

融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置

白凯峰¹, 顾洁¹, 彭虹桥¹, 朱彬若²

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 大数据工程技术研究中心, 上海市 200240;

2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海市 200437)

摘要: 多能互补系统结构及设备耦合关系复杂, 为提高含高渗透率新能源的多能系统的能源利用效率和运营效益, 对考虑风光出力不确定性和相关性的多能互补微网系统优化配置问题进行了研究。在规划阶段充分考虑新能源随机性与相关性, 提出了基于核密度估计和 Copula 理论的风光出力场景生成方法, 得到典型日风光出力序列; 基于能量枢纽, 建立结构完善的含风光多能互补系统的多能流平衡方程, 进而以年化总成本最低和一次能源节约率最高为目标建立配置与运行相结合的多能互补系统的双层优化配置模型, 并采用智能优化算法对模型进行求解。算例验证和灵敏度分析表明, 所述方法能够在考虑风光出力不确定性的基础上得到结构完善的多能互补微网系统优化配置方案, 有效降低了多能系统总成本并提高了一次能源节约率。

关键词: 多能互补; 能量枢纽; 不确定性; 相关性; 场景生成; 双层规划

0 引言

为了提高能源使用效率, 应对能源枯竭和环境污染问题, 能源互联网的愿景在全球引起了广泛关注^[1]。多能互补微网(multi-energy complementary microgrid, MECM)系统耦合电能、风能、光能以及天然气能等多种能源, 通过配电网联络线、热力管道、风机(wind turbine, WT)、光伏(photovoltaic, PV)、储能电池和冷热电三联供(combined cooling, heating and power, CCHP)系统实现多种能源之间的互补阶梯利用, 是一种能够提高能源利用率、减少环境污染的多能流系统, 可以广泛用于医院、学校、工业园区等区域综合能源系统, 对促进能源互联网发展的应用具有重要意义^[2-3]。

多能互补微网系统结构复杂、运行方式繁多, 系统内设备耦合关系复杂, 源侧及需求侧在技术与政策引导等双重驱动下存在强不确定性, 因此如何根据区域用能需求确定多能系统优化配置和优化运行方案是实现多能互补系统最大能源利用效率以及系统收益的难题^[4]。目前, 国内外对多能互补系统的优化配置和运行等问题进行了相应的研究。在

优化配置方面, 文献[5]采用 Benders 分解法将热电联供机组优化配置模型分解为投资优化主问题和模拟运行子问题对模型进行求解; 文献[6]考虑了余热在供热和供冷之间的分配系数, 根据用能需求分别对系统的设备容量以及运行方式进行优化; 文献[7]建立多区域 CCHP 系统容量优化配置模型, 研究了电热网耦合对 CCHP 系统优化配置结果以及热网能流的影响。在优化运行方面, 文献[8-9]分别建立多能互补系统优化运行的多目标规划模型和计及光伏和蓄能的机会约束规划模型, 从经济、环境角度对系统进行运行优化。

但目前对多能互补系统优化配置的研究存在两个主要问题: ①所配置的多能系统结构不够完善, 大多仅对系统的燃气轮机(gas turbine, GT)进行配置, 不利于系统的环保性和经济性; ②多能互补系统的风光接入容量较高, 波动性的风光出力给系统带来功率平衡问题和风光消纳问题, 同时区域内风光出力具有相关性, 因此还需要在规划阶段充分考虑风光出力的不确定性和相关性。

本文针对多能互补微网系统的优化配置问题, 首先, 构建基于核密度估计法和 Copula 理论的风机和光伏典型日出力场景生成方法, 从而在规划阶段充分考虑风光出力不确定性和相关性的影响; 然后, 鉴于多能互补微网系统作为可再生能源消纳的有效模式, 规划与运行紧密耦合是实现其建设目标的根本保障, 本文针对系统的经济性和环保性, 建立了结构完善的多能互补微网系统双层规划模型, 对系统

收稿日期: 2017-09-13; 修回日期: 2017-12-15。

上网日期: 2018-05-18。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900100); 国家电网公司总部科技项目“中低压配电网的弹性提升和价值评价关键技术研究”。

的配置和运行进行分层优化,提高系统经济效益和节能效益;最后,通过算例验证了模型的合理性和优越性,并进行了灵敏度分析。

1 多能互补微网系统

1.1 多能互补微网系统结构

本文所研究的多能互补微网系统的结构及能量流如图1所示。多能系统中,发电设备包括风机、光伏电池以及燃气轮机,同时微网通过联络线连接至配电网;制热设备包括燃气锅炉(gas boiler, GB)和余热锅炉(heat recovery boiler, RB);制冷设备包括电制冷机(electric cooler, EC)与溴化锂吸收式制冷机(absorption cooler, AC);另外,系统中配有储能设备(battery storage equipment, BSE)、储热设备(heat storage equipment, HSE)和储冷设备(ice storage equipment, ISE)。CCHP系统中,燃气轮机利用天然气向用户供电,余热锅炉利用燃气轮机烟气产生热水,可供热或供给吸收式制冷机进行制冷^[10-12]。储电/能设备在包含高比例波动性新能源的多能系统中参与系统协调运行优化,可提高系统风光消纳能力并减少热冷能损失,改善系统经济性与环保性。

