

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200876

# 考虑不确定性因素的综合能源系统协同规划研究

陈忠华<sup>1</sup>, 高振宇<sup>1</sup>, 陈嘉敏<sup>1</sup>, 吴娴萍<sup>2</sup>, 付学谦<sup>2</sup>, 陈贤卿<sup>3</sup>

(1. 杭州市电力设计院有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;  
3. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 为提高新能源高比例接入的综合能源系统能源配置效率, 对新能源不确定性建模和综合能源系统协同规划进行了深入研究。首先描述了风电出力和电动汽车充电负荷的不确定模型。然后提出一种基于随机模型的最大熵方法对风电出力和电动汽车充电负荷的边缘概率分布进行建模, 并采用主成分分析方法提取典型运行场景集; 考虑园区内供冷期、供暖期和过渡期三个场景建立综合能源系统协同规划模型, 并使用 YALMIP 工具求解。仿真算例结果表明, 所述方法能够在考虑不确定性因素的基础上得到经济效益更高的协同规划方案, 有效提高综合能源系统的经济性和灵活性。

**关键词:** 不确定性; 最大熵; 主成分分析; 协同规划; 综合能源系统

## Research on cooperative planning of an integrated energy system considering uncertainty

CHEN Zhonghua<sup>1</sup>, GAO Zhenyu<sup>1</sup>, CHEN Jiamin<sup>1</sup>, WU Xianping<sup>2</sup>, FU Xueqian<sup>2</sup>, CHEN Xianqing<sup>3</sup>

(1. Hangzhou Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;  
2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;  
3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In order to improve the energy allocation efficiency of a high proportion of new energy integrated energy systems, an in-depth study of new energy uncertainty modeling and integrated energy system cooperative planning is conducted. This paper first describes the uncertain models of wind power output and electric vehicle charging load. Then a maximum entropy method based on a stochastic model is proposed to model the marginal probability distribution, and the principal component analysis method is used to extract typical operating scenarios. Finally, it considers the three scenarios of cooling period, heating period and transition period in a park to establish an integrated energy system cooperative planning model and use YALMIP tools to solve it. The results of simulation examples show that the method can obtain a cooperative planning scheme with higher economic value considering the uncertainty factors, and effectively improve the economy and flexibility of the integrated energy system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007193) and the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (No. HZJTK09).

**Key words:** uncertainty; maximum entropy; principal component analysis; cooperative planning; integrated energy system

## 0 引言

《国家能源局关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见》提出联网型新能源微电网应重点建设“利用风、光、天然气、地热等可再生能源及

其他清洁能源的分布式能源站, 基于智能配电网的综合能量管理系统, 实现冷热电负荷的动态平衡及与大电网的灵活互动”<sup>[1]</sup>。现代综合能源系统中, 分布式能源(Distributed Generation, DG)和电动汽车(Electric Vehicle, EV)接入比例逐渐增加, 多能源相互作用愈发凸显<sup>[2]</sup>。然而, DG出力具有自然属性, 决定了其较强的随机性、波动性和不确定性<sup>[3]</sup>。电动汽车接入和离开电网的时刻存在较强的随机性,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52007193); 国网浙江省电力有限公司科技项目资助(HZJTK09)

因此电池荷电状态具有不确定性<sup>[4]</sup>。因此, 研究 DG 出力和电动汽车充电负荷对综合能源系统的影响, 对系统经济规划以及稳定运行具有重要意义。

目前, 对含 DG 和 EV 的综合系统规划已有许多文献报道<sup>[5-13]</sup>。文献[5]建立 DG 包括风机、光伏和冷热电负荷的随机分布模型, 考虑储能效益的综合能源系统年投资运行费用最小为目标, 提出了一种园区 DG 容量优化配置随机规划模型。文献[6]在考虑多情景光伏发电和电动汽车交换需求不确定的情况下开发了一种随机编程模型, 目的是最大化运营商利益。文献[7]使用蒙特卡洛法模拟典型日内充电站规划的充电负荷, 建立了计及电动汽车充电服务能力和配电网网损两个维度的充电网络多目标规划模型。文献[8]提出了一种计及风电、光伏和电动汽车充电负荷相关性的 DG 选址定容规划模型, 并分析电动汽车不同充电方式对规划方案的影响。文献[9]考虑了电动汽车的功率不确定性, 并建立了以网络损耗、电压偏移和系统稳定性为目标函数的 DG 优化配置模型。文献[10]研究了一个多时间尺度的随机建模框架以解决含高比例风力发电综合能源系统的不确定性问题, 该模型提高了随机规划的置信水平。文献[11]采用概率情景法对决策支持系统和负荷的不确定性进行建模, 提出了一种基于双水平随机场景的集成能源系统优化规划模型。文献[12]针对小型综合能源系统, 提出了一种基于机会约束规划(CCP)的新型最优调度模型, 并开发了一种基于序列操作理论(SOT)的解决方法, 将基于 CCP 的原始调度模型通过机会约束转化为确定性等价形式。文献[13]结合混沌采样算法构建了一种改进型 Kriging 模型, 从而快速准确地得到综合能源系统多能流网络模型的最佳规划方案。上述文献在刻画新能源发电以及负荷需求波动性的问题上, 对不确定性模型的构建主要以场景分析法和概率解析法为主, 但仍未实现多能系统经济性和供电可靠性的平衡。

在多能规划中由于需要考虑新能源发电和电动汽车等各种不确定因素对规划结果的影响, 故它是一个十分复杂的多目标的非线性混合整数规划问题。传统的多能源系统规划方法仅仅根据确定性预测场景进行规划, 较少考虑不确定因素的影响。随着新能源发电和电动汽车广泛接入能源系统, 加剧了综合能源系统运行面临的不确定性和复杂性, 从而导致多能规划难以精细化建模和求解。园区综合能源系统能源关联耦合, 互联互通, 系统的规划选型配置结果需要满足其运行时涉及的每个复杂场景下安全性、经济性的要求, 系统整体规划结果经济性最优且满足一定概率水平。本文深入研究复杂运

