

考虑用户满意度的弹性微电网最优经济运行

李佳讯¹, 张寿明^{1*}, 杨 森²

(1. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650504;

2. 滇西应用技术大学 测绘与信息工程学院, 云南 大理 671006)

Optimal Economic Operation of Resilient Microgrid Considering User Satisfaction

LI Jiaxun¹, ZHANG Shouming^{1*}, YANG Sen²

(1. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China;

2. Department of Computer Science and Technology, West Yunnan University of Applied Sciences, Dali 671006, China)

Abstract: [Objective] An optimisation model of a flexible microgrid is proposed to study the resilience of the system under extreme conditions while considering user satisfaction and pursuing economic operation. And the impact of flexible loads on user satisfaction is considered to improve user satisfaction while optimising economic dispatch. [Methods] This model integrated user satisfaction with microgrid economic operation and resilience enhancement, proposing a hybrid pelican optimization algorithm that simultaneously addresses pre-disaster prevention and post-disaster recovery strategies. A hybrid pelican algorithm was proposed, which contains multiple strategies of inertia weights, Lévy flights, attenuation factors and t-distribution. Mixing multiple strategies gradually improved the solution accuracy of the pelican algorithm. [Results] In simulation tests of low-probability high-impact scenarios, the proposed algorithm demonstrated significant performance advantages over butterfly optimization algorithm, particle swarm optimization algorithm, grey wolf optimization algorithm, artificial bee colony optimization algorithm, and the original algorithm, achieving system operational cost reductions of 26.7%, 27.0%, 26.1%, 21.8%, and 6.7% respectively, significant performance advantages. [Conclusion] The model can improve user satisfaction to a certain extent and proves that the proposed algorithm is more superior in solving the optimal economic operation and resilience problems of microgrids.

Key words: resilient microgrid; user satisfaction; optimal economic operation; hybrid pelican algorithm

摘要: [目的] 在考虑用户满意度和追求经济运行的同

时,提出了弹性微电网优化模型,以研究系统在极端条件下的弹性。考虑到柔性负荷对用户满意度的影响,在优化经济调度的同时提高用户的满意度。【方法】该模型涉及用户满意度和寻求微电网经济运行和恢复力,考虑到灾前预防和灾后恢复,提出一种混合鹈鹕算法,其中包含惯性权重、莱维飞行、衰减因子和 t 分布多种策略。将多种策略混合,逐步提高鹈鹕算法的求解精度。【结果】在低概率高损害场景的仿真试验中,改进算法相比蝴蝶优化算法、粒子群优化算法、灰狼优化算法、人工蜂群优化算法及原始算法分别节省了 26.7%、27.0%、26.1%、21.8% 和 6.7% 的系统运行成本,性能优势显著。【结论】该模型可以在一定程度上提高用户的满意度,证明了所提算法在解决微电网的最优经济运行和恢复能力问题方面具有更强的优越性。

关键词: 弹性微电网;用户满意度;最优经济运行;混合鹈鹕算法

0 引言

随着微电网技术的不断发展和完善,人们在追求微电网经济运行的同时,也越来越关注微电网在极端情况下能否恢复到灾前的运行状态。王治然等^[1]提出了一种弹性配电网灾后多源序贯协同供电恢复方法。陈将宏等^[2]对弹性指标量化,忽略经济约束。钱佳钰等^[3]以光储氢直流微电网为研究对象,提出了一种并离网相统一的协调控制策略,但该控制策略未涵盖故障场景。荣烜曼等^[4]指出面向城市电网极端灾害防御与恢复,建

设城市弹性电网具有重要的战略和现实意义,但未考虑人为攻击等复杂情况。同时经济性目标与弹性目标之间的动态平衡尚未得到深入探讨。

邵萍等^[5]建立了基于用户意愿的电动汽车备用容量多目标优化调度模型,但忽略了用户满意度驱动的需求弹性。微电网拥有更多分布式和可控的微源,母线电压以及分布式能源都会影响微电网安全运行^[6]。在面对极端自然灾害以及微电网故障等情况,提高微电网的弹性,这需要大量的研究。

钱和平等^[7]提出的热电联产微电网调度模型虽引入需求响应,但未明确关联用户满意度与抗灾能力。刘志坚等^[8]提出的储能-光伏协同方案未考虑极端事件场景。李晓龙等^[9]采用 t 分布变异算子改进算法,但未验证高维多目标收敛性。张艳菊等^[10]提出的衰减因子策略仅测试于静态数据。包伟华等^[11]通过惯性权重平衡探索与开发,但未证明其对微电网经济优化的有效性。

现有研究多聚焦于微电网经济性或抗灾能力的单方面优化,但鲜有研究探讨灾后恢复与经济可行性的协同问题,且普遍忽视用户需求。本文创新提出经济性、抗灾能力与用户满意度的三维优化模型,结合混合鹌鹑算法,提升收敛速度与精度,应用柔性负荷模型,保障用户电力需求。通过灾前预防与灾后恢复的协同优化,实现系统高效运行。

1 建立模型

本文建立了以蓄电池(Battery Storage, BS)、可再生能源以及柴油发电机(Diesel Generator, DG)等传统可控微源的微电网模型,探讨了柔性负荷对微电网优化调度中用户满意度的影响,并寻求在发生微电网事故时的最佳经济运行和更好的弹性。其中,可再生能源包括风能(Wind Energy, WE)、光伏(Photovoltaic, PV)、微型燃气轮机(Micro Turbine, MT)和 DG。

