

计及电动汽车及多类需求响应的电力用户能量管理鲁棒模型

吕飞春¹, 胡惊涛¹, 张文涛¹, 胡东¹, 武旭²

(1. 国网江西省电力有限公司 余干县供电分公司, 江西 上饶 335100;

2. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:近年来,分布式能源呈规模化并网运行,导致传统电力用户从单纯的电能消费者逐步演变为兼具电能生产与消费能力的产消者,并可在市场电价的引导下有序参与市场交易。然而,受自身容量的限制,产消者难以承受市场电价波动性、光伏出力随机性带来的风险。为此,提出了一种基于鲁棒优化的产消者能量管理模型,首先构建了含电动汽车以及多类需求响应资源的产消者能量管理模型;在此基础上,考虑电价波动性以及光伏出力的随机性,构建了计及电价、光伏不确定性的产消者能量管理鲁棒模型,分析了鲁棒系数对产消者整体效益以及能量管理策略的影响。最后,采用改进灰狼算法实现了模型的高效求解。

关键词:产消者;鲁棒优化;能量管理模型;电动汽车;需求响应

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24261

Robust Model for Energy Management of Electric Power Users Considering Electric Vehicles and Multi Class Demand Response

LÜ Feichun¹, HU Jingtao¹, ZHANG Wentao¹, HU Dong¹, WU Xu²

(1. Yugan Country Power Supply Branch, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Shangrao 335100, Jiangxi, China; 2. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: In recent years, the large-scale grid connected operation of distributed energy has led to the gradual evolution of traditional power users from simple power consumers to prosumers with both power production and consumption capacity, and can orderly participate in market transactions under the guidance of market electricity price. However, limited by their own capacity, it is difficult for prosumers to bear the risks brought by the fluctuation of market electricity price and the randomness of photovoltaic output. Therefore, an energy management model of prosumers based on robust optimization was proposed. Firstly, an energy management model of prosumers including electric vehicles and various demand response resources was constructed. On this basis, considering the fluctuation of electricity price and the randomness of photovoltaic output, a robust model of energy management for prosumers considering the uncertainty of electricity price and photovoltaic was constructed, and the influence of robustness coefficient on the overall benefits of prosumers and energy management strategy was analyzed. Finally, the improved gray wolf algorithm was used to solve the model efficiently.

Key words: prosumers; robust optimization; energy management model; electric vehicle; demand response

在能源结构转型以及电力市场改革的双重背景下,分布式能源开发利用技术的推广成为我国解决能源危机和应对环境问题的主要手段^[1]。在配电网层面,以电动汽车(electric vehicle, EV)、需求响应(demand response, DR)负荷、光伏(photovoltaic, PV)以及电储能系统(energy storage sys-

tem, ESS)为代表的分布式能源呈规模化并网运行。与此同时,随着物理信息系统的蓬勃发展,在先进的通信技术、自动化技术的加持下,对用户侧的多类分布式资源进行整合,形成集发、用、储为一体的单元,称其为电力产消用户,简称产消者^[2]。凭借其聚合单元的灵活性以及快速响应

基金项目: 国家电网科技项目(5218C12230UC)

作者简介: 吕飞春(1984—),男,本科,工程师,Email: 1246134697@qq.com

电价的能力,产消者成为负荷侧资源高效管理与调控的有效手段。

目前,国内外学者对产消者的定义^[3]、产消者的能量管理策略^[4-5]以及产消者的市场化交易^[6-7]开展了一系列的研究。文献[8]对产消者的基本概念和基本定义进行了说明,指出产消者的本质是兼具电能生产与消费能力的电力用户。文献[9]构建了含分布式光伏、储能在内的光储产消者能量管理模型,分析了产消者能量管理行为与市场电价之间的关系。文献[10]在此基础上,进一步丰富了产消者的资源类型,加入空调、电动汽车负荷并构建了新的能量管理模型。产消者作为新兴独立主体,可以参与电力市场交易。文献[11]对产消者参与市场交易的时间尺度以及市场类型进行了分析归纳。文献[12]构建了产消者集中-分散市场交易模型,并采用交替方向乘子法实现产消者P2P交易动态定价,从而实现对用户隐私的保护。

