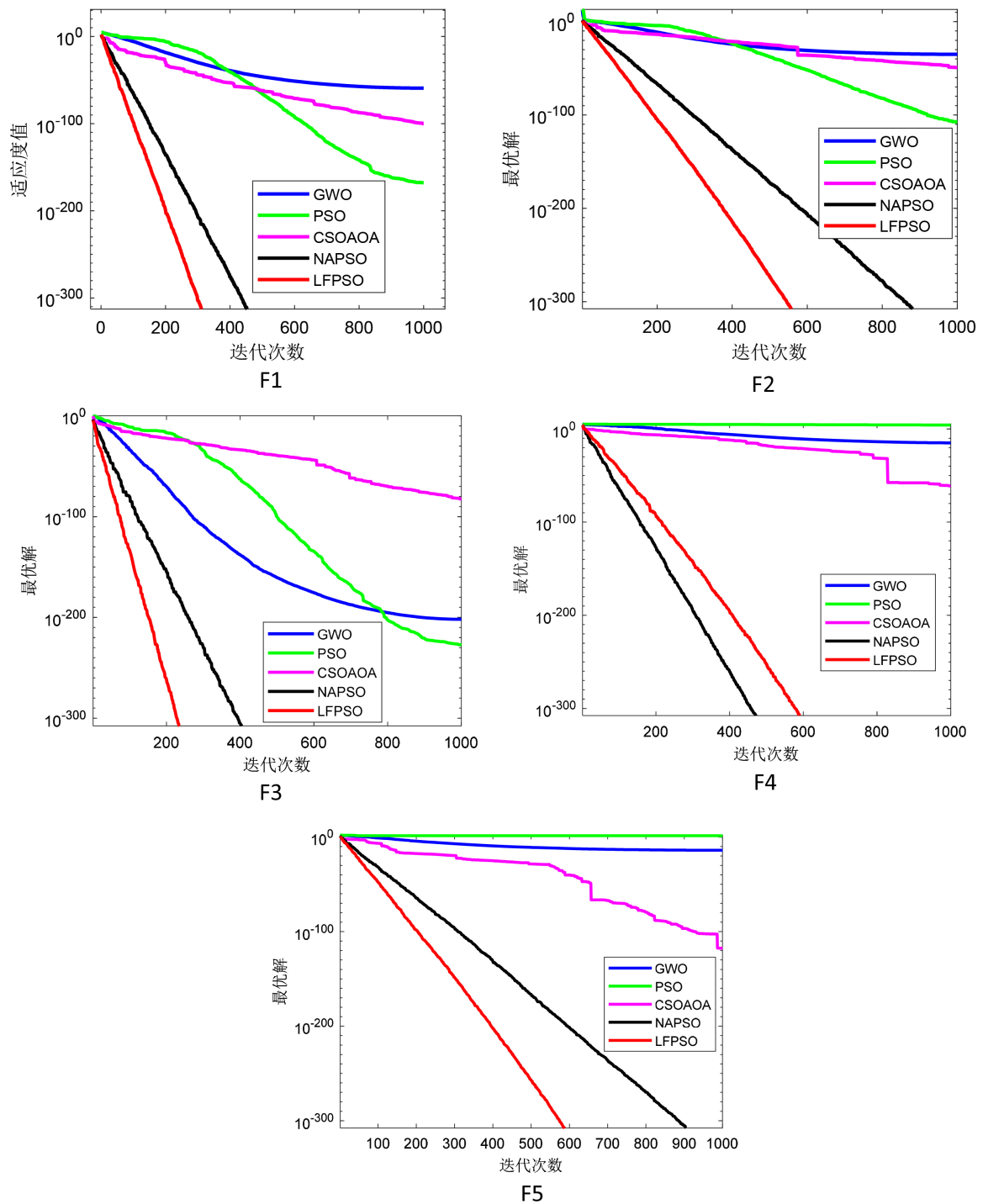


Figure 1. Convergence curve of the LFPSO algorithm

图 1. LFPSO 算法收敛曲线

3. 微电网优化模型

3.1. 目标函数

本文主要探讨了含光伏(Photovoltaic, PV)、内燃机(Motorcycle Engine, GS)、微型燃气轮机(Micro-

Turbine, MT)、燃料电池(Fuel Cell, FC)、风力发电机(Wind Turbine, WT)以及蓄电池(Storage Battery, BT)的微电网模型[11]。该模型旨在实现经济成本最小化和环境效益最大化。经济成本包括燃料费用、运行维护费用以及与主电网的交互费用；环境成本则涉及微电源运行过程中污染物(如 CO_2 、 NO_x 、 SO_2)排放的治理费用[12]：

