

# 基于长时间尺度的园区综合能源系统随机规划

赵瑾<sup>1</sup>, 雍静<sup>1</sup>, 郇嘉嘉<sup>2</sup>, 余梦泽<sup>3</sup>, 王晓静<sup>1</sup>, 曾诚玉<sup>4</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 广东电网发展研究院有限责任公司, 广东 广州 510080;

3. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东 广州 510080;

4. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**针对已有的综合能源系统规划模型不能很好地评价能源设备全生命周期的利用率,采用设备的年利用小时数作为衡量设备全寿命周期利用率的指标,同时为避免规划中短时间尺度负荷预测误差太大的问题,提出一种计及风、光、荷不确定性的园区综合能源系统长时间尺度规划方法。建立风机、光伏年利用小时数的随机模型以及冷、热、电负荷年需求量的随机分布模型,以计及储能效益的综合能源系统年投资运行费用最小为目标,建立含电储、热储、热电联供等多种能源设备的园区综合能源系统随机规划模型,并探讨了不同置信度水平下的配置结果。同时,结果验证了所提的基于长时间尺度的区域综合能源系统随机规划模型在解决园区综合能源系统容量配置问题时的有效性。

**关键词:**园区综合能源系统;设备利用率;年利用小时数;长时间尺度;容量配置;随机规划

**中图分类号:**TM 715;TK 01

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202003008

## 0 引言

综合能源系统(IES)是指在规划、建设和运行等阶段,通过对能源的生产、传输、分配、转化、存储、消费等环节进行有机协同优化后,形成的多种能源产供销一体化系统<sup>[1]</sup>。

在设备构成方面,综合能源系统不仅包括以现代电力系统为主的能源输配系统,还包括一定规模的可再生能源发电、各类能源转化设备等。目前,已有诸多学者考虑了能源系统全生命周期的经济性、可靠性、可再生能源利用率、环境效益等因素<sup>[2-5]</sup>,并进一步考虑了热泵、储能装置、需求响应等<sup>[6-9]</sup>的工作特性,对综合能源系统设备优化配置进行了研究。文献[4]针对风机、变压器、热电联产、燃气锅炉、电储能、热储能等设备组成的能量枢纽,建立了一种新型的综合能源系统容量协同优化配置的混合整数线性规划模型,引入了失负荷期望等可靠性指标作为约束;文献[5]提出了包含储电和储热系统的额定功率、容量的配置方法,其中储电系统模型计及了供暖期与非供暖期蓄电池寿命的估算;文献[6]提出了一种通过解析法确定燃气三联供和热泵最佳匹配容量的方法;文献[7]研究了蓄冷、储热、储电和混合储能能在多能互补协同运行情况下的盈利策略,讨论了系统配置不同储能的经济性和可行性,建立了全寿命

周期的冷、热、电储能调度规划双层优化模型;文献[8]基于含有微泵储能系统的海岛储能系统,并考虑孤岛微电网的需求响应,提出了一种容量配置优化模型。

在系统规模方面,综合能源系统按照供能范围可划分为用户级综合能源系统、区域级综合能源系统以及跨区级综合能源系统。在区域综合能源系统中,能源受端存在特性各异且随机变动的不同负荷,能源输入端又存在大量风能、太阳能等间歇性能源,在规划过程中需综合考虑这些广泛存在的不确定性所造成的影响。文献[9]提出了考虑风能和太阳能不确定性的综合能源系统容量配置问题的区间优化模型,该模型将代表可再生资源的确定变量处理为区间数。文献[10]考虑了可再生能源出力的不确定性给优化配置带来的影响,并建立了考虑用户满意度的交直流混合微电网需求响应模型,有效提升了微电网应对可再生能源发电不确定性的能力,降低了其经济成本。文献[11]通过研究独立风-光-燃料电池微电网的容量配置优化问题,提出了一种基于条件风险值的随机优化模型,考虑了风能和太阳能资源的不确定性对微电网运行风险的影响。

上述文献在考虑系统的运行情况时从短时间尺度(小时、日)角度出发对系统的运行情况进行预测模拟,但由于规划的目标一般为长期性的(如年等值投资运行成本、年碳排放量等),从长时间尺度(年)预测短时间尺度(小时、日)风光出力及负荷需求,不确定因素多而复杂,存在很大预测误差,因而模拟的系统日运行情况往往与实际情况也相差较大。另外,能否充分利用能源设备直接关系到投资效益,但