尽管上述文献对产消者的能量管理模型以及市场交易模型进行了构建和求解,但是整体看来依然存在以下不足:1)上述文献对产消者的用户属性凸显不足,负荷资源分类不够明确;2)上述文献仅研究确定性交易模型,对不确定因素影响下的产消者能量管理或交易模型研究较少。

基于此,本文在上述文献的基础上,进一步构建了计及电动汽车及多类需求响应资源的电力产消用户能量管理鲁棒模型。首先,按源-荷-储的形式对产消者聚合资源进行了分类建模,对于负荷侧资源,按照可转移负荷、可中断负荷对其作了更为细致的划分;其次,构建了以总收益最大为目标的产消者能量管理模型,并考虑产消者各聚合单元运行约束、能量平衡约束以及向上级电网电能交互约束;最后,考虑市场电价以及光伏出力的不确定性,构建了产消者鲁棒能量管理模型,并采用基于Tent映射的改进灰狼算法实现了模型的高效求解。最后,以实际产消者为例,验证了所构模型的有效性。

1 产消者的结构和聚合资源

1.1 产消者基本概念

在先进的物理信息技术、协调通信技术以及能量管理技术的支撑下,对配电网层级的分布式电源、储能设备、固定负荷以及可控负荷等资源进行有机聚合,形成集电能生产与消耗于一体的电力用户,即为产消者^[13]。在地理位置的分布上,

产消者没有明确的定义限制,工业智能园区、商业楼宇综合体以及集群居民负荷均可以称之为产消者,其定义较为宽泛,管理资源类型和数量较为丰富,产消者的一般结构组成和交互模式如图1所示。在能量管理系统的统一协调下,产消者聚合用户侧的EV,DR,PV以及ESS等资源,并可以参与能源交易或者辅助电网运行。

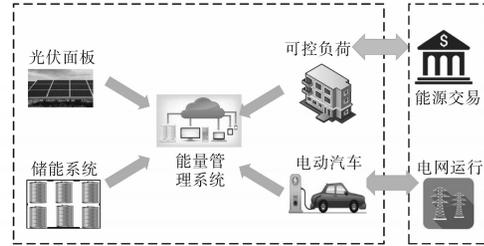


图1 产消者概念示意图

Fig.1 Schematic of prosumer concept

1.2 产消者聚合资源分类建模

按照产消者聚合资源的性质不同,可将其分为源-荷-储三大类进行分析,在电源侧,主要聚合资源为分布式光伏面板;在负荷侧,主要资源包括可中断负荷、可转移负荷以及固定负荷;在储能侧,包括固定的储能装置以及以电动汽车为代表的移动储能装置,以下将对此进行逐一建模。

1.2.1 电源侧建模

在电源侧,考虑产消者拥有光伏面板等资源,其 t 时刻输出功率 P_t^{pv} 与光伏所在地的太阳能辐射强度成正比关系,计算如下:

$$P_t^{pv} = \eta_{et} \cdot S_{CA} \cdot G_t \quad (1)$$

式中: η_{et} 为光伏面板光-电能量转换效率; S_{CA} 为光伏面板的实际有效面积; G_t 为太阳能辐射强度概率密度函数。

1.2.2 负荷侧建模

负荷侧资源包括可转移负荷以及可中断负荷,可转移负荷需要保持在转移前后调度周期内总的负荷量不变,产消者对中断的负荷需要给予一定的补偿 C_t^{DR} ,具体计算如下:

$$C_t^{DR} = \sum_{m=1}^{N_m} (\lambda_m^{cut} P_{m,t}^{il}) \quad (2)$$

式中: λ_m^{cut} 为第 m 级中断负荷的补贴单价; $P_{m,t}^{il}$ 为第 m 级 t 时刻中断负荷的响应电量。

可中断负荷运行约束如下:

$$P_t^{il} = \sum_m P_{m,t}^{il} \quad (3)$$

$$0 \leq P_{m,t}^{il} \leq P_{m,t}^{il,max} \quad (4)$$

$$P_t^{il} + P_{t-1}^{il} \leq P_s^{il,max} \quad (5)$$

式中: P_t^{il} 为 t 时刻总的中断负荷量; $P_{m,t}^{il,max}$ 为第 m 级

中断负荷的最大响应量; $P_s^{il,max}$ 为连续中断负荷的最大响应量。

将1天分为 T 个时段,可转移负荷的运行约束如下:

$$\sum_{t=1}^T P_t^{shift} = \sum_{t=1}^T P_t^s \quad (6)$$

$$0 \leq P_t^{drs} \leq P_{max}^{shift} \quad (7)$$

式中: P_t^{shift} 为 t 时刻转移后的负荷值; P_t^{drs} 为实际转移的负荷; P_t^s 为转移前的负荷值; P_{max}^{shift} 为 t 时刻最大可转移负荷量。