$$F = \min(\phi F_1 + \mu F_2) \quad (6)$$

其中： F 为总运行成本； F_1 、 F_2 分别为经济成本和环境治理费用；为了方便计算将多目标采用加权的方式转化成单目标， ϕ 、 μ 取值都为 0.5。

目标函数 1：经济成本

$$\min F_1(x) = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^N (C_{i,f} P_{i,t} + C_{i,m} P_{i,t}) + C_{Grid,t} P_{Grid,t} + C_{BT,t} P_{BT,t} \right] \quad (7)$$

其中： T 为一个调度周期； N 为分布式电源的种类； $C_{i,f}$ 、 $C_{i,m}$ 分别是各微电源的燃料系数和运行管理费用； $P_{i,t}$ 为第 i 种微电源的输出功率； $C_{Grid,t}$ 、 $C_{BT,t}$ 分别为 t 时刻电价与蓄电池的运行管理费用； $P_{Grid,t}$ 、 $P_{BT,t}$ 分别为 t 时刻与电网的交互功率和蓄电池的输出功率[12]。

目标函数 2：环境成本

$$\min F_2(x) = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^I \alpha_i \left(\sum_{j=1}^N \beta_{ji} P_j^t + \beta_{Gridi} P_{Grid}^t \right) \right) \quad (8)$$

其中： α_i 为第 i 类污染物的治理费用； β_{ji} 为第 j 台微电源的第 i 类污染物的排放系数； P_j 为微电源的输出功率； β_{Gridi} 为主电网的第 i 类污染物的排放系数； P_{Grid} 为主电网的输出功率[12]。

3.2. 约束条件

1) 功率平衡约束

$$P_d^t + P_{loss}^t = \sum_{i=1}^N P_{Gi}^t + P_{grid}^t \quad (9)$$

其中： P_d^t 为 t 时段系统负荷； P_{loss}^t 为 t 时段输电损耗； P_{Gi}^t 为各微电源的出力； P_{grid}^t 为与主网的交互功率，本文为 150 KW。

2) 各微电源出力约束

$$P_t^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_t^{\max} \quad (10)$$

其中： $P_t^{\min}$ 、 $P_t^{\max}$ 分别为微电源 i 的输出功率的上限和下限。

3) 微电网与主电网之间的功率约束

$$P_{Grid}^{\min} \leq P_{Grid,t} \leq P_{Grid}^{\max} \quad (11)$$

其中： $P_{Grid}^{\min}$ 、 $P_{Grid}^{\max}$ 为微电网与主网间交互的上限和下限功率；若 $P_{Grid}^{\min} < 0$ ，表示微电网系统可以向主网输出功率。

4) 蓄电池运行约束

$$P_{BT}^{\min} \leq P_{BT}^i \leq P_{BT}^{\max} \quad (12)$$

其中： $P_{BT}^{\min}$ 、 $P_{BT}^{\max}$ 分别为蓄电池的上限和下限的功率。

4. 微电网中储能装置的运行策略

4.1. 蓄电池削峰填谷控制

削峰填谷是对蓄电池最常用的控制方式之一，顾名思义就是在用电高峰时段，蓄电池放电，以缓解主电网的压力，当处于用电低谷时段，对蓄电池进行充电来存储电能，以便下阶段使用，这样负荷曲线就会变得平坦，有利于提高系统的稳定性。

