

[综合能源]

计及多主体主从博弈的储能优化策略研究

文/曾飞¹ 徐红灿² 张伦峰³ 毕水仙³ 沈林辉³

1. 国网浙江省电力有限公司建德市供电公司; 2. 国网浙江省电力有限公司; 3. 中能聚创(杭州)能源科技有限公司

针对综合能源系统多主体利益交互存在错综复杂的关系, 提高储能利用率是实现综合能源系统经济发展的有效手段。提出一种通过采用多主体主从博弈的方法来优化储能充放电, 有效提高参与方的效益, 最大限度地提高储能的利用率, 进一步提升整个系统的经济性。通过应用蜚螂算法优化过程, 成功实现在供需不平衡条件下储能系统的合理调度, 以适应不同时间段的电力需求。同时, 对蜚螂算法进行改进, 提高其实用性和寻优效果, 增强系统的稳定性和收敛速度。与常用算法相比, 改进后的蜚螂算法具有更快的收敛效率, 达到系统经济性的最优水平。通过实证分析, 验证算法的可行性和有效性。

随着气候变化的加剧和环境污染的日益严重, 推动可再生能源的大规模发展, 实现低碳化转型已经成为共识。综合能源系统的发展是未来能源转型的重要方向之一, 解决多园区与电网共同利益问题, 实现低碳效益是关键性的挑战。只有通过多方合作和综合策略的应用, 才能实现能源系统的高效运行和可持续发展, 为构建低碳社会做出积极贡献。

在多主体合作利益分配问题中, 博弈理论可以帮助找到一种稳定的合作策略, 使得各个主体都能获得最大的收益。博弈理论的应用可以有效解决园区多主体合作利益分配问题, 提高综合能源系统的效率和经济性。文献[1]利用分布鲁棒结合纳什谈判的鲁棒博弈方法, 一定程度地促进微电网参与共享储能的积极性, 使共享储能具有更好的发展前景。文献[2]提出一种基于合作博弈模型的混合电池储能系统优化模型, 选择最经济的电池类型和最优的储能站容量配置。文献[3]以共享储能为主体, 各微电网为从体, 建立一主多从博弈优化调度模型, 提高共享储能的储能利润, 同时缓解微电网的并网率

波动。文献[4]提出一种分布式储能双层合作共享策略, 通过分时复用提高了储能的利用率及经济性。文献[5]通过分析碳交易和绿政交易, 构建双层交易框架, 多园区间收益与公平分配。上述文献都较好提出利益分配的有效模型, 但是对于单独储能参与方利益最优情况及储能利用率提升未有效考虑。

除考虑各主体利益分布外, 国内外研究学者还提出多种算法来对主体利益寻优。文献[6]采用差分进化算法来求解各主体的出力分配和利益分配问题。文献[7]采用多目标灰狼算法对系统供能侧, 需求侧和阶梯型需求响应激励机制进行优化求解, 对系统的总成本和碳排放量都有所降低。文献[8]提出一种基于改进的正则化技术的高效单环分布式算法, 用于计算具有清晰经济解释的纳什博弈, 验证得到所提模型的有效性。文献[9]采用一种基于二分法的分布式算法求解两阶段博弈问题, 仿真结果验证基本电价和储能配置建议, 验证了所提方法的优越性。上述文献均采用算法来求取最优解, 但是在算法对比方面有些许欠缺。

基于此, 本文提出一种多主体主从博弈方法,

成功优化综合能源系统中的储能充放电行为,实现参与主体效益的提升和储能利用率的最大化。对蜚螳优化算法初始化优化与内部位置更新进行改进,实现多主体利益的最有化,通过算例模拟仿真,验证本文所提模型的有效性 with 合理性。

考虑储能的主从博弈优化模型

1. 主从博弈体系

主从博弈是一种参与者按顺序做出决定的博弈。第二个决策者可以根据第一个决策者制定的策略制定自己的策略。同时,第二决策者制定的策略也可能对第一决策者制定的策略产生影响。主从博弈模型可以表示为

$$M = \left\{ \left\{ P_{\text{leader}} \cup P_{\text{follower}} \right\}, \left\{ S_{\text{leader}} \cup S_{\text{follower}} \right\}, \left\{ I_{\text{leader}} \cup I_{\text{follower}} \right\} \right\} \quad (1)$$

式中, M 为主从博弈模型。

主从博弈模型主要包含三要素,分别如下:

1) 参与者。 $\{P_{\text{leader}} \cup P_{\text{follower}}\}$ 是参与者的集合, P_{leader} 表示领导者即综合能源运营商, P_{follower} 表示跟随者即用户与储能。