行场景多能源规划设计, 研究结果为园区综合能源系统工程实践提供理论方法与支撑。

本文贡献如下: 1) 引入最大熵理论来量化风电出力和电动汽车充电负荷的不确定性, 计算出的熵值可以作为综合能源系统运行的分析工具, 熵值越大, 风电出力和电动汽车充电负荷可预测性越小。2) 对综合能源系统复杂运行场景进行季节性精细化分析, 通过供暖期、供冷期和过渡期下电、热、冷负荷平衡衡量系统日常运行的经济性。3) 在保证计算精度的前提下通过典型运行场景提取大幅削减多目标协同规划模型的求解工作量, 达到计算效率和求解精度的平衡。

本文首先分析了园区全年供冷期、供暖期和过渡期季节性负荷差异, 并在每个季节下进行精细化场景建模, 使用基于随机模型的最大熵方法模拟风电出力(Wind Turbine Power Output, WTPO)和电动汽车充电负荷(Electric Vehicle Charging Load, EVCL)不确定场景。其次, 采用主成分分析算法从海量复杂运行场景进行特征提取, 得到数量规模较小的典型运行场景。然后, 建立了以经济性和供电可靠性为目标函数的多目标多能协同规划模型。最后, 使用成熟的求解软件 Yalmip 工具箱和 Gurobi 优化器进行求解, 通过某市新开发区示范项目作为算例系统验证了该方法的有效性。

## 1 源-荷不确定场景建模

### 1.1 季节性差异分析

受气象因素影响, 园区在不同季节各类型负荷需求量截然不同。本文考虑所需平衡的负荷划分为电、冷、热三大类。供暖期中, 热电联产系统和燃气锅炉向用户终端供热负荷, 需满足电负荷及热负荷平衡, 本文以北方为例, 供暖期为 11 月中旬—3 月中旬。供冷期中, 冷负荷通过电制冷空调和溴化锂吸收式冷温水机组(LiBr Absorption Chiller Heater, LiBr-ACH)两部分来满足, 此时, 电负荷和冷负荷平衡, 供冷期为 6 月中旬—9 月中旬。其他时间则为过渡期, 因园区过渡期随季节差异变化较小, 故只需满足电负荷需求。

### 1.2 风电出力模型

据统计, 在一定时间段内风速可以假设为双参数 Weibull 分布<sup>[14]</sup>, 其概率密度函数为

$$F(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

式中,  $k$  和  $c$  分别为形状参数和尺度参数。

根据得到的风速计算风力发电机输出功率为<sup>[15]</sup>

$$P_{wT} = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci} \text{ 或 } v \geq v_{co} \\ \left( \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} \right) \cdot P_r & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_r$  为风力发电机额定功率, 单位为 MW;  $v_{ci}$ 、 $v_{co}$  和  $v_r$  分别为切入风速、切除风速和额定风速, 单位为 m/s。

### 1.3 电动汽车充电负荷计算模型

电动汽车的充电时段取决于用户的出行时间。根据美国交通部对全美家用车辆出行的统计结果, 电动汽车起始充电时刻  $t_{start}$  和充电容量  $S_{OC}$  均满足正态分布<sup>[16]</sup>, 其概率密度函数分别为

$$G(t_{start}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_t^2} e^{-\frac{(t_{start}-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}}} \quad (3)$$

$$G(S_{OC}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{soc}^2} e^{-\frac{(S_{OC}-\mu_{soc})^2}{2\sigma_{soc}^2}}} \quad (4)$$

式中,  $\mu_t$ 、 $\mu_{soc}$ 、 $\sigma_t$  和  $\sigma_{soc}$  分别为电动汽车起始充电时刻和充电容量的均值和标准差。注意, 不同使用类型的电动汽车, 均值和标准差不同。

电动汽车的充电持续时长  $T$  为<sup>[17]</sup>

$$T = \frac{C_a(1 - S_{OC})}{P_{rw}} \quad (5)$$

式中:  $C_a$  为电池容量, 单位为 kWh;  $P_{rw}$  为电池充电功率, 单位为 kW。本文考虑无线充电特性, 充电方式为恒功率充电<sup>[18]</sup>。

电动汽车充电负荷计算流程如图 1 所示。

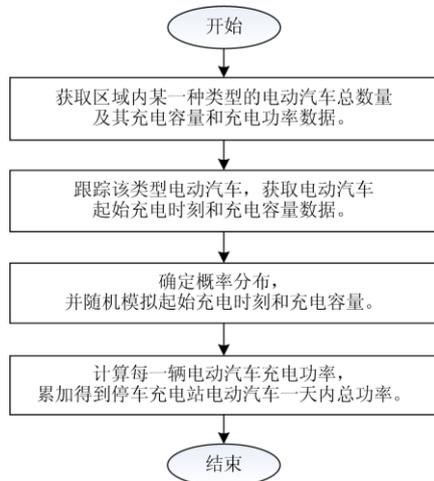


图 1 电动汽车充电负荷计算流程图

Fig. 1 Flow chart of EVCL calculation

### 1.4 最大熵

为了准确描述风电出力和电动汽车充电负荷的

变化规律, 本节提出基于随机模型的最大熵原理来假设风电出力和电动汽车充电负荷的边缘概率分布。

熵可以度量随机事件或信息量的不确定性<sup>[19]</sup>。

一个随机变量  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  的熵可以表示为

$$H(X) = -\sum_{i=1}^N p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (6)$$

