

基于 p -中位模型的区域综合能源系统能源站优化规划

易文飞¹, 俞永增¹, 张艺伟¹, 李中成², 黄永章¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206; 2. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津市 300010)

摘要: 综合能源系统能够实现能源的优化利用, 有效提高能源使用效率, 缓解环境污染问题。以往对于综合能源系统能源站规划的研究主要集中在设备容量的优化配置方面, 较少对能源站位置及管网络径的优化规划进行分析。研究了考虑电、热供应的区域综合能源系统能源站选址及能源传输管网络径优化布局问题。首先, 根据 p -中位模型建立了能源站选址及管网络径布局的优化规划模型。其次, 考虑能源站、管网设备初始投资及施工费用, 建立了区域综合能源系统投资费用模型。最后, 基于枚举法提出了一种改进求解方法对规划模型进行求解, 并以某园区为实例进行仿真分析, 验证了所提模型及方法的有效性。

关键词: 区域综合能源系统; p -中位模型; 能源站选址; 管网布局

0 引言

随着社会经济的高速发展, 能源需求逐年增加, 能源危机和环境污染的压力越来越大。由于传统化石能源日渐枯竭, 提高能源利用效率、加强可再生能源的综合利用, 成为解决能源需求日益增长和能源紧缺与环境保护之间矛盾的必然选择^[1]。打破原有冷、热、电、气供能系统单独规划和独立运行的模式, 对不同供能系统进行统一协调和优化, 构建一体化的综合能源系统, 是实现提高能源使用效率、促进可再生能源消纳的有效途径^[2-4]。

区域综合能源系统由能源站和能源输送管网组成^[5]。目前, 有关综合能源站优化规划的研究主要集中在基于多能流耦合的综合能源系统设备容量优化配置和能源传输网络优化布局方面。文献[6]以技术指标、经济指标和环境指标为目标函数, 考虑社会因素、市场因素、安全约束等约束条件, 提出了一种综合能源系统规划与运行框架。文献[7-9]考虑经济性和环保性, 研究了综合能源系统能源生产设备及能源存储设备的容量优化配置问题。文献[10]通过某园区规划实例, 结合多场景规划理念, 分析了综合能源站子系统规划及多能互补系统效益等内容。文献[11]研究了基于冷热电联产(CCHP)系统和热网构建的区域综合能源系统规划, 分析了多区域 CCHP 系统容量优化配置的规划问题。

在区域综合能源系统的规划中, 确定能源站的数量、位置及能源传输管网络径布局是保障系统经济效益最优的关键。文献[12]考虑系统运行成本和设备投资成本, 建立了电能、热能传输、存储和消费的分分布式能源系统结构优化模型, 提出了区域供热管网的优化布局方法。文献[13]建立了一种电力系统和天然气系统协同规划模型, 能够同时确定天然气发电设备、天然气供应站位置和输电线路、输气管道的布局。文献[14]提出了一种考虑热网-电网综合潮流的用户侧综合能源系统的规划方法, 对微型能源站安装位置及接入网络进行了优化。文献[15]以系统建设、运行成本和碳排放最小为目标函数, 建立了分布式能源系统的设备容量优化配置、系统经济运行模型, 讨论了区域供热网络的优化布局问题, 模型中考虑了热能的存储及系统运行过程中供热管网的热损失。文献[16]以图论理论为基础, 提出了“能距”的概念, 建立了能源站“站-网”布局优化模型, 讨论了供热能源站选址及管线路径优化布局问题。文献[17]介绍了综合管廊的技术标准及建设情况, 分析了将电力、供热等工程管线统筹纳入综合管廊进行统一规划的合理性和必要性。综上, 能源站选址的选择和管网络径的优化布局应充分考虑区域能源条件与区域市政道路的规划, 现有的研究多集中在单个供能网络的优化布局问题, 未考虑管网的路径与区域市政道路的协调优化, 缺少关于从供能系统整体出发对能源站址选择和管网络径优化布局问题的研究。