2) 策略集。 $\{S_{\text{leader}} \cup S_{\text{follower}}\}$ 表示参与者的策略集,上层综合能源运营商考虑机组价格,出售电,热气的价格以及储能装置的老化,维修费用等。

3) 收益。 $\{I_{\text{leader}} \cup I_{\text{follower}}\}$, I_{leader} 表示运营商的收益, I_{follower} 表示用户的收益。

2. 含储能的主从博弈新型电力系统

本文所研究的综合能源系统包含多个新型电力系统,每个新型电力系统均含有可再生能源、负载和储能。其中各个分布式能源站的电价和热价由市场统一决定。能源运营商作为能源供应方的能源站追求其自身最大收益,而用户根据自身的电热需求以及自身满意度追求最优效能。储能装置根据调整充放电时间及充放电频率追求最优收益,以此构成相互竞争的博弈关系。其中博弈关系及系统内部构成如图1所示。

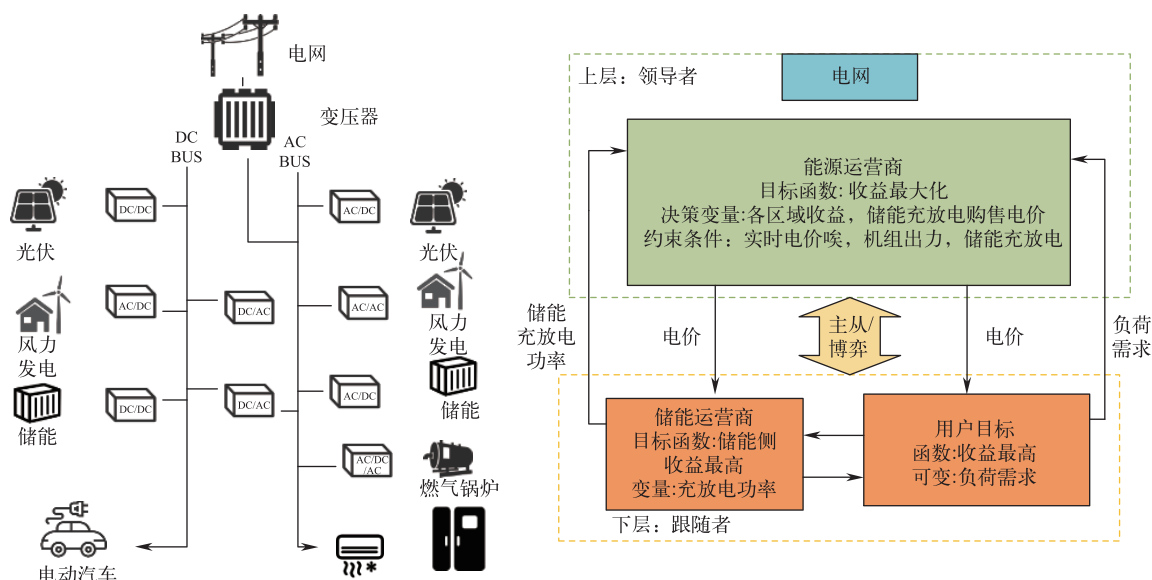


图1 新型系统博弈关系图

主从博弈模型构建

1. 上层领导者运营商模型

(1) 目标函数

运营商以最大收益为目标函数,主要考虑出售收益,向电网购电成本,燃料成本及储能成本。

$$\max P_{\text{IES}} = I_{\text{load}} - C_{\text{grid}} - C_{\text{gas}} \quad (2)$$

$$I_{\text{load}} = \sum_{t=1}^{24} \rho_p(t) P_{\text{load}}(t) + \sum_{t=1}^{24} \rho_Q(t) Q_{\text{load}}(t) \quad (3)$$

$$C_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^{24} (\rho_{\text{grid}}(t) P_{\text{grid}}(t)) \quad (4)$$

$$C_{\text{gas}} = \rho_{\text{gas}} \times \sum_{t=1}^{24} (C_{\text{US}_{\text{GT}}}(t) + C_{\text{US}_{\text{GB}}}(t)) \quad (5)$$

$$C_{\text{st}} = C_{\text{inv}} + C_{\text{om}} + C_{\text{scr}} + C_{\text{F}} \quad (6)$$

