

DOI: 10.7667/PSPC180179

# 考虑不确定性的分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化能量调度

戴璐平, 吴薇, 黄蓓雯

(国网上海市电力公司客服中心, 上海 200122)

**摘要:** 分布式家庭并网光伏系统是太阳能产业规划的重要组成部分, 其能量优化调度模型是一项重要研究课题。针对系统中光伏出力的不确定性, 对其采取区间形式表示。以系统运行成本最小为目标, 计及系统功率平衡约束等多项必要约束条件, 建立分布式家庭并网光伏系统的能量优化基本模型。通过鲁棒优化框架将能量优化调度基本模型中含不确定变量的约束条件转化为确定性约束, 从而建立分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化能量调度模型。采用改进萤火虫算法对所建立的模型进行求解。仿真算例表明, 所建立模型得到的系统运行方案能够在实际运行中具备良好的鲁棒性, 降低系统经济风险。

**关键词:** 分布式家庭并网光伏系统; 不确定性; 鲁棒优化; 能量调度; 萤火虫算法

## Optimal energy scheduling for family grid-connected photovoltaic systems considering uncertainty

DAI Luping, WU Wei, HUANG Beiwen

(State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company Customer Service Center, Shanghai 200122, China)

**Abstract:** The family grid-connected photovoltaic system is an important part of the solar energy industry planning and its energy optimization scheduling model is an important research topic. In the light of the uncertainty of photovoltaic output in the system, it is expressed in the form of interval. Taking the minimum cost of system operation as the objective function, while taking into account the necessary constraints of system such as power balance constraints and others, a basic energy optimization model of family grid-connected photovoltaic systems is established. A robust optimization framework is applied to transform the constraint condition containing uncertain variables in the basic energy optimization scheduling model into deterministic constraints, so as to establish a robust optimal energy scheduling model for family grid-connected photovoltaic systems. The improved firefly algorithm is used to solve the model. The simulation example shows that the system operation scheme obtained by proposed model has good robustness in the actual operation and is able to reduce the economic risk of the system.

This work is supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51337005).

**Key words:** family grid-connected photovoltaic systems; uncertainty; robust optimization; energy scheduling; firefly algorithm

## 0 引言

分布式光伏发电作为一种新型的、具有广阔应用前景的发电和能源综合利用形式, 倡导就近发电、就近并网、就近转换、就近使用的原则<sup>[1]</sup>。光伏发电呈现“规模化分散开发、低压接入、就地消纳”以及“大规模集中开发、中高压接入、高压远距离外送消纳”两种方式并存格局<sup>[2]</sup>。随着光伏电池 (Photovoltaic, PV) 的生产制造成本不断降低以及国家对于分布式新能源并网发电的扶持力度不断加大,

分布式家庭并网光伏系统作为光伏发电的一种重要形式, 逐渐得到推广和应用<sup>[3-4]</sup>。

目前, 针对分布式家庭并网光伏系统的优化调度问题, 不少文献提出了模型。比如文献[5]设计了一种含储能接入的小型分布式光伏系统, 并且为系统的优化调度模型建立提供了基础。文献[6]重点研究了分时和阶梯两种电价政策下的家庭并网光伏系统的优化运行模型, 并对两种情况下的系统运行指标作了比较。文献[7]从储能装置的角度建模, 目的是有效降低供电需求变化产生的压力。文献[8]从发电侧角度进行研究, 提高了光伏发电系统在并网模式时的调峰能力。文献[9]提出了一种针对大容量储

能光伏系统的优化运行与经济性评价体系, 重点研究了储能系统的燃料费用和环境污染物排放量的降低。文献[10]出一种考虑电能质量问题的分布式光伏发电的规划方法。文献[11]提出了专门针对居民和工商业用户的分布式光伏系统的经济性分析模型, 并将其应用于示范工程中。然而以上文献都没有考虑到分布式家庭光伏系统中光伏出力的不确定性, 所建立的模型适用性有限。

针对含分布式光伏并网系统的优化运行问题, 也有部分文献计及了光伏出力的不确定性, 并通常采用随机分布形式来描述光伏出力的不确定分布。例如文献[12]考虑机会约束建立了含光伏的主动配电网优化调度模型; 文献[13]采用概率约束的形式计及了冷热电联供系统中光伏出力的不确定性。然而光伏出力的随机分布在现实中很难测定, 即使可行也需要大量的成本。而且采用这种方式建立的模型由于需要随机模拟通常会导致较高的求解难度。采用鲁棒优化模型则可以避免这些问题, 而且目前还鲜有文献针对分布式家庭并网光伏系统能量优化调度问题采用鲁棒优化模型计及光伏出力不确定性进行建模。

鲁棒优化<sup>[14]</sup>是一种针对不确定性问题的建模方法, 与一般的随机性处理方法不同, 该方法采用区间来描述不确定性。鲁棒优化所得到的解在给定的集合描述中均要求满足, 是指在任意情况下系统都能达到的最优情况。鲁棒优化能够兼顾模型的经济性和可靠性<sup>[15]</sup>, 与传统的随机和模糊处理方式相比, 更加偏向对可靠性的保证上。