式中:  $p(x_i)$  表示  $x_i$  的概率;  $\log$  通常是以 2 为底的对数;  $H(X)$  的单位是比特。

当变量  $x$  为连续时, 熵可以用以  $e$  为底的对数表示:

$$H(X) = -\int f(x) \ln f(x) dx \quad (7)$$

1957 年, Jaynes E. T 提出最大熵原理来模拟随机变量的边缘概率分布<sup>[20]</sup>。随机事件通常会受到一些条件的制约, 也一定能找到一个合适的概率分布使得信息熵最大化, 即求解最大熵的解。此时, 最大熵的解偏差最小, 表明建模主观性得到了最大限度的降低。最大熵公式可以表示为

$$\max H(X) = -\int f(x) \ln f(x) dx \quad (8)$$

约束条件为

$$\int f(x) dx = 1 \quad (9)$$

$$\int g_r(x) f(x) dx = \mu_r, r = 1, \dots, m \quad (10)$$

式中:  $f(x)$  为变量  $x$  的概率密度函数;  $g_r(x)$  为变量  $x$  的第  $r$  个已知函数;  $m$  为作为条件的已知函数的个数;  $\mu_r$  为第  $r$  个已知数据点。

拉格朗日乘子法常用来求解式(8)一式(10)。为了求解风电出力的边缘概率分布  $f(x)$ , 假设拉格朗日参数为  $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m]$ , 则

$$f(x) = \exp \left[ -\lambda_0 - \sum_{r=1}^m \lambda_r g_r(x) \right] \quad (11)$$

代入式(10)可得

$$\int g_r(x) \exp \left[ -\lambda_0 - \sum_{r=1}^m \lambda_r g_r(x) \right] dx = \mu_r, r = 1, \dots, m \quad (12)$$

当几何矩为最大熵的约束时, 随机变量的概率密度函数解可以表示为

$$f(x) = \exp \left[ -\lambda_0 - \sum_{r=1}^m \lambda_r t^r \right] \quad (13)$$

则式(12)可以表示为

$$\int g_r(x) \exp \left[ -\lambda_0 - \sum_{r=1}^m \lambda_r t^r \right] dx = \mu_r, r = 1, \dots, m \quad (14)$$

基于泰勒级数, 采用标准牛顿法迭代便可以得到风电出力的边缘概率分布<sup>[21]</sup>, 同理, 电动汽车充

电负荷的边缘概率分布也可求得, 这里不再赘述。

### 1.5 典型运行场景提取

不确定场景数量规模大, 维数高, 导致多目标协同模型求解困难、收敛速度慢, 因此本节介绍了一种典型运行场景提取方法。

主成分分析法是一种高效的数据集中特征提取的方法<sup>[22-23]</sup>, 可以实现典型运行场景提取, 具体步骤如下。

第一步: 对原始样本数据进行标准化变换;

第二步: 计算标准化后的样本矩阵的协方差矩阵, 求解协方差矩阵的特征值和对应的特征向量;

第三步: 用标准化后的数据矩阵的特征向量做线性组合提取主成分;

第四步: 进行主成分提取, 根据主成分贡献率法选择主成分个数<sup>[24]</sup>。

## 2 综合能源系统多目标协同规划

### 2.1 规划方法

本文提出了考虑风电和电动汽车充电负荷不确定性因素的综合能源系统分布式供能协同规划方法, 如图 2 所示。首先获取园区内全年供冷期、供暖期和过渡期内电力负荷、热负荷和冷负荷以及电动汽车充电负荷数据; 然后根据提出的模型, 规划综合能源系统分布式供能设备, 包括冷热电联产机组和燃气锅炉的选型及配置容量, 其中冷热电联产机组包括内燃机和多能源综合利用型溴化锂吸收式冷温水机组, 最后根据协同规划结果进行供能设备施工选址。

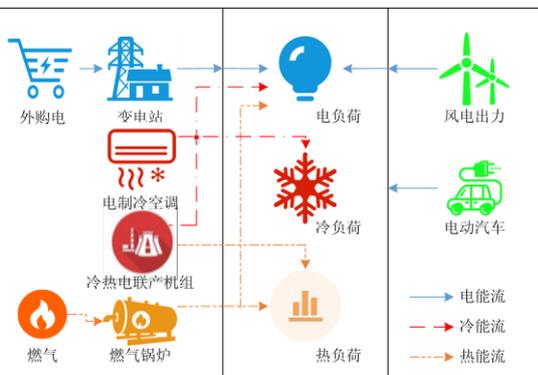


图 2 考虑不确定性因素的综合能源系统协同规划

Fig. 2 Cooperative planning of integrated energy system considering uncertainty

### 2.2 多目标协同规划模型

#### 2.2.1 目标函数

1) 目标函数 1: 以全年建设与运行成本之和最小化为目标, 即

$$\min f_1 = (C_{\text{INV}} + C_{\text{OM}}) \quad (15)$$

$$C_{\text{INV}} = \sum_{q \in \Omega} \left( \sum_{J \in \Psi_J^{\text{CCHP}}} C_{q,J}^{\text{CCHP}} x_{q,J}^{\text{CCHP}} \right) + \sum_{q \in \Omega} \left( \sum_{J \in \Psi_J^{\text{GL}}} C_{q,J}^{\text{GL}} x_{q,J}^{\text{GL}} \right) + \sum_{q \in \Omega} C_{q,J}^{\text{AC}} x_{q,J}^{\text{AC}} \quad (16)$$

$$C_{\text{OM}} = \sum \frac{N}{N + i} \times \left[ \sum_{q \in \Omega} \sum_{S=C,H,T} \lambda_S M^{\text{GAS}} V_q^{\text{fuel}} \right] \quad (17)$$

$$V_{q,S}^{\text{fuel}} = \sum_{J \in \Psi_J^{\text{CCHP}}} V_{q,J,S}^{\text{CCHP}} + \sum_{J \in \Psi_J^{\text{GL}}} V_{q,J,S}^{\text{GL}} \quad (18)$$