针对区域综合能源系统, 在系统的规划过程中, 直接使用 p -中位算法计算出的能源站站址存在不

收稿日期: 2018-02-28; 修回日期: 2018-06-12。

上网日期: 2018-10-16。

国家自然科学基金资助项目(5150070253)。

满足地质条件、自然资源、市政规划等条件限制的情况。因此本文首先根据区域地质条件、市政规划等条件限制对能源站位置进行初选,在此基础上,根据已知负荷中心电负荷、热负荷、待选能源站位置和规划区域道路规划情况,使用 p -中位模型,利用“‘负荷中心’与‘能源站’之间的赋权距离之和最小”的思想,建立了区域综合能源系统能源站优化规划模型,对能源站的数量、站址和能源输送管网路径的优化布局问题开展研究。

1 区域综合能源系统结构模型

1.1 p -中位模型

在公共设施位置选择过程中,根据区域地质条件、气候条件和地面建筑等状况,可以选择出比实际需求更多的设施位置,而出于投资经济性的考虑,需要在其中选择最优一个或几个最优的位置。 p -中位问题是设施选址问题中常见的一类问题,研究如何在可选设施位置中选择 p 个设施的最优位置。

对于无向带权网络 $G=(V,E,W)$,其中, V 为顶点集, E 为边集, W 为权集。 p -中位问题可以描述为:从集合 V 中寻找一个子集合 V_p ,使得顶点集合 $\{V-V_p\}$ 到 V_p 中最近顶点的距离之和最小^[18-19],集合 V_p 中的顶点叫中位点。 p -中位问题可用式(1)所示的规划模型来表示:

$$\begin{cases} \min Z = \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} a_i d_{ij} y_{ij} \\ \text{s.t.} & \sum_{j \in N} y_{ij} = 1 \\ & \sum_{j \in N} x_j = p \\ & y_{ij} \leq x_j \end{cases} \quad (1)$$

式中: M 为需求点集合; N 为候选设施点集合; i 为第 i 个需求点; j 为第 j 个候选设施点; a_i 为第 i 个需求点的需求量; d_{ij} 为第 i 个需求点到第 j 个候选设施点的最短距离; p 为所选设施点的数目; x_j 表示候选设施点 j 是否被选中,若是,则 $x_j=1$,否则 $x_j=0$; y_{ij} 表示需求点 i 是否由候选设施点 j 提供服务,若是, $y_{ij}=1$,否则 $y_{ij}=0$ 。

1.2 能源站 p -中位优化规划模型

在综合能源系统的规划过程中,为节约地下空间,避免反复开挖路面,工程管线通常采用热、电综合管廊,热网和电网的路径布局一致^[18]。区域综合能源系统的能源站、能源传输管网和负荷中心的布局可以用一个赋权网络 $G=(V,E,W)$ 来表示:系统负荷中心、候选能源站和路网结点构成顶点集 V ,边集 E 表示顶点间的直接连通情况,权集 W 表示各顶点间能源输送管网的投资成本。

本文采用评分优选法遴选规划区域能源站候选站址。首先,列出影响站址选址的主要因素,包括地理位置、自然资源分布、地质条件等自然因素,以及国家政策、市政规划和环境保护要求等社会经济因素;其次,将影响因素按其重要程度给予一定的比重因子,为规划区域各选址方案中各影响因素给予评价价值;最后,根据各影响因素比重因子及对应评价价值,得出各方案评价分,根据评价分数遴选候选能源站^[20]。如图 1 所示,黑色点为该区域负荷中心,红色点代表根据上述方法遴选出的候选能源站,实线为已规划道路,虚线为负荷中心和能源站到对应道路的垂线,表示能源传输管网负荷中心进线和能源站出线的方向。