分布式家庭并网光伏系统中光伏出力的随机性、间歇性和波动性会对系统的稳定可靠运行产生不良影响, 在能量优化调度模型中需要采用适合的模型去考虑。本文针对系统中光伏出力的不确定性, 以系统运行成本最小为目标, 计及系统功率平衡约束等多项必要约束条件, 建立分布式家庭并网光伏系统的能量优化基本模型。在此基础上, 采用鲁棒优化模型建立分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化能量调度模型。采用改进萤火虫算法对所建立的模型进行求解。所建立的模型能够充分考虑光伏出力不确定性对能量优化调度的影响, 在保证系统运行可靠性的基础上充分追求经济性。

## 1 分布式家庭并网光伏系统基本模型

### 1.1 光伏出力的区间模型

光伏发电的原理是将太阳能直接转化成电能。光伏组件的功率输出通常以标准测试条件也就是太阳辐射强度达到  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$ , 电池温度为  $25\ ^\circ\text{C}$  时

的功率出力为标准进行修正, 具体可表示为<sup>[16]</sup>

$$P_{\text{PV}} = P_{\text{STC}} \frac{G_{\text{ING}}}{G_{\text{STC}}} [1 + k_{\text{PV}}(T_c - T_r)] \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{PV}}$  为光伏组件的实际出力;  $G_{\text{ING}}$  为实际辐射强度;  $G_{\text{STC}}$  为标准测试条件下的阳光辐射强度;  $P_{\text{STC}}$  为标准条件下光伏电池组件的额定输出功率;  $k_{\text{PV}}$  为功率温度系数;  $T_c$  为电池温度;  $T_r$  为外界温度。

尽管光伏出力的随机分布很难测定, 光伏出力的基本区间却很容易测得, 通过鲁棒优化模型使得模型的约束条件在光伏出力水平位于所有情况下都能够满足的前提下追求目标函数。

光伏出力的间歇性和波动性可用式(2)和式(3)来表示, 该式采用区间的形式描述了光伏出力的分布情况, 作为鲁棒优化模型的基础。

$$P_{\text{PV}}(t) = \bar{P}_{\text{PV}}(t) + \hat{P}_{\text{PV}}(t) \quad (2)$$

$$\hat{P}_{\text{PV}}(t) \in [\hat{P}_{\text{PV},\min}(t), \hat{P}_{\text{PV},\max}(t)] \quad (3)$$

式中:  $P_{\text{PV}}(t)$  为分布式光伏在时段  $t$  的实际出力水平;  $\bar{P}_{\text{PV}}(t)$  为能量优化调度中心对分布式光伏在时段  $t$  的预测出力;  $\hat{P}_{\text{PV}}(t)$  为分布式光伏在时段  $t$  的实际出力和预测出力的偏差;  $\hat{P}_{\text{PV},\min}(t)$  和  $\hat{P}_{\text{PV},\max}(t)$  分别为该偏差的最小值和最大值。

通过这种方式将分布式光伏出力表示为不确定量的形式, 然后通过数学方法代入到能量优化调度基本模型中, 建立鲁棒优化模型。

分布式家庭并网光伏系统通常应用于居民用户或者工业园区用户, 因此负荷曲线较为稳定, 与光伏出力相比不确定性低, 因此本文对负荷水平的不确定性采用系统旋转备用满足一定条件的方式来考虑。

### 1.2 储能运行模型

分布式家庭并网光伏系统中通常需要配置一定容量的储能, 作为对光伏出力平抑的手段。本文模型中采用硫纳型蓄电池储能。储能电量与储能充放电功率存在直接的约束关系<sup>[17]</sup>, 如式(4)所示。

$$E_{\text{SB}}(t+1) = \begin{cases} E_{\text{SB}}(t) - P_{\text{SB}}(t)\eta_{\text{ch}}\Delta t - \Delta t D_{\text{SB}} Q_{\text{SB}}, P_{\text{SB}}(t) \leq 0 \\ E_{\text{SB}}(t) - \frac{P_{\text{SB}}(t)}{\eta_{\text{dis}}}\Delta t - \Delta t D_{\text{SB}} Q_{\text{SB}}, P_{\text{SB}}(t) \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $E_{\text{SB}}(t+1)$  为  $t+1$  时段末储能的剩余电量状态;  $\eta_{\text{ch}}$  和  $\eta_{\text{dis}}$  分别为储能的充电效率和放电效率;  $D_{\text{SB}}$  为储能自放电系数, 该系数描述了无论储能处于充

电状态还是放电状态都必然存在的电量损耗。

此外储能进行充放电活动还伴随着运行维护成本, 并且充电活动和放电活动的运行维护成本计算方式存在区别<sup>[18]</sup>。储能运行维护成本计算如式(5)所示。

$$c_{SB}(t) = u_{ch}(t)|P_{SB}(t)|\Delta tk_{ch} + u_{dis}(t)|P_{SB}(t)|\Delta tk_{dis} \quad (5)$$