式中:  $C_{\text{INV}}$  为建设成本;  $C_{\text{OM}}$  为运行成本;  $C_{q,J}^{\text{CCHP}}$ 、 $C_{q,J}^{\text{GL}}$  和  $C_{q,J}^{\text{AC}}$  分别为冷热电联产机组、燃气锅炉和电制冷空调在区域  $q$  的选型机组  $J$  的成本;  $x_{q,J}^{\text{CCHP}}$ 、 $x_{q,J}^{\text{GL}}$  为 0-1 决策变量;  $x_{q,J}^{\text{AC}}$  为连续变量;  $N$  为规划年份;  $i$  为每年运行成本总净现值的折现率;  $\lambda_S$  为不同场景在全年下的比例,  $S=C,H,T$  表示供冷期、供暖期和过渡期三个场景, 在三个场景中, 均需要考虑风电出力和电动汽车充电负荷的不确定场景;  $M^{\text{GAS}}$  是燃气的单价;  $V_q^{\text{fuel}}$  是不同场景下区域  $q$  内的燃料耗量, 由燃气锅炉和冷热电联产机组的燃料耗量两部分组成。

2) 目标函数 2: 失负荷为每个负荷节点无法供给的负荷量, 表征了系统的供电可靠性。失负荷成本为园区不同区域在全年中不同季节下无法供给的负荷量而造成的成本, 即

$$\min f_2 = C_{\text{VOLL}} \quad (19)$$

$$C_{\text{VOLL}} = M^{\text{VOLL}} \times \sum_{q \in \Omega, S=C,H,T} r_{q,S} \quad (20)$$

式中:  $C_{\text{VOLL}}$  为失负荷成本;  $M^{\text{VOLL}}$  为失负荷成本系数, 数值极高, 以避免运行中切负荷现象的发生;  $r_{q,S}$  为区域  $q$  内在不同场景  $S$  下无法供给的负荷量。

#### 2.2.2 约束条件

##### 1) 等式约束

$$Q_{q,J,S}^{\text{CCHP}} = V_{q,J,S}^{\text{CCHP}} \theta^{\text{LHV}} / 3.6 \quad (21)$$

$$Q_{q,J,H}^{\text{GL}} = V_{q,J,H}^{\text{GL}} \theta^{\text{LHV}} / 3.6 \quad (22)$$

式中:  $V_{q,J,S}^{\text{CCHP}}$  和  $V_{q,J,H}^{\text{GL}}$  为燃气进气量;  $\theta^{\text{LHV}}$  表示低位燃料热值;  $Q_{q,J,S}^{\text{CCHP}}$  和  $Q_{q,J,H}^{\text{GL}}$  为单位时间内内燃机和燃气锅炉产生的热值<sup>[25-26]</sup>。

$$q_{q,J,S}^{\text{CCHP}} = \alpha^{\text{E}} Q_{q,J,S}^{\text{CCHP}} + \beta^{\text{E}} \quad (23)$$

$$q_{q,J,S}^{\text{GAS}} = \alpha^{\text{GAS}} Q_{q,J,S}^{\text{CCHP}} + \beta^{\text{GAS}} \quad (24)$$

$$q_{q,J,S}^{\text{WA}} = \alpha^{\text{WA}} Q_{q,J,S}^{\text{CCHP}} + \beta^{\text{WA}} \quad (25)$$

式中:  $q_{q,J,S}^{\text{CCHP}}$  表示不同场景下区域  $q$  内燃机发电出力;  $q_{q,J,S}^{\text{GAS}}$  和  $q_{q,J,S}^{\text{WA}}$  表示内燃机排放的烟气、缸套冷却水的可利用热功率;  $\alpha$  和  $\beta$  为内燃机的性能参数。

$$q_{q,J,H}^{\text{GL}} = C_{\text{OP}}^{\text{GL}} Q_{q,J,H}^{\text{GL}} \quad (26)$$

$$q_{q,J,C}^{\text{AC}} = C_{\text{OP}}^{\text{AC}} E_{q,J,C}^{\text{AC}} \quad (27)$$

$$q_{\text{H}} = C_{\text{OP}}^{\text{Br,H}} q^{\text{r}} \quad (28)$$

$$q_{\text{C}} = C_{\text{OP}}^{\text{Br,C}} q^{\text{r}} \quad (29)$$

式中:  $C_{\text{OP}}^{\text{GL}}$  表示燃气锅炉的额定热效率;  $C_{\text{OP}}^{\text{AC}}$  为电制冷空调性能常数, 表示输出的制冷量与输入的电功率之比;  $C_{\text{OP}}^{\text{Br,H}}$  和  $C_{\text{OP}}^{\text{Br,C}}$  为 LiBr-ACH 制热/制冷性能系数, 表示输出的制热/制冷量与输入的可用余热之比;  $q^{\text{r}}$  表示 LiBr-ACH 机组用于制热和制冷的可用余热值;  $q_{q,J,H}^{\text{GL}}$ 、 $q_{q,J,C}^{\text{AC}}$ 、 $q_{\text{H}}$  和  $q_{\text{C}}$  分别表示燃气锅炉供热量、电制冷空调供冷量、LiBr-ACH 机组供热量和供冷量。

$$r_{q,S} + E_0^{\text{SUB}} = E_{q,S} + E_{q,C}^{\text{AC}} - q_{q,J,S}^{\text{CCHP}} \quad (30)$$

$$q_{q,J,H}^{\text{load}} = q_{q,J,H}^{\text{CCHP}} + q_{q,J,H}^{\text{GL}} \quad (31)$$

$$q_{q,J,C}^{\text{load}} = q_{q,J,C}^{\text{CCHP}} + q_{q,J,C}^{\text{AC}} \quad (32)$$