收稿日期:2019-07-12;修回日期:2020-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777021);中国南方电网公司科技项目(GD-KJQQ-20161202)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777021) and the Science and Technology Project of China Southern Power Grid(GD-KJQQ-20161202)

在上述的规划方法中,难以衡量能源设备全生命周期的利用率。为解决上述问题,本文提出一种计及风、光、荷不确定性的园区综合能源系统长时间尺度规划方法,建立风机、光伏年利用小时数的随机模型以及冷、热、电负荷年需求量的随机分布模型,采用设备的年利用小时数作为衡量设备全生命周期利用率的指标,以计及储能效益的综合能源系统年投资运行费用最小为目标,建立园区综合能源系统容量优化配置随机规划模型,并探讨了不同置信度水平下的配置结果。

## 1 风、光、荷随机分布模型

### 1.1 风机的年利用小时数

风机的发电量主要与风机的装机容量和风速有关。双参数威布尔分布曲线由于其形式简单,且能较好地拟合风速的分布情况,已广泛应用于风能评价领域<sup>[12-13]</sup>。根据风机出力与风速之间的关系(式(1))和风机年发电量与年利用小时数之间的关系(式(2)),假设该园区风机装机容量不变,则风机年利用小时数也可用威布尔分布拟合,且概率密度函数可表示为式(3)。

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & v(t) < v_{ci}, v(t) > v_{co} \\ \frac{v^3(t) - v_{ci}^3}{v_N^3 - v_{co}^3} N_{WT} & v_{ci} \leq v(t) < v_N \\ N_{WT} & v_N < v(t) \leq v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{WT} = h_{WT} N_{WT} \quad (2)$$

$$f_{WT}(h_{WT}) = \frac{k}{c} \left( \frac{h_{WT}}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{h_{WT}}{c} \right)^k \right] \quad (3)$$

其中, $P_{WT}(t)$ 为 $t$ 时刻风机输出功率; $v(t)$ 为 $t$ 时刻风速; $v_{ci}$ 、 $v_{co}$ 、 $v_N$ 分别为风机的切入、切出、额定风速; $N_{WT}$ 为风机额定发电容量; $E_{WT}$ 为风机的年发电量; $h_{WT}$ 为风机的年利用小时数; $c$ 、 $k$ 分别为威布尔分布的比例参数和形状参数。

### 1.2 光伏的年利用小时数

大量的统计数据表明在白天光照强度符合贝塔分布<sup>[14]</sup>,同理根据光照强度与光伏发电出力之间的关系(式(4))以及年光伏发电量与光伏年利用小时数的关系(式(5)),假设该园区光伏装机容量不变,可以得到光伏年利用小时数的概率密度函数如式(6)所示。

$$P_{PV}(t) = \eta_{IPCE} S G(t) \quad (4)$$

$$E_{PV} = h_{PV} N_{PV} \quad (5)$$

$$f_{PV}(h_{PV}) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left( \frac{h_{PV}}{8760} \right)^{\alpha-1} \left( 1 - \frac{h_{PV}}{8760} \right)^{\beta-1} \quad (6)$$

其中, $P_{PV}(t)$ 为 $t$ 时刻光伏的输出功率; $\eta_{IPCE}$ 为光电转

化效率; $S$ 为光伏阵列有效发电面积; $G(t)$ 为 $t$ 时刻太阳光辐射强度; $E_{PV}$ 为光伏的年发电量; $h_{PV}$ 为光伏的年利用小时数; $N_{PV}$ 为光伏的额定发电容量; $\alpha$ 、 $\beta$ 为贝塔分布的参数; $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数。

### 1.3 冷、热、电负荷年用能需求量

一般认为冷、热、电负荷服从正态分布<sup>[15-16]</sup>,相应地,可将冷、热、电负荷年需求量也视为服从正态分布。其概率密度函数为:

$$f_j(E_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp \left( - \frac{E_j - E_{ave,j}}{2\sigma_j^2} \right) \quad (7)$$

其中, $E_j$ 为能量 $j$ (本文中的能量特指冷、热、电3种形式的能量)的年需求量; $E_{ave,j}$ 、 $\sigma_j$ 分别为能量 $j$ 年需求量的期望值与标准差。