式中:  $c_{SB}(t)$  为储能在时段  $t$  的运行维护成本;  $P_{SB}(t)$  为  $t$  时段储能充放电功率, 大于零时为放电;  $u_{ch}(t)$  和  $u_{dis}(t)$  分别表示  $t$  时段储能的充放电状态, 当  $t$  时段储能处于充电状态时  $u_{ch}(t)$  为 1 且  $u_{dis}(t)$  为 0, 处于放电状态时  $u_{ch}(t)$  为 0 且  $u_{dis}(t)$  为 1;  $k_{ch}$  为充电时的储能寿命损耗成本系数;  $k_{dis}$  为放电时的储能寿命损耗成本系数。

其中运行维护成本系数表达式计算分别如式(6)和式(7)所示。

$$k_{ch} = \frac{C_{init}}{N(x)} \cdot \frac{\gamma_{ch}}{-P_{SB}(t)C_{SB,start}} \cdot \frac{C_{SB}^{max}}{C_{SB,end}} \quad (6)$$

$$k_{dis} = \frac{C_{init}}{N(x)} \cdot \frac{\gamma_{dis}}{P_{SB}(t)C_{SB,end}} \cdot \frac{C_{SB,start}}{C_{SB}^{min}} \quad (7)$$

式中:  $N(x)$  为最大循环次数, 由充放电深度  $x$  决定, 具体计算参考文献[18];  $C_{init}$  为储能初始固定投资成本;  $C_{SB,start}$  为充放电过程的初始荷电状态;  $C_{SB,end}$  为充放电过程的末尾荷电状态;  $C_{SB}^{min}$  为储能最低放电深度, 取为储能容量的 0.1 倍;  $C_{SB}^{max}$  为储能最高允许电量, 取为储能容量的 0.9 倍;  $\gamma_{ch}$  和  $\gamma_{dis}$  分别为充放电影响因子。

## 2 能量优化调度基本模型

### 2.1 目标函数

调度的时间范围选取为一天, 能量优化调度基本模型的目标函数为分布式家庭并网光伏系统一天运行成本最小, 如式(8)所示。

$$\min C = \sum_{t=1}^T [C_{SB}(t) + P_{grid}(t)q(t)\Delta t - FP_{PV}(t)\Delta t] \quad (8)$$

式中:  $C$  为分布式家庭并网光伏系统一天的运行成本;  $T$  为一天的调度时段数;  $\Delta t$  为每个调度时段时长;  $P_{grid}(t)$  为  $t$  时段家庭光伏系统与外网交换功率, 大于零时为购电, 本文运行家庭并网光伏系统的光伏功率向外网外送从而获得收益;  $q(t)$  为  $t$  时段外网分时电价水平;  $F$  为政府对分布式光伏发电的补贴价格,  $F=0.42$  元/kWh;  $P_{PV}(t)$  为  $t$  时段光伏出力功率。

### 2.2 约束条件

分布式家庭光伏系统能量优化调度模型还需

要满足以下约束条件, 包括功率平衡约束、储能电量约束, 储能充放电功率约束、交换功率约束以及旋转备用约束。

#### 1) 系统功率平衡约束

在系统运行中, 最重要的是需要满足功率平衡约束。分布式家庭光伏系统中的手段有光伏发电、储能放电、向外网购电, 而用电手段有储能充电、向外网售电、负荷消纳。因此功率平衡约束如式(9)所示。

$$P_{PV}(t) + P_{SB}(t) = P_{grid}(t) + P_L(t) \quad (9)$$

式中,  $P_L(t)$  是系统在时段  $t$  的负荷水平。

#### 2) 蓄电池电量约束

当家庭光伏系统运行时, 储能充放电深度与储能使用寿命密切相关, 过大的储能放电深度会导致储能寿命下降。因此储能电量需要满足上下限约束以及首末电量平衡约束, 如式(10)所示。

$$\begin{cases} E_{SB}^{min} \leq E_{SB}(t) \leq E_{SB}^{max}, E_{SB}(0) = E_{SB}(T) \\ E_{SB}^{min} = 0.1Q_{SB}; E_{SB}^{max} = 0.9Q_{SB} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $E_{SB}(0)$  为储能一天初始时刻电量;  $E_{SB}(T+1)$  为储能一天末时刻即第  $T$  个调度时段末时刻的电量。

#### 3) 蓄电池充放电功率约束

储能充放电功率存在限制, 在模型中需要计及该约束从而制定符合实际的优化调度方案, 该约束如式(11)所示。

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

式中:  $P_{SB}^{max}$  为储能充放电功率上限, 为正, 即储能放电功率上限;  $P_{SB}^{min}$  为储能充放电功率下限, 为负, 其绝对值即为储能充电功率上限。

#### 4) 系统与外网功率约束

分布式家庭光伏系统与外网进行功率交换存在一定的限制约束如式(12)所示。

$$P_{grid}^{min} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{max} \quad (12)$$

式中:  $P_{grid}^{max}$  为向外网购电功率上限;  $P_{grid}^{min}$  为负, 其绝对值为向外网售电功率上限。

#### 5) 旋转备用约束

$$\min[P_{SB}^{max}, (E_{SB}(t-1) - E_{SB}^{min} - D_{SB}Q_{SB})\eta_{dis}] + P_{PV}(t) + P_{grid}^{max} \geq P_{grid}(t)(1 + \lambda) \quad (13)$$