1.2.3 储能资源建模

储能资源包括电化学储能资源以及移动储能资源,可通过低储高发的模式获取收益,电化学储能的基本损耗 C_t^{ess} 可以表示为

$$C_t^{ess} = \tau(g_t^{esc} + g_t^{esd}) \quad (8)$$

式中: τ 为换算后的单位功率电池损耗费用; g_t^{esc} , g_t^{esd} 分别为储能的充、放电功率。

移动储能的典型代表为电动汽车负荷,除了满足基本的日常出行外,其余时间电动汽车均可并网进行充、放电活动,其电池损耗成本 C_t^{EV} 表示为

$$C_t^{EV} = \sum_{v=1}^{N_v} \frac{C_v^b}{L_v^c S_v^{EV} d_v^{DOD}} \left(\frac{P_{v,t}^{vd}}{\eta_v^{vd}} + E_v d_{v,t}^r \right) \quad (9)$$

式中: N_v 为EV数量; C_v^b 为第 v 辆EV的电池购买成本; L_v^c 为EV电池周期内充放电循环次数; S_v^{EV} 为EV电池容量; d_v^{DOD} 为EV的电池放电深度; $P_{v,t}^{vd}$ 为EV的放电功率; η_v^{vd} 为EV放电效率; E_v 为EV单位行驶距离所消耗的功率; $d_{v,t}^r$ 为EV行驶距离。

2 产消者确定性能量管理模型

对于产消者用户而言,其目标函数为净利润最大化,因此其优化模型的目标函数可表示为

$$\max \sum_{t=1}^T (S_t^{mark} - C_t^{EV} - C_t^{ess} - C_t^{DR}) \quad (10)$$

其中

$$S_t^{mark} = \lambda_t^{em} P_t^{em} \quad (11)$$

式中: S_t^{mark} 为产消者与上级电网交互获取的收入; λ_t^{em} 为 t 时刻能量市场电价; P_t^{em} 为 t 时刻产消者与上级电网的交互电量。

在上述目标函数下,产消者能量管理模型需要满足联络线传输功率约束以及能量平衡约束,具体如下:

$$-P_t^{emmax} \leq P_t^{em} \leq P_t^{emmax} \quad (12)$$

$$P_t^{em} + g_t^{esc} + P_t^{shift} - P_t^{il} + \sum_{v=1}^{V_m} P_{v,t}^{vc} = g_t^{esd} + \sum_{v=1}^{V_m} P_{v,t}^{vd} + P_t^{pv} \quad (13)$$

式中: P_t^{em} 为 t 时刻联络线传输功率; P_t^{emmax} 为 t 时刻产消者与上级电网联络线的最大传输功率; g_t^{esc} 为 t 时刻储能的充电功率; P_t^{shift} 为 t 时刻转移后的负荷值; P_t^{il} 为 t 时刻总的中断负荷量; $P_{v,t}^{vc}$ 为电源放电功率; g_t^{esd} 为储能的放电功率; $P_{v,t}^{vd}$ 为EV的放电功率; P_t^{pv} 为光伏输出功率。

