

DOI: 10.7667/PSPC160433

基于电热系统联合规划的城市商住混合区能源站优化配置

贾晨¹, 吴聪², 张超¹, 周静¹, 刘公博¹, 白牧可², 蔡永翔², 唐巍², 孙辰军³

(1. 南瑞集团公司北京电研华源电力技术有限公司, 北京 102200; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 3. 国家电网河北省电力公司, 河北 石家庄 050021)

摘要: 针对城市能源需求日益增大、分布式光伏发电具有不确定性、商住混合区供热供电独立规划导致能源综合效率不高的问题, 基于电热系统联合规划研究城市商住混合区能源站优化配置。首先, 考虑光伏出力的不确定性, 建立了典型日各时段光伏出力的多状态模型。其次, 分别以一定置信度下的年费用和运行费用最小作为上、下层目标函数, 提出了嵌入机会约束规划的城市商住混合区能源站接入区域电网、热网的二层规划模型。该模型基于电-热网络综合潮流, 考虑了可控分布式综合能源单元的优化调度, 因而仿真模拟更符合系统的实际运行, 结果更准确。最后, 采用分段二进制编码和精英保留策略遗传算法对所提出模型进行求解。北方某城市商住混合区算例结果表明: 与电热分产相比, 区域电-热系统联合规划能够有效地减少运行费用和污染物排放; 随着系统供能可靠性的提升其经济性将有所下降, 所以规划时应结合成本增加灵敏度和系统实际要求来权衡经济性和可靠性。

关键词: 多状态模型; 能源站; 城市商住混合区; 电热系统联合规划; 机会约束规划

Optimum configuration of energy station in urban hybrid area of commerce and residence based on integrated planning of electricity and heat system

JIA Chen¹, WU Cong², ZHANG Chao¹, ZHOU Jing¹, LIU Gongbo¹, BAI Muke², CAI Yongxiang², TANG Wei², SUN Chenjun³
(1. Beijing Dianyuan Huayuan Electric Power Technology Co., Ltd., NARI Group, Beijing 102200, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Science and Technology Communication Department, State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: To address the problems of increasing uncertainty caused by distributed generation and lower efficiency of energy system planned separately in urban hybrid area of commerce and residence, the optimum configuration of energy stations in urban hybrid area of commerce and residence is studied based on the integrated planning of electrical and heat system. First, the multi-state models of photovoltaic during each period in typical days are built. Then, the bi-level programming model of the new-built energy stations in electrical and heat network near consumers is presented, whose upper and lower objectives are the minimum of the annual and operating costs separately under some confidence level based on chance constrained programming. Optimum dispatch of the controlled distributed energy unit is also considered based on the electrical and heat power flow, which conforms to the real operation of the system, thus the final calculation is more accurate. Last, the elitist strategy genetic algorithm based on segmented chromosome coding is applied to solve the proposed model. The simulation results indicate that the integrated planning contributes to a lower operating cost and less emission of pollutants, also higher reliability of system brings about the decreasing economy, thus both the sensitivity of capital's improvement and the real requirements of system should be considered to keep a balance between the economy and reliability.

This work is supported by "Research on Key Technology of the User-side Micro Energy Grid Power Unit and Energy Network Planning" of Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52467K150007).

Key words: multi-state model; energy station; urban hybrid area of commerce and residence; integrated planning of electricity and heat system; chance constrained programming

0 引言

随着全球环境、能源形势愈发严峻, 建立在化

石能源基础上的电力工业面临重大挑战。通过电/气/热多种能源系统的一体化规划设计和运行优化, 构建由分布式终端综合能源单元和与之相耦合的集中式能源供应网络构成的区域综合能源系统, 是社会发展的必然选择^[1-2]。基于天然气的分布式热电联产系统(Combined Heat and Power, CHP)是当前国内

基金项目: 国家电网公司科技项目“用户侧微能网能源站和能源网络规划关键技术研究”(52467K150007)

外分布式能源的主要形式,在负荷密度高、土地节约集约利用的城市办公区、住宅区和商业区等功能区得到广泛应用。商住混合区集商娱、服务和居住等于一体,是城市中最常见的社区类型,其普遍邻近或处于市中心,用地紧张,全年对电能和热能有较高的需求。在传统规划中,电力和热力系统单独规划和运行,彼此缺乏协调、优化和配合,不利于供能系统的经济、高效运行。当对商住混合区的电/热供能系统进行联合规划时,CHP作为电/气/热系统的耦合单元,其接入系统的位置和容量显得尤为重要。此外,随着风机、光伏等可再生能源的大量接入,其出力的随机性、波动性和间歇性使得电力系统面临的不确定性急剧增加,成为影响区域供能系统安全可靠、经济高效、节能环保运行的主要因素。