式中,  $\lambda$  为家庭光伏系统在  $t$  时段所需要的旋转备用率, 为一个大于 0 小于 1 的系数。

## 3 鲁棒优化模型建立

### 3.1 约束条件转化

所建立的分布式家庭并网光伏系统能量优化

调度模型的约束条件中包含不确定变量。通过区间形式描述的光伏出力表达式, 本文采用鲁棒优化框架将约束条件式(9)及式(13)中的不确定性变量消除, 转化为只含有确定性变量的约束条件, 进而将整个不确定模型转化为确定式的鲁棒优化模型。

将功率平衡约束(9)和光伏出力区间描述式(13)代入到旋转备用约束表达式中得到

$$\begin{aligned} & \bar{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{PV}(t) + P_{grid}^{\max} + \\ & \min[P_{SB}^{\max}, (E_{SB}(t-1) - E_{SB}^{\min} - D_{SB}Q_{SB})\eta_{dis}] \geq \quad (14) \\ & [\bar{P}_{PV}(t) + \hat{P}_{PV}(t) + P_{SB}(t) - P_{grid}(t)](1 + \lambda) \end{aligned}$$

整理可以得到将  $\hat{P}_{PV}(t)$  提取出来的形式如式(16)所示, 式中考虑到只需要让  $\hat{P}_{PV}(t)$  的最大值满足该约束, 那么原有的旋转备用约束就必然成立, 因此采用  $\max$  形式。

$$\begin{aligned} & \max \hat{P}_{PV}(t) \leq \\ & \frac{\min[P_{SB}^{\max}, (E_{SB}(t-1) - E_{SB}^{\min} - D_{SB}Q_{SB})\eta_{dis}]}{\lambda} + \quad (15) \\ & \frac{P_{SB}^{\max} - [P_{SB}(t) + P_{grid}(t)](1 + \lambda)}{\lambda} - \bar{P}_{PV}(t) \end{aligned}$$

根据线性对偶理论将最大值形式的目标函数转化为最小值形式如式(16)所示。

$$\max \hat{P}_{PV}(t) = -\min(-\hat{P}_{PV}(t)) \quad (16)$$

对于  $-\min(-\hat{P}_{PV}(t))$  构造其拉格朗日函数如式(17)所示, 同时将其对  $\hat{P}_{PV}(t)$  求偏导得到式(18)。

$$\begin{aligned} L(\hat{P}_{PV}(t), \alpha(t), \beta(t), \delta(t)) = & -\hat{P}_{PV}(t) + \alpha(t)\hat{P}_{PV}(t) + \\ & \beta(t)(\hat{P}_{PV}(t) - \hat{P}_{PV,\min}(t)) + \delta(t)(\hat{P}_{PV,\max}(t) - \hat{P}_{PV}(t)) \quad (17) \end{aligned}$$

$$\Delta_{\hat{P}_{PV}(t)} L(\hat{P}_{PV}(t), \alpha(t), \beta(t), \delta(t)) = -1 + \alpha(t) + \beta(t) - \delta(t) \quad (18)$$

式中,  $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$  和  $\delta(t)$  分别为拉格朗日系数。

对构造的拉格朗日函数中不确定变量  $\hat{P}_{PV}(t)$  运用优化理论中的线性对偶理论化简后可以得到式(19)所示的目标函数和式(20)所示的约束条件。

$$\begin{aligned} & \max \hat{P}_{PV}(t) = \min[\beta(t)\hat{P}_{PV,\min}(t) - \delta(t)\hat{P}_{PV,\max}(t)] \quad (19) \\ & \text{s.t. } -1 + \alpha(t) + \beta(t) - \delta(t); \quad (20) \\ & \beta(t) \geq 0; \delta(t) \geq 0 \end{aligned}$$

### 3.2 鲁棒优化能量调度综合模型

通过这种方式, 可以将原有的分布式家庭并网光伏系统基本能量优化调度模型中包含不确定量的功率平衡约束和旋转备用约束转化为只含有确定变量的形式。转化后的分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化综合模型如式(21)所示。该模型能采用确定性

方法求解。

$$\begin{aligned} & \min C \\ & \text{s.t. (11) - (13)} \\ & -1 + \alpha(t) + \beta(t) - \delta(t); \beta(t) \geq 0; \delta(t) \geq 0 \\ & \lambda[\bar{P}_{PV}(t) + \beta(t)\hat{P}_{PV,\min}(t) - \delta(t)\hat{P}_{PV,\max}(t)] \leq \quad (21) \\ & \min[P_{SB}^{\max}, (C_{SB}(t-1) - C_{SB}^{\min} - D_{SB}Q_{SB})\eta_{dis}] + \\ & P_{grid}^{\max} - (1 + \lambda)(P_{grid}(t) + P_{SB}^{\max}) \end{aligned}$$

分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化模型结构示意图如图 1。图中表示了模型建立所需要的输入输出信息以及系统的能量流动情况。