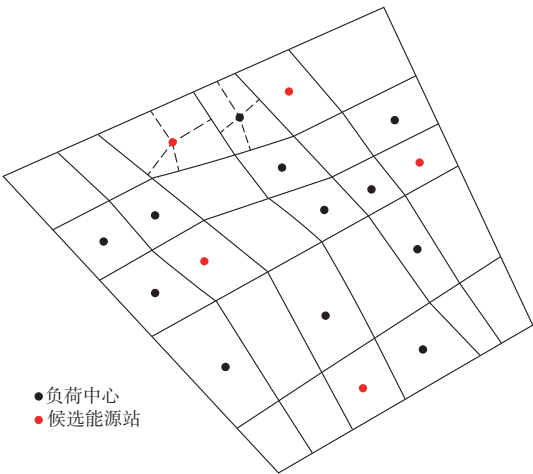


图 1 区域综合能源系统结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of structure of regional integrated energy system

定义 $M=\{m|m=1,2,\cdots,m_0\}$ 为负荷中心集合, $N=\{n|n=1,2,\cdots,n_0\}$ 为候选能源站集合, $Q=\{q|q=1,2,\cdots,q_0\}$ 为路网结点集合,则 $V=M \cup N \cup Q$,其中, M,N 和 Q 为两两不相交集;边集 $E=\{e(i,j)|i,j \in V\}$,表示顶点 i 和 j 之间的直接连通关系;权集 W 可以表示为: $W=\{w(e(i,j))=w(i,j)|e(i,j) \in E\}$,表示边 $e(i,j)$ 的权重。

定义某一负荷中心 m 的负荷需求为:

$$P_{LD,m}=(P_{EL,m},P_{HL,m}) \quad (2)$$

式中: $P_{EL,m}$ 和 $P_{HL,m}$ 分别为负荷中心 m 的电负荷和热负荷。

定义顶点 i 和 j 之间能源传输管网的造价为:

$$C_{tun,ij}=(C_{EP,ij},C_{HP,ij}) \quad (3)$$

式中: $C_{EP,ij}$ 和 $C_{HP,ij}$ 分别为顶点 i 和 j 之间输电线路造价和供热管网造价。

区域综合能源系统能源站选址过程中,建设能源站的总费用会随着能源站数量和能源站总负荷的变化而变化,故在优化目标函数中需要考虑能源站

的建设费用。某一能源站 n 建设费用可以表示为 $C_{ES,n} = f(P_{ES,n})$, 其中, $C_{ES,n}$ 为能源站的建设费用; $P_{ES,n}$ 为能源站的负荷大小。

综上所述,区域综合能源系统能源站的优化规划问题可以描述为:在候选能源站集合 N 中寻找子集 $V_p (|V_p| = p)$, 负荷需求点 M 由该 p 个能源站提供能源服务,使得 p 个能源站和负荷需求点之间的最短路径距离与负荷需求之积的和加上该 p 个能源站的初始投资成本后结果最小,其规划模型可以表示为:

$$\min Z = \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} (C_{ES,n} + P_{LD,m} d_{mn}) y_{mn} \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{m \in M} y_{mn} = 1 \\ \sum_{n \in N} x_n = p \\ y_{mn} \leq x_n \end{cases} \quad (5)$$

式中: d_{mn} 为负荷中心 m 和能源站 n 之间的最小权重; p 为所选能源站数目,当候选能源站 n 被选为中位点时 $x_n = 1$, 否则 $x_n = 0$; 当负荷中心 m 由能源站 n 提供能源服务时 $y_{mn} = 1$, 否则 $y_{mn} = 0$ 。

2 区域综合能源系统投资费用模型

2.1 输电管网投资费用模型

输电管网的投资费用包括电缆材料费用和电缆隧道建设费用,第 i 段输电管网的投资费用 $C_{EP,i}$ 表示为:

$$C_{EP,i} = (c_{EP, \text{line}, i} + c_{EP, \text{pipe}, i}) l_{EP,i} \quad (6)$$

式中: $c_{EP, \text{line}, i}$ 为第 i 段输电管网电缆材料单价; $c_{EP, \text{pipe}, i}$ 为第 i 段输电管网电缆隧道单价; $l_{EP,i}$ 为输电线路长度。