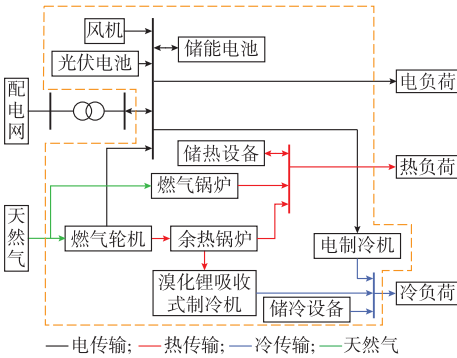


图1 多能互补微网系统结构
Fig.1 Structure of MECM system

1.2 多能互补微网系统内设备出力模型

多能互补系统中设备出力模型已有大量研究成果,本文主要参考文献^[13-17]分别建立了风机和光伏电池组、燃气轮机、电制冷机、溴化锂吸收式制冷机、余热锅炉、燃气锅炉以及储电/能设备出力模型。篇幅所限,此处不再赘述。

1.3 基于能量枢纽的多能系统能量流模型

为了描述多能源系统中复杂的耦合关系,苏黎世联邦工学院(ETH Zurich)提出了能量枢纽(energy hub)的概念。能量枢纽采用耦合矩阵清晰地描述输入能源和输出负荷之间的平衡关系,可应用于多能源系统的运行、规划研究^[18]。

能量枢纽可以将多能互补系统描述为如附录A图A1所示的输入-输出端口模型,左侧P为输入的能量或能源,经过多能系统后转换为符合需求的能量或能源L。

能量枢纽的输入-输出关系可由式(1)表示,其中矩阵C为表示P和L具体转换关系的耦合矩阵,S为修正矩阵^[19]。S用来描述系统中存在的内部供能设备,包括风机、光伏电池、储能设备以及电制冷机,因内部供能设备不起输入和输出的直接转换作用,所以需要转换方程做出修正。这样就能简单清晰地对复杂的多能系统能量流进行描述。

$$L = CP - S \tag{1}$$

针对本文所研究的多能互补微网系统,首先引入天然气分配系数v和余热分配系数w^[20],即有

$$\begin{cases} P_{\text{gas}}^{\text{GT}} = vP_{\text{gas}} \\ P_{\text{gas}}^{\text{GB}} = (1-v)P_{\text{gas}} \\ Q_{\text{AC}}^{\text{h}} = wQ_{\text{RB}}^{\text{h}} \end{cases} \tag{2}$$

式中: $P_{\text{gas}}^{\text{GT}}$ 和 $P_{\text{gas}}^{\text{GB}}$ 分别为燃气轮机和燃气锅炉使用的天然气功率,热值选天然气低热值^[4] 9.97 (kW·h)/m³; P_{gas} 为多能系统使用的天然气功率; Q_{AC}^{h} 为吸收式制冷机利用的热能; Q_{RB}^{h} 为余热锅炉出力。

根据各个设备的出力模型以及系统的能量平衡关系,得到电、热、冷平衡方程,如式(3)所示:

$$\begin{cases} L_e = P_{\text{grid}} + P_{\text{WT}} + P_{\text{PV}} + vP_{\text{gas}}\eta_{\text{g-e}}^{\text{GT}} - \frac{P_{\text{EC}}}{R_{\text{EC}}^{\text{COP}}} - P_{\text{BSE}} \\ L_h = (1-v)P_{\text{gas}}\eta_{\text{g-h}}^{\text{GB}} + v(1-w)P_{\text{gas}}\eta_{\text{g-h}}^{\text{GT}}\eta^{\text{RB}} - P_{\text{HSE}} \\ L_c = vwP_{\text{gas}}\eta_{\text{g-h}}^{\text{GT}}\eta^{\text{RB}}R_{\text{COP}}^{\text{AC}} + P_{\text{EC}} - P_{\text{ISE}} \end{cases} \tag{3}$$

式中: L_e, L_h, L_c 分别为电、热、冷负荷; P_{grid} 为配电网联络线电功率,微网向大电网购电时 P_{grid} 为正,微网向大电网售电时 P_{grid} 为负; P_{WT} 和 P_{PV} 分别为风机和光伏总出力; $P_{\text{BSE}}, P_{\text{HSE}}, P_{\text{ISE}}$ 分别为储电、储热、储冷设备出力,大于零表示充电/能,小于零表示放电/能; P_{EC} 为电制冷机出力; $\eta_{\text{g-e}}^{\text{GT}}$ 和 $\eta_{\text{g-h}}^{\text{GT}}$ 分别为燃气轮机产生电能和烟气中热能的效率; $\eta_{\text{g-h}}^{\text{GB}}$ 为燃气锅炉的产热效率; η^{RB} 为余热锅炉效率; $R_{\text{COP}}^{\text{EC}}$ 和 $R_{\text{COP}}^{\text{AC}}$ 分别为电制冷机和溴化锂吸收式制冷机的能效比。

将电、热、冷平衡方程整理为如下形式:

$$\begin{bmatrix} L_e \\ L_h \\ L_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & v\eta_{\text{g-e}}^{\text{GT}} \\ 0 & (1-v)\eta_{\text{g-h}}^{\text{GB}} + v(1-w)\eta_{\text{g-h}}^{\text{GT}}\eta^{\text{RB}} \\ 0 & vw\eta_{\text{g-h}}^{\text{GT}}\eta^{\text{RB}}R_{\text{COP}}^{\text{AC}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\text{grid}} \\ P_{\text{gas}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -P_{\text{WT}} - P_{\text{PV}} + \frac{P_{\text{EC}}}{R_{\text{EC}}^{\text{COP}}} + P_{\text{BSE}} \\ P_{\text{HSE}} \\ -P_{\text{EC}} + P_{\text{ISE}} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式(4)一方面可以清晰地描述本文所研究的多能互补微网系统的能量平衡,另一方面则可通过调节天然气和余热分配系数对系统中各个设备的运行状态进行控制,如通过调节天然气分配系数,实现对燃气锅炉和燃气轮机出力的控制以达到经济、环境等方面的目的。