1.1 微电网模型

BS 能够灵活充放电,其充电状态的数学模型^[12]如式(1)所示:

$$SOC(t) = SOC \cdot (t - 1) + [P_{BS}(t) \cdot \eta_{BS} \cdot \Delta t] / E_{BS} \quad (1)$$

式中: $P_{BS}(t)$ 为 BS 的充放电功率; η_{BS} 为 BS 的充

放电效率; E_{BS} 为 BS 的额定容量。

MT 成本模型^[13]如式(2)所示:

$$C(P_{MT}) = (\varphi / LHV) \cdot [(P_{MT} \Delta t) / \eta_{MT}] + \sum_{i=1}^M \gamma_{MT}^i \beta_{MT}^i P_{MT} \quad (2)$$

式中: P_{MT} 为 MT 的输出功率; Δt 为 MT 的单位运行时间; η_{MT} 为 MT 的运行效率; φ 为燃气价格,取 2.07;LHV 为燃气的低热值; M 为污染物的类型,取 3; γ_{MT}^i 为 MT 每单位发电量产生的第 i 种污染物的排放量; β_{MT}^i 为第 i 种污染物的环境污染补偿系数。

DG 的成本主要考虑环境污染的惩罚成本和燃料成本^[14],其成本模型如式(3)所示:

$$C(P_{DG}) = a_0 P_{DG}^2 + a_1 P_{DG} + a_2 + \sum_{i=1}^M \gamma_{DG}^i \beta_{DG}^i P_{DG} \quad (3)$$

式中: P_{DG} 为 DG 的输出功率; a_0 、 a_1 、 a_2 为成本系数,依次为 0.000 84、0.074 2、5.62; γ_{DG}^i 为 DG 每产生单位电力所排放的第 i 种污染物的数量; β_{DG}^i 为第 i 种污染物的环境污染补偿系数。

PV 由一系列光伏电池组成,其在给定时间点的输出功率^[15]如式(4)所示:

$$P_{PV}(t) = \eta_{PV} \cdot I_{PV}(t) \cdot A_{PV} \quad (4)$$

式中: $P_{PV}(t)$ 为 PV 阵列的输出功率; η_{PV} 为 PV 阵列效率; $I_{PV}(t)$ 为 t 时的太阳辐射强度; A_{PV} 为 PV 电池的面积。

WE 的模型^[16]如式(5)所示:

$$P_{WE}(t) = \begin{cases} 0, & v_t < v_c \text{ || } v_t > v_f \\ P_r \cdot \left(\frac{v_t - v_c}{v_r - v_c} \right), & v_c \leq v_t < v_r \\ P_r, & v_r \leq v_t \leq v_f \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{WE}(t)$ 为输出功率; v_t 为实际风速; v_c 为入口风速; v_r 为截止风速; v_f 为额定风速; P_r 为风力涡轮机的额定功率。

微电网系统的结构如图 1 所示。

1.2 用户满意度模型

用户满意度是衡量微电网服务质量的关键,微电网则通过经济补偿激励用户参与调峰填谷,平衡供需并提升系统稳定性。

可转移负荷补偿成本^[7]为

$$C(P_{TL}) = \sum_{t=1}^T a_T P_{out}^t(t) P_T^t(t) \quad (6)$$

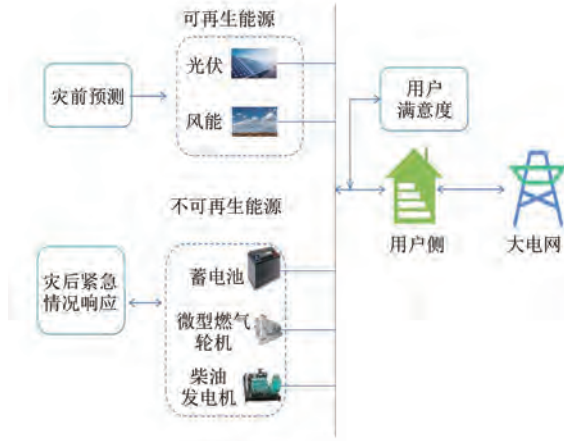


图1 微电网系统的结构图

Fig. 1 Structure of the microgrid system

式中: $C(P_{TL})$ 为转移负荷的成本; a_T 为可转移负荷的补偿系数,取 $0.65^{[7]}$; P_{out}^t 为 t 时转移的负荷量; P_T^t 为 t 时的电价; T 为总调度时间。

可削减负荷补偿成本 $^{[17]}$ 为

$$C(P_{CL}) = \sum_{t=1}^T a_{C1} a_{C2} P_{cut}^t(t) \quad (7)$$

式中: a_{C1} 为是否执行负荷削减的状态变量,取0或1; a_{C2} 为可削减负荷的补偿系数,取 $0.35^{[17]}$; P_{cut}^t 为 t 时削减的负荷量。

可平移负荷补偿成本 $^{[18]}$ 为

$$C(P_{SL}) = \sum_{t=t_0}^{t_0+t_2-t_1} a_{C3} a_{C4} P_{shift}^t(t) \quad (8)$$

式中: a_{C3} 为状态变量,指示是否执行负荷平移,取0或1; a_{C4} 为可平移负荷的补偿系数,取 $0.25^{[18]}$; $P_{shift}^t(t)$ 为平移后的负荷功率,负荷转移前的用电周期为 $[t_1, t_2]$ 。