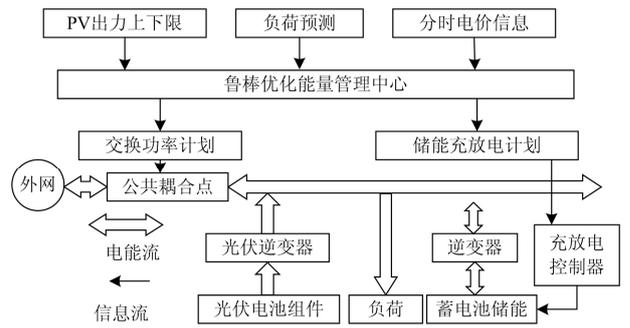


图 1 分布式家庭并网光伏系统鲁棒优化模型结构示意图  
Fig. 1 A schematic diagram of robust optimization model of distributed home grid connected PV system

在实际运行中, 不论是传统确定性模型, 还是本文鲁棒优化模型, 求解得到的光储系统运行方案必然存在功率不平衡现象。针对这些不平衡功率, 采取公共耦合点来进行平抑, 平抑所需的功率计入综合运行成本。不平衡功率平抑成本采用式(22)来计算。

$$\Delta C = \sum_{t=1}^T P_{grid}(t) \Delta P(t) \quad (22)$$

式中:  $\Delta C$  为光储系统一天不平衡功率平抑成本;  $\Delta P(t)$  为  $t$  时段光储系统在既定运行方案下的不平衡功率。

因此, 一套有效的能量优化调度方法之所以能够具备较好的经济性, 是因为制定了合理的预先运行计划, 从而最小程度上避免不够经济的不平衡功率平抑成本。

## 4 模型求解流程

### 4.1 改进萤火虫算法原理

萤火虫算法(Firefly Algorithm, FA)是受到萤火虫发光行为启发而提出的一种智能算法<sup>[19-20]</sup>。在 FA 算法中, 每个萤火虫个体的位置信息代表着解空间内的某一种优化方案, 通过引入运行公式在每一代

迭代中改变每个个体的位置信息, 最后得到寻优结果。当第  $j$  个萤火虫(亮度较弱)在第  $i$  个萤火虫的感知范围内时, 其运动在数学上表述为式(23)。

$$X_j(t+1) = X_j(t) + \beta_{(0)} \times \exp(-\gamma r^m) \times (X_i(t) - X_j(t)) + u_j \quad (23)$$

$$u_j = \alpha(\text{rand} - 0.5) \quad (24)$$

式中:  $X_j(t+1)$  和  $X_j(t)$  分别为第  $t$  时段和第  $t+1$  时段中第  $j$  个萤火虫的位置向量;  $X_i(t)$  为第  $t$  时段第  $j$  个萤火虫感知范围内最亮的萤火虫的位置向量;  $\beta_{(0)}$  为两个萤火虫距离为零时的吸引力, 当距离不为零时吸引力随着距离呈现指数递减;  $r$  为萤火虫之间的距离;  $\gamma$  为光强系数, 为一常数;  $m$  为萤火虫的数量;  $\alpha$  为  $[0, 1]$  之间的随机参数;  $u_j$  为随机搜索量, 其幅度由  $\alpha$  来调节。

传统 FA 算法仍然存在收敛速度慢和求解精度低等缺点, 因此引入局部范围的混沌搜索, 可以充分发掘每个个体此时的搜索能力<sup>[21]</sup>。在周围没有萤火虫, 或周围萤火虫没有亮度时, 第  $j$  个萤火虫在其感知范围内进行混沌搜索, 搜索过程如式(25)、式(26)所示, 式中采用 Logistic 映射作为混沌运动公式。

$$\chi_{u+1} = 4\chi_u(1 - \chi_u) \quad \chi_u \in (0, 1) \quad (25)$$

$$\chi_0 = \text{rand}(\cdot) \quad \chi_0 \notin \{0.25, 0.5, 0.75\} \quad (26)$$

式中:  $\chi_{u+1}$  和  $\chi_u$  分别表示第  $u+1$  次和第  $u$  次迭代时的混沌变量值;  $\chi_0$  表示混沌变量的初始值。

#### 4.2 模型求解流程

本文采用改进后的 FA 算法对所建立的模型进行求解。求解流程如下:

1) 设定萤火虫种群规模, 种群参数, 包括萤火虫数量, 光强系数, 最大吸引力, 算法迭代次数以及混沌搜索代数。

2) 在控制变量范围内, 随机初始化每个萤火虫的位置。每个萤火虫的位置信息对应一种光伏调度计划。

3) 更新每个萤火虫的亮度, 该亮度由每个萤火虫对应调度方案下系统的运行成本决定, 系统成本越小, 亮度越高。

4) 针对每个萤火虫个体, 选择其感知范围内亮度最高的萤火虫个体, 计算两者之间的距离和吸引力, 并且采用式(23)、式(24)更新该萤火虫个体的位置; 若该萤火虫个体感知范围内自身就是亮度最高的, 采取式(25)、式(26)对其进行混沌搜索。