2 考虑风光不确定性和相关性的场景生成

风能和光能属于可再生能源,利用风能和光能发电对生态环境影响较小,但风能和光能的自然属性决定了风机和光伏出力的不确定性以及同区域风光出力的相关性,为了确保多能互补微网系统运行的安全可靠,必须在规划和运行阶段考虑新能源出力的随机性和相关性。

目前,对风速和光照强度的随机性的处理方法主要有两种:①根据统计经验,认为风速服从 Weibull 分布,光照强度服从 Beta 分布^[21],采用采样方法获取风速和光照强度序列,然而这种方法忽略了序列的时间尺度,可用于系统的可靠性评估等场景,而不适用于计算系统含时间尺度的指标,如日、年运行成本等;②以风速和光照强度的日前预测为基础,认为预测误差服从正态分布,通过误差采样实现风速和光伏的随机性,但是这种方法受日前预测局限较大^[22],并不适用于系统规划研究。

本文研究目标是建立规划与运行相结合的多能互补微网系统配置模型,根据典型日风光出力曲线计算系统年化总成本,需要考虑风速和光照强度序列的时间尺度。为此,提出一种风机和光伏典型日出力场景生成方法,具体过程如图 2 所示。

以历史风光出力数据(每小时一个点)为基础(图中 x 和 y 分别表示单位风机和光伏出力),首先基于核密度估计法选取常用的高斯核函数生成 24 h 内每个时段的风、光出力概率密度函数。然后考虑风光相关性,基于 Copula 理论建立每个时段的风光出力联合概率分布函数;对于 Copula 函数的选取,由于二元阿基米德 Copula 函数中,Gumbel 和 Clayton Copula 函数只能描述变量间的非负关系, Frank Copula 可兼顾变量的非负和负相关关系^[23],而风光常有负相关互补关系,因此本文选取 Frank Copula 函数描述风光相关性。最后,对每个时段的联合概率分布函数进行采样,并根据采样结果和风光的联合概率分布函数反变换得到每个时段的采样风机和光伏出力,从而最终生成考虑风光相关性和随机性的典型日曲线。

由于采样数 N 较大,不利于计算,因此本文采

用 K -means 聚类对 N 组采样结果进行聚类,生成 k 个典型日场景(k 值由当地风光出力的季节特性确定),并计算各场景出现的概率。

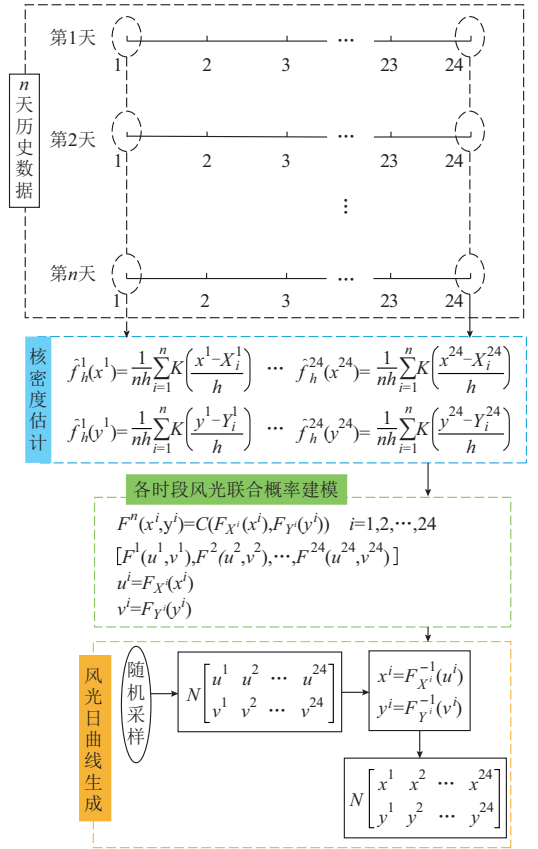


图 2 风光出力场景生成方法

Fig.2 Scenario generation method of WT and PV output

3 多能系统双层优化模型及求解算法

3.1 多能互补系统的双层优化模型

对于多能互补系统的优化配置问题,在进行设备配置设计时,必须考虑配置方案的实际运行效果,一方面为了满足系统的用能需求,另一方面为了实现系统的经济性和环保性,需要联合考虑系统的运行优化问题。基于本文提出的风光出力多场景生成方法,配置优化问题的结果是各场景的运行优化问题的先决条件,属于决策层,而配置优化问题目标的求解又基于各场景运行优化问题的结果,两者彼此关联,具有双层优化问题的特征,故本文将多能互补微网系统的配置与运行相结合,构建双层规划模型对系统最优配置问题进行求解。