3 产消者鲁棒能量管理模型

3.1 模型建立

本文进一步采用鲁棒优化法处理市场电价的波动性以及光伏出力的随机性,产消者鲁棒能量管理模型的目标函数 F 以及部分约束条件如下:

$$F = \begin{cases} \max \sum_{t=1}^T \left[\frac{1}{2} (\bar{\lambda}_t^{em} + \underline{\lambda}_t^{em}) P_t^{em} - C_t^{EV} - C_t^{ess} - C_t^{DR} \right] - \\ \Gamma^m \nu^m - \sum_{t=1}^T q_t^{em} \\ \text{s.t.} \quad P_t^{PV} + \Gamma_t^{pv} v_t^{pv} + q_t^{pv} \leq \frac{1}{2} (\bar{P}_t^{PV} + \underline{P}_t^{PV}) \\ v_t^m + q_t^{em} \geq \frac{1}{2} (\bar{\lambda}_t^{em} + \underline{\lambda}_t^{em}) \gamma_t^{em} \\ -\gamma_t^{em} \leq P_t^{em} \leq \gamma_t^{em} \\ v_t^{pv} + q_t^{pv} \geq \frac{1}{2} (\bar{P}_t^{PV} + \underline{P}_t^{PV}) y_t^{pv} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\bar{\lambda}_t^{em}$, $\underline{\lambda}_t^{em}$, \bar{P}_t^{PV} , \underline{P}_t^{PV} 分别为市场电价以及光伏出力的上、下限; Γ^m , Γ_t^{pv} 分别为市场电价以及光伏出力的鲁棒系数; ν^m , q_t^{em} , γ_t^{em} , v_t^{pv} , q_t^{pv} , y_t^{pv} 分别为市场电价以及光伏出力鲁棒模型引入的辅助变量,且 γ_t^{em} , y_t^{pv} 大于等于1、其余辅助变量非负。

结合式(14)以及上述产消者运行约束式(1)~式(13),可构建基于鲁棒优化的产消者能量管理模型。

3.2 求解方法

本文采用Tent映射改进灰狼算法求解上述鲁棒能量管理模型。传统的灰狼算法在寻优的过程中,往往需要利用随机数法确定初始种群信息,该方法将难以体现种群的多样性,从而造成寻优效率低;遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等在求解能量管理模型中多样性差、后期收敛速度慢、易陷入局部最优等缺陷^[14]。基于此,本文以混沌映射机制对上述方法进行改进,利用混沌运动的随机性、规律性以及遍历性的特征促进算法及时跳出局部最优解,提高算法的全局搜索性能。

基于Tent映射改进灰狼算法的初始种群基本表达式如下:

$$x_{i+1} = \begin{cases} \frac{x_i}{u} & 0 \leq x_i \leq u \\ \frac{1-x_i}{1-u} & u \leq x_i \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

令 $u=1/2$ 得到 Tent 映射最典型的形式,此时所得序列分布较为均匀,于是,式(15)可改写为

$$x_{i+1} = \begin{cases} 2x_i & 0 \leq x_i \leq 1/2 \\ 2(1-x_i) & 1/2 \leq x_i \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

利用Tent混沌映射产生序列值的算法步骤如图2所示。

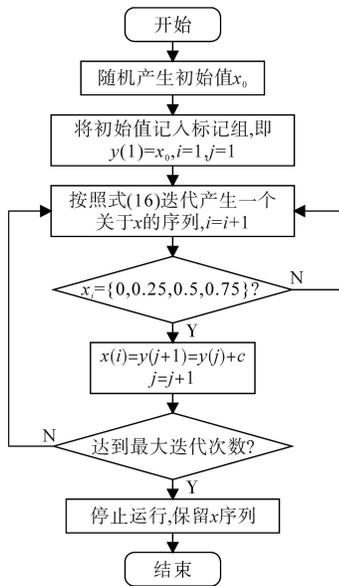


图2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of the algorithm

进一步结合灰狼算法的求解步骤,即可完成整个鲁棒模型的求解,相关步骤参考文献[15],本文在此不再赘述。

4 算例测试与结果分析

4.1 算例描述

本文以含光伏、储能、可控负荷以及电动汽车的产消者为例验证所构模型的有效性。光伏输出功率预测值及其上下限、市场电价预测值及其上下限分别如图3以及图4所示。基本负荷曲线如图5所示。

电动汽车类型为比亚迪E6,共计含有1000辆电动汽车,其基本参数取自文献[16],储能系统的充放电最大功率为1 MW,蓄电池容量为4 MW·h,充放电效率均取0.95,可削减负荷共计三级,各级最大削减比例为10%,8%以及5%,各级补贴费用分别为200元/(MW·h),300元/(MW·h)以及