5) 判断算法求解结果是否收敛到设定的精度, 或者迭代次数是否已经达到设定迭代次数, 如果是

则输出结果, 算法结束; 否则返回步骤(3)。

## 5 算例

本文以图 1 所示的某一个典型分布式家庭并网光伏系统为例, 对所提出的模型进行验证。

调度时段  $\Delta t$  为 15 min, 模型的调度周期选取为一天。分布式光伏组件在标准光照测试下的额定发电功率为 15 kW, 系统中蓄电池储能容量  $Q_{SB}$  为 40 kWh, 储能自放电系数  $D_{SB}$  为 0.1, 充放电效率  $\eta_{ch}$  和  $\eta_{dis}$  均为 0.9, 储能电量上下限取为  $0.1 Q_{SB}$  和  $0.9 Q_{SB}$ 。萤火虫数量  $m=80$ ; 光强系数  $\gamma=1.0$ ; 最大吸引力  $\beta_0=1.0$ ; 最大迭代次数  $I=250$  次, 混沌搜索次数为 30 代。

为充分利用光伏电能, 采取 MPPT 控制策略。算例中所做的能量优化调度的核心是制定储能充放电策略, 在既定的负荷水平和储能充放电功率下, 针对光伏出力不确定性引起的功率偏差, 采取公共耦合点进行平衡调节。为了在光伏发电功率充足时提高光储系统效益, 允许系统向外网售电。其中, 外网分时电价水平曲线如图 2 所示, 而分布式光储系统的光伏出力的分布区间如图 3 所示。

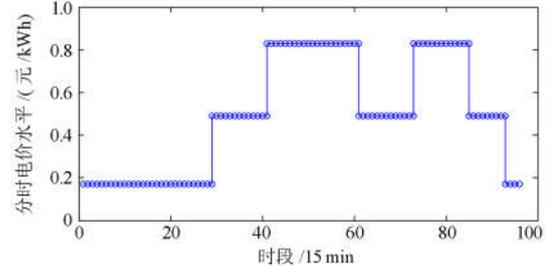


图 2 外网分时电价水平

Fig. 2 TOU power price level of the grid

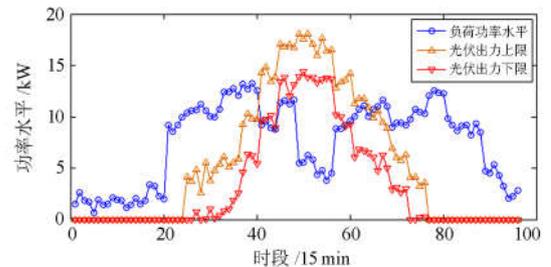


图 3 分布式光储系统光伏出力的分布区间

Fig. 3 Distribution range of photovoltaic output in distributed optical storage system

图中, 光伏的实际出力点可以位于出力上限曲线和出力下限曲线之间的任何点, 在最坏的情况下,

光伏出力将不断在出力上限曲线和下限曲线之间来回跳动, 这时光伏出力的波动性最大, 对能量优化调度的经济型影响也最大。首先随机模拟出符合光伏出力区间内的一条实际光伏出力曲线进行优化。

为了验证本文方法的有效性, 也对完全相通条件下传统的不考虑不确定性的分布式光伏系统能量优化调度模型进行求解, 得到如图4所示的能量优化调度方案。采用本文模型求解得到的能量优化调度方案如图5所示。

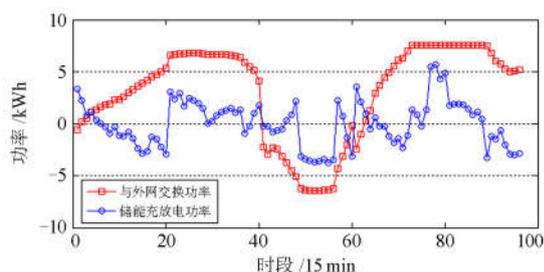


图4 传统优化调度下分布式光伏系统能量运行方案

Fig. 4 Energy operation scheme of distributed photovoltaic system under traditional optimal scheduling

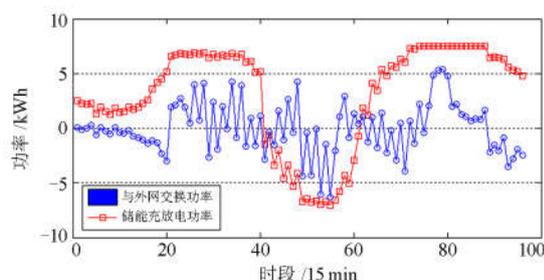


图5 鲁棒优化调度下分布式光伏系统能量运行方案

Fig. 5 Energy operation scheme of distributed photovoltaic system under robust optimal scheduling

事实上, 在上述典型情景下, 传统确定性模型下分布式家庭并网光储系统一天运行成本为17.67元, 鲁棒优化模型下一天运行成本为19.23元, 要高于传统确定性模型下的成本。然而, 如果在光伏出力区间内模拟100次形态各异的光伏实际出力曲线, 然后分别再采用两种模型下的系统能量优化调度方案, 可以得到运行成本散点分布图如图6所示, 同时得到如表1所示的各项运行指标分析。表中采用标准离差率(Coefficient of Variance, C.V)来衡量两种决策下的风险<sup>[22]</sup>。