针对天然气分布式热电联产系统的规划与运行,国内外学者进行了大量研究^[3-11]。文献[7]以最小年投资和运行费用最低为目标,对城市某商住混合区进行分布式能源系统的设备选型和容量配置,采用混合正数线性规划方法进行求解。文献[9]建立了计及制热收益的微网系统的经济运行优化模型,在保证敏感负荷供电可靠性的基础上,运用改进遗传算法优化一天内各微源各时段的有功和无功出力。文献[10]提出一种冷热电联供系统的三级协同整体优化方法,分别以一次能源利用率最高、年CO₂排放量最少、年运行成本最低为目标,采用粒子群算法确定设备的选型、容量及最优运行参数。综合分析研究现状,这些模型多采用数学优化技术(线性规划、混合整数线性规划、混合整数非线性规划、随机优化、遗传算法、粒子群优化、多目标优化),以3E(Energy, Environment and Economic)效益最高进行经济评估,即最大节能率、最小温室气体排放量、最小运行维护费用,鲜有文章考虑CHP系统的耦合作用,对区域电热系统进行联合规划,在此基础上兼顾光伏出力不确定性的研究更是少有。

本文基于电热系统联合规划,重点关注由CHP和光伏(Photovoltaic, PV)组成的城市商住混合区能源站接入区域电热网络的优化配置。建立分时段多状态模型,基于机会约束规划考虑光伏出力的不确定性,采用二层规划确定能源站的接入位置与容量,并基于电热网络综合潮流,实现分布式能源电、热出力的优化调度。

1 分布式能源出力的数学模型

不可控分布式能源的出力具有不确定性,其功率水平将呈现多个不同的状态,以微燃机为核心的

热电联产系统,加强了电网与热网的耦合,故在规划中需对各分布式能源的出力模型进行研究。

1.1 光伏出力的多状态模型

本文利用密度聚类方法对光伏发电时序数据进行处理,生成不同季节各时段光伏状态,对3年数据进行处理,一年的供暖季与非供暖季各选一个代表日,每个代表日分为24个时段。某一个季节代表日各时段光伏状态的生成方法如下:

1) 数据生成。统计该季节各小时的光照强度,每个小时的数据为一个样本点,用一维数组表示。

2) 状态聚类。将该季节所有天第*i*时段数组进行标记,采用密度聚类DBSCAN算法^[12]进行聚类,获得各时段聚类数为 $N_i (i=1,2,\dots,24)$ 。

3) 状态合并。将第*i*时段状态数取为 N_i ,第*j*类样本数为 M_j ,第*j*类第*k*个样本为 $x_{ijk} (k=1,2,\dots,M_j, j=1,2,\dots,N_i, i=1,2,\dots,24)$,第*i*时段第*j*类样本中心点为 X_{ij} ,则

$$X_{ij} = \frac{1}{M_j} \sum_{k=1}^{M_j} x_{ijk} \quad (1)$$

将第*i*时段属于第*j*类的全部 M_j 个样本状态合并成一个状态 X_{ij} ,第*i*时段状态 X_{ij} 出现的概率 $P(X_{ij})$ 为

$$P(X_{ij}) = \frac{M_j}{\sum_{l=1}^{N_i} M_l} \quad (2)$$

4) 重复以上步骤,获得一天各小时对应的综合状态及概率,作为该季节代表日数据。

1.2 微型燃气轮机模型

忽略外界环境变化对发电、燃料燃烧效率的影响,微燃机(Micro-turbine, MT)的热电出力表示为

$$\begin{cases} Q^{\text{MT}}(t) = P_e^{\text{MT}}(t)[1 - \eta_c(t) - \eta_1]/\eta_e(t) \\ Q_{\text{he}}(t) = Q^{\text{MT}}(t)\eta_{\text{he}}K_h \\ F_{\text{MT}}(t) = (\sum P_e^{\text{MT}}(t)\Delta t)/(\eta_e(t)L) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $Q^{\text{MT}}(t)$, $P_e^{\text{MT}}(t)$, $\eta_e(t)$ 分别为*t*时段微燃机的排气余热、电功率和电效率; η_1 为散热系数; $Q_{\text{he}}(t)$ 为*t*时段溴冷机制热量; η_{he} , K_h 分别为溴冷机的烟气回收率和制热系数; $F_{\text{MT}}(t)$ 为*t*时段燃气消耗量; Δt 为微燃机运行的单位时间,本文取1h; L 为天然气的低热值,常取9.73 kWh/m³。