式中:  $E_{q,S}$  和  $E_{q,S}^{\text{AC}}$  表示区域  $q$  内在场景  $S$  下电负荷功率和电制冷空调负荷功率, 其中, 电负荷功率包括区域系统内用电负荷、风力发电功率和电动汽车充电负荷;  $E_0^{\text{SUB}}$  表示区域  $q$  内原有变电站供电能力;  $q_{q,J,H}^{\text{load}}$  和  $q_{q,J,C}^{\text{load}}$  分别表示供暖期和供冷期下区域  $q$  内的热负荷和冷负荷功率需求;  $q_{q,J,H}^{\text{CCHP}}$  和  $q_{q,J,C}^{\text{CCHP}}$  分别表示供暖期和供冷期下区域  $q$  内冷热电联产机组的供热量和供冷量。式(30)表示全年所有场景下电功率平衡, 式(31)表示供暖期场景下的热功率平衡, 式(32)表示供冷期场景下的冷功率平衡。

## 2) 不等式约束

$$\sum_{J \in \Psi_q^{\text{CCHP}}} x_{q,J}^{\text{CCHP}} q_{\min,q,J}^{\text{CCHP}} \leq q_{q,J,S}^{\text{CCHP}} \leq \sum_{J \in \Psi_q^{\text{CCHP}}} x_{q,J}^{\text{CCHP}} q_{\max,q,J}^{\text{CCHP}} \quad (33)$$

$$\sum_{J \in \Psi_q^{\text{GL}}} x_{q,J}^{\text{GL}} q_{\min,q,J}^{\text{GL}} \leq q_{q,J,H}^{\text{GL}} \leq \sum_{J \in \Psi_q^{\text{GL}}} x_{q,J}^{\text{GL}} q_{\max,q,J}^{\text{GL}} \quad (34)$$

$$\sum_{J \in \Psi_q^{\text{CCHP}}} x_{q,J}^{\text{CCHP}} \leq 1 \quad (35)$$

$$\sum_{J \in \Psi_q^{\text{GL}}} x_{q,J}^{\text{GL}} \leq 1 \quad (36)$$

式中:  $q_{\max,q,J}^{\text{CCHP}}$ 、 $q_{\min,q,J}^{\text{CCHP}}$  和  $q_{\max,q,J}^{\text{GL}}$ 、 $q_{\min,q,J}^{\text{GL}}$  分别表示内燃机和燃气锅炉的最大、最小有功出力值; 式(35)和式(36)表示每个区域  $q$  至多只配置一种型号和装机容量的冷热电联产机组和燃气锅炉。

$$q_{\text{H},\min} \leq q_{\text{H}} \leq q_{\text{H},\max} \quad (37)$$

$$q_{\text{C},\min} \leq q_{\text{C}} \leq q_{\text{C},\max} \quad (38)$$

$$q^{\text{r}} \leq q^{\text{GAS}} + q^{\text{WA}} \quad (39)$$

式中:  $q_{\text{H},\min}$ 、 $q_{\text{H},\max}$  和  $q_{\text{C},\min}$ 、 $q_{\text{C},\max}$  分别表示 LiBr-ACH 机组的最大、最小制热/制冷值; 式(39)表示 LiBr-ACH 机组用于制热/制冷的余热值必须小于内燃机排出烟气和缸套冷却水的热值之和。

## 3 多目标规划模型求解

一个好的编程模型比一个好的求解器更有效。关于规划模型, 本文提出的多目标规划模型中建设部分包括分布式供能设备的选型和配置容量, 运行部分包括三个季节下的典型电热冷负荷平衡, 而系统供电可靠性将转化为失负荷成本来体现。因此, 这是一个极为复杂且难以求解的多目标的非线性混合整数规划问题。为了便于多目标协同规划问题得到快速求解, 本文采用了成熟的求解规划软件, 使用 Matlab 软件作为求解工具, 并结合 Yalmip 工具箱和数学规划 Gurobi 优化器。经过不断的参数调试, 设置收敛指标为 MIP 的上界与下界之间的相对差距为小于 0.001%。求解流程如图 3 所示。