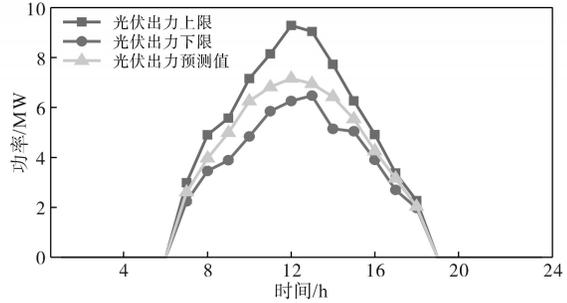


图3 光伏输出预测值

Fig.3 Predicted value of photovoltaic output

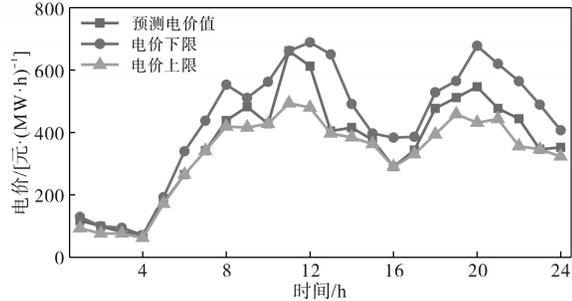


图4 市场电价预测值

Fig.4 Forecast value of the market electricity price

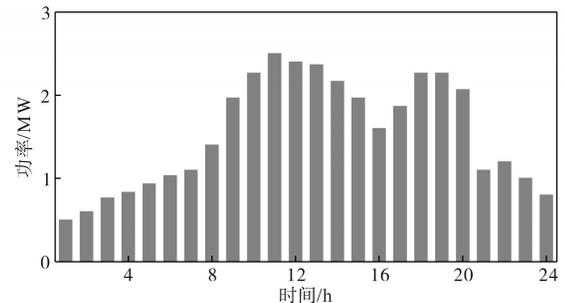


图5 基础负荷预测值

Fig.5 Forecast value of the base load

400元/(MW·h),可转移负荷的最大转移比例为5%。

改进灰狼算法的参数取自文献[17],仿真平台为Matlab 2019b。

4.2 优化结果分析

4.2.1 产消者聚合资源对收益的影响分析

为了衡量产消者内部各聚合资源对其整体运行效益方面的贡献,设置表1所示的几种对比场景,不同场景下的产消者的总收益以及各项费用如表2所示。从表2可以看到,聚合DR、聚合EV以及聚合ESS对于产消者利润而言,均具有正向的增益效果,但是分别将场景2、场景3以及场景4与场景1进行对比可以发现,DR对于产消者效益的影响最大,聚合DR与不聚合DR相比,市场获利减少了近50%,导致产消者的总收益降低了28.18千元,而聚合ESS或不聚合ESS对于产消者的收益影响相对较少,聚合ESS情况下还能够降低DR的补贴费用。

表1 不同运行方案表

场景编号	聚合 DR	聚合 EV	聚合 ESS
1	√	√	√
2	√	√	×
3	√	×	√
4	×	√	√

表2 不同运行方案下各项费用计算

场景	费用/千元				
	DR 补贴	EV 损耗	ESS 损耗	市场 获利	总收益
场景1	26.49	4.94	7.92	105.94	66.61
场景2	29.65	4.94	0.00	88.28	53.69
场景3	32.25	0.00	7.92	86.59	46.42
场景4	0.00	4.94	7.92	51.29	38.43

4.2.2 产消者聚合资源对收益的影响分析

鲁棒系数反映了系统对于风险的偏好程度。鲁棒系数越大,系统对于风险越厌恶,风险就越小;而鲁棒系数越小,则风险就越大,为了衡量系统风险成本,采用失负荷量表示系统运行风险,计算系统的风险成本。对于本文产消者鲁棒能量管理模型而言,依次取不同的鲁棒系数,则产消者能量管理模型的总收益和风险成本变化如图6所示。