*t*时段微燃机燃料成本 $C_{\text{MT}}^f(t)$ 为

$$C_{\text{MT}}^f(t) = c_{\text{gas}} \frac{P_e^{\text{MT}}(t)\Delta t}{\eta_e(t)L} \quad (4)$$

式中, c_{gas} 为天然气的价格。

1.3 燃气锅炉模型

燃气锅炉(Gas Boiler, GB)的出力与自身输出特性及负荷情况相关,其制热表达式如式(5)。

$$Q^B(t) = \eta_B F_B(t) \quad (5)$$

式中: $Q^B(t)$ 表示 t 时段燃气锅炉的输出热量; $F_B(t)$ 表示 t 时段输入燃气锅炉的燃料量; η_B 表示燃气锅炉的制热效率,燃料成本计算同式(4)。

本文将每小时光伏出力分为 5 种状态,因此一天内区域综合能源系统的最大状态数为 120。

2 基于二层规划的城市商住混合区能源站的优化配置模型

2.1 总体思路

随着风、光等可再生能源的大量接入,功率波动和电压越限等问题突出,通过对可控产能单元的优化调度,可以降低可再生能源接入的不利影响,以保证安全可靠运行,同时还可以提升区域能源系统的经济性。因此,在规划问题中考虑系统运行条件可以获得更为符合实际的能源系统运行指标。

由于二层规划^[13]可以同时考虑能源站配置和运行调度,因此本文基于二层规划建立城市商住混合区能源站优化配置模型。上层规划为能源站投资决策问题,规划目标是一定置信度下的年费用最小,决策变量是能源站接入网络的位置与容量;下层规划为能源站的运行优化问题,规划目标是一定置信度下的年运行费用最小,已知量包括分布式能源的接入容量和位置,以及光伏在各时段的出力多状态及相应的概率,决策变量为微燃机 24 h 的有功出力^[14]。

本文采用机会约束规划的方法处理 PV 出力不确定性,因此二层规划模型的上下层目标函数和约束条件均以机会约形式体现^[15]。在下层规划中,基于 PV 各时刻的多状态和相应的概率,根据该层的目标和约束,分别确定每个时刻符合要求的某一状态,然后将该状态对应的运行参数返回上层规划。

2.2 目标函数

1) 上层规划的目标函数为

$$\min F_{\text{up}} \quad (6)$$

其满足概率约束如式(7)、式(8)。

$$\sum_{i=1}^{\xi_{\max}} P\{f(X_1, \xi_i) \leq F_{\text{up}}\} \geq \alpha \quad (7)$$

$$f(X_1, \xi_i) = C_C + C_M + C_E + C_O \quad (8)$$

式中: X_1 为决策变量,即分布式能源接入位置及容量; ξ_i 为综合能源系统中的第 i 个状态量; ξ_{\max} 为系统最大状态数; $f(X_1, \xi_i)$ 为在状态 ξ 下系统的年费用最小值; α 为目标函数的置信水平; F_{up} 为

$f(X, \xi)$ 在概率水平至少为 α 时所取的最小值。

(1) 设备的投资费用 C_C

$$C_C = r_1 \sum_{h=1}^{N_{\text{MT}}} w^{\text{MT}} R_h^{\text{MT}} + r_2 \sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} w^{\text{PV}} R_i^{\text{PV}} \quad (9)$$

式中: N_{MT} , N_{PV} 分别为微燃机、光伏的安装总数; w^{MT} , w^{PV} 分别为微燃机、光伏单位容量的投资成本; R_h^{MT} 为第 h 个候选位置的微燃机安装容量; R_i^{PV} 为第 i 个位置的光伏容量; r_1 , r_2 分别为微燃机和光伏的贴现率。

(2) 系统的维护费 C_M

$$C_M = m_{\text{MT}} R^{\text{MT}} + m_{\text{PV}} R^{\text{PV}} + m_B R^B \quad (10)$$