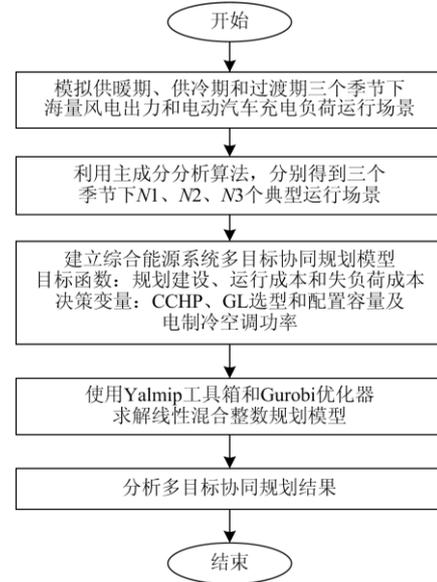


图 3 协同规划模型求解流程图

Fig. 3 Flow chart of cooperative planning model solution

## 4 算例

### 4.1 仿真条件

本文以中国某市新开发区的一个实际示范项目为算例。开发区负荷数据的划分如表 1 所示。注意, 表 1 中的功率负荷不包括交流负荷。综合能源

系统分布式能源协同规划方案为: 电制冷空调成本为 85 万元/MW; 冷热电联产机组和燃气锅炉选型方案见表 2 和表 3。

风力发电机为 1 台, 切入风速、切出风速和额定风速分别为 3 m/s、18 m/s 和 10 m/s, 风力发电机额定功率为 600 kW; 电动汽车类型为私家车的总数量为 44 000 辆, 电池容量为 20 kWh, 充电功率为 2.5 kW; 电动汽车类型为公务车的总数量为 11 000 辆, 电池容量为 60 kWh, 充电功率为 2.5 kW; 电动汽车类型为出租车的总数量为 44 000 辆, 电池容量为 120 kWh, 充电功率为 50 kW; 电动汽车类型为公交车的总数量为 6 000 辆, 电池容量为 100 kWh, 充电功率为 26.5 kW; 低位燃料热值为 32.967 MJ/m<sup>3</sup>, 燃气价格为 3.23 元/m<sup>3</sup>, 电制冷空调卖电价格为 0.248 1 元/kWh, LiBr-ACH 制冷/制热系数为 1.2 和 0.9, 燃气锅炉的额定热效率为 0.92; 变电站外购电价格为 0.992 3 元/kWh。总规划期设定为 10 年, 每年的运营成本折现率设定为 5%, 失负荷成本系数为 1×10<sup>6</sup> 元/MW。

表 1 全年内所有场景各区域负荷

Table 1 Loads in all scenes and regions around the year unit

区域	kW		
	电负荷 S=C,H,T	热负荷 S=H	冷负荷 S=C
A	22.7	33.6	36.9
B	27.7	41.8	45.9
C	35.9	59.2	65.7
D	27.7	50.5	57.2
E	13.4	68.6	81.4
F	32.2	129.8	144.6
G	28.2	117.1	132.7

表 2 冷热电联产机组规划方案

Table 2 CCHP planning program

方案	冷热电联产机组	
	设备选型/MW	成本/万元
1	1	1 200
2	2	2 400
3	3	3 500
4	6	6 600
5	10	10 800

表 3 燃气锅炉规划方案

Table 3 Gas boiler planning program

方案	燃气锅炉	
	设备选型/MW	成本/万元
1	50	2 857
2	150	8 571
3	250	14 285
4	350	20 000

## 4.2 仿真结果

### 4.2.1 不确定性场景

仿真的输入数据是分别服从 Weibull 分布的风速数据和获取的电动汽车计算数据, Weibull 分布形状参数为 10.988 5, 尺寸参数为 2.113 1, 分辨率为小时级别, 几何矩为 [2.400 3, -0.044 7, 0.029 2, 0.000 8, -0.000 1]<sup>[21]</sup>。使用第 1 节和第 2 节所述方法对风电出力和电动汽车充电负荷进行仿真。为了验证基于最大熵方法的随机模型, 将仿真结果与实际经验分布进行了比较, 见图 4 和图 5。

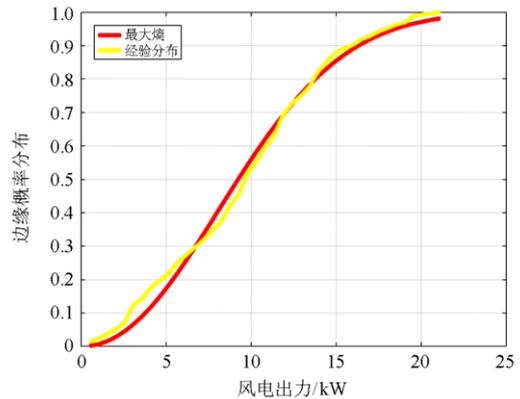


图 4 风电出力边缘概率分布

Fig. 4 Marginal distribution of WTPO

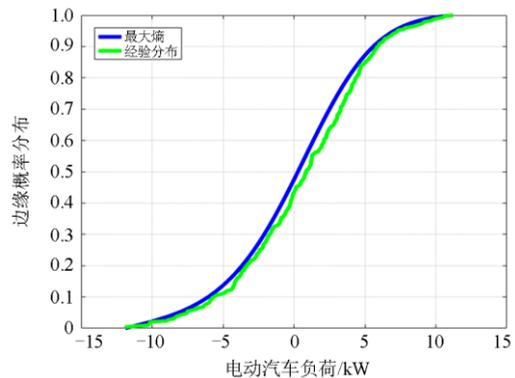


图 5 电动汽车充电负荷边缘概率分布

Fig. 5 Marginal distribution of EVCL

如图 4 和图 5 所示, 最大熵分布与经验分布非常相似, 因此最大熵可以准确地模拟风电出力和电动汽车充电负荷的边缘概率分布。

风电出力和电动汽车充电负荷的熵值如表 4。

表 4 负荷场景的熵值

Table 4 Entropy of load scenarios

负荷场景	熵
风电出力	2.483 3
电动汽车充电负荷	2.320 8

由表 4 可知, 风电出力和电动汽车充电负荷的熵值均较大, 体现了较强的不确定性。

根据经验阈值运用第 2 节所述主成分分析算法对输入海量场景进行特征提取, 得到主成分个数为 7。提取前后的典型运行场景数据特征如表 5 所示。

表 5 场景提取前后数据特征表

Table 5 Data characteristics before and after scenarios extraction

典型运行场景		均值	标准差
风电出力	前	323.612	251.633
	后	324.160	252.155
电动汽车充电负荷	前	112.242	85.676
	后	110.032	86.266

由表 5 可知, 典型运行场景提取前后数值特征误差小, 因此, 采用主成分分析方法对风电出力和电动汽车充电负荷进行典型运行场景提取是准确可行的。

#### 4.2.2 综合能源系统协同规划

方案 1: 确定性负荷场景的综合能源系统协同规划方案。

方案 2: 考虑源-荷不确定性因素的综合能源系统协同规划方案。注意, 不确定性场景模拟区域 A、B 电负荷, 区域 C、D、E、F 和 G 负荷场景为定值, 与方案 1 相同。