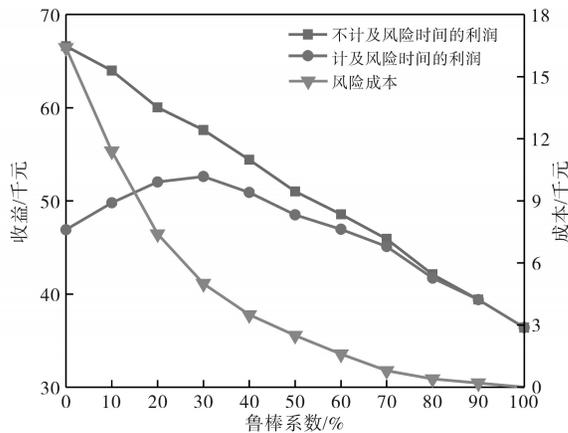


图6 产消者能量管理模型的总收益和风险成本

Fig.6 Total revenue and risk cost of energy management model for prosumers

由图6可知,不计及风险时产消者的收益随着鲁棒系数的增大而降低,而计及风险时产消者的收益随着鲁棒系数的增加先升高后降低,并在鲁棒系数为30%~40%左右达到最大值,而系统的风险成本则随着鲁棒系数的增加而逐步降低。可见,鲁棒系数越大,系统的鲁棒性越强,失负荷风险越低,表现为风险成本也大大降低,因此考

虑风险的鲁棒能量管理模型总收益也有所提高。

4.2.3 鲁棒系数对产消者市场交易策略的影响

图7为不同鲁棒系数对产消者市场交易策略的影响图。由图7可知,在确定性模型下,产消者购电电量相对较低,且整体售电电量相对较高。与之不同,随着鲁棒系数的增加,产消者的购电电量逐渐增加,但是售电电量却有所降低。这主要是随着风险系数的增加,各类随机变量的不确定性增加,为了减少失负荷率,降低系统运行风险,产消者选择降低售电电量,并在购电时段提高购电电量。

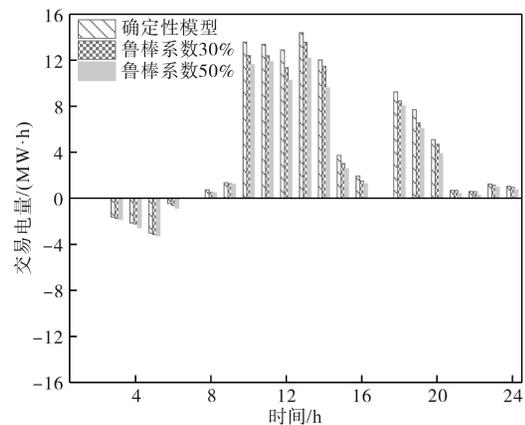


图7 鲁棒系数对购售电量决策的影响

Fig.7 Influence of robustness coefficient on power purchase and sale decision

4.2.4 改进灰狼算法性能测试

为了验证本文所提算法的有效性,设置以下对比算法:

- 1)采用传统灰狼算法,不改进初始种群;
- 2)采用粒子群算法;
- 3)采用本文基于Tent映射的改进灰狼算法。

上述三种算法的迭代曲线如图8所示。

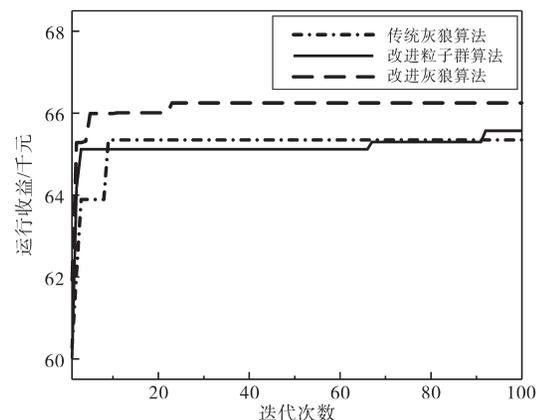


图8 不同算法寻优能力对比

Fig.8 Comparison of optimization ability of different algorithms

由图8可以看出,传统灰狼算法与改进灰狼

算法在前期迭代速度方面差距较大,改进灰狼算法前期寻优能力更强,且最终收敛到较大的数值。而传统灰狼算法不仅初始寻优能力差,最终收敛的数值也低于改进灰狼算法。此外,在运行效益上,改进灰狼算法优势明显,第25次迭代已收敛,而改进粒子群算法与传统灰狼算法效益明显低于改进灰狼算法,虽改进粒子群算法的最终收敛值也较大,但是其收敛较为缓慢,在第90次迭代才收敛到该数值,整体寻优能力较差。