2.2 供热管网投资费用模型

供热管网投资费用包括管网材料费用和管网通道建设费用,第 i 段供热管网投资费用(包括土建费用) $C_{HP,i}$ 表示为^[21]:

$$C_{HP,i} = f(d_{HP,i}) l_{HP,i} \quad (7)$$

$$f(d_{HP,i}) = 9.606 d_{HP,i} - 873.15 \quad (8)$$

式中: $C_{HP,i}$ 为第 i 段供热管网的投资费用; $d_{HP,i}$ 为第 i 段供热管网管径; $f(d_{HP,i})$ 为第 i 段供热管网单位长度造价; $l_{HP,i}$ 为第 i 段供热管网长度。

2.3 能源站造价模型

区域综合能源系统能源站造价包括土建费用、设备投资安装费用和运行维护费用,根据文献[16],某一能源站初始投资费用 $C_{ES,n}$ 表示为:

$$C_{ES,n} = \left[2.188 \left(\frac{(P_{EL,n} + P_{HL,n}) c_{ES,n}}{10^7} \right)^{0.920} + 27.54 \right] \times 10^7 \quad (9)$$

式中: $P_{EL,n}$ 为能源站 n 提供的电负荷; $P_{HL,n}$ 为能源站 n 提供的热负荷; $c_{ES,n}$ 为满足负荷需求的能源站设备的单位容量投资成本。

3 基于改进枚举法的模型求解

p -中位问题是复杂的线性优化问题,常用的优化求解方法有枚举法和分散搜索方法、遗传算法、贪婪算法、蚁群算法^[22]等启发式算法。在求解过程中,枚举法可以获得最优解,但仅适用于问题规模较小的情况。启发式算法求解速度快,但是有明显的缺点,如分散搜索方法、贪婪搜索方法不能保证解的最优性,遗传算法局部搜索能力和保持解多样性的能力较弱,蚁群算法的求解速度和结果会受初始参数较大影响,所以启发算法适用于问题规模较大的情况。本文基于枚举法提出了一种改进的计算方法,结合图论中结点间最短路径的求解方法,在为既定负荷中心选择对应能源站时,选择权重最小的能源站为其提供能源供应服务,能够考虑到所有的可行解,同时相比枚举法减少了计算次数,而且避免了智能算法容易陷入局部最优、结算结果容易受初始参数影响的问题。具体求解过程如图2所示。

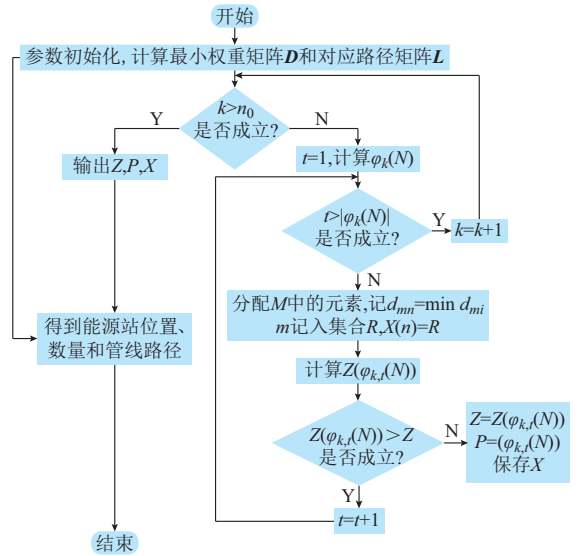


图2 算法流程图
Fig.2 Flow chart of algorithm

针对区域综合能源系统站网络 $G = (V, E, W)$, 其中 $V = M \cup N \cup Q$, M 为负荷中心集合, N 为候选能源站集合, Q 为路网节点集合。令 $\psi(N)$ 表示集合 N 的幂集, $\varphi_k(N)$ 表示幂集 $\psi(N)$ 中所有含 k 个元素的子集组成的集合。令 $\varphi_{k,i}(N)$ 表示 $\varphi_k(N)$ 中第 i 个元素, 有 $|\varphi_{k,i}(N)| = k$ 。 Z 表示目标函数值, P 表示中位点集合, $X = \{x_i | i = 1, 2, \dots\}$ 表示能源站服务负荷中心的分配情况, 即 x_1 表示