协同规划结果如表 6 所示, 典型运行场景提取前后规划模型求解计算时间如表 7 所示。

表 6 协同规划结果比较表

Table 6 Comparison table of cooperative planning results

				万元
比较项		方案 1	方案 2	成本降低
规划建设成本	冷热电联产机组	71 820	71 820	0
	燃气锅炉	44 000	38 000	6 000
	电制冷空调	42 185	42 185	0
	总计	158 005	152 005	6 000
运行成本	冷热电联产机组	473 794.8	472 340.8	1 454
	燃气锅炉	285 999.4	267 496.1	18 503.3
	总计	759 794.2	739 837.2	19 957
失负荷成本		385 352 766.6	327 723 266.6	57 629 500
总成本		917 798.4	891 841.1	45 914.3

表 7 计算时间

Table 7 Calculating time

方法	场景规模大小	计算时间/s	总成本/千万元
海量场景	600	210.710	89.075
典型运行场景	7	1.435	89.184

对于协同规划结果得出如下结论:

1) 由表 6 可知, 方案一由于本文考虑了风电出力和电动汽车充电负荷最大负荷场景, 因此规划建

设、运行总成本较高, 规划结果较为保守。而方案二经济性更具有优势, 原因在于考虑了风电出力和电动汽车充电负荷的不确定性。从式(30)可知, 系统运行时涉及的每个复杂场景均满足了经济性、安全性的要求。系统的供电可靠性可通过失负荷成本来体现。相比方案一, 方案二的协同规划结果失负荷成本有所下降, 说明方案二的供电可靠性更强。

2) 由表 7 可知, 场景规模越大, 综合能源系统运行场景仿真越精细化, 使得规划求解效率显著下降。相比于考虑海量场景的规划模型, 考虑典型运行场景的规划模型运行总成本计算误差为 0.12%, 则可说明典型运行场景提取算法在保证计算精度的前提下大幅削减了规划模型的求解工作量, 实现规划模型高效求解。

3) 从国家层面上来说, 综合能源配置效率的提高是为了避免能源的浪费。而对于能源供应商, 考虑能源配置效率最终的目的是投资回报。根据参考文献[27], 园区整体规划结果建设与运行成本有所下降, 正是体现了考虑优化分布式供能设备选型和配置容量带来的益处, 能源配置效率得到了提高。

## 5 结论

本文使用最大熵和边缘概率分布分析风电出力和电动汽车充电负荷的不确定性。运用约简算法, 采用主成分分析方法对海量运行场景进行特征提取, 得到典型运行场景。考虑全年不同场景下的失负荷成本, 以系统全年建设与运行成本为目标函数, 使用 Yalmip 工具和 Gurobi 优化器求解综合能源系统协同规划方案。

分布式电源的时序特性和电动汽车充电负荷特性具有强随机性, 在综合能源系统协同规划中, 将由于运算量巨大而导致求解困难。采用约简算法得到合适数量的典型场景, 可以提高规划问题的求解效率。通过考虑源-荷不确定性的典型运行场景, 不仅能提高 DG 和 EV 在综合能源系统中的渗透率, 还保证了分布式能源 DG 和 EV 在长期规划过程中的经济性和供电可靠性。

在本算例中, 已在实际工程项目上证明了该方法的有效性。不同的系统网络参数可能会影响公式。式(30)为各季节下多场景的负荷平衡公式, 依赖于精确可靠的场景负荷预测数据。因此, 所提出的方法可用于工商业较为集中、负荷数据精确的园区综合能源系统。如果考虑其他的风电出力分布和电动汽车充电方式, 则需要更改风速的形状参数、尺度参数和充电参数。