## 2 园区综合能源系统随机规划模型

### 2.1 变量设定

(1)随机变量:由第1节可知随机变量包括风机、光伏的年利用小时数及冷、热、电负荷的年需求量。

(2)决策变量:主要含以下三部分,一是各能源设备是否投建的0-1状态变量,取值为1时表示投建,取值为0时表示不投建(本文公式涉及的设备皆默认为投建设备);二是各能源设备的投建容量(假设设备容量可连续变化,且储能设备的容量特指功率容量);三是各能源设备的年利用小时数。

### 2.2 目标函数

本文以计及储能效益的系统整体年投资运行成本 $C_{UAV}$ 最小为目标函数, $C_{UAV}$ 包含设备投资年化成本、系统年运行成本、系统设备年化残值。在综合能源系统中,储能的主要作用是在时间尺度上转移能量,即在用能低谷期存储能量,在用能高峰期将所储能量释放。为鼓励储能的这一作用,式(10)中加入惩罚项 $-(\omega_{ES}E_{ES} + \omega_{HS}E_{HS})$ 。

$$\min C_{UAV} = \sum_{i=1}^M C_{1,i} \frac{r_i(1+r_i)^{Y_i}}{(1+r_i)^{Y_i} - 1} + C_2 - \sum_{i=1}^M C_{3,i} \frac{r_i}{(1+r_i)^{Y_i} - 1} \quad (8)$$

$$C_{1,i} = N_{i,j} c_{inv,i} \quad (9)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^M c_{om,i} h_i N_{i,j} + \sum_{j \in J} (c_{b,j} E_{b,j} - c_{s,j} E_{s,j}) + c_{gas} V_{gas} - (\omega_{ES} E_{ES} + \omega_{HS} E_{HS}) \quad (10)$$

$$C_{3,i} = \sigma_i C_{1,i} \quad (11)$$

其中, $M$ 为选择的能源设备总数; $J$ 为冷、热、电3种形式能量的集合; $C_{1,i}$ 为设备 $i$ 的初始投资成本; $C_2$ 为系统的年运行成本; $C_{3,i}$ 为设备 $i$ 的残值; $r_i$ 为设备 $i$ 的

贴现率;  $Y_i$  为设备  $i$  的使用寿命;  $N_{i,j}$  为设备  $i$  输出能量  $j$  的容量(式(8)中表示设备的主要输出能量形式的容量,如热电联供(CHP)的主要输出能量形式为电);  $c_{inv,i}$  为设备  $i$  的单位投建成本;  $c_{om,i}$  为设备  $i$  的运行维护系数;  $h_i$  为设备  $i$  的年利用小时数;  $c_{b,j}$ 、 $c_{s,j}$  分别为设备  $i$  的购、售能价格;  $E_{b,j}$ 、 $E_{s,j}$  分别为设备  $i$  向上级能源网的年购、售能量  $j$ ;  $c_{gas}$  为天然气价格;  $V_{gas}$  为天然气的年消耗体积;  $\omega_{ES}$ 、 $\omega_{HS}$  和  $E_{ES}$ 、 $E_{HS}$  分别为电储、热储的惩罚系数和蓄能量;  $\sigma_i$  为设备  $i$  的回收残值率。

### 2.3 模型约束

(1) 计及备用的能量约束。

$$\sum_{i=1}^M (h_i N_{i,j} - h_i N_{i,j} / \eta_{i,j-1}) \geq (1 + \lambda) E_j \quad (12)$$

其中,  $N_{i,j}$  为设备  $i$  输出非能量  $j$  的容量;  $\eta_{i,j-1}$  为能量  $j$  与非能量  $j$  之间的转换系数;  $\lambda$  为能量  $j$  年需求量的备用系数。

(2) 设备容量约束。

$$N_{i,j,\min} \leq N_{i,j} \leq N_{i,j,\max} \quad (13)$$

其中,  $N_{i,j,\min}$ 、 $N_{i,j,\max}$  分别为设备  $i$  输出能量  $j$  的最小、最大功率,一般由系统的最大、最小负荷决定。

同时,需保证系统在最不利情况(可再生能源未出力,储能设备蓄能量为0,负荷需求最大)下,生产能量  $j$  的能力需大于等于系统消纳能量  $j$  的能力,即:

$$\sum_{i \in \{PV, WT\}} N_{i,j} \geq \sum_{i=1}^M N_{i,j} / \eta_{i,j-1} + (1 + \lambda) L_{\max,j} \quad (14)$$