由表1所示的情况说明, 尽管传统确定性优化下系统的期望运行成本小于鲁棒优化下的, 但是鲁棒优化能够将系统运行成本保证在一定范围以内, 即

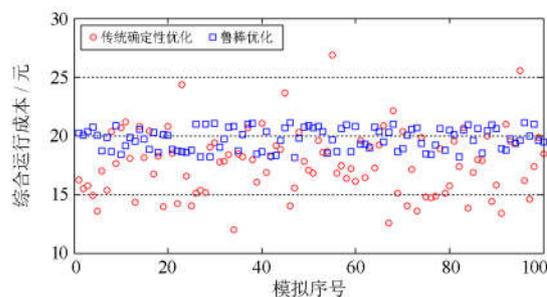


图6 两种模型下的系统运行成本散点分布图

Fig. 6 Scatter plot of system running cost under two models

表1 传统确定性模型下和鲁棒优化模型下运行指标对比

Table 1 Comparison of system operation indexes under traditional deterministic model and robust optimization model

运行指标	传统确定性优化	鲁棒优化
平均运行成本/元	17.67	19.23
最大运行成本/元	26.89	21.12
最小运行成本/元	11.99	18.14
标准离差率	0.285 7	0.112 6

使光伏出力不确定性是最不利的情况下也是。在部分情况下, 系统运行成本会较正常情况下高出很多, 这点对于风险厌恶者来说特别需要避免。本文模型下制定的系统运行方案具备较好的鲁棒性, 对于系统运行决策者具有较好的参考价值。

两种情况下蓄电池储能一天剩余电量曲线比较如图7所示。

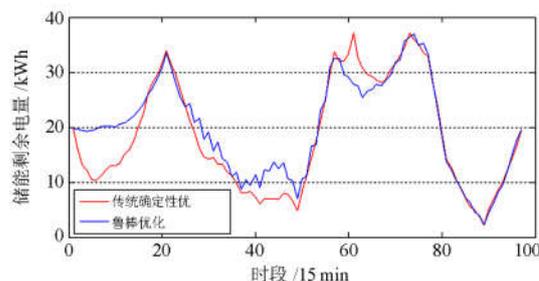


图7 两种模型下蓄电池储能一天剩余电量曲线

Fig. 7 Residual energy curve of storage battery energy storage in a day

由图7可见, 储能充放电行为在两种模型下的区别主要体现在光伏出力时段, 在这些时段中, 光伏出力由于具有随机性、间歇性和波动性, 因此鲁棒优化模型中需要制定不同的储能充放电方案来提升方案的鲁棒性。此外, 在鲁棒优化下, 系统储能水平整体上大于确定模型下, 这是因为系统需要通过保持较高的储能电量水平来确保有相对足够的电量来代替公共耦合点来进行不平衡功率平抑, 从而

提高系统可靠性。

为了验证本文改进萤火虫算法的效果,分别针对传统确定性优化模型和本文鲁棒优化模型,采用传统粒子群算法、传统萤火虫算法以及本文改进萤火虫算法进行求解,得到以下指标对照表如表2所示。其中,粒子群算法的参数配置中,粒子数目为80,最大迭代次数为200代,两个学习因子均为2,惯性权重为0.5。由表可见,改进萤火虫算法在寻优效果以及求解效率上均是三者中最好的。

表2 3种算法求解所得平均运行成本以及运行时间

Table 2 Average running cost and running time by three algorithms

算法	确定性模型下	鲁棒优化模型	平均运算 时间/s
	运行成本/元	下运行成本/元	
粒子群算法	17.37	19.04	25.4
传统萤火虫算法	17.44	19.12	14.3
改进萤火虫算法	17.67	19.23	12.7

## 6 结论与展望

本文针对分布式家庭并网光储系统的能量优化调度问题,计及光伏出力不确定性采用鲁棒优化方法建立模型。针对传统萤火虫算法中局部最优个体寻优资源的浪费现象,对其引入混沌搜索进行改进,采用改进萤火虫算法对所建立的模型进行求解。仿真结果表明,所建立的模型能够使得运行方案在应对实际中各种光伏出力曲线具备较好的鲁棒性,通过牺牲一定的经济性来降低了系统运行成本的风险,提高了系统运行可靠性,对于系统运行决策者具备较好的参考价值。