3.1.1 上层目标函数

上层以年化总成本最低为目标,包括投资、维护、运行和环境成本,控制变量为系统各设备的台数,如式(5)所示。

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

$$\begin{cases} C_1 = \frac{r(1+r)^y}{(1+r)^y - 1} \sum_{i \in \Omega_1} n_i c_i \\ C_2 = \delta \sum_{i \in \Omega_1} n_i c_i \\ C_3 = 365 \sum_{i=1}^k p_i \sum_{t=1}^{24} (p_{\text{gas}} P_{\text{gas}}(t) + \\ p_{\text{grid}}(t) \max(P_{\text{grid}}(t), 0) + p_{\text{grid}}^{\text{sell}} \min(P_{\text{grid}}(t), 0)) \\ C_4 = 365 \sum_{i=1}^k p_i \sum_{t=1}^{24} (\xi^{\text{grid}} P_{\text{grid}}(t) + \xi^{\text{GT}} P_{\text{GT}}(t) + \\ \xi^{\text{GB}} P_{\text{GB}}(t)) \end{cases} \quad (5)$$

式中: C 为系统年化总成本; C_1 为所有配置设备年化投资成本, 包括燃气轮机、风机、光伏电池、余热锅炉、溴化锂吸收式制冷机、电制冷机、燃气锅炉组以及储电/能设备, Ω_1 为这些设备组成的集合; r 为贴现率, 本文取 8%; y 为使用年限(本文统一假定为 15 年); n_i 为配置台数; c_i 为单台成本, 单位为元; C_2 为系统年维护成本; δ 为维护成本系数, 取 0.03; C_3 为年运行成本, 主要包括天然气费用、购电费用以及售电收益; p_i 为场景 i 出现的概率; p_{grid} 和 p_{gas} 分别为电价和天然气价格; $p_{\text{grid}}^{\text{sell}}$ 为微网售电价格, 取新能源上网标杆电价 0.459 3 元/(kW·h); C_4 为年环境成本, 即污染物排放价值成本; ξ^{grid} 、 ξ^{GT} 、 ξ^{GB} 分别为电网和燃气轮机生产单位电能、燃气锅炉生产单位热能的环境价值成本, 单位为元/(kW·h); P_{GB} 为燃气锅炉出力。

3.1.2 下层目标函数

下层以一次能源节约率最高为目标, 控制变量为天然气分配系数、余热分配系数、储电/能设备出力以及电制冷机出力, 如式(6)所示。

$$\max \eta = \frac{E_{\text{SP}} - E_{\text{MECM}}}{E_{\text{SP}}}$$

$$\begin{cases} E_{\text{SP}} = \sum_{t=1}^{24} \left(\frac{L_{\text{h}}(t)}{\eta_{\text{g-h}}^{\text{GB}}} + \frac{L_{\text{e}}(t) + \frac{L_{\text{c}}(t)}{R_{\text{COP}}^{\text{EC}}}}{\eta_{\text{grid}} \eta_{\text{trans}}} \right) \\ E_{\text{MECM}} = \sum_{t=1}^{24} \left(P_{\text{gas}}(t) + \frac{P_{\text{grid}}(t)}{\eta_{\text{grid}} \eta_{\text{trans}}} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: η 为一次能源节约率; E_{SP} 和 E_{MECM} 分别为分供联网系统和多能联供系统的一次能源使用量(本文分供联网系统指燃气锅炉、电制冷机以及配电网单独供能, 不考虑储能); η_{grid} 和 η_{trans} 分别为电网平均产电效率和电能输送效率。

3.1.3 约束条件

1) 能量平衡约束

能量平衡约束即为基于能量枢纽的能量平衡方

程, 如式(4)所示。

2) 分配系数约束

$$\begin{cases} 0 \leq v(t) \leq 1 \\ 0 \leq w(t) \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

3) 设备配置数量约束

$$0 \leq n_i \leq N_{\text{max}} \quad (8)$$

式中: N_{max} 的取值需考虑系统实际需求, 本文以在负荷最大值下设备容量不冗余为目标确定该值。

4) 新能源渗透率约束

$$\frac{P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t)}{L_{\text{e}}(t) + \frac{P_{\text{EC}}(t)}{R_{\text{COP}}^{\text{EC}}} + \max(0, P_{\text{BSE}}(t))} \leq 0.3 \quad (9)$$

5) 设备出力约束

$$P_{i,\text{min}} \leq P_i(t) \leq P_{i,\text{max}} \quad (10)$$

式中: $P_i(t)$ 为设备 i 出力, 其中 i 表示燃气轮机、风机、光伏电池、余热锅炉、溴化锂吸收式制冷机、电制冷机、燃气锅炉。

6) 爬坡率约束

增出力时:

$$P_i(t) - P_i(t-1) \leq R_{\text{up},i} \quad (11)$$

减出力时:

$$P_i(t-1) - P_i(t) \leq R_{\text{down},i} \quad (12)$$

式中: $R_{\text{up},i}$ 为设备 i 的向上爬坡约束值; $R_{\text{down},i}$ 为设备 i 的向下爬坡约束值; 设备 i 表示电网、燃气轮机和燃气锅炉。

7) 储电/能设备约束

储电/能设备约束包括出力约束、荷电状态约束以及初末状态平衡约束, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{D,max}} \leq P_i(t) \leq P_{\text{C,max}} \\ S_{\text{min}} \leq S_i(t) \leq S_{\text{max}} \\ W_i^0 = W_i^{24} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{D,max}}$ 和 $P_{\text{C,max}}$ 分别为充、放电/能功率限制; $S_i(t)$ 为荷电/能系数; S_{max} 和 S_{min} 分别为最大和最小荷电/能系数; W_i^t 为 t 时刻设备 i 的储电/能量, 其中 i 表示储能电池、储热设备和储冷设备。