可转移负荷和可削减负荷的综合满意度计算式为 $^{[19]}$

$$w_1 = \alpha U_{com} + \beta U_{eco} \quad (9)$$

式中: U_{com} 为用户的用电舒适度; U_{eco} 为经济度; α 为舒适度占综合满意度的权重; β 为经济度的权重, α 大于 β 则用户比较注重用电的舒适度,反之则重视经济度。

$$U_{com} = 1 - \sum_{t=1}^T |\Delta P_{L,t}| / P_{L,t} \quad (10)$$

$$U_{eco} = 1 - \sum_{t=1}^T B_t (P_{L2,t} - P_{L1,t}) / P_{L1,t} \quad (11)$$

式中: $|\Delta P_{L,t}|$ 为运行前后 t 时刻负荷的变化量; $P_{L,t}$ 为运行前的负荷量; B_t 为 t 时刻的电价; $P_{L2,t}$ 、 $P_{L1,t}$ 分别为运行后、前的用户负荷量。

对于可移动负荷,用户的满意度受平移时间段的影响。用户综合满意度的计算式为 $^{[20]}$

$$w_2 = 1 + \beta \left(\frac{\sum_{t=1}^T c_{shift,t}}{\sum_{t=1}^T C_{shift,t}} \right) - \alpha (\Delta T_{shift} / T) \quad (12)$$

式中: ΔT_{shift} 为平移时差; $c_{shift,t}$ 为可平移负荷的补偿收益; $C_{shift,t}$ 为运行前的购电费用。

1.3 多目标的加权模糊处理

寻求微电网运行成本最小,其目标函数1如式(13)所示:

$$\begin{aligned} \min C_c = & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^U C(P_j) + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^N C(P_k) + \\ & \sum_{t=1}^T C(P_{BS}) + \sum_{t=1}^T C(P_{Grid}) + \sum_{t=1}^T C(P_{FLoad}) \end{aligned} \quad (13)$$

式中: C_c 为系统运行总成本; P_j 为第 j 个可再生能源的输出功率; P_k 为第 k 个可控微源的输出功率; P_{Grid} 为与主电网交互的功率; $C(P_{FLoad})$ 为柔性负荷的补偿成本。

目标函数2为蓄电池每小时的容量之和,如式(14)所示:

$$\max E_{BS} = \sum_{t=1}^T E_{bat} \quad (14)$$

式中: E_{BS} 为BS每小时容量之和; E_{bat} 为当前BS容量。

加权模糊化方法通过为经济调度和电池存储目标分配动态权重,并设计隶属度函数统一量纲,实现多目标协同优化。其中,隶属度函数将不同量纲的指标归一化至 $[0, 1]$ 区间,权重系数则根据实时运行需求动态调整 $^{[21]}$ 。隶属函数的表达式为

$$\mu(C_c) = (C_{c,\min} + \beta_1 C_{c,\min} - C_c) / \beta_1 C_{c,\min} \quad (15)$$

$$\mu(F_{BS}) = (F_{BS} - E_{bat,\max} + \beta_2 E_{bat,\max}) / \beta_2 E_{bat,\max} \quad (16)$$

式中: $C_{c,\min}$ 和 $E_{bat,\max}$ 分别为当存在单个目标时系统总运营成本的最小值、电池容量之和的最大值; β_1 和 β_2 为对应的弹性系数,其中 $\beta_1 C_{c,\min}$ 和 $\beta_2 E_{bat,\max}$ 分别为成本和存储容量的增加或减少范围; $\mu(C_c)$ 和 $\mu(F_{BS})$ 为系统成本和弹性的综合满足度 $^{[14]}$ 。

当 C_c 小于 $C_{c,\min}$, $\mu(C_c)$ 取1;当 C_c 大于

$C_{c,\min} + \beta_1 C_{c,\min}, \mu(C_c)$ 取 0。当 F_{BS} 大于 $E_{bat,\max}$, $\mu(F_{BS})$ 取 1; 当 F_{BS} 小于 $E_{bat,\max} - \beta_2 E_{bat,\max}$, $\mu(F_{BS})$ 取 0。

将多目标优化转换为单目标优化函数的表达式为

$$\max F = \beta_3 \mu(C_c) + \beta_4 \mu(F_{BS}) \quad (17)$$

$$\beta_3 + \beta_4 = 1 \quad (18)$$

式中: F 为优化后的系统综合满意度; β_3 和 β_4 为两个优化目标的权重系数。

2 提出算法

2.1 混合鹈鹕算法

鹈鹕算法模拟了群体之间的合作和竞争行为, 使搜索能够覆盖广泛的解决方案空间^[21]。对于微电网经济调度等具有多重约束的优化问题, 该算法能够高效处理更复杂的优化目标。在各种优化问题中表现出更好的收敛速度和稳定性, 尤其是在非线性问题中, 并且能够更好地避免陷入局部最优。混合鹈鹕优化算法 (Hybrid Pelican Optimisation Algorithm, HPOA) 融合莱维飞行策略和动态衰减因子可以比原始算法更高效地解决高维问题, 是解决微电网最优调度的好方法。

在优化的早期阶段, 算法需要执行广泛的搜索, 而随着迭代的进行, 需要逐渐减少搜索, 以便更精确地关注附近的最优解决方案。位置更新式为

$$x_i^{\text{new}1} = x_i \cdot L(\beta_0) + x_i \quad (19)$$

$$X_i^{\text{new}2} =$$

$$\begin{cases} Z \cdot \{x_i - c_1 \cdot [(UB - LB) \cdot c_2 + LB]\}, c_3 \geq 0.5 \\ Z \cdot \{x_i + c_1 \cdot [(UB - LB) \cdot c_2 + LB]\}, c_3 < 0.5 \end{cases} \quad (20)$$

$$Z = \exp[-(T/2) \cdot (t/T)] \quad (21)$$

$$c_1 = 2 \cdot \exp[-(4t/T)^2] \quad (22)$$

式中: $x_i^{\text{new}1}$ 、 $X_i^{\text{new}2}$ 为引入莱维飞行、衰减因子策略后鹈鹕在种群中的更新位置; β_0 为 $[0, 2]$ 之间的随机数; Z 为衰减因子; c_1 为转换开关; c_2 和 c_3 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