式中: m_{MT} , m_{PV} , m_B 分别为微燃机、光伏和热平衡节点处(即锅炉房)锅炉的单位容量维护费用; R^{MT} , R^{PV} , R^B 分别为微燃机、光伏和锅炉的安装总容量。

(3) 环境成本 C_E

$$C_E = \sum_{k=1}^2 T_k \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^m w_j \sum_{i=1}^q E_{ij} P_i(t) \Delta t \quad (11)$$

式中: w_j 为第 j 种污染物所收罚款; E_{ij} 为第 i 个分布式能源的第 j 种污染物排放量; $P_i(t)$ 为第 i 个分布式能源在 t 时段的出力; T_k 为供暖季或者非供暖季天数; m 为污染物种类; q 为分布式能源的种类。

(4) 运行费用 C_O

$$C_O = C_F + C_G \quad (12)$$

式中, C_F , C_G 分别为燃料费用、系统与主网交互的电量费用。

2) 下层规划的目标函数为

$$\min F_{\text{down}}$$

其满足概率约束如式(13)、式(14)。

$$\sum_{i=1}^{\xi_{\max}} P\{f(X_2, \xi_i) \leq F_{\text{down}}\} \geq \alpha \quad (13)$$

$$f(X_2, \xi_i) = C_F + C_G \quad (14)$$

式中: X_2 为决策变量,即微燃机 24 h 的电、热出力; $f(X_2, \xi_i)$ 为在状态 ξ 下系统的年费用最小值; α 为目标函数的置信水平; F_{down} 为 $f(X_2, \xi_i)$ 在概率水平至少为 α 时所取的最小值。

(1) 燃料年费用 C_F

$$C_F = \sum_{k=1}^2 T_k \sum_{t=1}^{24} (\sum_{h=1}^{N_{\text{MT}}} C_{\text{MT},h}^f + C_B^f(t)) \quad (15)$$

式中: $C_{\text{MT},h}^f(t)$ 为 t 时段第 h 位置微燃机的燃料成本; $C_B^f(t)$ 为热平衡节点处锅炉的燃料成本。

(2) 与外网交互电量的年费用 C_G

$$C_G = \sum_{k=1}^2 T_k \sum_{t=1}^{24} (c_b P_{b,t} - c_s P_{s,t}) \quad (16)$$

式中: c_b , c_s 分别为向外网的购电价和售电价; $P_{b,t}$, $P_{s,t}$ 分别为第 t 时段向外网的购电量和售电量。

2.3 约束条件

1) 电网约束

(1) 支路功率概率约束

$$P\{P_k(x, \xi) \leq P_k^{\max}\} \geq \beta_p, k \in \Omega_{\text{line}} \quad (17)$$

式中: $P\{\cdot\}$ 表示事件概率; $P_k(x, \xi)$ 为在状态 ξ 下支路 k 的有功功率值; P_k^{\max} 为支路 k 的有功功率允许最大值; β_p 为支路功率的置信水平; Ω_{line} 为系统支路集合。

(2) 节点电压概率约束

$$P\{U_i^{\min} \leq U_i(x, \xi) \leq U_i^{\max}\} \geq \beta_U, i \in \Omega_{\text{node}} \quad (18)$$

式中: $P\{\cdot\}$ 表示事件概率; $U_i(x, \xi)$ 为在状态 ξ 下节点 i 的电压值; U_i^{\max} , U_i^{\min} 分别为节点 i 的电压上、下限; β_U 为节点电压的置信水平; Ω_{node} 为系统节点集合。

(3) 电功率平衡约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_i , Q_i 分别为节点 i 注入的有功功率和无功功率; G_{ij} , B_{ij} , δ_{ij} 分别为节点 i, j 之间的电导、电纳和电压相位差; n 为系统节点总数; U_i , U_j 分别为节点 i, j 的电压幅值。