4.2. 蓄电池模糊逻辑控制

模糊逻辑控制(Fuzzy Logic Control, FLC)是工程控制方法中最常用的方法之一[13]，本文采用该方法应用于微电网优化调度中，结合模糊决策理论，对蓄电池充放电管理。控制器以实时电价(RP)、蓄电池剩余容量(SOC)为输入，以蓄电池充放电功率(CP)为输出，模糊语言对应关系如表 3 所示。按如下策略选取模糊规则：

Table 3. FLC controller input-output
表 3. FLC 控制器输入 - 输出

观测量	模糊语言		变量类型
	P	N	
RP	+	ϕ	输入
SOC	+	ϕ	输入
CP	+	-	输出

- 1) 当 SOC 较高时，若 RP 较高，则蓄电池放电功率 CP 越大。
 - 2) 当 SOC 较低时，若 RP 较低，则蓄电池充电功率 CP 越大。
 - 3) 当 SOC 较低时，若 RP 较低，则优先考虑微电网向系统放电。
- 模糊规则如表 4 所示。

Table 4. IF-THEN rules
表 4. IF-THEN 规则

RP/SOC	PVS	PS	PL	PVL
PVS	NB	NM	NS	ZO
PS	NM	NS	ZO	PS
PL	NS	ZO	PS	PM
PVL	ZO	PS	PM	PB

其中：RP 和 SOC 的模糊集为{PVS (正非常小)，PS (正小)，PL (正大)，PVL (正非常大)}；CP 的模糊集为{NB (负大)，NM (负中)，NS (负小)，ZO (零)，PS (正小)，PM (正中)，PB (正大)}。

5. 算例分析

5.1. 算例基础数据

本文以 Matlab 为仿真平台。种群大小 60，迭代次数 3000。Grid 表示主网。污染物的排放参数如表 5 所示；各微电源的具体参数如下表 6 所示。居民日负荷(Load)，以及光伏出力和风能出力如图 2 所示。

Table 5. Treatment costs for pollutants emitted by each distributed power source
表 5. 各分布式电源排放污染物的处理费用

污染物类型	治理费用(元/Kg)	FC (Kg/kwh)	MT (Kg/kwh)	DE (Kg/kwh)	Grid (Kg/kwh)
CO ₂	0.088	1.596	1.432	1.078	23
NO _x	26.46	0.440	0.030	21.8	3.6
SO ₂	6.237	0.008	0.006	0.454	4.54

Table 6. Optimal operating parameters of each distributed power source
表 6. 各分布式电源的优化运行参数

电源类型	功率下限(KW)	功率上限(KW)	运行成本(元/KWh)	燃料成本(元/KWh)
PV	0	50	0.0103	-
WT	0	70	0.0450	-
FC	0	65	0.0293	0.2435
MT	0	65	0.0419	0.4090
DE	0	50	0.1258	0.6031

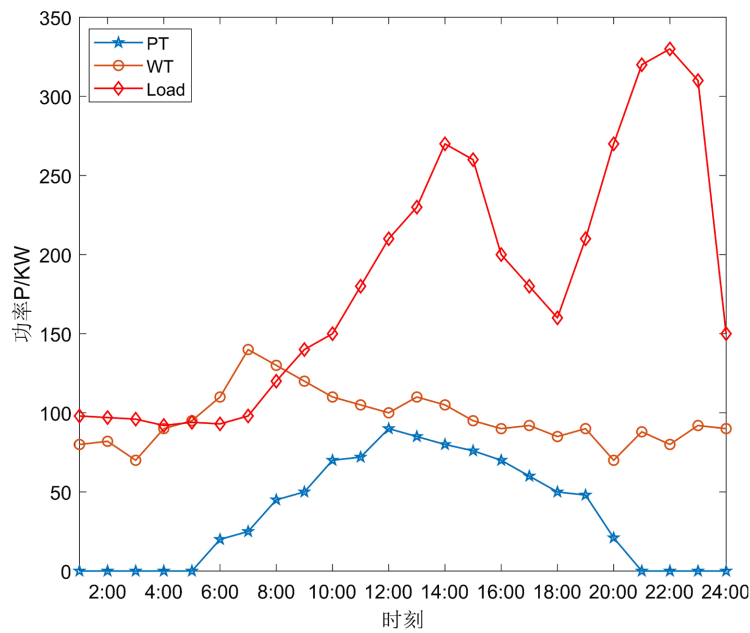


Figure 2. Predicted power by Load, PV and WT
图 2. Load、PV、WT 预测功率

微电网并网运行时，不考虑售电情况。各时段实时电价如下表 7 所示：

Table 7. Electricity purchase and sale prices at different time periods
表 7. 各时段购电和售电的价格