惯性权重通过动态调节更新速率平衡全局探索 (大权重) 与局部开发 (小权重), 而 t 分布的长尾特性增强种群多样性, 使算法在搜索中保留更多探索性, 有效避免局部最优。位置更新式为

$$X_i^{\text{new}3} = 0.5 \cdot [I(t) \cdot x_i + x_{i-1}] \quad (23)$$

$$I(t) = I_i + (I_f - I_i) \exp[-(I_a t/T)^2] \quad (24)$$

$$X_i^{\text{new}4} = t(\text{iter}) \cdot X_i^{\text{best}} + X_i^{\text{best}} \quad (25)$$

式中: $X_i^{\text{new}3}$ 、 $X_i^{\text{new}4}$ 分别为引入惯性权重、 t 分布策略后鹈鹕在种群中的更新位置; $I(t)$ 为惯性权重; I_i 为初始惯量; I_f 为最终惯量; I_a 为非线性参数; $t(\text{iter})$ 为 t 分布, 当前迭代数作为自由度; X_i^{best} 为第 t 代的最佳解。

2.2 基于拉丁超立方体采样和概率距离的混合场景削减方法

微电网灾害预测和场景削减方法通过预判安全威胁来提升系统弹性。针对多重不确定性, 首先采用拉丁超立方采样 (Latin Hypercube Sampling, LHS) 生成初始场景集, 该方法通过分层抽样技术, 仅需传统蒙特卡洛 1/10 的样本量即可达到同等精度。随后引入概率距离 (Probability Distance, PD) 削减技术, 基于 Kullback-Leibler 散度量场景间差异, 剔除冗余度超过阈值的相似场景。测试表明, 这种 LHS-PD 混合方法在处理不确定性较大的微电网优化问题时, 可有效降低计算复杂度并提高优化效率, 同时保持较高的求解精度。

3 仿真结果分析

从灾前预测和灾后恢复的角度出发, 针对不同的低概率、高影响的突发事件进行仿真试验, 探究已建立的弹性微电网模型的经济调度能力、弹性和用户满意度。在模拟试验中, 运行周期设置为 24 h, 间隔为 1 h。

3.1 用户满意度分析

灾前预测微电网的不确定性因素, 既能提升系统弹性, 又能通过柔性负荷管理保障用户满意度, 实现安全与经济双赢。使用 LHS-PD 的混合情景削减策略, 以实现合理预测和有效预防。当 $S=5.00$ 、 $m=5$ 、 $N=10$ 、 $n=5$ 且标准差为 0.1 时, 可再生能源和负荷需求的预测功率不确定性情景削减过程分别如图 2~图 4 所示。WE、PV 和负荷需求均不同程度地偏离了预测值, 更好地反映了可再生资源和负荷需求的不确定性。