8) 配电网联络线功率约束

$$|P_{\text{grid}}(t)| \leq P_{\text{grid}}^{\text{max}} \quad (14)$$

式中: $P_{\text{grid}}^{\text{max}}$ 为配电网联络线传输容量限制。

3.2 模型求解算法

本文所求模型上层为混合整数非线性规划模型, 采用遗传算法求解, 下层为非线性模型, 采用考虑极值变异的混合粒子群算法求解。模型上层结合下层优化结果解决设备配置台数优化问题, 下层基于上层配置方案解决多典型日场景下的运行优化问题, 具体求解流程可见附录 A 图 A2。

4 算例仿真与分析

4.1 风光出力场景生成

选取某园区所在区域 2016 年全年并网风电和光伏出力数据(每小时一个点)为样本,将其标么化后采用本文提出的场景生成方法得到 10 000 组考虑风光相关性的典型日风光出力标么化数据;考虑一年可分为冬季、夏季和过渡季 3 个典型季节,并兼顾计算速度和精度,将 10 000 组数据聚类为 6 个典型日风光出力场景。历史风光出力数据以及生成的各场景出力曲线如图 3 所示,各场景出现概率在图例中括号内标出,出力均为标么值。

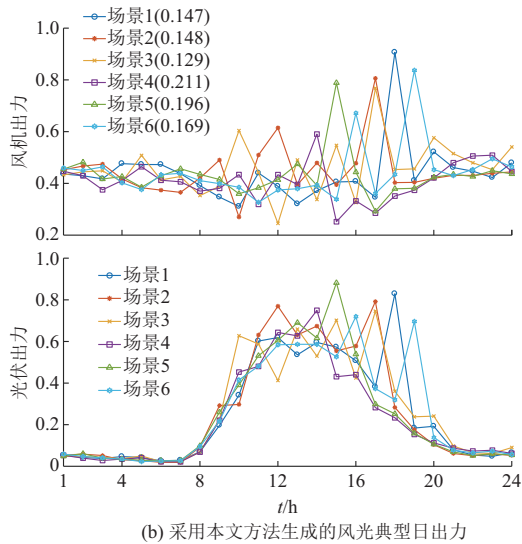
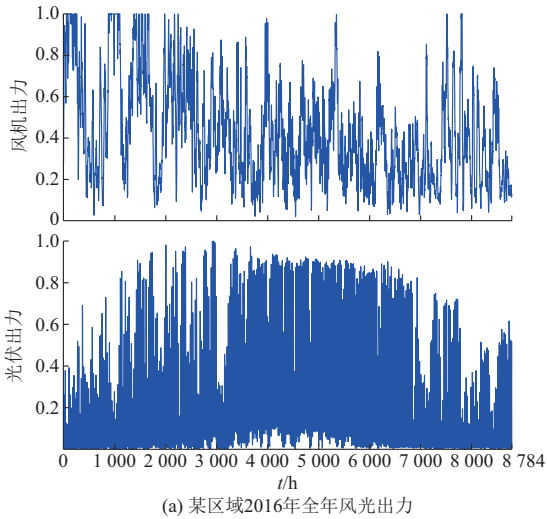


图3 历史数据及场景生成结果

Fig.3 Historical data and scenario generation results

从风光相关性角度看,各个场景中风光出力在部分区段变化趋势一致或相反,具有一定的相关性;各个场景彼此间差异显著,呈现明显的季节性特点。场景 1 与场景 6 日落时间较晚,且风速水平相对较

高,具有夏季特性;从出现概率上看,其他 4 个场景区分较为明确,场景 4 和 5 为过渡季,场景 2 和 3 为冬季,而从季节特性上看四者区分不明显,这与该区域的气候特性相关。总之,场景生成结果能够较好地模拟规划对象所在区域的风光随机性和相关性,有利于系统整体规划,提高系统经济性、环保性和可靠性。

4.2 算例数据及优化结果

以该区域某园区为研究对象进行分析,园区典型日电、热、冷负荷数据以及电网峰谷分时电价数据见附录 A 图 A3。图中,以每项数据的最大值为基准值,取该项标么值;电负荷最大值为 984.5 kW,热负荷最大值为 455.49 kW,冷负荷最大值为 2 030.5 kW,电价峰值为 0.977 元/(kW·h)。

结合生成的风光典型场景数据以及附录 A 图 A3 中的负荷及电价数据,采用本文提出的多能互补系统双层规划模型对系统设备配置进行优化。算例中所配置设备的详细参数见附录 A 表 A1。

为了说明多能互补微网系统优化配置结果的有效性,本文选取分供系统的配置方案和离网的多能互补微网系统的优化配置方案进行比较分析,计算结果如表 1 所示。可以看出,与分供系统相比,联网的多能互补系统年运行成本降低 237.2 万元,减少 20.45%,很大程度上提高了系统运行的经济性;一次能源节约率方面,联网的多能互补系统在 6 个场景下一次能源节约率如附录 A 表 A2 所示,平均一次能源节约率为 11.68%,能够有效节约一次能源,并减少环境污染。

表 1 多能互补微网系统优化配置结果及分供系统配置
Table 1 Configuration results of MECM and separate production system