项目	价格/元/KWh		
	峰时段	平时段	谷时段
	10:00~15:00	07:00~09:00	23:00~06:00
	19:00~22:00	16:00~18:00	
购电	1.56	0.7	0.43
售电	1.28	0.54	0.32

5.2. 优化调度结果分析

对蓄电池采用 2 种不同的控制策略，并采用 LFPSO 对微电网模型求解，结果分析如下：

方案 1：削峰填谷控制策略

当对蓄电池采用削峰填谷控制策略时，各微电源调度图如图 3 所示，LFPSO 在求解过程中的收敛曲线如图 4 所示。

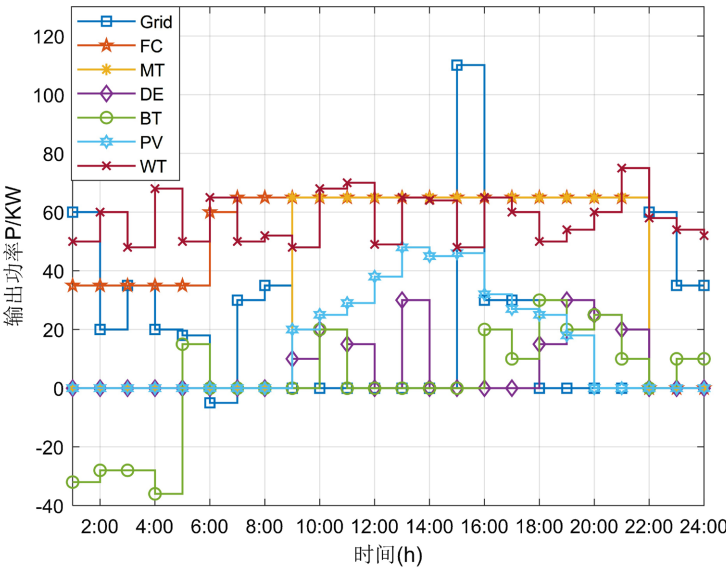


Figure 3. The output of each distributed power source during peak shaving and valley filling control
图 3. 削峰填谷控制时各分布式电源出力情况

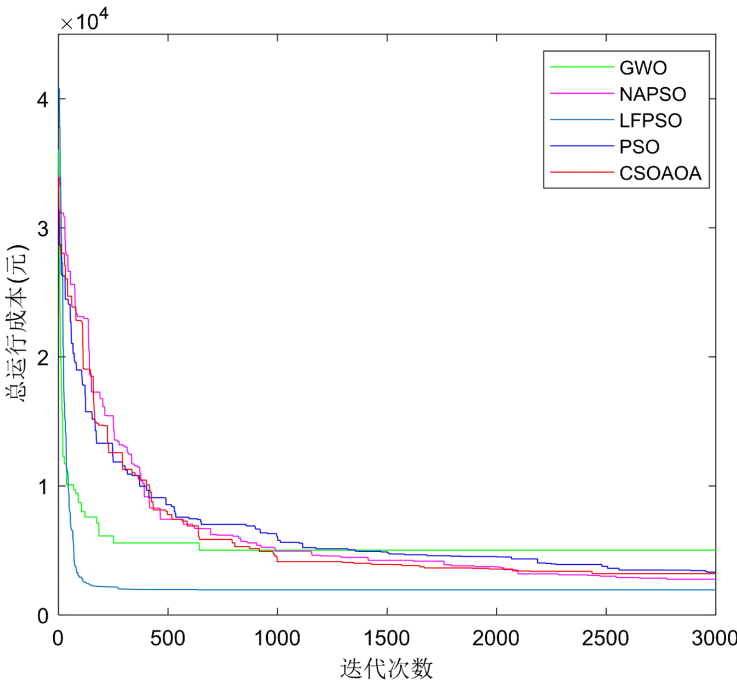


Figure 4. The total cost of the system during peak shaving and valley filling control
图 4. 削峰填谷控制时系统花费总成本