式中, P_{IES} 为IES运营商自身的效益; I_{load} 为运营商向用户的售能收益; C_{grid} 为电网购电成本; C_{gas} 为燃气成本; $P_{load}(t)$ 、 $Q_{load}(t)$ 分别为用户在 t 时刻的电负荷和热负荷; $\rho_p(t)$ 、 $\rho_q(t)$ 分别运营商在 t 时刻的售电价格和售热价格; $P_{load}(t)$ 为运营商在 t 时刻向电网购买的电量; $\rho_{grid}(t)$ 为电网在 t 时刻的电价; $CUS_{GT}(t)$ 、 $CUS_{GB}(t)$ 分别为运营商在 t 时刻的燃气轮机与燃气锅炉的燃气消耗量; ρ_{gas} 为单位燃气购气成本。

3. 约束条件

(1) 电功率平衡约束

为确保电力系统的稳定性和可靠性, 避免电力系统内部过载及系统崩溃造成崩坏, 电功率平衡约束计算公式为

$$P_{grid}(t) + P_{GT}(t) + u_{WT}(t) + P_{dis}(t) = P_{load}(t) + P_{ch}(t) \quad (7)$$

式中, $P_{GT}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机的输出电功率; $u_{WT}(t)$ 为 t 时刻风机的输出功率。

(2) 燃气轮机约束

功率转换约束计算公式为

$$\begin{cases} P_{GT}(t) = \eta_p^{GT} CUS_{GT}(t) \\ Q_{GT}(t) = \eta_h^{GT} CUS_{GB}(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中, η_p^{GT} 、 η_h^{GT} 分别为燃气轮机电功率及热功率的转换系数。

出力约束计算公式为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{GT}(t) \leq P_{max}^{GT} \\ 0 \leq Q_{GT}(t) \leq Q_{max}^{GT} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $Q_{GT}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机的热功率; P_{max}^{GT} 、 Q_{max}^{GT} 分别为燃气轮机电功率及热功率的最大值。

(3) 售价约束

$$\begin{cases} \rho_{p,min} \leq \rho_p(t) \leq \rho_{p,max} \\ \sum_{t=1}^T \rho_p(t) \leq T \rho_{p,max}^- \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\rho_{p,min/max}$ 为运营商售电价格的上下限; $\rho_{p,max}^-$ 为 t 时刻平均售价的上限。

储能运营商模型

1. 目标函数

储能运营商依靠低价时充能, 电价高时放能来获取收益, 其目标函数为

$$\max f_{sto} = \sum_{t=1}^{24} (C_{BT}(t) - C_{st}(t)) \quad (11)$$

$$C_{BT}(t) = \rho_p(t) P_{bs}^{ch}(t) - \rho_p(t) P_{bs}^{dis}(t) \quad (12)$$

$$C_{st}(t) = \lambda_p (P_{bs}^{ch}(t) + P_{bs}^{dis}(t)) + \lambda_h (Q_{bs}^{ch}(t) + Q_{bs}^{dis}(t)) \quad (13)$$

式中, f_{sto} 为储能运营商的收益; $C_{BT}(t)$ 为 t 时刻储能电池的收益; C_{st} 为储能充放电成本; $P_{bs}^{ch}(t)$ 、 $P_{bs}^{dis}(t)$ 分别为运营商在 t 时刻的电储能充电和放电功率; $Q_{bs}^{ch}(t)$ 、 $Q_{bs}^{dis}(t)$ 分别为运营商在 t 时刻的热储能蓄热和放热功率; λ_p 、 λ_h 分别为电储能和热储能的运维成本。