设备	配置结果/台		
	多能互补微网系统	多能互补微网系统(离网)	分供系统
燃气轮机	2	4	
风机	5	6	
光伏电池	4	3	
余热锅炉	3	5	
溴化锂吸收式制冷机	7	9	
电制冷机	10	8	11
燃气锅炉	1	1	4
储能电池设备	2	3	
储热设备	1	3	
储冷设备	4	3	
年化总成本/万元	922.8	931.1	1 160.0

对比离网与联网情况下的配置方案可知,离网的多能互补微网系统的燃气轮机配置台数增加 2 台以满足系统的负荷需求,同时与其相配合的余热锅

炉、吸收式制冷机的配置台数也有所增加,从而可以有效利用燃气轮机烟气中的热能,由附录 A 表 A2 可知其一次能源节约率相对较高,平均一次能源节约率为 12.33%。增多的燃气轮机减轻了电制冷机的冷负荷供给负担,因此电制冷机台数减少。配置方案的改变导致离网情况下的设备年化投资增加 41.9 万元,然而由于天然气价格相对较低,因此系统的年耗能成本减少,所以其年化总成本与联网情况下相近。

4.3 双层优化配置模型验证

为验证本文模型的有效性和优越性,与单层优化配置模型进行对比。对比采用的单层优化配置模型以年化总成本为目标函数,决策变量为系统各设备出力,根据优化出力结果确定各设备的台数或容量。算例选取单场景下的单/双层优化模型配置结果以及多场景下的单/双层优化模型配置结果进行比较分析,配置结果如附录 A 表 A3 所示。

由附录 A 表 A3 可知,在单场景下,单层优化模型得到的优化配置结果与双层优化模型相比,年化总成本略低,经济性稍优;但由于双层模型下层以一次能源节约率最高为目标对配置方案进行运行优化,其得到的配置结果的一次能源节约率更高。由表 1 的双层模型优化配置结果和附录 A 表 A3 可

知,在多场景下,单层优化模型以 6 个场景的各设备出力为决策变量对 6 个场景并行优化,其优化结果与 4.2 节的双层模型相比,年化总成本相差不大,一次能源节约率仍相对较低,这是由于在多场景并行运行优化下,单层优化模型仅以经济性为目标,忽略了多能系统一次能源节约能力。

由此可知,本文提出的多能互补微网系统双层优化模型能够兼顾系统经济性和节能性,并且适用于多场景下的优化规划问题,提高了优化结果的鲁棒性。

在验证本文模型配置结果的经济性和节能性之外,仍需要考虑配置方案在运行阶段的设备利用率以进一步验证模型的合理性,因此本文针对多场景下的双层和单层优化方案,选取供电/能设备的年利用小时数以及储电/能设备的最大充放电/能率(即充放电/能功率占设备充放电/能功率限制的比例)对多能系统的各设备容量利用率进行评价,评价结果取 6 个场景下的加权平均值,如表 2 所示。由于单/双层优化模型采用的风光出力场景相同,因此不再列出风机和光伏设备相同的年利用小时数。由评价结果可知,总体上双层优化配置结果在运行阶段的设备利用率更高,进一步证明了所建立模型的合理性。

表 2 配置设备的利用率评价
Table 2 Utilization rate assessment of configured devices

优化模型	年利用小时数/h					最大充放电/能率		
	燃气轮机	余热锅炉	溴化锂吸收式制冷机	电制冷机	燃气锅炉	储能电池设备	储热设备	储冷设备
单层	3 160	2 820	1 640	5 150	1 600	0.996	0.854	0.932
双层	4 540	4 500	1 010	5 460	1 040	0.914	0.948	0.923

4.4 多能互补系统配置结果的影响分析

1) 风光渗透率约束对配置结果的影响

风光渗透率是影响多能互补系统一次能源节约率的重要因素,同时风机和光伏电池组投资较大,因此系统的总成本会受到一定的影响,因此需要研究渗透率约束对多能互补系统配置结果的影响。

控制风光渗透率约束在 0 到 1 之间变化(变化间隔为 0.1),年化总成本和一次能源节约率变化趋势如图 4(a)所示(各配置结果的最大风光渗透率在年化总成本曲线旁标出)。随着渗透率约束的增大,在 0~0.4 时,风机与光伏电池组配置台数逐渐增大,渗透率提高,同时储电设备配置台数也有所增加,这是由于新能源渗透率的增大给系统带来了消纳困难,储电设备增加从而帮助系统消纳过多的新能源,提高系统一次能源节约率;同时,可以看出系统的年化总成本逐渐减小,这是由于新能源渗透率的提高减少了系统的外部能源需求,以此带来的收

益大于风机和光伏电池组以及储电设备的投资费用。当渗透率约束大于 0.5 后,系统的年化总成本和一次能源节约率变化较小,这是由于如果配置更多新能源设备时,系统对储电和储能设备的需求更大,从而导致系统新增的投资费用大于新能源设备带来的收益,因此在高风光渗透率约束下,多能系统优化配置的风机和光伏电池组台数不再增加,配置方案变化不大。

2) 天然气价格对配置结果的影响

在上述的多能互补系统中,天然气价格关系到 CCHP 系统的生产成本,从而影响整个系统的年化总成本。随着天然气需求的变化,必须考虑天然气价格的波动对多能互补系统的优化配置的影响。控制天然气价格在本文选取价格的 0.5~1.5 倍之间变化(变化间隔为 0.1),年运行成本和一次能源节约率的变化如图 4(b)所示。