其中,  $L_{\max,j}$  为能量  $j$  负荷最大值。

(3) 设备利用率约束。

设备利用率约束,即设备年利用小时数约束:

$$h_{i,\min} \leq h_i \leq h_{i,\max} \quad (15)$$

其中,  $h_{i,\min}$ 、 $h_{i,\max}$  分别为投资者期望设备  $i$  的最小、最大年利用小时数。

特别地,针对电储能设备,考虑到频繁充放电对其寿命的影响,本文设定每天满充放循环次数不超过2次,满充、满放时间按2h计算,即年单充/单放利用小时数不超过1460h。设定蓄热设备每天循环放热次数不超过3次,满充、满放时间按2h计算,即年单充/单放利用小时数不超过2190h。且储能设备的单充、单放利用小时数满足:

$$h_{ch,j} N_{ch,j} \eta_{ch,j} = \frac{h_{dis,j} N_{dis,j}}{\eta_{dis,j}} \quad (16)$$

其中,  $h_{ch,j}$ 、 $h_{dis,j}$  分别为能量  $j$  的储能设备的单充、单放利用小时数;  $N_{ch,j}$ 、 $N_{dis,j}$  分别为能量  $j$  的储能设备的最大充、放功率;  $\eta_{ch,j}$ 、 $\eta_{dis,j}$  分别为能量  $j$  的储能设备的充、放效率系数。

系统与上级能源网的交互有购能、售能2种模式,则2种模式下的购售能利用小时数之和需小于

等于8760h。

(4) 设备工作特性约束

设备的工作特性即设备的能量形式转化。CHP、燃气锅炉、电热泵、电制冷机、溴化锂制冷机等能源转化设备都可表示为:

$$E_{i,1,j} = \eta_i E_{i,j} \quad (17)$$

式(17)可理解为:设备  $i$  可以将  $E_{i,j}$  大小的能量  $j$  转化成  $E_{i,1,j}$  大小的非能量  $j$ ,两者之间的转化效率为  $\eta_i$ 。

### 2.4 园区综合能源系统配置优化机会约束模型

显然,上述模型的目标函数和约束条件中都存在随机变量,因此采用机会约束规划(CCP)处理模型的约束条件和目标函数中含有随机变量的数学问题,则上述模型可转化为:

$$\begin{cases} \min \bar{C}_{UAV} \\ \text{s.t.} \Pr\{C_{UAV} \leq \bar{C}_{UAV}\} \geq \theta \\ \Pr\left\{\sum_{i=1}^M (h_i N_{i,j} - h_i N_{i,j} / \eta_{i,j-1}) \geq (1 + \lambda) E_j\right\} \geq \rho_j \\ \text{式(11)---(15)} \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $\bar{C}_{UAV}$  为  $C_{UAV}$  在置信水平为  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq 1$ ) 时能取得的最小值;  $\Pr\{\}$  表示事件  $\{\}$  成立的概率;  $\rho_j$  为约束条件式(12)成立的置信水平,且  $0 \leq \rho_j \leq 1$ 。

## 3 模型求解

### 3.1 模型简化

式(12)针对电量,约束条件包含风光机组的年利用小时数、年用电量,比较复杂,而针对热量和冷量,约束条件只包含年热负荷需求量/年冷负荷需求量单个随机变量。为方便求解,可转化成相应的确定性等价类。

$$\sum_{i=1}^M (h_i N_{i,j} - h_i N_{i,j} / \eta_{i,j-1}) \geq (1 + \lambda) E_{\rho_j} \quad (19)$$

其中,  $E_{\rho_j}$  表示在置信水平为  $\rho_j$  时,存在一个值  $E_{\rho_j}$  使得满足式(20)。

$$\Pr\{E_{\rho_j} \geq E_j\} = \rho_j \quad (20)$$

$$E_{\rho_j} = \inf\{E_j | E_j = \Phi_j^{-1}(\rho_j)\} \quad (21)$$

其中,  $\Phi_j^{-1}(\rho_j)$  为能量  $j$  年需求量的概率分布函数的逆函数;  $\inf\{\}$  表示集合  $\{\}$  的下界。

### 3.2 模型求解方法

上述模型本质上为混合非线性随机规划问题,本文基于蒙特卡洛模拟的方法,在MATLAB平台上采用YALMIP+KNITRO工具求解该随机约束模型。KNITRO是ZIENA开发的一种大规模非线性优化求解器,为具有二进制或整数变量的优化模型(线性和