2. 约束条件

$$\begin{cases} 0 \leq P_{bs}^{ch/dis} \leq U_{bs}^{ch/dis} P_{bs}^{ch/dis,max} \\ U_{bs}^{ch} + U_{bs}^{dis} \leq 1 \\ E_{bs,t_x} = E_{bs,t_x-1} + (P_{bs,t_x}^{ch} \eta_{sj,t_x}^{ch} - P_{bs,t_x}^{dis} / \eta_{bs}^{dis}) \Delta t \\ E_{bs}^{min} + \Delta E_{bs}^{down} \leq E_{bs,t} \leq E_{bs}^{max} - \Delta E_{bs}^{up} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} 0 \leq R_{bs,dc,t}^{ch,up} \leq Q_{bs,t}^{ch} \\ 0 \leq R_{bs,dc,t}^{dis,up} \leq U_{bs,t}^{dis} Q_{bs}^{dis,max} - Q_{bs,t}^{dis} \\ 0 \leq R_{bs,dc,t}^{ch,down} \leq U_{bs,t}^{ch} Q_{bs}^{ch,max} - Q_{bs,t}^{dis} \\ 0 \leq R_{bs,dc,t}^{dis,down} \leq Q_{bs,t}^{dis} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} 0 \leq R_{bs,dc,t}^{ch,up} \leq Q_{bs,t}^{ch} \\ 0 \leq R_{bs,dc,t}^{dis,up} \leq U_{bs,t}^{dis} Q_{bs}^{dis,max} - Q_{bs,t}^{dis} \\ 0 \leq R_{bs,dc,t}^{ch,down} \leq U_{bs,t}^{ch} Q_{bs}^{ch,max} - Q_{bs,t}^{dis} \\ 0 \leq R_{bs,dc,t}^{dis,down} \leq Q_{bs,t}^{dis} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{24} R_{bs,dc,t}^{ch,up} + R_{bs,dc,t}^{dis,up} \leq \Delta E_{bs}^{up} \\ \sum_{t=1}^{24} R_{bs,dc,t}^{ch,down} + R_{bs,dc,t}^{dis,down} \leq \Delta E_{bs}^{down} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $P_{bs}^{ch/dis}$ 、 $P_{bs}^{ch/dis,max}$ 分别为储能电池的冲/放电功率以及所对应的上限; η_{bs}^{dis} 为储能电池充/放电的效率; $U_{bs}^{ch/dis}$ 为储能电池充/放电状态的0-1变量; E_{bs} 、 $E_{bs}^{min,max}$ 分别为储能电池当前储存的能量及储能的上下限; $\Delta E_{bs}^{up/down}$ 为储能电池的上下调备用容量, $R_{bs,dc,t}^{ch,up/down}$ 、 $R_{bs,dc,t}^{dis,up/down}$ 分别为 t 时刻储能电池在充/放电状态时刻提供的上下调直流备用。

用户模型

1. 用户目标函数

$$\begin{cases} \max f_{user} = \sum_{t=1}^T (S(t) - C_{buy}(t)) \\ C_{buy}(t) = B_e(t) P_e(t) \\ C_{buy}(t) = \alpha_e P_e(t) - \frac{\beta_e}{2} P_e^2(t) \end{cases} \quad (18)$$

式中, $S(t)$ 为 t 时刻的用户满意度; $C_{buy}(t)$ 为 t 时刻的用户的购能成本; $B_e(t)$ 为 t 时刻购电电价; $P_e(t)$ 为 t 时刻的电负荷; α_e 、 β_e 分别为用户的用电效益系数。

2. 约束条件

(1) 负荷约束

$$\begin{cases} P_e(t) = P_{e,s}(t) + P_{e,d}(t) \\ 0 \leq P_{e,s}(t) \leq P_{e,s}^{\max}(t) \end{cases} \quad (19)$$

式中, $P_{e,s}(t), P_{e,d}(t)$ 分别为 t 时刻的柔性负荷及刚性负荷; $P_{e,s}^{\max}(t)$ 为 t 时刻柔性负荷的最大值。

(2) 峰谷用电需求约束

对于用户, 在用电峰谷时期, 要保证一定的需求量, 比如在谷时段必须设备的运行, 不能低于总用电量比例, 能够避免峰时段电力供需压力过大, 并且谷时段电价较低, 能够保证用户享受到更加低廉的价格, 节约能源成本。在峰时段, 也不能超过总用电量的70%, 避免一次性电力过载造成电力系统崩坏, 造成停电等问题。因此设置峰电时段电量约束, 可以平衡负荷、保障供电可靠性、节约能源成本, 并促进能源效率和可持续发展。这有助于建立更可靠、高效、可持续的电力供应体系。

$$\begin{cases} I_{\text{peak}} \leq 70\% I_{\text{sum}} \\ I_{\text{grain}} \geq 10\% I_{\text{sum}} \end{cases} \quad (20)$$

(3) 用户需求与特殊要求约束

对于特定的设备只能在某些时段运行, 其约束公式为

$$I_{\text{peak}} \leq I_{\text{sum}}(1 - \Delta t) - I_{\text{unit}}(t) \quad (21)$$

$$I_{\text{peak}} \leq I_{\text{sum}}(1 - \Delta t) - I_{\text{spe}}(t) \quad (22)$$

$$\begin{cases} E_{\min} \leq E_c(t) \leq E_n \\ \forall i \in T, E_c(t) = E_0 + \sum_{t=1}^i P_c(t) \Delta t \end{cases} \quad (23)$$

式中, $I_{\text{unit}}(t)$ 为机组设备在特定时段的用电量; $I_{\text{spe}}(t)$ 为在特定时间段的用电量, $E_c(t)$ 为储能系统内部 (t) 时段的电量; E_n 为储能系统内部额定容量。