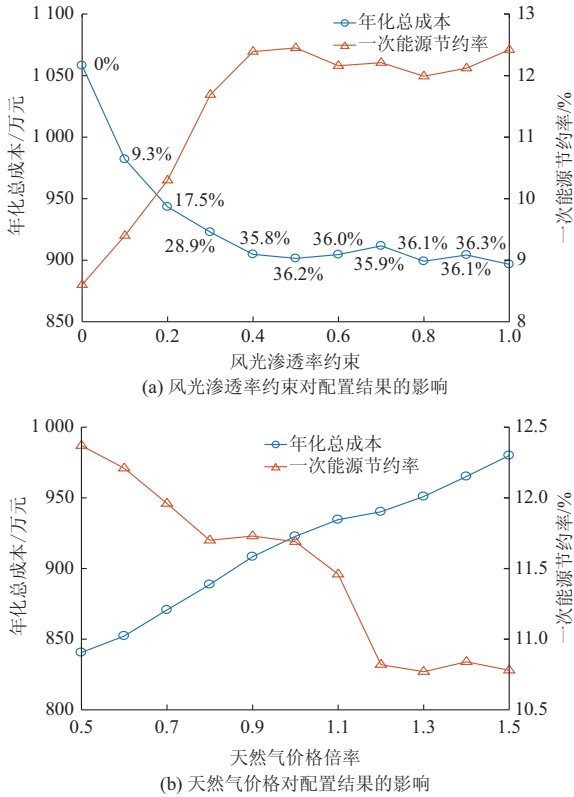


图4 多能互补系统配置结果的影响分析
Fig.4 Analysis on effects of allocation results of multi-energy complementary system

由图 4(b)可以看出,随着天然气价格倍率的变化,多能互补系统的年化总成本逐渐增大。倍率在 0.8~1.1 之间时,燃气轮机配置两台,随着天然气价格提高,年化总成本提高;上层配置方案变化不大,系统的一次能源节约率的变化也较小。与上述状态相比,倍率减小至 0.6~0.7 时,燃气轮机配置 3 台,同时与其匹配的 CCHP 系统中其他设备的台数也有所增加,下层增大燃气轮机出力以得到更大的一次能源节约率,新增投资费用小于能源价格下降带来的收益,系统年化总成本降低;倍率为 0.5 时,燃气轮机再增加了一台,具体原因与上述相似。当天然气价格倍率较高,即倍率在 1.2~1.5 之间时,与正常天然气价格情况下相比,燃气轮机台数减少,天然气使用量降低,但由于配电网联络线容量有限,燃气轮机台数至少保留一台;具有高效率的燃气轮机出力减少,导致系统的一次能源节约率也有一定程度的降低。

5 结论

本文基于核密度估计法和 Copula 理论构建了风机和光伏典型日出力场景生成方法,并基于双层规划理论建立了规划与运行紧密结合的多能互补微网系统整体规划模型,结论如下。

1) 本文研究所提出的基于历史数据的风光出力场景生成方法能够较好地描述风光出力随机性和相关性,在配置阶段对其进行合理应用有利于提高多能系统的经济性和环保性。

2) 文中提出的基于能量枢纽的多能互补系统双层优化配置模型,能够给出结构完善的多能互补系统优化配置方案,有效地降低多能系统年化总成本,减少一次能源使用量,提高设备利用率,兼顾多能系统的经济性和环境友好性。

3) 多能互补微网系统中,新能源渗透率在合理范围内变化时,其增大有利于系统的经济性和环保性;但当渗透率过高时,投资过大的储电/能设备反而不利于系统的经济性;对此,本文模型可在给定渗透率约束下,获得兼顾经济性与环保性的配置方案;此外,该模型还可以积极响应能源价格变动,获得合理的系统优化配置方案。

本文的研究成果可为多能互补微网系统规划提供一定的理论支持,但模型仅对单个综合用能系统进行优化配置,未考虑区域内互联的多个综合用能系统联合优化问题,因此,能源互联网背景下的区域综合能源系统规划问题将是今后研究的重点。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光.能源互联网:理念、架构与前沿展望[J].电力系统自动化,2015,39(19):1-8. DOI: 10.7500/AEPS20150701007.
- [2] SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy Internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20150701007.
- [3] ZHENG C Y, WU J Y, ZHAI X Q. A novel operation strategy for CCHP systems based on minimum distance [J]. Applied Energy, 2014, 128: 325-335.
- [4] 曾鸣,韩旭,李冉,等.能源互联微网系统供需双侧多能协同优化策略及其求解算法[J].电网技术,2017,41(2):409-417.
- [5] ZENG Ming, HAN Xu, LI Ran, et al. Multi-energy synergistic optimization strategy of micro energy internet with supply and demand sides considered and its algorithm utilized [J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 409-417.
- [6] 施锦月,许健,曾博,等.基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行[J].电网技术,2016,40(10):2959-2966.
- [7] SHI Jinyue, XU Jian, ZENG Bo, et al. A bi-level optimal operation for energy hub based on regulating heart-to-electric ratio mode [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2959-2966.
- [8] 杨艳红,裴玮,屈慧,等.基于广义 Benders 分解的分布式热电联供机组规划方法[J].电力系统自动化,2014,38(12):27-33. DOI: 10.7500/AEPS20130802001.
- [9] YANG Yanhong, PEI Wei, QU Hui, et al. A planning method