第一个能源站服务的负荷中心的集合。令 $k=1$;
 $Z \rightarrow \infty$; 集合 P, X 和 L 均为空集。算法流程如下。

步骤 1: 根据网络 G 中各顶点之间的相互关联情况, 求解边矩阵 E , 具体计算方法为:

$$e(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{若 } i, j \text{ 相邻} \\ 0 & \text{若 } i, j \text{ 不相邻} \\ 0 & \text{若 } i, j \text{ 为同一顶点} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $e(i, j) \in E; i, j \in V$ 。

根据网络 G 中各结点位置信息及边矩阵 E , 求解权重矩阵 W , 具体计算方法为:

$$w(i, j) = \begin{cases} C_{\text{tun}, ij} & \text{若 } e(i, j) = 1 \\ \infty & \text{若 } e(i, j) = 0, i, j \text{ 为不同顶点} \\ 0 & \text{若 } e(i, j) = 0, i, j \text{ 为相同顶点} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $w(i, j)$ 为 W 的元素; $i, j \in V$; $C_{\text{tun}, ij}$ 由式(3)求得。

采用 Dijkstra 算法求解网络 G 各顶点间的最小权重, 求解权重矩阵 D , 具体计算算法为:

$$d_{ij} = \begin{cases} w(i, j) & \text{若 } e(i, j) = 1 \\ \min d_{ij} & \text{若 } e(i, j) = 0, i, j \text{ 为不同顶点} \\ 0 & \text{若 } e(i, j) = 0, i, j \text{ 为相同顶点} \end{cases} \quad (12)$$

式中: d_{ij} 为 D 的元素; $i, j \in V$; d_{ij} 为顶点 i 和 j 之间的最小权重; 记 $l(i, j)$ 表示当顶点 i 和 j 取得最小权重时, 二者之间的路径。

记录取得最小权重时两顶点间的路径矩阵 L , L 为 $s \times s$ 阶矩阵, 其中, $s = |V|$ 。

步骤 2: 若果 $k > n_0$, 转至步骤 7; 否则, 令 $t=1$, 计算 $\varphi_k(N)$ 。

步骤 3: 如果 $t > |\varphi_k(N)|$, 执行步骤 6。否则, 定义 R 为空集, 对于给定 $m \in M$, 计算 d_{mi} , 其中, $i \in \varphi_{k,t}(N)$; 记 $d_{mn} = \min d_{mi}$, 则将 m 记入集合 R 中, 并令 $X(n) = R$; 重复计算, 直至 M 中的元素全部分配。

步骤 4: 计算目标函数 $Z(\varphi_{k,t}(N))$, 即 $Z(\varphi_{k,t}(N)) = \sum_{j \in \varphi_{k,t}(N)} \sum_{i \in R} (C_{\text{ES}, j} + P_{\text{LD}, i} d_{ij}) y_{ij}$ 。

步骤 5: 如果 $Z(\varphi_{k,t}(N)) < Z$, 令 $Z = Z(\varphi_{k,t}(N))$, $P = \varphi_{k,t}(N)$, 保存 X , 令 $t = t + 1$, 执行步骤 3。

步骤 6: 令 $k = k + 1$, 转到步骤 2。

步骤 7: 输出优化函数值 Z , 中位点集合 P , 负荷中心分配情况集合 X ; 根据中位点集合 P 可以得到能源站的数量及位置, 根据集合 X 及矩阵 L , 可得到各负荷需求点到对应能源站的具体路径。

4 算例分析

本文选取北方某园区规划数据进行计算。如图 3 所示, 该园区共有 12 个负荷需求区, 5 个地区适合建设能源站。区域南北长 3.08 km, 东西长 3.5 km。根据如图所示顺序为候选能源站、负荷需求区域和路网结点编号, 共计结点 127 个, 其中, 候选能源站编号为 1 至 5, 负荷中心编号为 6 至 17, 路网结点编号为 18 至 127。

