

考虑区域综合能源系统拓扑特性的能源站和管线规划

徐成司¹, 董树锋¹, 吴金城¹, 韩荣杰², 寿挺², 李建斌²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 国网浙江杭州市萧山区供电有限公司, 浙江省杭州市 311200)

摘要: 为科学指导区域综合能源系统中能源站的建设数量、位置以及供能管线布局,研究了考虑区域综合能源系统拓扑特性的能源站和管线规划方法。首先总结了区域综合能源系统的拓扑特性,根据城市规划方案和地理信息系统获得可供选择的能源站站址和管线通道。进而基于能流平衡约束和热网特性建立能源系统的拓扑描述模型,以初期投资建设和后期运行成本最小化为目标,建立能源站和供能管线布局规划模型,并利用正交多项式逼近等方法对优化模型进行合理的简化处理。算例分析结果表明所提方法可得到更为经济的规划方案。

关键词: 区域综合能源系统; 拓扑特性; 能源站选址; 管线布局

0 引言

作为能源互联网的重要物理载体,综合能源系统通过耦合电力、天然气、热冷等系统,实现了多能优势互补并可促进可再生能源的消纳,已经成为提高能源利用效率、应对能源危机的重要途径^[1]。综合能源系统按其规模可分为跨区域级、区域级和用户级3个层次,其中对区域综合能源系统(regional integrated energy system, RIES)的研究是广域能源综合分析的基础^[2]。RIES由能源站、供能管线和负荷中心组成^[3]。能源站和供能管线的规划需要与城市规划相协调,其合理性不仅会影响综合能源工程的顺利落地,也会影响后期RIES建设和运行的可靠性和经济性。因此,有必要研究科学合理的RIES能源站和供能管线的布局规划方法。

目前,关于综合能源系统中基于多能耦合的设备容量规划和考虑RIES的配电网扩展规划已经有较多的研究^[4-6],而针对RIES能源站的数量、位置及供能管线布局规划的研究较少^[7]。文献[8]考虑楼层热负荷分布,提出了建筑内区域供热管网的优化布局方法。文献[9]讨论了供热网络管线数量和布局对系统碳排放量的影响。文献[10]在已有独立能源系统中考虑电力和天然气的耦合,提出一种扩建规划模型。文献[11]提出新型城镇的能源系统规划应进行站网的联合规划,将站网作为一个整体考虑,进一步提高系统经济性和可靠性。文献[12]利

用p-中位模型建立了RIES能源站和管线布局规划模型,但未对引入p-中位问题优化目标的物理意义进行说明。文献[13]提出了一种基于路径描述的电力廊道布局规划方法,廊道规划是在一个多环路城市道路网络中选择最佳廊道分布,而网络中路径数量随环路增加呈指数趋势增长^[14],该方法仅适用于道路结构简单规划问题。文献[15]提出一种使负荷中心和能源站之间路径加权距离最短的规划方法,但是能源站和管线布局并不等同于最短路径问题。1条管线通道中允许敷设多条线路,仅考虑路径最短忽视了共用通道所能降低的成本,且该模型采用启发式算法求解易陷入局部最优,需采用枚举法进行求解。文献[16]提出应将电力、热力等工程管线纳入综合管廊进行统一设计规划,但仅给出了RIES管线规划的一些通用原则和标准。

综上,当前尚未有成熟的RIES能源站和管线规划方法指导能源站选址和管线布局。本文提出一种考虑RIES拓扑特性的能源站和管线规划方法。结合城市规划方案和地理信息系统获得可供选择的能源站站址和管线通道集合。通过分析RIES的拓扑特性,基于能流平衡约束和热网特性建立能源站和负荷中心之间的连通性模型,并建立和求解以投资建设和后期运行成本最小化为目标的优化模型,得出RIES能源站定址和管线布局方案。不同于文献[12-15]中基于路径的方法,本文模型能够考虑管线容量对成本的影响。此外,本文采用正交多项式逼近等方法对模型进行简化处理,以降低规划问题求解的难度。

收稿日期: 2019-05-20; 修回日期: 2019-07-30。

上网日期: 2019-11-13。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901300)。

1 基于能流平衡的RIES拓扑描述模型

1.1 RIES拓扑特性

RIES的建设规划涉及确定能源站的数量、位置和供能管线的最优布局等问题,规划过程中要考虑其在拓扑结构上所须满足的约束。RIES的拓扑结构与传统配电网既有相似也有不同之处,其主要特性如下。

1)RIES管线的建设分为管线地下通道的建设和管线敷设。为了充分利用城市中稀缺的地下资源,1条通道中通常可包含多条供能管线,因此通道网络的结构相比管线网络较为简单。