2) 热网约束

(1) 水力平衡约束

$$\mathbf{A}\dot{\mathbf{m}} = \mathbf{m}_q \quad (20)$$

$$\mathbf{B}\mathbf{h}_f = \mathbf{0} \quad (21)$$

式中: \mathbf{A} 为热网关联矩阵, 其描述了节点与管道的关系; $\dot{\mathbf{m}}$ 为每条管道内的质量流量的向量; \mathbf{m}_q 为注入每个节点的质量流量的向量; \mathbf{B} 为基本回路矩阵, 其描述回路与管道的关系; \mathbf{h}_f 为水头损失向量, 如式(22)所示。

$$\mathbf{h}_f = \mathbf{K}\dot{\mathbf{m}} \quad (22)$$

式中, \mathbf{K} 是每个管道阻力系数的向量, 其很大程度上取决于管道的直径, 可由 Darcy-Weisbach 公式推导出, 故式(21)可表示为

$$\mathbf{BK}\dot{\mathbf{m}} \mid \dot{\mathbf{m}} \mid = \sum_{j=1}^{n_{\text{pipe}}} B_{ij} k_j \dot{m}_j \mid \dot{m}_j \mid = 0 \quad (23)$$

式中: n_{pipe} 为管道条数; B_{ij} 表示第 i 条回路与第 j 条管道的关系。

(2) 热功率平衡约束

$$C_p (\sum \dot{m}_{\text{out}}) T_{\text{out}} = C_p (\sum \dot{m}_{\text{in}}) T_{\text{in}} \quad (24)$$

式中: T_{out} 为节点的混合温度; \dot{m}_{out} 为管道内离开节点的质量流量; T_{in} 为进管末端水流的温度; \dot{m}_{in} 为

管道内进入节点的质量流量; C_p 为水的比热。

3) 其他约束

(1) 微型燃气轮机的出力约束和爬坡率约束

$$P_{\text{MT}}(t) \geq \lambda_{\min} P_r \quad (25)$$

$$\begin{cases} P_{\text{MT}}(t) - P_{\text{MT}}(t-1) \leq R_{\text{up,MT}} \\ P_{\text{MT}}(t-1) - P_{\text{MT}}(t) \leq R_{\text{down,MT}} \end{cases} \quad (26)$$

式中: λ_{\min} , P_r 分别表示燃气轮机的最低负载率和额定功率; $R_{\text{up,MT}}$, $R_{\text{down,MT}}$ 分别为在一个调度时段内微型燃气轮机调整的有功功率上下限。

(2) 燃气锅炉出力约束

$$Q_{\min}^B \leq Q^B \leq Q_{\max}^B \quad (27)$$

式中: Q^B 为燃气锅炉出力; Q_{\min}^B , Q_{\max}^B 分别表示燃气锅炉最小出力和最大出力。

3 基于二层规划的城市商住混合区能源站优化配置模型的求解算法

针对上述二层规划模型, 本文采用精英保留策略遗传算法求解, 为提高编码效率, 上下层遗传染色体均采用混合编码^[15]。

3.1 上层规划编码方式

上层规划的染色体分为三段, 分别表示光伏、风机和燃气轮机的容量和位置, 如图 1 所示。



图 1 上层规划染色体结构

Fig. 1 Chromosome structure of upper level planning

PV_i 采用 3 位二进制编码, 000 表示在候选位置 i 不安装光伏, 001 表示在候选位置 i 安装 55 kW 的光伏, 由此可见, 每个位置最多安装 385 kW; MT_k 采用 2 位二进制编码, 001 表示在候选位置 k 安装 200 kW 的燃气轮机, 因此, 每个位置最大安装容量为 600 kW; p, m 分别表示光伏和燃气轮机候选位置的个数。

3.2 下层规划编码方式

下层规划的染色体分为 n 段, n 表示 p 个候选位置中有 n 个位置安装了燃气轮机 ($n \leq p$)。

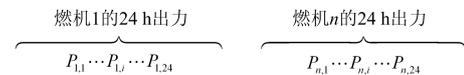


图 2 下层规划染色体结构

Fig. 2 Chromosome structure of lower level planning

$P_{1,i}$ 采用 3 位二进制编码, 000 表示第 l 个位置的微燃机在 i 时段不出力, 001 表示燃气机的出力为 $\lambda_{\min} P_r$, 111 表示出力为 P_r , 010 表示出力为

$$p = (P_r - \lambda_{\min} P_r) / 6 + \lambda_{\min} P_r \quad (28)$$

由此可见, 将燃气轮机的出力分为 7 档, 后 6 档的出力均匀增加。值得注意的是, 当燃气轮机的电出力确定时, 其热出力根据式(8)也唯一确定。

3.3 算法流程

Step1: 输入网络的原始数据;

Step2: 根据原始数据分别进行电网潮流和热网潮流计算, 获得初始网络相应数据;