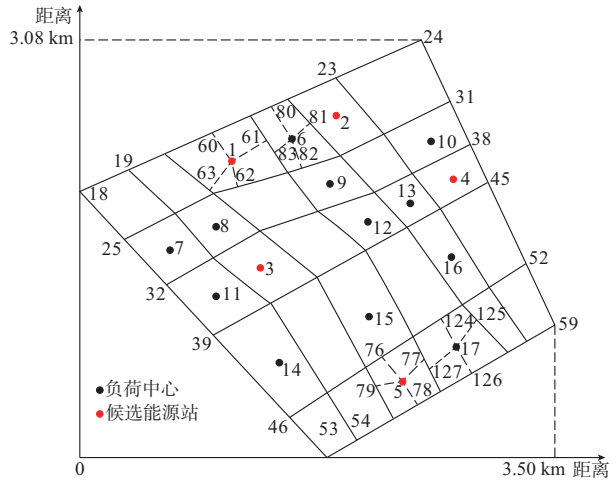


图 3 区域综合能源系统结点示意图
Fig.3 Schematic diagram of nodes for regional integrated energy system

各负荷中心电负荷、热负荷需求如附录 A 表 A1 所示。模型中 $d_{\text{HP}, i} = 500 \text{ mm}$, $c_{\text{EP}, \text{pipe}, i} = 7\,000 \text{ 元/m}$, $c_{\text{ES}, n} = 10\,000 \text{ 元/kW}$, $c_{\text{EP}, \text{line}, i} = 500 \text{ 元/m}$ ^[16, 23]。根据第 3 部分模型求解方法, 算例具体求解流程如下。

步骤 1: 构建边矩阵 E 和权矩阵 W 。根据图 3 各结点编号、结点直接关联情况, 结合式(10), 构建边矩阵 E ; 如图 3 所示建立坐标系, 根据坐标系获取各结点位置信息、边矩阵 E , 结合各结点坐标计算各相邻结点间的距离, 然后根据式(6)一式(8)和式(11)计算各结点之间的权重, 构建权矩阵 W 。

步骤 2: 构建最小权重矩阵 D 和最短路径矩阵 L 。采用 Dijkstra 最短路径求解算法, 根据边矩阵 E 和权矩阵 W 的求解结果及式(12), 计算各结点之间的最小权重, 构建权重矩阵 D ; 在计算过程中, 记录结点之间实现权重最小时经过的路径, 构建最短路径矩阵 L 。附录 A 表 A2 反映了各候选能源站(编号 1 至 5)与各负荷中心(编号 6 至 17)之间的最小权重, 即候选能源站到相应负荷中心建设能源传输管网的最小投资费用。

步骤 3: 能源站与管网路径选择。第 3 节步骤 7 输出的数据结果中, 根据集合 P 可以确定能源站的

数量和位置,根据集合 X 可以确定每个能源站服务的负荷中心;参照最短路径矩阵 L ,可以确定任意能源站到对应负荷中心的最佳路径。

算例区域的能源站与管网路径的最佳布局如图 4 所示。根据优化结果可以看出,5 个候选能源站有 4 个被选中,每个能源站都对应一定的供能范围。其中 6 号和 9 号负荷中心由 2 号能源站供能,7 号、8 号、11 号和 14 号负荷中心由 3 号能源站供能,10 号、12 号、13 号和 16 号负荷中心由 4 号能源站供能,15 号和 17 号负荷中心由 5 号能源站供能。蓝色路径表示能源站到对应负荷中心的管网路径。