其中, 峰时段用电量表示在指定的峰时段内所使用的电量, 总用电量表示整个时间段内的总电量消耗。波动范围 Δt 是用户根据他们的特殊需求和要求设定的一个在 $0 \sim 1$ 之间的比例系数, 用来限制电力需求在一定范围内的波动。根据具体情况和用户需求, 可以适当调整公式中的系数和参数。

改进蜣螂算法

蜣螂优化算法 (Dung Beetle Optimizer,

DBO) 是继麻雀搜索算法之后, 提出的一种全新的智能优化算法, 其主要是模拟蜣螂的滚球、跳舞、繁殖、觅食和偷窃五种行为^[23]。在觅食过程中, 根据小蜣螂在觅食过程中的位置变化, 确定最佳捕食区域的边界, 计算公式为

$$\begin{cases} Lb^b = \max(X^b(1 - R), Lb) \\ Ub^b = \min(X^b(1 + R), Ub) \end{cases} \quad (24)$$

式中, X^b 为全局最佳位置; Lb^b 为最优搜索域的下界; Ub^b 为最优搜索域的上界。

在觅食阶段引入高斯游走策略, 提高搜索性能, 使个体跳出局部极值点的束缚收敛域全局极值点, 提高收敛速度及准确度。

高斯分布的概率密度函数为

$$p(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (25)$$

其概率分布函数为

$$P(a < y < b) = \int_a^b p(y) dy = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} dy \quad (26)$$

引入高斯游走策略后蜣螂在觅食阶段的位置更新公式为

$$x_i(t+1) = x_i(t) + C_1(x_i(t) - Lb^b) + C_2(x_i(t) - Ub^b) + \varepsilon \cdot N(0, \sigma^2) \quad (27)$$

式中, ε 为学习率; $N(0, \sigma^2)$ 为均值为0, 方差为 σ^2 的高斯随机分布函数; $x_i(t)$ 表示第 i 只蜣螂在 t 次迭代的位置信息; C_1 为服从正态分布的随机数。 C_2 为属于 $(0, 1)$ 的随机向量。

在偷窃阶段, 其公式为

$$x_i(t-1) = X^b + Sg(|x_i(t) - X^b| |x_i(t) - X^b|) \quad (28)$$

引入自适应搜索策略优化偷窃阶段, 当个体适应度差异较大时, 选择将惯性权重减小, 在所有个体的适应值趋于一致或者在局部最优时刻, 则将惯性权重增大。其基本要素更新规则为

$$\begin{cases} \tau_{i,j}(t+1) = (1 - p)\tau_{i,j}(t) + \sum_{i=1}^j k(\Delta\tau_{i,j}k(t)) \\ W = W_{\max} - (W_{\max} - W_{\min}) \left(\frac{i}{it_{\max}} \right)^2 \end{cases} \quad (29)$$

式中, $\tau_i(t)$ 为第 i 个小偷在 t 次迭代时的位置信息; g 为服从正态分布的 $1 \times D$ 随机向量; S 为常数, W 为惯性权重, 在迭代初期, W 较大有利于全局搜索, 后期 W 较小, 便于向最优解靠近。