- of distributed combined heat and power generator based on generalized Benders decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(12): 27-33. DOI: 10.7500/AEPS20130802001.
- [6] CHANG Liuchen, WENG Gongyu, HU Jie, et al. Operation and configuration optimization of a CCHP system for general building load[C]// IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), May 22-26, 2016, Hefei, China: 1799-1805.
- [7] 王珺, 顾伟, 陆帅, 等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 17-24. DOI: 10.7500/AEPS20160426010.
- WANG Jun, GU Wei, LU Shuai, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 17-24. DOI: 10.7500/AEPS20160426010.
- [8] JU Liwei, TAN Zhongfu, LI Huanhuan, et al. Multi-objective operation optimization and evaluation model for CCHP and renewable energy based hybrid energy system driven by distributed energy resources in China[J]. Energy, 2016, 111: 322-340.
- [9] 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. DOI: 10.7500/AEPS20160610002.
- 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. DOI: 10.7500/AEPS20160610002.
- [10] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 22-27.
- WANG Rui, GU Wei, WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 22-27.
- [11] 胡荣, 马杰, 李振坤, 等. 分布式冷热电联供系统优化配置与适用性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 418-425.
- HU Rong, MA Jie, LI Zhenkun, et al. Optimal allocation and applicability analysis of distributed combined cooling-heating-power system[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 418-425.
- [12] LU Yuehong, WANG Shengwei, SHAN Kui. Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings [J]. Applied Energy, 2015, 155: 463-477.
- [13] 黄红程, 顾洁, 方陈. 基于无向生成树的并行遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 89-96. DOI: 10.7500/AEPS20140517002.
- HUANG Hongcheng, GU Jie, FANG Chen. Application of undirected spanning tree-based parallel genetic algorithm in distributed network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 89-96. DOI: 10.7500/AEPS20140517002.
- [14] 李贇, 黄兴华. 冷热电三联供系统配置与运行策略的优化[J]. 动力工程, 2006, 26(6): 894-898.
- LI Yun, HUANG Xinghua. Integrated optimization of scheme and operation strategy for CCHP system[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(6): 894-898.
- [15] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 26-33.
- WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33.
- [16] 洪博文. 微网调度优化模型与方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- HONG Bowen. Research on dispatch model and method of microgrid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [17] 廖名洋. 含 CCHP 的微网经济运行优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- LIAO Mingyang. Research on optimization of economic operation of microgrid with CCHP [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [18] PAZOUKI S, HAGHIFAM M R, OLAMAEI J. Economical scheduling of multi carrier energy systems integrating renewable, energy storage and demand response under energy hub approach[C]// Smart Grid Conference (SGC), December 17-18, 2013, Tehran, Iran: 80-84.
- [19] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
- WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [20] 郝然, 艾芊, 朱宇超, 等. 基于能源集线器的区域综合能源系统分层优化调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 171-178.
- HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 171-178.
- [21] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关 SOP 规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1889-1897.
- WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Optimal configuration of soft open point for active distribution network considering the characteristics of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1889-1897.
- [22] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电电网的电力系统运行灵活性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1672-1678.
- LI Haibo, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Assessment on operational flexibility of power grid with grid-connected large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1672-1678.
- [23] 赵继超, 袁越, 傅质馨, 等. 基于 Copula 理论的风光互补发电系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 124-129.
- ZHAO Jichao, YUAN Yue, FU Zhixin, et al. Reliability assessment of wind-PV hybrid generation system based on Copula theory [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 124-129.

白凯峰(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统优化规划. E-mail: bkf123@sjtu.edu.cn

顾洁(1971—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究

方向:电力市场及电力系统优化规划。E-mail: gujie@sju.edu.cn

市场及电力系统优化规划。E-mail: phq382316206@sju.edu.cn

彭虹桥(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力

(编辑 蔡静雯)

Optimal Allocation for Multi-energy Complementary Microgrid Based on Scenario Generation of Wind Power and Photovoltaic Output

BAI Kaifeng¹, GU Jie¹, PENG Hongqiao¹, ZHU Binruo²

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Research Center for Big Data Engineering and Technologies, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Corporation, Shanghai 200437, China)

Abstract: The structure and coupling relationships between devices in the multi-energy complementary system are complex. In order to improve the energy efficiency and operation benefit of the system with high penetration of renewable energy, this paper studies the optimal allocation of the multi-energy complementary microgrid (MECM) considering the uncertainty and relativity between wind power and photovoltaic outputs. Considering the randomness and relativity of the renewable energy during the planning stage, a scenario generation method of wind power and photovoltaic output based on the kernel density estimation and Copula theory is proposed, and the wind power and photovoltaic output sequences on the typical days are obtained. Besides, the multi-energy flow balance equations of the MECM with wind power and photovoltaic with complete structures are established based on the energy hub. Then, by combining the configuration and operation, this paper establishes a bi-level optimal allocation model of MECM for the purpose of acquiring the lowest total annual cost and the highest primary energy saving ratio. The intelligent optimization algorithms are applied to solve this optimal model. The simulation example and sensitivity analysis show that the proposed method is able to obtain the optimal allocation of MECM with complete structure based on the consideration of the uncertainty of wind power and photovoltaic output. Meanwhile, the proposed method can also effectively reduce the total cost of the system and improve the primary energy saving ratio.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900100) and State Grid Corporation of China.

Key words: multi-energy complementarity; energy hub; uncertainty; relativity; scenario generation; bi-level programming