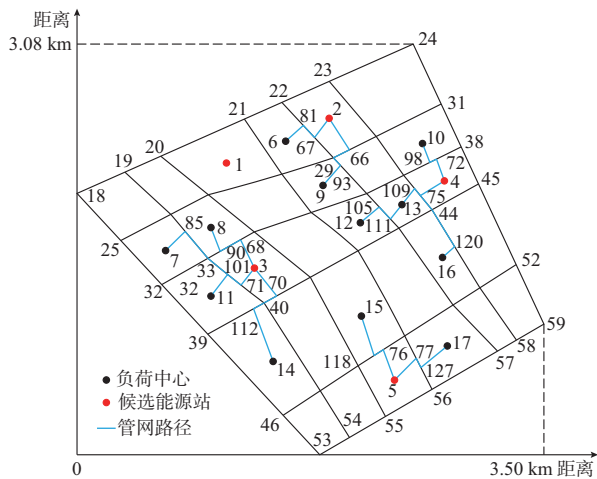


图 4 能源站选址和管网路径
Fig.4 Obtained optimal sites of energy station and path of networks

5 结语

本文研究了区域综合能源系统中考虑供电/热的能源站数量、位置的选择以及能源传输管网路径的优化布局。结合 p -中位模型建立了优化规划模型,基于枚举法提出了一种改进求解算法,验证了所提方法的有效性,得出的主要结论有:

- 1) p -中位模型是选址问题中常用的模型,所提出的基于 p -中位模型的区域综合能源系统能源站优化规划模型,考虑了负荷中心负荷需求和能源站、能源管网的初始投资成本,适用于以经济性为目标的能源站优化规划研究。
- 2) 基于枚举法提出的改进计算方法,在降低求解难度的前提下,能够有效求解建立的优化规划模型,确定能源站的具体数量和位置以及能源站和负荷中心之间能源传输管网的最佳路径,实现综合能源系统能源及管网路径的优化规划。
- 3) 本文讨论了考虑电、热供应的能源站优化规划及管网布局,未来将进一步分析考虑冷/热/电/气耦合的能源站优化规划问题。

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

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. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.
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. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.

[2] 吴建中.欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J].电力系统自动化,2016,40(5):1-7. DOI: 10.7500/AEPS20150512001.
WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20150512001.

[3] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹.对我国综合能源系统发展的思考[J].电力建设,2015,36(1):16-25.
JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 16-25.

[4] 艾芊,郝然.多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2018,42(4):2-10. DOI: 10.7500/AEPS20170927008.
AI Qian, HAO Ran. Optimal allocation model for multi-energy capacity of virtual power plant considering conditional value-at-risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 2-10. DOI: 10.7500/AEPS20170927008.

[5] 管霖,陈鹏,唐宗顺,等.考虑冷热电存储的区域综合能源站优化设计方法[J].电网技术,2016,40(10):2934-2941.
GUAN Lin, CHEN Peng, TANG Zongshun, et al. Integrated energy station design considering cold and heat storage[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2934-2941.

[6] 黎静华,桑川川.能源综合系统优化规划与运行框架[J].电力建设,2015,36(8):41-48.
LI Jinghua, SANG Chuanchuan. Discussion on optimal planning and operation framework for integrated energy system [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(8): 41-48.

[7] 吴聪,唐巍,白牧可,等.基于二层规划的用户侧能源互联网规划[J].电工技术学报,2017,32(21):122-131.
WU Cong, TANG Wei, BAI Muke, et al. Optimal planning of energy internet near user side based on bi-level programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 122-131.

[8] 黄仁乐,蒲天骄,刘克文,等.城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J].电力系统自动化,2015,39(9):26-33. DOI: 10.7500/AEPS20141229010.
HUANG Renle, PU Tianjiao, LIU Kewen, et al. Design of hierarchy and functions of regional Energy Internet and its demonstration applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 26-33. DOI: 10.7500/AEPS20141229010.

[9] 何桂雄,黄子硕,同华光,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. DOI: 10.7500/AEPS20170905007.
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. DOI: 10.7500/AEPS20170905007.

[10] 程林,张靖,黄仁乐,等.基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J].电力自动化设备,2017,37(6):282-287.
CHENG Lin, ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 282-287.

[11] 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.

[12] SÖDERMAN J, PETTERSSON F. Structural and operational optimization of distributed energy systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(13): 1400-1408.