其算法流程图如图2所示。

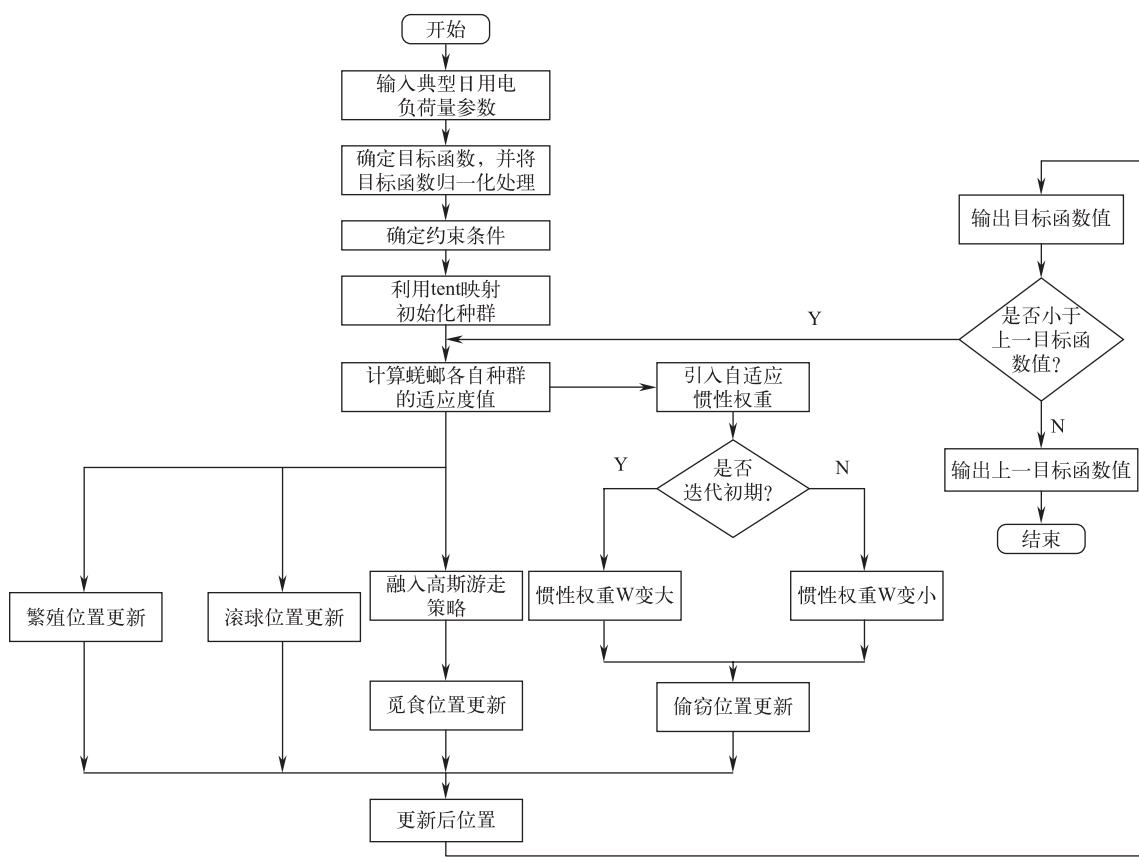


图2 改进蜚螂算法流程图

算例验证

1. 算例数据设置

为验证所提优化算法的有效性，在Python3.8版本下进行算例仿真，以浙江省某工业大用户的暑期一个月的电负荷数据作为本文的研究数据来源，本文设计3个储能单元，分别配6套200 kW储能双向变流器和一台1250 kV·A的升压隔离变压器，组成容量为6.708 MW·h功率为3.6 MW的储能电站系统。光伏电站拟安装容量为1 MW，假定光伏发电效率为80%，因此其在云层无遮挡时刻发电功率最大为0.8 MW。经过9台225 kW逆变器逆变、3台630 kV·A变压器升压连接至10 kV并网柜。

2. 场景设置

为分析改进蜚螂算法对储能充放电时段的优化效果，本文设置以下3个场景来进行对比分析。

场景1：不含储能装置的大工业用户（不考虑主从博弈）。

场景2：含储能装置的大工业用户（不考虑主从博弈）。

场景3：改进蜚螂算法优化储能装置的大工业用户（考虑主从博弈）。

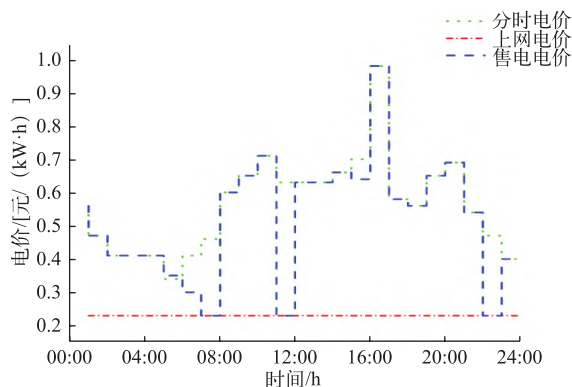


图3 出电价优化结果

图3中，运营商制定了一种售电价格策略，该策略基于当地电网提供的分时电价和上网电价的包络线。与电网相比，运营商为用能侧用户提供更有吸引力的价格。特别是在8:00—9:00和12:00—13:00的时段，运营商提供的售电价格明显低于电网的价格。这个策略的目的是促进新能源的消纳，防止风

能和光能被浪费或被弃掉。通过提供更具竞争力的价格，运营商鼓励用户在这些时间段使用电力，以更好地利用可再生能源和平滑电网负荷。

上述场景各主体效益见表1。

表1 上述场景各主体效益

场景	f_{leader}	f_{follower}	f_{sto}
1	23 562	14 562	0
2	25 685	15 685	548
3	28 695	17 584	1 125