本文针对风电出力和电动汽车充电负荷不确定

性的综合能源系统协同规划问题做了初步探索, 尚未考虑 DG 和 EV 的时空特性, 以上问题将是未来研究的重点。

### 参考文献

- [1] 本刊编辑部. 国家能源局发布《关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见》[J]. 农村电气化, 2015(9): 1-1.  
Editorial Department. The National Energy Administration issued "guiding opinions on promoting the construction of new energy micro grid demonstration projects"[J]. Rural Electrification, 2015(9): 1-1.
- [2] FU Xueqian, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Typical scenario set generation algorithm for an integrated energy system based on the Wasserstein distance metric[J]. Elsevier Ltd, 2017, 135: 153-170.
- [3] 王俊, 李霞, 周昔东, 等. 基于 VMD 和 LSTM 的超短期风速预测[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 45-52.  
WANG Jun, LI Xia, ZHOU Xidong, et al. Ultra-short-term wind speed prediction based on VMD-LSTM[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 45-52.
- [4] 靳现林, 赵迎春, 吴刚. 考虑分布式光伏和电动汽车接入的配电网空间负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 10-19.  
JIN Xianlin, ZHAO Yingchun, WU Gang. Space load forecasting of distribution network considering distributed PV and electric vehicle access[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 10-19.
- [5] 赵瑾, 雍静, 郇嘉嘉, 等. 基于长时间尺度的园区综合能源系统随机规划[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 62-67.  
ZHAO Jin, YONG Jing, HUAN Jiajia, et al. Stochastic planning of park-level integrated energy system based on long time-scale[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 62-67.
- [6] CHENG Yu, ZHANG Chengwei. Configuration and operation combined optimization for EV battery swapping station considering PV consumption bundling[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(3): 276-293. DOI: 10.1186/s41601-017-0056-y.
- [7] 钱科军, 谢鹰, 张新松, 等. 考虑充电负荷随机特性的电动汽车充电网络模糊多目标规划[J/OL]. 电网技术: 1-12[2020-09-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0201a>.  
QIAN Kejun, XIE Ying, ZHANG Xinsong, et al. Fuzzy multi-objective optimization of electric vehicle charging network with considering stochastic characters of charging load[J/OL]. Power System Technology: 1-12[2020-09-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0201a>.
- [8] 龙川, 张文涛, 叶圣永, 等. 计及源荷相关性含电动汽车的分布式电源选址定容规划[J]. 热力发电, 2020, 49(6): 97-104.  
LONG Chuan, ZHANG Wentao, YE Shengyong, et al. Optimal planning for siting and sizing of distributed generator including electric vehicles considering correlations of source and load[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 97-104.
- [9] 王满商, 李正明, 汪洋. 考虑电动汽车不确定性因素的配电网分布式电源优化布置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 67-72.  
WANG Manshang, LI Zhengming, WANG Yang. Distribution network distributed power supply configuration considering the uncertainties of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 67-72.
- [10] KRAD I, GAO D W, WU H. An assessment of flexibility reserves in stochastic modeling at multiple timescales[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(1): 84-92.
- [11] XIAO Hao, PEI Wei, DONG Zuomin, et al. Bi-level planning for integrated energy systems incorporating demand response and energy storage under uncertain environments using novel metamodel[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 155-167.
- [12] 刘迪, 吴俊勇, 林凯骏, 等. 基于 Kriging 模型的综合能源系统规划方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 185-194.  
LIU Di, WU Junyong, LIN Kaijun, et al. A planning method of integrated energy system based on Kriging model[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 185-194.
- [13] LI Yang, WANG Chunling, LI Guoqing, et al. Improving operational flexibility of integrated energy system with uncertain renewable generations considering thermal inertia of buildings[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 207: 112-126.
- [14] PIOTR W. Two and three-parameter Weibull distribution in available wind power analysis[J]. Renewable Energy, 2017, 103: 15-29.
- [15] 唐建林, 余涛, 张孝顺, 等. 基于多搜索器优化算法的含可再生能源协同优化调度[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(3): 492-504.  
TANG Jianlin, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Collaborative optimization scheduling with renewable energy based on multi-searcher optimization algorithm[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(3): 492-504.

- [16] 常小强, 宋政湘, 王建华. 基于蒙特卡罗算法的电动汽车充电负荷预测及系统开发[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 1-5.  
CHANG Xiaoqiang, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua. Electric vehicle charging load prediction and system development based on Monte Carlo algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 1-5.
- [17] 陈昕儒, 林祥逸, 吴奇珂. 计及用户行为的电动汽车充电负荷预测[J]. 电工技术, 2017(1): 129-130.  
CHEN Xinru, LIN Xiangyi, WU Qike. Electric vehicle load forecasting considering user behavior[J]. Electric Engineering, 2017(1): 129-130.
- [18] 柯慧敏, 邵军军, 石进永. 考虑动态充电负荷需求与多因素影响电动汽车充电负荷模型[J]. 新能源汽车供能技术, 2017, 1(1): 46-50.  
KE Huimin, SHAO Junjun, SHI Jinyong. Electric vehicle charging load model considering dynamic charging load demand and multi factors[J]. Energy Supply Techniques of New Energy Vehicles, 2017, 1(1): 46-50.
- [19] 张潇龙, 齐林海. 融合稀疏降噪自编码与聚类算法的配电网台区分类研究[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(12): 15-23.  
ZHANG Xiaolong, QI Linlai. Research on distribution transformer area classification based on sparse de-noising auto-encoder and clustering algorithm[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(12): 15-23.
- [20] 史坤鹏, 张雪敏, 赵伟, 等. 计及静态安全分析熵特性的电力系统自组织临界过程仿真[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 38-43.  
SHI Kunpeng, ZHANG Xuemin, ZHAO Wei, et al. Simulation of self-organized criticality in power system considering entropy property of static security analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 38-43.
- [21] FU Xueqian, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Uncertainty analysis of an integrated energy system based on information theory[J]. Energy, 2017, 122: 649-662.
- [22] 张玉霖. 基于主成分分析的网络时延特征数据提取仿真[J]. 计算机仿真, 2020, 37(3): 301-304.  
ZHANG Yulin. Simulation of network delay feature extraction based on principal component analysis[J]. Computer Simulation, 2020, 37(3): 301-304.
- [23] FANG Shengen, ZHANG Qiuhu, REN Weixin. Parameter variability estimation using stochastic response surface model updating[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 49(1): 249-263.
- [24] 赵莹, 赵川, 叶华, 等. 应用主成分分析约简电压暂降扰动源识别特征的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 105-110.  
ZHAO Ying, ZHAO Chuan, YE Hua, et al. Method to reduce identification feature of different voltage sag disturbance source based on principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 105-110.
- [25] FU Xueqian, ZHANG Xiurong, QIAO Zhen, et al. Estimating the failure probability in an integrated energy system considering correlations among failure patterns[J]. Energy, 2019, 178: 656-666.
- [26] 张雨曼, 刘学智, 严正, 等. 光伏-储能-热电联产综合能源系统分解协调优化运行研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(11): 2372-2386.  
ZHANG Yuman, LIU Xuezhi, YAN Zheng, et al. Decomposition-coordination based optimization for PV-BESS-CHP integrated energy systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(11): 2372-2386.
- [27] SHEN Xinwei, SHAHIDEHPOUR M, ZHU Shouzheng, et al. Multi-stage planning of active distribution networks considering the co-optimization of operation strategies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1425-1433.

收稿日期: 2020-07-22; 修回日期: 2020-10-26

作者简介:

陈忠华(1985—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划设计、电力储能技术应用及电动汽车有序充电;  
E-mail: 591787007@qq.com

付学谦(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统、综合能源系统建模、规划、可靠性评估。  
E-mail: fuxueqian@cau.edu.cn

(编辑 魏小丽)