考虑到用户侧的灵活用电, 用户用电量仍可能与预测情景不同。用户满意度模型一方面探讨了负荷变化对弹性微电网的影响, 另一方面根据

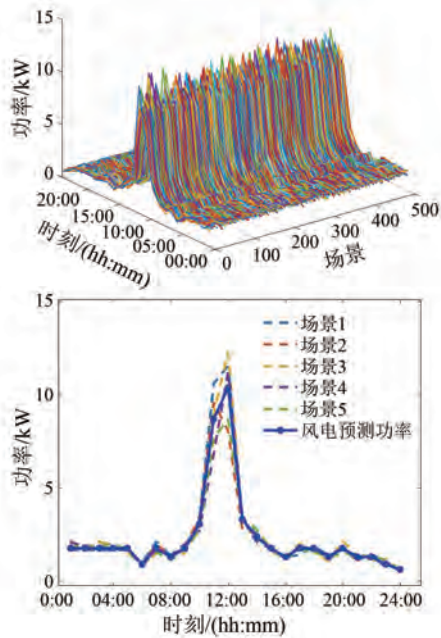


图2 WE场景生成及削减结果

Fig. 2 WE scenario generation and reduction results

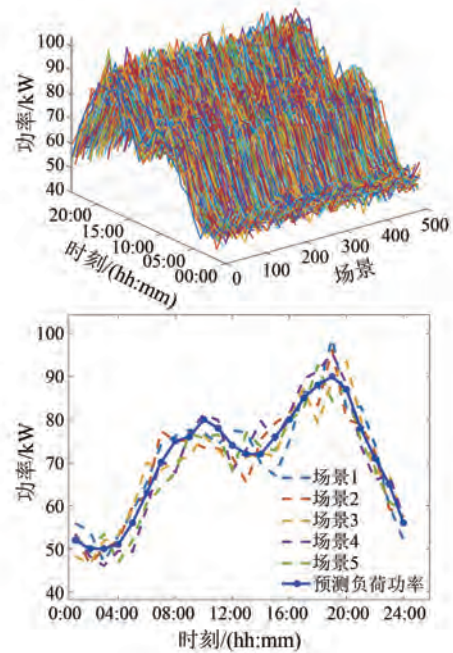


图4 负荷需求场景生成及削减结果

Fig. 4 Load demand scenario generation and reduction results

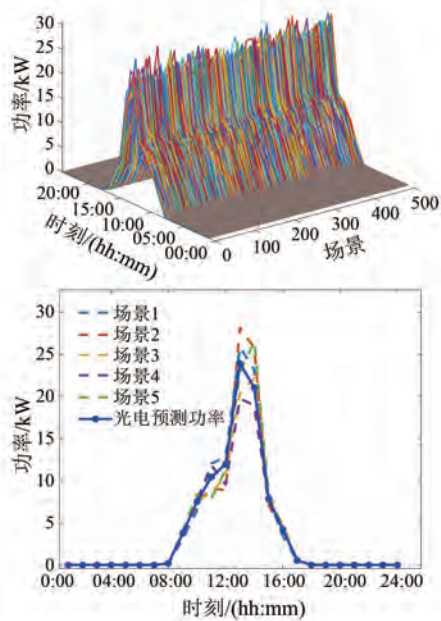


图3 PV场景生成及削减结果

Fig. 3 PV scenario generation and reduction results

用户的满意度对用户进行补偿。负荷变化的模拟如图5和图6所示,用户满意度如表1所示。当用户优先考虑舒适性时,对可转移负荷的满意度会降低,反之满意度相对较高。对于可削减的负荷,如果用户重视经济性,满意度就会显著提高。

综上所述,在面对可预测和柔性负荷变化情况时,弹性微电网能够在一定程度上满足用户的电力需求和经济满意度。

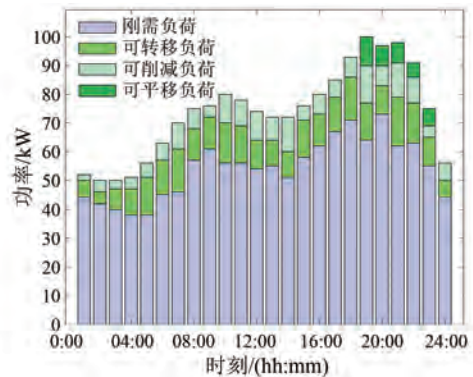


图5 负荷变化前

Fig. 5 Before the load change

表1 用户对柔性负荷的满意度

Tab. 1 User satisfaction with flexible loads

参数设置	可转移 负荷/kW	可削减 负荷/kW	可平移 负荷/kW
$\alpha=0.5, \beta=0.5$	1.046 6	1.315 5	1.123 1
$\alpha=0.3, \beta=0.7$	1.098 3	1.454 0	1.196 8
$\alpha=0.7, \beta=0.3$	0.995 0	1.177 1	1.005 4

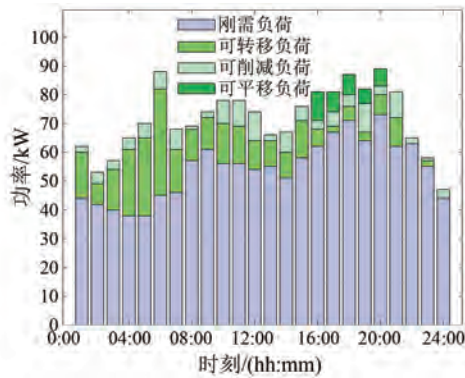


图 6 负荷变化后

Fig. 6 After the load changes

3.2 弹性微电网经济优化分析

从灾后适应和恢复的角度来看,根据图 2 至 4 中的优化结果,本文考虑的灾害场景主要包括极端天气事件引起的电力系统故障(如台风、冰雪灾害),或者人为破坏(如网络攻击)、电源侧故障。在主电网发生故障的紧急情况下,导致微电网和主电网之间无法进行电力交易,弹性微电网切换到孤岛运行,仅依靠自身的资源来满足电力需求。以主电网随机出现连续 2 小时故障又恢复供电为例,具体的功率情况如图 7 所示。

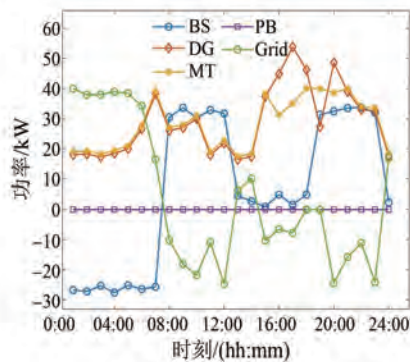


图 7 孤岛时功率情况

Fig. 7 Power situation at isolation

由图 7 可知,故障发生时,18 时电价为平时,BS 尽可能少出力,让其他微源来出力满足负荷要求,然而 19 时为电价峰时,故此时 BS 会尽可能多地出力,以此来减少其他微源的出力成本。即使微电网与主电网之间的交互功率为零,也可以确保其功率平衡。其中 PB 表示功率平衡,Grid 表示与主电网的交互功率,DG、MT、BS 分别指柴油发电机、微型燃气轮机和电池储能的功率情况。

如果微电网本身发生故障,以 DG 随机连续 2

小时故障又恢复供电为例,模拟导致分布式能源故障的意外事件,具体的功率情况如图 8 所示。故障发生时为电价峰时并且处在用电高峰期,故大部分微源都尽可能多地出力来满足功率平衡,并且为了减少微源较大出力造成的过高成本,微电网也会向大电网来购买额外的电能。分时电价参考文献[22],污染物系数如表 2 所示^[23],24 小时负荷需求参考文献[24]。