5 结论

本文构建了计及电动汽车及多类需求响应资源的电力产消用户能量管理鲁棒模型,并提出了一种基于Tent映射的改进灰狼算法,经过算例测试,得出以下结论:

1)产消者聚合EV、聚合ESS以及聚合DR对于其收益均有正增益,可以提高产消者的总收益。

2)产消者鲁棒模型能够在运行风险以及整体收益直接达到平衡,考虑风险成本时,在鲁棒系数为30%~40%左右可以达到收益的最大值。

3)基于Tent映射的改进灰狼算法在前期寻优能力以及最终收敛数值方面均有优势,能够提高模型的求解效率。

参考文献

- [1] 赵振宇,叶慧男,耿孟茹. 中国省级天然气分布式能源开发环境评价及聚类分析[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 175-182.
ZHAO Zhenyu, YE Huinan, GENG Mengru. Provincial evaluation and cluster analysis of environments for gas distributed energy system development in China[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 175-182.
- [2] BARTON J P, INFELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [3] 刘永江,魏超,高正平,等. 氢储能接入含风电的热电联产系统日前调度研究[J]. 电气传动, 2021, 51(20): 64-68, 74.
LIU Yongjiang, WEI Chao, Gao Zhengping, et al. Day ahead scheduling of hydrogen energy storage connected to wind power cogeneration system[J]. Electric Drive, 2021, 51(20): 64-68, 74.
- [4] 陈新和,裴玮,邓卫. 基于代理模型的分布式能源现货市场运营模式[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 107-116.
CHEN Xinhe, PEI Wei, DENG Wei. Surrogate model based operation model of distributed energy spot market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 107-116.
- [5] RATHNAYAKA A J D, POTDAR V M, DILLON T S, et al. A methodology to find influential prosumers in prosumer community groups[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 706-713.
- [6] 吉斌,莫峻,谭建成. 高比例光伏电能产消群电力需求响应机制设计[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3315-3323.
JI Bin, MO Jun, TAN Jiancheng. Design of power demand response mechanism for high proportion of photovoltaic prosumer[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3315-3323.
- [7] 吴界辰,艾欣. 交互能源机制下的电力产消者优化运行[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 1-18.
WU Jiechen, AI Xin. Optimal operation of prosumers based on transactive energy mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 1-18.
- [8] LIU N, CHENG M, YU X, et al. Energy-sharing provider for PV prosumer clusters: a hybrid approach using stochastic programming and stackelberg game[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6740-6750.
- [9] 任洪波,吴琼,刘家明. 耦合区域售电服务的分布式能源产消者经济优化与能效评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3756-3766.
REN Hongbo, WU Qiong, LIU Jiaming. Economic optimization and energy assessment of distributed energy prosumer coupling local electricity retailing services[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3756-3766.
- [10] 艾欣,王坤宇,胡俊杰,等. 基于交互能源机制的产消者群分布式调度方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1766-1777.
AI Xin, WANG Kunyu, HU Junjie, et al. Study on distributed scheduling approach of aggregated prosumers based on transactive energy mechanism[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1766-1777.
- [11] 吴界辰. 交互能源机制下的集群产消者优化调度模型与方法研究[D]. 北京:华北电力大学, 2020.
WU Jiechen. Research on interactive scheduling method of energy cluster and consumer scheduling mechanism[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [12] 赵有林,邱晓燕,赵长枢,等. 考虑电转气精细化模型的气电联合微网日前优化调度[J]. 电气传动, 2021, 51(11): 68-74.
ZHAO Youlin, QIU Xiaoyan, ZHAO Changshu, et al. Day ahead optimal scheduling of gas electricity combined microgrid considering electricity to gas refinement model[J]. Electric Drive, 2021, 51(11): 68-74.
- [13] 单俊嘉. 基于peer-to-peer模式的多产消者电能交易方法研究[D]. 北京:华北电力大学, 2021.
SHAN Junjia. Research on multi producer electricity trading method based on peer-to-peer model[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [14] 单俊嘉,董子明,胡俊杰,等. 基于区块链技术的产消者P2P电能智能交易合约[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3830-3839.
SHAN Junjia, DONG Ziming, HU Junjie, et al. P2P power intelligent trading contract for producers and consumers based on blockchain technology[J]. Power System Technology, 2021, 45