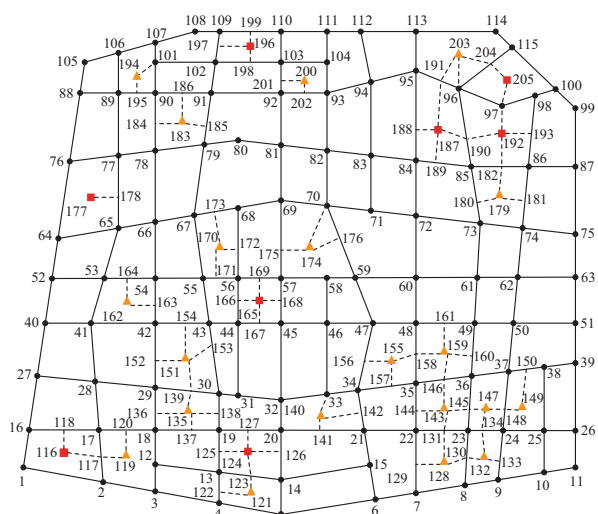
2)RIES管线通道的规划与城市土地规划密切相关,一般应沿道路建设,同时还需要考虑地质条件、地面建筑等更多实际地理限制因素。

3)管线通道需要为管线的敷设提供充足的空间资源,保证至少有1种能够满足负荷需求的管线敷设方案。因此通道在规划中可存在冗余设计、包含环状结构,而配电网网架拓扑通常为辐射状结构。

4)RIES能源站选址应首先根据城市规划、可再生能源资源等条件初选出可能比实际需求更多站址,然后再考虑投资经济性,在候选位置中选择1个或多个位置建设能源站。

5)负荷中心在空间上可由多个方向接入管线通道,为便于管理通常只有1条能源接入通道^[15]。

某待规划区域内的城市道路和RIES拓扑示意图如图1所示。



■ 候选能源站节点; ● 道路节点; ▲ 负荷节点; — 城市道路; ---- 候选通道

图1 城市道路和RIES拓扑示意图

Fig.1 Topological diagram of urban roads and RIES

图1包含候选能源站位置、城市道路网络、候选管线通道和负荷中心分布等拓扑信息,其中候选能

源站、道路交汇点和负荷中心用节点表示,道路及其他可建设管线通道的路线用边表示。为便于表述,后文将图1中的边统一称为道路。RIES布局规划需在图中选择最优的能源站站址和敷设管线的道路。其中城市道路、通道和管线的规划建设存在先后关系,在图1中除能源站和负荷节点的进出管线外,其余管线的通道均需沿给出的城市道路建设,在建设有通道的道路上才能敷设管线。

1.2 RIES拓扑描述模型

根据1.1节所述RIES的拓扑特性,首先根据城市规划方案和地理信息系统筛选出可建设能源站的位置和可以建设供能管线的道路。令0-1变量 β_i 表示是否在第 i 个候选站址建设能源站,若是则 $\beta_i = 1$,否则 $\beta_i = 0$;令0-1变量 x_b 表示是否在第 b 条道路上建设管线通道,若是则 $x_b = 1$,否则 $x_b = 0$ 。

为保证负荷中心与能源站之间存在供能路径,需建立RIES的拓扑连通性模型。文献[12-15]提出基于路径通断描述连通性,但网络中可能的供能路径数量随环路的增加呈指数趋势增长,该方法难以适用于较为复杂、存在大量环路的城市道路网络。文献[17-18]提出采用潮流平衡约束保证配电网的拓扑连通性,类似地,在RIES中可采用能流平衡约束来保证连通性。令候选能源站节点集合为 Ω_s ,道路节点集合为 Ω_r ,负荷节点集合为 Ω_L ,对于网络中的3类节点满足如式(1)至式(3)所示的约束。

$$\begin{cases} \sum_{n_i \in \Gamma_j} P_{e,ij} = P_{e,j} & n_j \in \Omega_L \\ \sum_{n_i \in \Gamma_j} Q_{e,ij} = Q_{e,j} & n_j \in \Omega_L \\ \sum_{n_i \in \Gamma_{out,j}} P_{h,ij} - \sum_{n_i \in \Gamma_{in,j}} P_{h,ji} = P_{h,j} & n_j \in \Omega_L \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sum_{n_i \in \Gamma_j} P_{e,ij} = 0 & n_j \in \Omega_r \\ \sum_{n_i \in \Gamma_j} Q_{e,ij} = 0 & n_j \in \Omega_r \\ \sum_{n_i \in \Gamma_{out,j}} P_{h,ij} - \sum_{n_i \in \Gamma_{in,j}} P_{h,ji} = 0 & n_j \in \Omega_r \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sum_{n_i \in \Gamma_j} P_{e,ij} \geq -\beta_j P_{em,j} & n_j \in \Omega_s \\ \sum_{n_i \in \Gamma_{in,j}} P_{h,ji} \leq \beta_j P_{hm,j} & n_j \in \Omega_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: n_i 为网络中第 i 个节点; Γ_j 为节点 n_j 的邻接节点集合; $P_{e,ij}$ 和 $Q_{e,ij}$ 分别为由节点 n_i 流向节点 n_j 的有功功率和无功功率,且其满足关系 $P_{e,ij} = -P_{e,ji}$, $Q_{e,ij} = -Q_{e,ji}$; $\Gamma_{out,j}$ 为节点 n_j 的邻接节点集合,且热功率由该集合中的节点流向节点 n_j ; $\Gamma_{in,j}$ 为节点 n_j 的