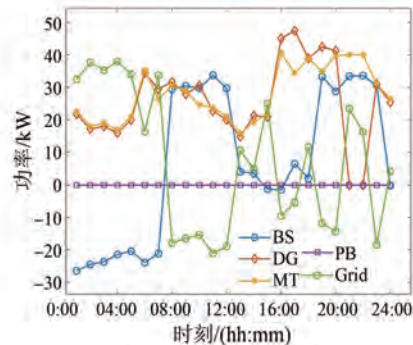


图 8 DG 故障时功率情况

Fig. 8 Power situation at DG failure

表 2 污染物系数

Tab. 2 Pollutant Coefficients

污染物类型	额外的花费/ ($\text{¥} \cdot \text{kg}^{-1}$)	柴油发电机的排放因子/ ($\text{kg} \cdot \text{kWh}^{-1}$)	微型燃机的排放因子/ ($\text{kg} \cdot \text{kWh}^{-1}$)
NO_i	66	0.01	2×10^{-4}
SO_2	15.7	21×10^{-5}	4×10^{-6}
CO_2	0.22	65×10^{-5}	72×10^{-5}

模拟由极端天气事件引起的电力系统故障,以一小时的电力系统故障后经抢修又恢复电力为例,探究此模型面对一些突发情况是否具有很好的弹性。分布式能源和 BS 都处于瘫痪状态,无法满足用户的用电需求。为了弥补这一困境,在接下来的一个小时内,在满足当前需求的前提下,提供了前一小时无法保证的额外电力。图 9 显示了具体的功率输出情况,以 21 时故障又恢复电能为例。此时可以看到所有微源出力均为零,负荷需求也不满足,然而当电力系统恢复后,微电网在面对灾害发生后所需要的额外电能,仍然可以满足负荷的需求,此时所有微源出力都接近最大值,不可避免地加大了系统运行成本。在电价较低的时候,微电网会购买大量的电力并将其储存在电池中。此时,BS 的输出为负,这意味着 BS 正在储存

电力;反之,则电池为微电网供电。在电价高峰期,BS 释放大量电力以获取利润。在非高峰时段,BS 的输出功率很小,可控微源的稳定供电仍然可以满足功率平衡。

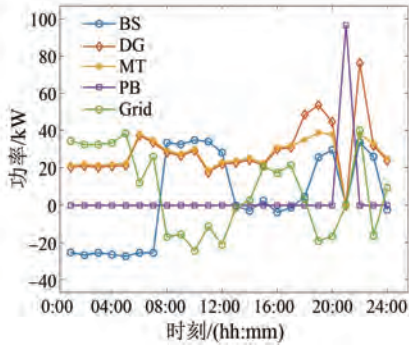


图 9 停电时功率情况

Fig. 9 Power situation in case of power failure

由图 7 至图 9 可知,当灾难或者故障发生时,此模型可以在 HPOA 的平衡下,始终保持功率平衡。并且在考虑经济运行的前提下,BS 也在尽可能地保持一个良好的蓄电量以应对其他突发事件,此模型具有较好的弹性。

蓄电池容量的比较如图 10 所示,HPOA 能够求解出电池的最佳充放电策略,避免了闲置资源和不必要的冗余输出,最大程度地利用电池。电池能够在低、高负荷区实现容量的合理分配,从而避免过度充放电。电池资源的有效利用不仅满足了极端条件下的负荷需求,还降低了长期储能成本,延长了电池的使用寿命。这对微电网的经济运行具有重要意义。HPOA 在不同故障场景下表

表 3 微电网系统的总成本、电池容量和满意度比较

Tab. 3 Comparison of total cost, battery capacity and satisfaction of microgrid systems

算法	度量	BOA	PSO	GWO	ABC	POA	HPOA
事件一系统成本/¥	平均值	2 850.21	2 866.72	2 831.89	2 817.49	2 198.99	2 090.74
事件二系统成本/¥	平均值	2 920.18	2 939.46	2 903.93	2 877.3	2 326.10	2 182.50
事件三系统成本/¥	平均值	2 903.79	2 914.92	2 879.56	2 720.31	2 270.70	2 126.62
蓄电池容量/kW	容量	1.24E+04	1.23E+04	1.21E+04	1.13E+04	1.15E+04	1.15E+04
综合满意度	平均值	0.606 76	0.592 09	0.589 65	0.601 77	0.899 37	0.971 2

4 结语

本文建立了考虑用户满意度和经济运行性的弹性微电网优化模型,从灾前预测和灾后适应的角度探讨了紧急情况对微电网经济运行的影响。

现出显著的鲁棒性,其降低电池冗余损耗的能力,将对未来可持续储能技术的发展产生深远影响。

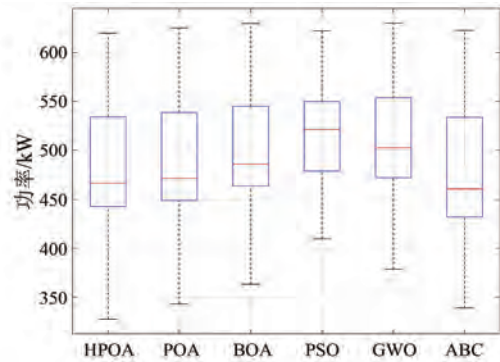


图 10 电池存储容量对比

Fig. 10 Comparison of battery storage capacity

不同算法求解不同事件的最小成本的平均值以及电池总存储容量和整体满意度如表 3 所示。规定事件一、二和三分别为大电网故障、DG 故障和极端停电情况。

由表 3 可知,将 HPOA 与蝴蝶优化算法 (Butterfly Optimisation Algorithm, BOA)^[25]、粒子群优化 (Particle Swarm Optimisation, PSO)^[26]、灰狼优化 (Grey Wolf Optimisation, GWO)^[27] 和人工蜂群 (Artificial Bee Colony, ABC)^[28] 以及原始算法进行比较,分别节省了 26.7%、27.0%、26.1%、21.8% 和 6.7% 的成本。电池容量在一定程度上可以表明微电网的弹性。面对极端条件,HPOA 的求解结果仍然具有一定的弹性和良好的经济效益。当 β_3 和 β_4 设置为 0.5 时,综合满意度也表明 HPOA 具有一定的卓越性。