方案 2: 模糊逻辑控制策略

当对蓄电池采用模糊逻辑控制策略时, 各微电源调度图如图 5 所示 LFPSO 在求解过程中的收敛曲线如图 6 所示。

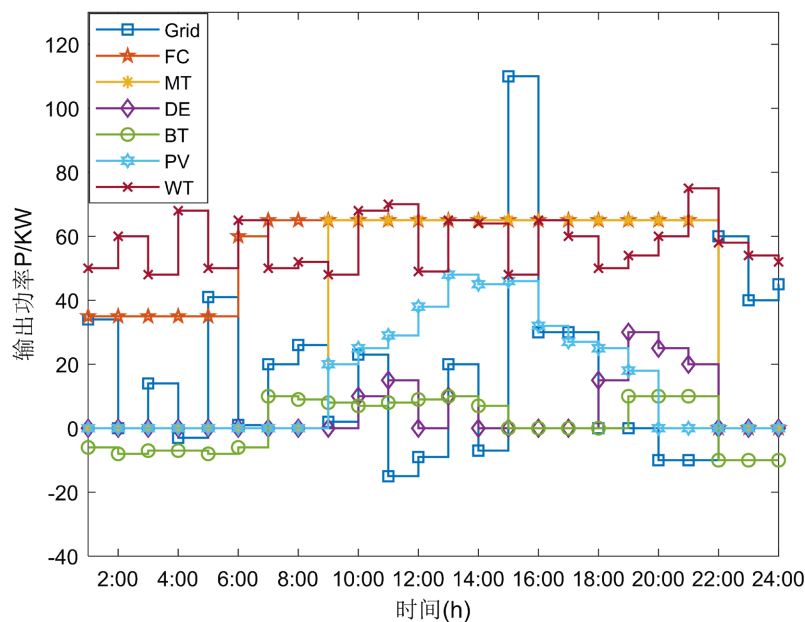


Figure 5. The output of each micro power supply during fuzzy logic control

图 5. 模糊逻辑控制时各微电源出力情况

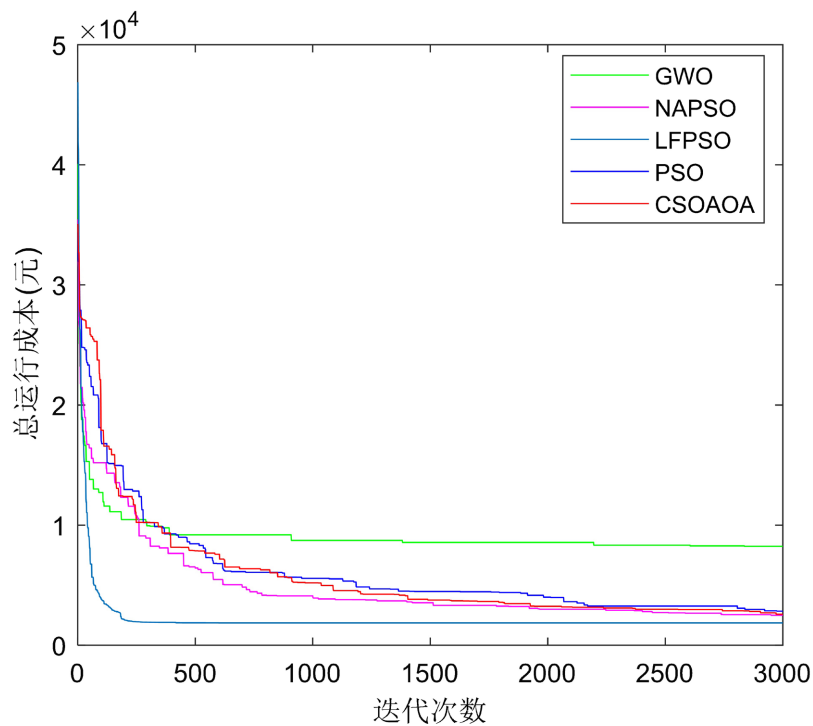


Figure 6. The total cost of the system when controlled by fuzzy logic

图 6. 模糊逻辑控制时系统花费总成本

综上 2 种方案分别为对蓄电池运行采用的 2 种控制策略, 以及在此控制策略下, 采用 LFPSO 和 NAPSO、CSOAOA 和 GWO 等 5 种不同的算法对模型求解。图 3 和图 5 分别不同策略下各微电源的调度情况。图 4 和图 6 分别不同控制策略下, 5 种不同的算法去求解该模型得到的系统所花费的总成本, 方案 1 微网总花费成本是 1514.5 元, 方案 2 微网总花费成本是 1466.9 元。对于不同算法的比较, 从图 4 和图 6 中直观地看出 LFPSO 收敛速度和精度显然是优于 NAPSO、CSOAOA 和 GWO。总的来说, 方案 2 > 方案 1, 说明合理的对蓄电池运行出力进行管理, 有利于微电网系统经济稳定的运行。因此, 通过上述实例的验证说明了 LFPSO 的有效性。

6. 结论

本文研究微电网的并网运行模式, 建立微电网系统多目标优化调度模型, 采用 LFPSO 对建立的模型进行求解, 结论如下:

- 1) 提出一种基于 Levy 飞行粒子群优化算法, 通过引入 Levy 飞行策略, 在算法迭代时通过远距离移动扩大搜索范围, 有效避免了算法陷入局部最优。最后, 采用基准测试集 LFPSO 的有效性。
- 2) 过使用 LFPSO 对所建立的微电网模型进行求解, 实现了是经济效益和环境效益最优的目标。
- 3) 通过对蓄电池运行采用 2 种不同的控制方式, 分析研究了对微电网调度的影响, 合理地蓄电池运行出力进行管理, 有利于微电网系统经济稳定的运行。

参考文献

- [1] 陈晓华, 王志平, 吴杰康, 等. 微电网技术研究综述[J]. 黑龙江电力, 2023, 45(6): 471-480+506.
- [2] 戴旭凡, 陆奎, 宋丹. 基于混沌映射的自适应退火型粒子群算法的微电网优化经济调度[J]. 甘肃联合大学学报(自然科学版), 2021(4): 35.
- [3] 孔爱良, 梁硕, 李春来等. 基于改进粒子群算法的微电网优化运行[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(6): 550-555.
- [4] 王盼宝, 徐殿国, 谭岭玲等. 基于改进 MOPSO 的多能互补型微电网多元优化运行策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(10): 130-140.