(下转第47页)

- 及线路参数识别方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(5):193-196.
- ZHOU Yu, FANG Ming, XIA Yibo. Distribution network topology and line parameter identification method based on data-driven technology[J]. AUTOMATION&INSTRUMENTATION, 2021(5):193-196.
- [13] 荆禄宗, 吴钦木. 基于递归神经网络的永磁同步电机参数辨识研究[J]. 电气传动, 2020, 50(3):87-91, 101.
- JING Luzong, WU Qinmu. Parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on neural network[J]. Electric Drive, 2020, 50(3):87-91, 101.
- [14] 金硕, 朱琳, 杨帅, 等. 基于SVR的变压器油浸纸电阻率分区间检测检测方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(3):1020-1027.
- JIN Shuo, ZHU Lin, YANG Shuai, et al. Multiregion indirect detection method for oil-impregnated paper in power transformer based on SVR[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3):1020-1027.
- [15] 沈兆轩, 袁三男. 利用卷积神经网络支持向量回归机的地区负荷聚类集成预测[J]. 电网技术, 2020, 44(6):2237-2244.
- SHEN Zhaoxuan, YUAN Sannan. Regional load clustering integration forecasting based on convolutional neural network support vector regression machine[J]. Power System Technology, 2020, 44(6):2237-2244.
- [16] 王珏, 杨文刚. 基于改进遗传算法的三相感应电机参数估计算法[J]. 电气传动, 2019, 49(11):3-7, 21.
- WANG Jue, YANG Wengang. Parameters estimation algorithm of TIM based on improved genetic algorithm[J]. Electric Drive, 2019, 49(11):3-7, 21.
- [17] 陈海涛, 张学敏, 戴伟康, 等. 基于GA优化SVM参数与云模型的继电保护装置状态评估方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(7):88-92, 117.
- CHEN Haitao, ZHANG Xuemin, DAI Weikang, et al. State assessment method of relay protection device based on GA optimization SVM parameters and cloud model[J]. Smart Power, 2020, 48(7):88-92, 117.
- [18] 刘爱国, 黄泽平, 薛云涛, 等. 基于遗传算法小波神经网络的光伏微网发电预测[J]. 电测与仪表, 2017, 54(7):28-33.
- LIU Aiguo, HUANG Zeping, XUE Yuntao, et al. Application for photovoltaic micro-grid power forecasting using improved wavelet neural networks-based on GA[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2017, 54(7):28-33.
- [19] 徐佳宁, 倪裕隆, 朱春波. 基于改进支持向量回归的锂电池剩余寿命预测[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17):3693-3704.
- XU Jianing, NI Yulong, ZHU Chunbo. Remaining useful life prediction for lithium-ion batteries based on improved support vector regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17):3693-3704.
- [20] 邱思语, 杨洪耕. 改进的加权支持向量机回归的谐波发射水平估计方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5):85-90.
- QIU Siyu, YANG Honggeng. Assessment method of harmonic emission level based on the improved weighted support vector machine regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5):85-90.
- 收稿日期:2021-11-13
修改稿日期:2021-12-03
- ~~~~~
- (上接第40页)
- (10):3830-3839.
- [15] 周亦洲, 孙国强, 黄文进, 等. 计及电动汽车和需求响应的多类电力市场下虚拟电厂竞标模型[J]. 电网技术, 2017, 41(6):1759-1767.
- ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Bidding model of virtual power plant in multi class electricity market considering electric vehicle and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(6):1759-1767.
- [16] 孙国强, 周亦洲, 卫志农, 等. 能量和旋转备用市场下虚拟电厂热电联合调度鲁棒优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11):3118-3128.
- SUN Guoqiang, ZHOU Yizhou, WEI Zhinong, et al. Robust optimization model of combined thermal power dispatching of virtual power plant in energy and rotating reserve market[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11):3118-3128.
- [17] 田书欣, 刘浪, 魏书荣, 等. 基于改进灰狼优化算法的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16):1-11.
- TIAN Shuxin, LIU Lang, WEI Shurong, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network based on improved grey wolf optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16):1-11.
- 收稿日期:2022-03-25
修改稿日期:2022-04-01