3. 结果对比分析

结果对比如图4~图7所示。

由图4与图5相比较可以得到在加入储能装置后，典型日的电负荷需求明显降低。对比图5和图6分析可得，经过蜚螂优化算法之后，场景三的储能充放电深度以及状态转换次数明显较场景二显著提升，系统的用电负荷再次降低，结合分时电价可知，在用电低谷时段加大储能充电功率，增加储能充放电次数，并且在工作日与节假日其储能充放电次及功率大小不同，能够最大限度利用储能装置减少从电网购电功率，从而减少电费。

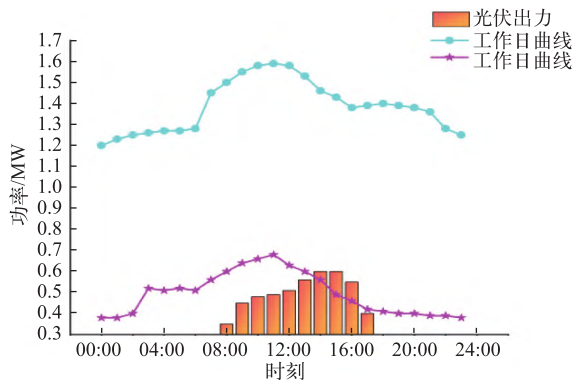


图4 场景一下的典型日电负荷情况及光伏出力情况

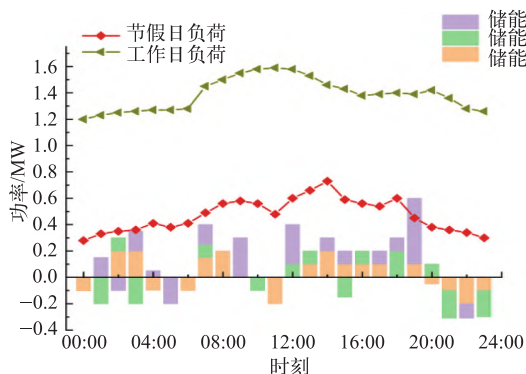


图5 场景二下典型如负荷曲线及储能充电情况

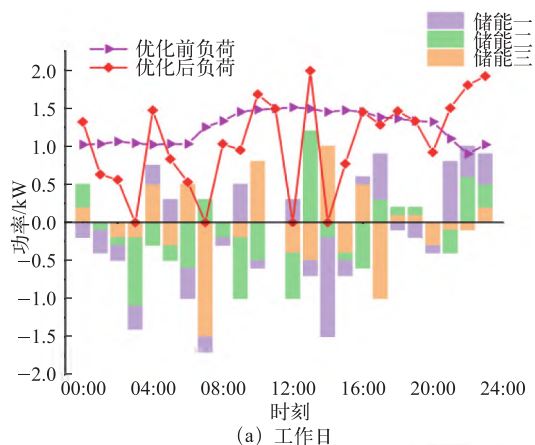
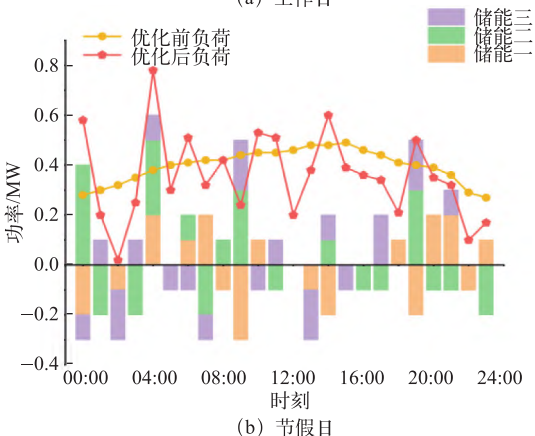


图6 场景三下不同时段储能充放电情况

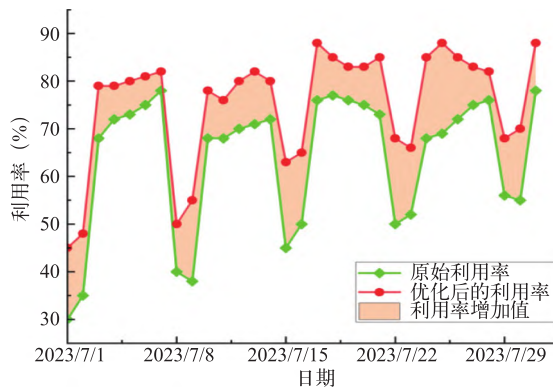


图7 储能利用率

图4是储能利用率示意图，从图4中可以看出，工作日相比于节假日储能利用率更高，这是因为在节假日存在着较为严重的储能闲置和储能资源浪费的问题。在节假日，工业用户内部用负荷较少会造成储能装置的闲置，而这段时间光伏相对出力没有变化，因此储能资源也存在着一定的浪费。经过蜚螂优化算法后，储能利用率均得到了提升，在工作日，原始储能利用率基本维持在60%~75%，