[13] HUANG G, WEN F, SALAM M A, et al. Optimal collaborative expansion planning of integrated electrical and natural gas energy systems[C]// IEEE Innovative Smart Grid Technologies, November 28-December 1, 2016, Melbourne, Australia: 378-383.

[14] 白牧可,唐巍,吴聪,等.基于热网-电网综合潮流的用户侧微型能源站及接入网络优化规划[J].电力自动化设备,2017,37(6):84-93.
BAI Muke, TANG Wei, WU Cong, et al. Optimal planning based on integrated thermal-electric power flow for use-side micro energy station and its integrating network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 84-93.

[15] MORVAJ B, EVINS R, CARMELIET J. Optimizing urban energy systems: Simultaneous system sizing, operation and district heating network layout [J]. Energy, 2016, 116: 619-636.

[16] 陈娟,黄元生,鲁斌.区域能源互联网“站-网”布局优化研究[J].中国电机工程学报,2018,38(3):675-684.
CHEN Juan, HUANG Yuansheng, LU Bin. Research on “stations-pipelines” layout and optimization of regional energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 675-684.

[17] 城市综合管廊工程技术规范:GB 50838—2015[S].2015.
Technical code for urban utility tunnel engineering: GB 50838—2015[S]. 2015.

[18] 胡静文,罗婷.城市综合管廊特点及设计要点解析[J].城市道桥与防洪,2012(12):196-198.
HU Jingwen, LUO Ting. Analysis of characteristics and design points of urban utility tunnel [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2012(12): 196-198.

[19] 杨珺,张敏,王世伟.基于 p -中位模型的网络关键设施识别问题的算法设计与实现[J].管理科学,2008,21(4):46-53.
YANG Jun, ZHANG Min, WANG Shiwei. Algorithms and analysis for the critical facilities identification problem in network based on p -median model[J]. Journal of Management Sciences, 2008, 21(4): 46-53.

[20] 陈北洋.天津武清燃气分布式能源站总体方案研究和设计[D].天津:天津大学,2010.
CHEN Beiyang. Research on the scheme and design for the gas distribution generation energy station at Tianjin Wuqing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

[21] 孙敬凯.基于技术经济评价体系的供热规划关键问题研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
SUN Jingkai. Research of key problems in heating planning based on technical economic evaluation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[22] 李倩,张惠珍.带投资约束 p -中位问题的混合蚁群算法[J].计算机应用研究,2017,34(6):1704-1707.
LI Qian, ZHANG Huizhen. Hybrid ant colony algorithm for capacitated p -median problem with investment[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(6): 1704-1707.

[23] 白毅.TG 城市地下电网规划设计与应用研究[D].北京:华北电力大学,2015.
BAI Yi. Research on the design planning and Application of civil underground power grid in TG[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

易文飞(1987—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:综合能源系统规划。E-mail: yiwfenfei2006@163.com
俞永增(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统规划。E-mail: yongzengyu@163.com
张艺伟(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统运行。E-mail: z_yi_wei@163.com

(编辑 杨松迎)

p -median Model Based Optimal Planning of Energy Station for Regional Integrated Energy Systems

YI Wenfei¹, YU Yongzeng¹, ZHANG Yiwei¹, LI Zhongcheng², HUANG Yongzhang¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: The development of integrated energy systems (IES) can achieve the optimal use of energy, effectively improve the energy efficiency and mitigate the environmental pollution problems. The existing research on the energy station planning of IES mainly focused on the optimal configuration of equipment capacity, and less analysis of the optimal planning of energy station location and pipeline network path is performed. This paper aims at the problem of energy station location selection and optimization layout of energy transmission pipe network considering electricity and heat supply. Firstly, based on the p -median model, an optimal planning model for energy station location and pipe network path layout is established. Secondly, considering the initial investment and construction costs of energy stations and pipe network equipment, an investment cost model of regional integrated energy system is proposed. Finally, the planning model is solved by an algorithm based on the enumeration method. The validity of the model and the algorithm is verified through the simulation of an area.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 5150070253).

Key words: regional integrated energy system; p -median model; location selection of energy stations; layout of pipe network