需要通过 CHP 机组或上级电网来满足,从而使其达到更高的设备利用率。

5种场景下综合能源系统的年投建运行成本如图2所示。可见随着置信度的增加,系统的年运行成本呈增加趋势(置信度取0.95时,综合能源系统的年运行成本为662.38万元,小于置信度取0.9时综合能源系统的年运行成本792.66万元,这是由于选择了蓄电池,电储能效益对年运行成本的影响较大),原因是置信度越高,系统需满足的负荷水平值越高,系统的产能量提高,从而运行成本上升。相反,系统投建成本呈下降趋势(置信度取0.95时,综合能源系统的年投建成本为453.41万元,高于置信度取0.9时综合能源系统的年运行成本400.57万元,而这高出的52.84万元正是蓄电池的年投建成本)。当不考虑蓄电池和蓄热罐的投建成本且置信度取0.85~1时,系统投建成本相对稳定。

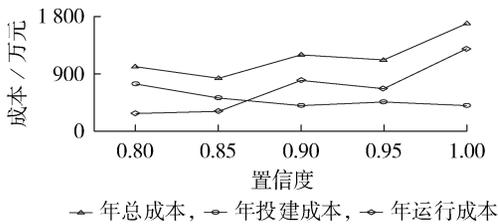


图2 不同置信度水平下综合能源系统的年投建运行成本

Fig.2 Annual investment and operation cost of IES under different confidence levels

## 5 结论

为解决园区综合能源系统规划中短时间尺度负荷预测误差过大的问题并且很好地约束能源设备全生命周期的利用率,本文提出了一种计及风、光、荷不确定性的长时间尺度的园区综合能源系统随机规划模型。该模型采用设备年利用小时数作为设备整体利用率的约束,可在一定程度上保证综合能源系统的能源设备全生命周期的利用率在投资者的可接受范围内,同时该模型具有较高的鲁棒性,为风、光、荷不确定性环境下园区综合能源系统优化配置的理论提供了新的思路和方法。下一步工作可进一步地深入研究考虑在分时电价的市场背景下,不同时段购售电价的变化对系统能源设备优化配置的影响。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

[1] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. 电工技术学报,2016,31(1):1-13.  
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13.

[2] NACER T, NADJEMI O, HAMIDAT A. Optimal sizing method

for grid connected renewable energy system under Algerian climate[C]//Renewable Energy Congress. Sousse, Tunisia: IEEE, 2015: 1-5.

[3] 刘梦璇,王成山,郭力,等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(17):34-39.  
LIU Mengxuan, WANG Chengshan, GUO Li, et al. An optimal design method of multi-objective based island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 34-39.

[4] 罗艳红,梁佳丽,杨东升,等. 计及可靠性的电-气-热能量枢纽配置与运行优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(2):47-53.  
LUO Yanhong, LIANG Jiali, YANG Dongsheng, et al. Configuration and operation optimization of electricity-gas-heat energy hub considering reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 47-53.

[5] 崔明勇,王楚通,王玉翠,等. 独立模式下微网多能存储系统优化配置[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):30-54.  
CUI Mingyong, WANG Chutong, WANG Yucui, et al. Optimal configuration of multi-energy storage system in standalone microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 30-54.

[6] 何桂雄,黄子硕,闫华光,等. 燃气三联供-热泵容量优化匹配分析方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):25-29.  
HE Guixiong, HUANG Zishuo, YAN Huaguang, et al. Analytical method for capacity matching optimization of CCHP-HP[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 25-29.

[7] 熊文,刘育权,苏万煌,等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):118-126.  
XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanghuang, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 118-126.

[8] HU R X, HE X Y, JING Z X, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/solar/pumped storage considering demand response[C]//Conference on Innovative Smart Grid Technologies-Asia. Bangkok, Thailand: IEEE, 2015: 1-6.

[9] 张有兵,任帅杰,杨晓东,等. 考虑价格型需求响应的独立型微电网优化配置[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):55-62.  
ZHANG Youbing, REN Shuaijie, YANG Xiaodong, et al. Optimal configuration considering price-based demand response for stand-alone microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 55-62.

[10] 赵波,汪湘晋,张雪松,等. 考虑需求侧响应及不确定性的微电网双层优化配置方法[J]. 电工技术学报,2018,33(14):3284-3295.  
ZHAO Bo, WANG Xiangjin, ZHANG Xuesong, et al. Two-layer method of microgrid optimal sizing considering demand-side response and uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3284-3295.

[11] LI K P, ZHANG J J, CHE J F, et al. Capacity configuration optimization for stand-alone microgrid considering the uncertainties of wind and solar resource[C]//Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference. Washington, USA: IEEE, 2018: 1-5.