- [5] 周辉, 张玉, 肖烈禧, 等. 基于改进秃鹰算法的微电网群经济优化调度研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 328-335.
- [6] Chen, G.-C. and Yu, J.-S. (2005) Particle Swarm Optimization Algorithm. *Information and Control*, **34**, 318-324.
- [7] Abualigah, L., Diabat, A., Mirjalili, S., Abd Elaziz, M. and Gandomi, A.H. (2021) The Arithmetic Optimization Algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **376**, Article ID: 113609. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113609>
- [8] Agushaka, J.O. and Ezugwu, A.E. (2021) Advanced Arithmetic Optimization Algorithm for Solving Mechanical Engineering Design Problems. *PLOS ONE*, **16**, e0255703. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255703>
- [9] Mirjalili, S., Mirjalili, S.M. and Lewis, A. (2014) Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, **69**, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- [10] 王维, 吴亮红, 刘振族, 等. 基于邻域自适应粒子群优化算法的地表水源热泵机组优化调度[J]. 系统科学与数学, 2021, 41(6): 1520-1532.
- [11] 常潇续, 曾宪文. 基于改进蜣螂算法的微电网优化调度研究[J]. 电工技术, 2024(5): 33-38.
- [12] 陈丹凤, 赵才, 张志飞, 等. 基于改进差分进化算法的微电网调度研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2022, 47(4): 1018-1029.
- [13] Sharma, R. (2016) Lyapunov Theory Based Stable Markov Game Fuzzy Control for Non-Linear Systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **55**, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.06.008>