Step3: 按前述方法对两层的决策变量编码;

Step4: 产生上层规划的初始化种群, 令 $t=1$;

Step5: 建立光伏及系统各时段的多状态模型;

Step6: 对 Step4 种群中的每一个体产生下层初始化群体, 依据下层规划模型, 求得其目标函数最优值;

Step7: 将上层初始化群体中每一个体对应的下层规划最优值、各时段燃气轮机和热平衡节点的锅炉出力返回上层, 计算上层规划模型, 并对目标函数进行置信水平检验;

Step8: 进行遗传操作, 选择、交叉、变异, 产生新种群;

Step9: 进行搜索终止条件判断, 若 $t > t_{\max}$, 则计算结束并输出结果, 否则令 $t=t+1$ 并转至步骤 Step5。

4 算例分析

4.1 基本数据

以北方某城市商住混合区为例, 原有电网-热网结构如图 3 所示, 各负荷点类型均为商住混合型。该区域原由燃气锅炉房供热、公用电网供电, 随着电热负荷的增长, 现欲在区域内新建能源站以满足需求, 能源站内的设备有微燃机(热电联产系统)、光伏, 其接入网络的候选电节点分别为 iv, vi, viii, 相应的热节点为 11, 19, 31, 因受建筑物屋顶面积限制, 每个接入点光伏安装容量最大为 400 kW(按 $8 \text{ m}^2/\text{kW}$ 计算)。区域的电负荷最大为 $2600 \text{ kW} + 1499.33 \text{ kvar}$, 热负荷最大为 3214 kW , 热网的供回水温度分别为 70°C 和 30°C , 选取 i 母线、锅炉房分别作为电、热的平衡节点。

本文根据供暖规律, 将一年分为供暖季与非供暖季, 各选一个代表日, 每个代表日分为 24 个时段, 供暖季与非供暖季典型日的热力与电力负荷曲线如图 4、图 5 所示。

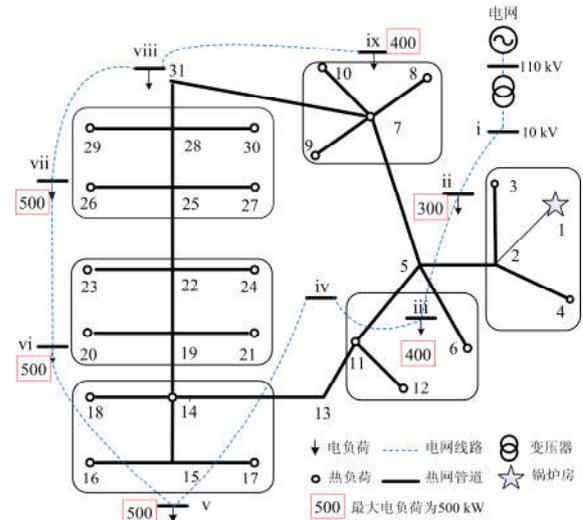


图 3 电网-热网结构图

Fig. 3 Diagram of the electricity and heating networks

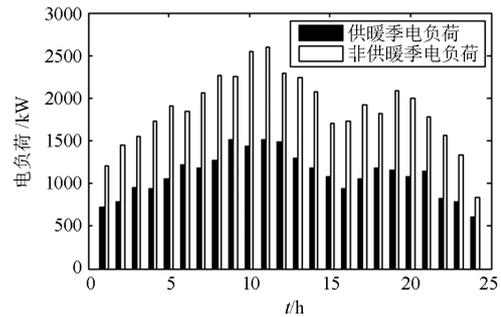


图 4 各季节典型日热负荷

Fig. 4 Hourly heat load of each typical day

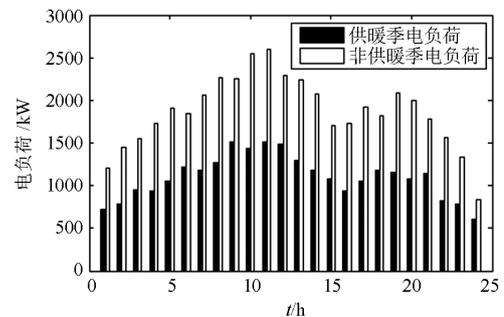


图 5 各季节典型日电负荷

Fig. 5 Hourly electrical load of each typical day

4.2 结果分析

1) 不同情形下的规划结果及比较

现比较以下 3 种情形的规划结果: 情形 1, 该区域原有的供能模式, 即只由主网供电、锅炉房供热; 情形 2, 分布式微燃机(不产热)和光伏接入区域电网和分布式燃气锅炉接入区域热网独立地进行规