[12] AZAD A K, RASUL M G, ISLAM R, et al. Analysis of wind energy prospect for power generation by three Weibull distribution methods[J]. Energy Procedia, 2015, 75: 722-727.

[13] NAYAK A K, MOHANTY K B. Adequacy assessment of wind energy conversion system through simulating wind speed using Weibull distribution[C]//National Power Electronics Conference. Pune, India: IEEE, 2017: 102-105.

[14] TRASHCHENKOV S, ASTAPOV V. The applicability of zero inflated beta distributions for stochastic modeling of PV plants' power output[C]//International Scientific Conference

on Electric Power Engineering. Brno, Czech:IEEE,2018:1-6.

- [15] AHMAD A, AZMIRA I, AHMAD S, et al. Statistical distributions of load profiling data[C]//Power Engineering & Optimization Conference. Melaka, Malaysia:IEEE,2012:199-203.
- [16] 盛四清,张立. 考虑风光荷预测误差的电力系统经济优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(9):80-85.  
SHANG Siqing,ZHANG Li. Economic dispatch of power system considering the prediction error of wind power, solar energy and load[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2017,29(9):80-85.
- [17] KRONQVIST J, BERNAL D E, LUNDELL A, et al. A review and comparison of solvers for convex MINLP[J]. Optimization and Engineering,2019(20):255-397.

#### 作者简介:



赵瑾

赵瑾(1995—),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化运行(**E-mail**:well\_zhaojin@163.com);

雍静(1964—),女,重庆人,教授,博士,主要研究方向为供配电技术(**E-mail**:yongjing@cqu.edu.cn);

郇嘉嘉(1983—),女,山东青岛人,高级工程师,博士,主要研究方向为综合能源规划与运行(**E-mail**:winnie5983@126.com)。

(编辑 李玮)

## Stochastic planning of park-level integrated energy system based on long time-scale

ZHAO Jin<sup>1</sup>, YONG Jing<sup>1</sup>, HUAN Jiajia<sup>2</sup>, YU Mengze<sup>3</sup>, WANG Xiaojing<sup>1</sup>, ZENG Chengyu<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Guangdong Power Grid Development Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

3. Power System Planning Research Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;

4. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** As for the existing planning models of integrated energy system cannot well evaluate the full life cycle utilization rate of energy equipment, the annual utilization hours of equipment are adopted as the index of equipment utilization during its whole life circle, and a park-level integrated energy system planning method for a long time-scale considering uncertainties of wind power, solar energy and load is put forward to avoid the problem of large error for load prediction in short time-scale. The stochastic mathematical models are respectively built to describe annual utilization hours of wind turbine, photovoltaic and annual demands of cold, heat, electricity load. On this basis, the allocation capacities of park-level integrated energy system equipment including electric / heat storage, cogeneration and other energy devices are optimized, to minimize the annual investment operating cost containing energy storage revenue. Meanwhile, the results under different confidence levels are discussed, which verifies that the proposed stochastic planning model based on long time-scale is effective in solving the capacity allocation problem of park-level integrated energy system.

**Key words:** park-level integrated energy system; equipment utilization rate; annual utilization hours; long time-scale; capacity allocation; stochastic planning

## 附 录

表 A1 风电、光伏年利用小时数分布参数

**Table A1 Distribution parameters of annual utilization hours of wind turbine and photovoltaic**

风电		光伏	
$c$	$k$	$\alpha$	$\beta$
2360	6	9	50

表 A2 负荷分布参数

**Table A2 Distribution parameters of loads**

负荷	$E_{ave}$ /(万 kW·h)	$\sigma$ /(万 kW·h)	最大负荷/kW
电	1471.85	125.93	3645
热	248.96	15.44	3112
冷	1147.07	97.35	4680

表 A3 备选设备参数

**Table A3 Alternative equipment parameters**

设备	单位容量投建成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	效率	运维系数/[元·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	运行年限/a
风机	4500	—	0.019	20
光伏	10000	—	0.010	20
CHP	8350	气-电: 0.45 气-热: 1.35	0.085	20
蓄电池	2000	0.9	0.043	10
燃气锅炉	750	0.85	0.045	20
热泵	1920	4.0	0.020	20
蓄热罐	800	0.95	0.023	20
电制冷机	970	3.8	0.059	20
溴化锂冷机	1200	1.3	0.035	20