考虑了柔性负荷变化对用户满意度的影响,本文提出一种混合鹌鹑算法,优化了系统总运营成本,求解出的综合满足度较为理想,验证了所提算法在求解弹性微电网最优经济运行模型方面的有效性。

本文提出的模型并未充分考虑动态变化的网络环境。随着智能电网和分布式能源技术的快速发展,微电网将在更加复杂和动态的网络环境中运行。灾难性事件发生后,如何快速恢复微电网的供电能力,特别是在电池储能和可再生能源互补调度以及多个微电网的情况下,如何提高微电网的弹性和自愈能力,将值得深入研究。在未来电力系统的规划和设计中,增强弹性和恢复能力是微电网发展的必然要求。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

李佳讯进行了方案设计、试验研究、内容总结与论文撰写,李佳讯、张寿明、杨森参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, experimental research, content summarization and paper writing were conducted by Li Jiaxun. The paper review and revision were participated in by Li Jiaxun, Zhang Shouming, and Yang Sen. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 王治然, 杨祺铭, 黄玉雄, 等. 考虑动态互联微电网与网络重构的弹性配电网多源序贯协同供电恢复方法[J/OL]. 电力建设, 2025-5-20. <https://link.cnki.net/urlid/11.2583.TM.20240926.1005.002>.
- WANG Z R, YANG Q M, HUANG Y X, et al. Multi-source sequential coordinated power supply recovery method for resilient distribution network considering dynamic networked microgrids and network reconfiguration [J/OL]. Electric Power Construction, 2025-5-20. <https://link.cnki.net/urlid/11.2583.TM.20240926.1005.002>.
- [2] 陈将宏, 时康昊, 胡佳慧, 等. 考虑弹性恢复的微电网经济优化调度[J]. 系统仿真学报, 2025, 37(3): 623-634.
- CHEN J H, SHI K H, HU J H, et al. Economic optimal scheduling of microgrid considering elastic recovery [J]. Journal of System Simulation, 2025, 37(3): 623-634.
- [3] 钱佳钰, 赵虎府, 刘文泉, 等. 直流微电网并离网协调控制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 11-23.
- QIAN J Y, ZHAO H F, LIU W Q, et al. Coordinated control strategy for DC microgrid grid-connected and off-grid [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 11-23.
- [4] 荣烜曼, 别朝红, 黄玉雄, 等. 城市弹性电网极端灾害防御与恢复技术[J]. 供用电, 2024, 41(8): 15-24+53.
- RONG X M, BEI C H, HUANG Y X, et al. Extreme disaster defense and recovery technologies for urban resilient grid [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(8): 15-24+53.
- [5] 邵萍, 杨之乐, 李慷, 等. 基于用户意愿的电动汽车备用容量多目标优化[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(11): 1501-1511.
- SHAO P, YANG Z L, LI K, et al. Multi-objective optimization of electric vehicle spare capacity based on user wishes [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(11): 1501-1511.
- [6] 姚红伟, 张建琪, 温镇, 等. 基于模拟状态信息的虚拟操作场景重构及微电网自适应控制设计[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 77-85.
- YAO H W, ZHANG J Q, WEN Z, et al. Virtual operation scenario reconstruction and microgrid adaptive control design based on simulated state information [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(10): 77-85.
- [7] 钱和平, 娄杨剑. 基于柔性电热负荷需求响应的热电联供微电网双层优化[J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(5): 27-33.
- QIAN H P, LOU Y J. Bilayer optimisation of cogeneration microgrid based on flexible electric and thermal load demand response [J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(5): 27-33.
- [8] 刘志坚, 刘杰, 李鹏程, 等. 光储微电网逆变器有限集模型预测控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(12): 81-86.
- LIU Z J, LIU J, LI P C, et al. Finite control set model predictive control of photovoltaic and storage