划; 情形 3, 电、热系统进行联合规划, 主要通过热电联产(CHP)系统来耦合电网和热网。目标函数、支路功率及节点电压的置信水平均取 0.9 时的规划结果以及 3 种情形下各项费用的比较如表 1 所示。

表 1 规划结果及比较

情形	1	2	3		
候选设备	-	PV MT GB	PV CHP		
容量/ kW	iv-11 vi-19 viii-31	264 358 326	400 200 500	74 158 128	400 600 400
投资	-	163.87	182.14		
项目年 费用/ 万元	运行	715.87	188.05	94.70	
	燃料	659.10	790.77	741.08	
	合计	1374.97	978.82	835.78	
	维护	5.95	23.46	44.43	
	环境	16.26	27.58	17.16	
合计	1397.18	1193.73	1079.51		

(1) 比较情形 2 与情形 1

情形 2 相对于情形 1, 在各候选节点配置了一定容量的分布式能源设备, 即光伏、燃机和锅炉。这些设备的配置主要增加了系统的投资、燃料和维护费用, 但是分布式光伏和微燃机就地为区域供电, 相比情形 1 只由主网供电, 这较大程度上削减了购电费用, 由 715.87 万降至 188.05 万, 从而削减了情形 2 中系统的运行成本, 降低了约 29%, 并最终促使情形 2 中规划年费用的降低。

(2) 比较情形 3 与情形 2

由表 1 可以看出, 情形 3 中以微燃机为核心的热电联产系统安装容量为 1400 kW, 相对于情形 2 中的微燃机容量增加了 1000 kW, 这较大程度上降低了情形 3 中的光伏容量, 并替代了分布式燃气锅炉, 但是由于 CHP 系统的单位容量安装成本较高, 所以情形 3 的投资成本反而增加了 18.27 万元; 因为微燃机的污染物排放强度(主要为氮氧化物和二氧化碳)较燃气锅炉低, 但是维护费用较高, 所以情形 3 较情形 2, 环境效益好, 而维护费用高; 由于光伏出力受光照条件限制, 只能在白天供电, 同时系统内并没有配备储能元件, 所以情形 2 在晚上依靠主网向区域供电, 而情形 3 中微燃机的安装容量大, 且不受自然条件约束, 在晚上依然可以为区域供电, 所以情形 3 与情形 2 相比, 其购电费用显著下降, 接近 50%, 这是情形 3 中规划年费用较低的主要因素。由上述分析可知, 与电热系统分开规划相比, 区域电-热系统联合规划拥有较高的经济和环境效益。

2) 不同置信度下的规划成本比较

三种情形在 5 种不同置信度下的年费用如表 2

和图 6 所示。

表 2 不同置信度下的年费用比较

Table 2 Comparison of the annual cost under different ε

情形	$\varepsilon = 0.75$	$\varepsilon = 0.80$	$\varepsilon = 0.85$	$\varepsilon = 0.90$	$\varepsilon = 0.95$
1	1167.18	1217.18	1297.18	1397.18	1597.18
2	993.73	1053.73	1113.73	1193.73	1403.73
3	929.51	949.51	989.51	1079.51	1309.51

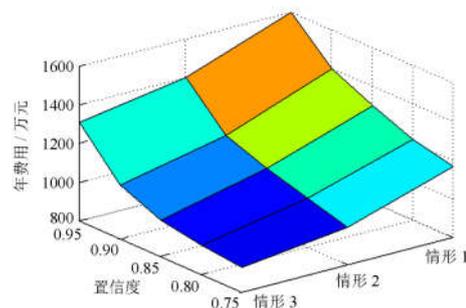


图 6 不同置信度下的年费用比较

Fig. 6 Comparison of the annual cost under different ε

由表 2 和图 6 可得, 当置信水平相同时, 情形 3 的规划年费用低于其他两种情形, 体现了电热系统联合规划方案具有较好的经济性; 当情形固定时, 随着置信度的提升, 规划年费用也逐渐增加, 这说明系统可靠性的提升将带来经济效益的下降, 此外, 当置信水平设置过高时, 规划年费用显著增加, 这是由于为保证高可靠性, 系统必须增加各设备的容量或出力来应付小概率的自然资源随机性, 由此可见, 规划时应在可靠性和经济性之间合理权衡, 确定折中方案。针对情形 3, 当置信水平从 0.9 降到 0.75 时, 其费用下降 150 万; 而当置信水平从 0.9 升至 0.95 时, 其费用急剧增加了 230 万, 所以规划时取置信水平为 0.9 比较合理。