### 参考文献

- [1] VILLALVA M G, GAZOLI J R, FILHO E R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1198-1208.
- [2] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14. DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. Scale photovoltaic power generation on power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [3] 李升, 姜程程, 赵之瑜, 等. 分布式光伏电站接入低压配电网系统暂态电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 67-72. LI Sheng, JIANG Chengcheng, ZHAO Zhiyu, et al. Study of transient voltage stability for distributed photovoltaic power plant integration into low voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 67-72.
- [4] 陈力, 胡钊, 卫敬宜, 等. 一种新的光伏并网评价体系[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 105-110. CHEN Li, HU Po, WEI Jingyi, et al. A new evaluation system of grid-integrated PV generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 105-110.
- [5] 韩学栋, 王海华, 李剑锋. 小型分布式光伏发电系统设计[J]. 电力建设, 2014, 35(1): 104-108. HAN Xuedong, WANG Haihua, LI Jianfeng. Design of small distributed photovoltaic generation system[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(1): 104-108.
- [6] 马霖, 张世荣. 分时电价/阶梯电价下家庭并网光伏发电系统运行优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 819-824. MA Lin, ZHANG Shirong. Optimal operation scheduling of family grid-connected photovoltaic systems under time-of-use and ladder tariffs[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 819-824.
- [7] SHIMADA T, KUROKAWA K, SHIMADA T, et al. Grid-connected photovoltaic systems with battery storages control based on insolation forecasting using weather forecast[C] // Renewable Energy Proceedings. International Solar Energy Society (ISES), 2006, Chiba, Japan: 228-230.
- [8] 黎永华. 结合储能的并网光伏发电对电网的调峰作用分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [9] OKA Y, YOKOYAMA A. Optimal operation scheduling and economical evaluation method of battery energy storage system in power system with a large penetration of photovoltaic generation[C] // Power Tech, 2013 IEEE Grenoble, June 16-20, 2013, Grenoble, France: 1-6.
- [10] 金卓勃, 向铁元, 陈红坤, 等. 考虑电能质量问题的分布式光伏发电接入规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 1-8. JIN Zhuoqing, XIANG Tiejuan, CHEN Hongkun, et al. Planning method of distributed photovoltaic power generation considering power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 1-8.
- [11] 邵汉桥, 张籍, 张维. 分布式光伏发电经济性及政策分析[J]. 电力建设, 2014, 35(7): 51-57. SHAO Hanqiao, ZHANG Ji, ZHANG Wei. Economy and policy analysis of distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(7): 51-57.
- [12] 张世达, 孙永辉, 卫志农, 等. 考虑可控光伏系统概率模型的主动配电网日前优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 247-257. ZHANG Shida, SUN Yonghui, WEI Zhinong, et al.

- Day-ahead optimal scheduling for active distribution network considering controllable photovoltaic system via probability model[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(1): 247-257.
- [13] 杨永标, 于建成, 李奕杰, 等. 含光伏和蓄能的冷热电联供系统调峰调蓄优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(6): 6-12, 29.  
YANG Yongbiao, YU Jiancheng, LI Yijie, et al. optimal load leveling dispatch of CCHP incorporating photovoltaic and storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(6): 6-12, 29.
- [14] BEYER H G, SEND H B. Robust optimization comprehensive survey[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2007, 196(33-34): 3190-3218.
- [15] 梅生伟, 郭文涛, 王莹莹, 等. 一类电力系统鲁棒优化问题的博弈模型及应用实例[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(19): 47-56.  
MEI Shengwei, GUO Wentao, WANG Yingying, et al. A game model for robust optimization of power systems and its application[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(19): 47-56.
- [16] KARAKI S H, CHEDID R B, RAMADAN R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, 14(2): 766-772.
- [17] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(34): 83-89.  
HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(34): 83-89.
- [18] 江知瀚, 陈金富. 计及不确定性和多投资主体需求指标的分布式电源优化配置方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(31): 34-42.  
JIANG Zhihan, CHEN Jinfu. Optimal distributed generator allocation method considering uncertainties and requirements of different investment entities[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(31): 34-42.
- [19] 胡博, 王昕, 郑益慧, 等. 基于萤火虫优化算法的分布式发电设备容量分配及配电网孤岛划分[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(13): 21-26.  
HU Bo, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Calculation of isolated island partition and distributed generator capacity based on firefly algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(13): 21-26.
- [20] HERBADJI O, NADHIR K, SLIMANI L, et al. Optimal power flow with emission controlled using firefly algorithm[C] // 2013 5th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), April 28-30, 2013, Hammamet, Tunisia: 1-6.
- [21] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 基于混沌粒子群优化方法的电力系统无功最优潮流[J]. *电力系统自动化*, 2005, 29(7): 53-57.  
LIU Zifa, GE Shaoyun, YU Yixin. Optimal reactive power dispatch using chaotic particle swarm optimization algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(7): 53-57.
- [22] 潘智俊, 张焰. 城市电网结构坚强性评价的指标体系和方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(16): 3999-4005.  
PAN Zhijun, ZHANG Yan. Index system and method for structure strength assessment of urban power network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(16): 3999-4005.

收稿日期: 2018-02-13; 修回日期: 2018-10-10

作者简介:

戴璐平(1976—), 男, 通信作者, 学士, 工程师, 研究方向为新能源并网发电和电力市场; E-mail: 3428447073@qq.com

吴薇(1970—), 女, 学士, 工程师, 研究方向为电网规划和运行;

黄蓓雯(1982—), 女, 学士, 工程师, 研究方向为分布式光伏发电和微电网技术。

(编辑 葛艳娜)