- microgrid inverter [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(12): 81-86.
- [9] 李晓龙, 黄鹤, 杨澜, 等. 多策略鹈鹕算法优化的车辆轨迹跟踪 MPC 控制器[J/OL]. *上海交通大学学报*, 2024-11-13. <https://link.cnki.net/doi/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.316>.
- LI X L, HUANG H, YANG L, et al. Multi-strategy pelican algorithm optimized MPC controller for vehicle trajectory tracking [J/OL]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2024-11-13. <https://link.cnki.net/doi/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.316>.
- [10] 张艳菊, 陈泽荣, 吴俊. 基于改进樽海鞘群优化的模糊 C-均值聚类算法[J/OL]. *控制工程*, 2024-5-29. <https://link.cnki.net/doi/10.14107/j.cnki.kzgc.20230841>.
- ZHANG Y J, CHEN Z R, WU J. Fuzzy C-means clustering algorithm based on improved salp swarm optimization [J/OL]. *Control Engineering*, 2024-5-29. <https://link.cnki.net/doi/10.14107/j.cnki.kzgc.20230841>.
- [11] 包伟华, 张超杰, 黄雨薇, 等. 基于云边协同的数据采集及风险预测系统研究[J]. *自动化仪表*, 2025, 46(6): 103-109+114.
- BAO W H, ZHANG C J, HUANG Y W, et al. Data collection and air compressor risk prediction based on cloud-based coordinated data [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2025, 46(6): 103-109+114.
- [12] CHEN H P, GAO L, ZHANG Z. Multi-objective optimal scheduling of a microgrid with uncertainties of renewable power generation considering user satisfaction [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 131: 107142.
- [13] YANG M, CUI Y, WANG J X. Multi-objective optimal scheduling of island microgrids considering the uncertainty of renewable energy output [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 144: 108619.
- [14] ZHANG J R, WU Y Y, GUO Y R, et al. A hybrid harmony search algorithm with differential evolution for day-ahead scheduling problem of a microgrid with consideration of power flow constraints [J]. *Applied Energy*, 2016, 183: 791-804.
- [15] PALIWAL N K, SINGH A K, SINGH N K. A day-ahead optimal energy scheduling in a remote microgrid along with battery storage system via global best guided ABC algorithm [J]. *Journal of Energy Storage*, 2019, 25: 100877.
- [16] 李子龙, 匡洪海, 徐雨溟, 等. 基于改进跳蛛算法的微电网经济优化调度[J/OL]. *电源学报*, 2024-10-14. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20241013.1154.004>.
- LI Z L, KUANG H H, XU Y H, et al. Economic optimization scheduling of microgrid based on improved spider jumping algorithm [J/OL]. *Journal of Power Supply*, 2024-10-14. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20241013.1154.004>.
- [17] MA Y, MENG R Q, LI T T. Robust optimal dispatch of microgrid considering flexible loads and step carbon trading [J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(2): 258-268.
- [18] 高乐, 文好, 李胜文, 等. 考虑柔性负荷的微电网低碳经济调度研究[J]. *山西电力*, 2023, (1): 10-14.
- GAO L, WEN Y, LI S W, et al. Study on low-carbon economic dispatch of microgrid considering flexible load [J]. *Shanxi Electric Power*, 2023, (1): 10-14.
- [19] 杨欢红, 唐芃芃, 黄文焘. 考虑用户满意度的基于需求侧管理的微电网多目标优化调度[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(6): 110-116.
- YANG H H, TANG P P, HUANG W T. Demand-side management-based multi-objective optimal scheduling of microgrids considering customer satisfaction [J]. *Electrical Measurement and Instrumentation*, 2023, 60(6): 110-116.
- [20] 颜湘武, 王庆澳, 卢俊达, 等. 计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(17): 69-79.
- YAN X W, WANG Q A, LU J D, et al. Microgrid energy scheduling with electric vehicles and flexible loads [J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(17): 69-79.
- [21] 张敏, 韩晓龙. 多目标模糊机会约束规划的低碳多式联运路径优化[J]. *计算机应用*, 2023, 43(2): 636-644.
- ZHANG M, HAN X L. Low-Carbon Multimodal transport path optimization with multi-objective fuzzy chance-constrained programming [J]. *Computer Applications*, 2023, 43(2): 636-644.
- [22] 杨世博, 孙亮, 陈立东, 等. 计及分时电价的含冷

- 热电联供型微网的配电网系统协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 15-23.
- YANG S B, SUN L, CHEN L D, et al. Coordinated optimal dispatch of distribution network system with cooling, heating, and power cogeneration microgrid considering time-of-use electricity pricing [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 15-23.
- [23] AGHAJANI G R, SHAYANFAR H A, SHAYANFAR H. Demand side management in a smart micro-grid in the presence of renewable generation and demand response [J]. Energy, 2017, 126: 622-637.
- [24] REZVANI A, GANDOMKAR M, IZABAKHSH M, et al. Environmental/economic scheduling of a micro-grid with renewable energy resources [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 216-226.
- [25] 高文欣, 刘升, 肖子雅, 等. 全局优化的蝴蝶优化算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(10): 2966-2970.
- GAO W X, LIU S, XIAO Z Y, et al. Butterfly optimization algorithm for global optimization [J]. Computer Application Research, 2020, 37(10): 2966-2970.
- [26] 梁秦玮. 基于改进 PSO 算法的配网故障区段定位研究[J]. 机电信息, 2023, (23): 23-25.
- LIANG Q W. Research on fault section localization in distribution network based on improved PSO algorithm [J]. Mechanical and Electrical Information, 2023, (23): 23-25.
- [27] 邓飞, 魏祎璇, 刘奕巧, 等. 灰狼优化算法的改进及其应用[J]. 统计与决策, 2023, 39(11): 18-24.
- DENG F, WEI Y X, LIU Y Q, et al. Improvement and application of grey wolf optimization algorithm [J]. Statistics and Decision, 2023, 39(11): 18-24.
- [28] 李波, 宋婧媛, 张邦成. 改进人工蜂群算法及其在工程设计中的应用[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2023, 41(5): 810-819.
- LI B, SONG J Y, ZHANG B C. Research on artificial bee colony algorithm and application in engineering design [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2023, 41(5): 810-819.

收稿日期:2025-04-26

收到修改稿日期:2025-05-23

作者简介:

李佳讯(2000-),男,硕士研究生,研究方向为微电网经济优化运行,1263713031@qq.com;

* 通信作者:张寿明(1966-),男,博士,教授,研究方向复杂控制系统,2559445607@qq.com。