5 结论

本文考虑光伏出力的不确定性、分布式可控能源的优化调度以及电热联供, 提出了基于约束规划和二层规划的城市商住混合区能源站优化配置模型, 并给出了相应的求解算法。算例结果表明:

1) 对于城市商住混合区, 电热系统一体化设计与运行的经济性优于电热系统单独规划, 多种能源系统应融合成一个有机的整体, 协调配合共同为社会提供能源与服务。

2) 随着供能系统可靠性的提升即置信水平的提高, 其经济效益将有所下降, 所以规划时应结合成本增加灵敏度和系统实际要求来权衡经济性和可靠性, 最后确定折中方案。

参考文献

- [1] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [2] 徐飞, 闵勇, 陈磊, 等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5063-5072.
XU Fei, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [3] 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.
- [4] CARLOS R M, JAVIER U M, AMAYA M G, et al. Design optimization of a poly-generation plant fuelled by natural gas and renewable energy sources[J]. Applied Energy, 2011, 88(2): 449-457.
- [5] 刘振国, 胡亚平, 陈炯聪, 等. 基于双层优化的微电网系统规划设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 124-133.
LIU Zhenguo, HU Yaping, CHEN Jiongcong, et al. A planning and design method for microgrid based on two-stage optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 124-133.
- [6] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [7] AKOMENO O, RUCHI C, ADAM B. Distributed energy resource system optimization using mixed integer linear programming[J]. Energy Policy, 2013, 61: 249-266.
- [8] 成思琪, 刘俊勇, 向月, 等. 微网中混储/柴协调运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 42-50.
CHENG Siqi, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. Research on optimal coordinated operation for microgrid with hybrid energy storage and diesel generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 42-50.
- [9] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 基于遗传算法的热电联产型微网经济运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 7-15.
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Genetic algorithm based economic operation optimization of a combined heat and power microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 7-15.
- [10] 赵峰, 张承慧, 孙波, 等. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3785-3793.
ZHAO Feng, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. Three-stage collaborative global optimization design method of combined cooling heating and power[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3785-3793.
- [11] 王进, 李欣然, 杨洪明, 等. 与电力系统协同区域型分布式冷热电联供能源系统集成方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 16-21.
WANG Jin, LI Xinran, YANG Hongming, et al. An integration scheme for DES/CCHP coordinated with power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 16-21.
- [12] 荣秋生, 颜君彪, 郭国强. 基于 DBSCAN 聚类算法的研究与实现[J]. 计算机应用, 2004, 24(4): 45-46, 61.
RONG Qiusheng, YAN Junbiao, GUO Guoqiang. Research and implementation of clustering algorithm based on DBSCAN[J]. Computer Applications, 2004, 24(4): 45-46, 61.
- [13] 郭金明, 李欣然, 邓威, 等. 基于 2 层规划的间歇性分布式电源及无功补偿综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 25-33.
GUO Jinming, LI Xinran, DENG Wei, et al. Comprehensive optimal allocation of intermittent distributed generation and reactive power compensation based on bi-level planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 25-33.
- [14] 张璐, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 含光伏发电的配电网有功无功资源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5525-5533.
ZHANG Lu, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Optimal configuration of active-reactive power sources in distribution network with photovoltaic generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5525-5533.
- [15] 白牧可, 唐巍, 张璐, 等. 基于机会约束规划的 DG 与配电网架多目标协调规划[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 346-354.
BAI Muke, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Multi-objective coordinated planning of distribution network incorporating distributed generation based on chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 346-354.

收稿日期: 2016-03-28; 修回日期: 2016-05-28

作者简介:

贾晨(1990-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统优化规划、微电网; E-mail: jiachen1@sgepri.sgcc.com.cn

吴聪(1993-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为用户侧微型能源系统规划; E-mail: 2458319397@qq.com

张超(1983-), 男, 学士, 工程师, 研究方向为配电自动化、微电网。E-mail: zhangchao5@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)