而在节假日可以看到储能利用率在30%~50%。经过蜚螂算法优化之后，节假日的储能利用率提升到45%~60%，工作日的储能利用率更是提高到75%~88%。因此，本文采用的蜚螂优化算法能够使得不管是节假日还是工作日的储能利用率提高，能够有效改善储能资源闲置和浪费的问题。

4. 算法对比

图8为不同算法下的功率优化过程，由图8中可以看到，不同算法都对目标函数值有着收敛作用，其中改进蜚螂优化算法在第82次迭代就达到了最优结果，其余的麻雀搜索算法（SSA），双向乘子法（ADMM）以及改进粒子群算法（IPSO）都需要在迭代近100次才能够达到收敛结果，证明了改进蜚螂算法的寻优速度最快。在收敛结果上，麻雀搜索算法在目标函数值达到0.3时刻最优，双向乘子法在0.29达到最优，改进粒子群算法则在0.28达到最优，改进蜚螂算法在0.25达到最优，证明改进蜚螂优化算法在寻优结果上具有较大的优势。

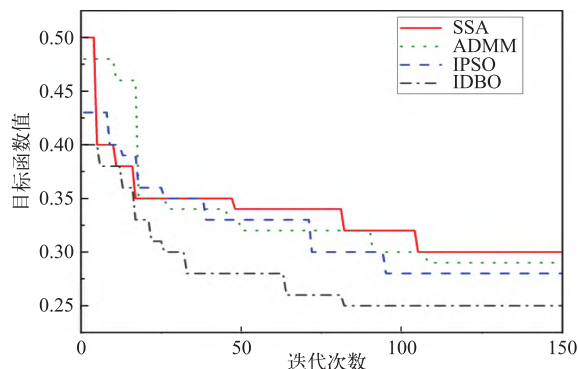


图8 不同算法下的功率优化过程

结束语

针对最大化利用储能装置从而达到电费优化的问题，本文提出改进蜚螂算法来优化整体储能装置利用率，通过三个场景的设置及对比仿真验证了本文所提方法的优越性，主要结论如下。

1) 通过蜚螂算法的优化过程，能够在供需不平衡的情况下，合理调度储能系统的充放电行为，以适应不同时间段的电力需求，以最优化的方式进行储能充电和放电，从而降低用户的电费支出。

2) 本文所提方法能够充分发挥储能利用率，提高储能充放电频次，最大限度地提高储能的利用效

率，进一步提高系统的经济性。

3) 针对蜚螂算法的实用性及寻优不足的问题进行了优化改进，提高系统整体稳定性及收敛速度，在解决问题时具有更高的效率和效果，并且与常用的算法进行对比，改进的蜚螂算法具有更快的寻优速度，达到系统经济性最高。EA

(收稿日期：2024-11-15)

参考文献

- [1] 臧云帆, 夏晟, 李嘉文, 等. 含共享储能的微电网群分布鲁棒博弈优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 90-101.
- [2] Han X, Ji T, Zhao Z, et al. Economic evaluation of batteries planning in energy storage power stations for load shifting[J]. Renewable Energy, 2015(78): 643-647.
- [3] 陈曦, 付文龙, 张海荣, 等. 考虑新能源发电不确定性的含微电网群共享储能优化调度[J]. 电网技术, 2024(1): 219-228.
- [4] 晏才鑫, 裘智峰, 王春生. 考虑合作博弈的风-光-液态空气储能集群日前市场不确定性优化方法研究[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(11): 2028-2038.
- [5] 岳子宜, 刘华志, 李永刚. 基于多阶段双重博弈的多园区随机场景低碳分布式调度优化[J]. 中国电机工程学报, 2024(22): 8860-8873.
- [6] 黄悦华, 邱元城, 张磊, 等. 考虑主从博弈的电热能源系统优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024(9): 115-123.
- [7] 高月芬, 员成博, 孔凡鹏, 等. 需求响应激励下耦合电转气、碳捕集设备的综合能源系统优化[J]. 中国电力, 2024(4): 32-41.
- [8] Liang Y, Wei W, Wang C. A Generalized Nash Equilibrium Approach for Autonomous Energy Management of Residential Energy Hubs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(11): 5892-5905.
- [9] Ding Y, Xu Q, Hao L, et al. A Stackelberg Game-based robust optimization for user-side energy storage configuration and power pricing[J]. Energy, 2023(283): 128429.