邻接节点集合,且热功率由节点 n_i 流向该集合中的节点; $P_{h,ij}$ 为节点 n_i 流向节点 n_j 的热功率; $P_{e,j}$, $Q_{e,j}$ 和 $P_{h,j}$ 分别为负荷节点 n_j 的需求有功功率、无功功率和热功率; $P_{em,j}$ 和 $P_{hm,j}$ 分别为能源站节点可提供的最大有功功率和热功率。

由于热网与周围环境温度的差异,且其介质流速和温度扩散速度较为缓慢,在传输时会发生温度下降,并导致热能损耗。与电力传输相比,热网在传输热能的过程中存在较大损耗。热力管道的稳态传热特性为^[19]:

$$T_{in,b} = T_a + (T_{out,b} - T_a) e^{-\frac{\lambda l_b}{c_w m_b}} \quad (4)$$

式中: $T_{in,b}$ 和 $T_{out,b}$ 分别为第 b 条热力管线的入口温度和出口温度; T_a 为热力管线所处的环境温度; λ 为热力管线保温材料的导热系数; l_b 为第 b 条道路的长度; c_w 为工质水流的比热容; m_b 为第 b 条热力管线的热水质量流量。

本文模型用于 RIES 管网的规划,系统供热半径通常在 10 km 以内,满足 $\lambda l_b \ll c_w m_b$, 则根据式(4)可将热力管道始末端功率流量之间的关系近似表示为^[19]:

$$P_{h,out,b} = P_{h,in,b} - \lambda l_b T_c \quad (5)$$

式中: $P_{h,in,b}$ 和 $P_{h,out,b}$ 分别为第 b 条热力管道的入口和出口热功率; T_c 为管道内外平均温差。

式(1)至式(5)保证了 RIES 的拓扑连通性。此外供能管线上输送的功率还受到地下通道是否建设的约束,对于不直接与负荷节点相连的管线有:

$$\begin{cases} -x_b F_{e,b} \leq S_{e,b} \leq x_b F_{e,b} \\ -x_b F_{h,b} \leq P_{h,b} \leq x_b F_{h,b} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S_{e,b}$ 和 $P_{h,b}$ 分别为第 b 条通道中供电、供热管线上的视在功率和热功率; $F_{e,b}$ 和 $F_{h,b}$ 分别为供电管线和供热管线输送的功率上限。

对于直接与负荷节点相连的管线通道,需要考虑其中仅有 1 条通道中管线的功率流向为指向该负荷节点的约束^[12]。利用文献[20]中获取图的生成树方法的思路,将该约束条件描述为:

$$\sum_{n_i \in \Omega_i, n_j \in \Gamma_i} \alpha_{ij} = 1 \quad (7)$$

$$\alpha_{ij} + \alpha_{ji} = x_{ij} \quad (8)$$

$$\begin{cases} -\alpha_{ij} F_{e,b} \leq S_{e,ij} \leq \alpha_{ji} F_{e,b} \\ -\alpha_{ij} F_{h,b} \leq P_{h,ij} \leq \alpha_{ji} F_{h,b} \end{cases} \quad (9)$$

式中: α_{ij} 为引入的 0-1 变量,当管线通道中存在功率流且其流向为从节点 n_j 到节点 n_i 时值为 1, 否则为 0; x_{ij} 表示是否在节点 n_i 和 n_j 之间的道路上建设管线通道的 0-1 变量,若是则 $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$ 。 $S_{e,ij}$ 为由

节点 n_i 流向节点 n_j 的视在功率,且其满足关系 $S_{e,ij} = -S_{e,ji}$ 。

式(7)至式(9)中,当 $x_{ij} = 0$ 时,可得 $\alpha_{ij} = \alpha_{ji} = 0$, $f_{ij} = 0$, 即地下通道未建设时,该道路不存在能量流;当 $x_{ij} = 1$ 时,可得 α_{ij} 和 α_{ji} 中一个为 1, 一个为 0, 此时式(7)保证了仅有 1 条通道的功率流向为指向负荷节点 n_i 。因此上述约束符合 RIES 的拓扑描述要求。

2 RIES 能源站和管线布局规划模型

科学合理的 RIES 能源站和管线布局规划是区域综合能源工程顺利落地和实施的重要基础,规划方案应在满足 1.2 节所述 RIES 拓扑结构约束的基础上,考虑能源站、管线及其通道的建设成本,并兼顾后期 RIES 运行的经济性。本文考虑电力、热力供应的 RIES, 建立能源站和管线布局规划模型。

2.1 能源站和管线投资建设成本

RIES 能源站的初始投资建设成本包括土建费用、设备投资及安装费用等^[15], 计算公式为:

$$C_{s,i} = \left[2.118 \left(c_s \frac{P_{se,i} + P_{sh,i}}{10^7} \right)^{0.9198} + 27.54 \right] \times 10^7 \quad (10)$$

式中: $C_{s,i}$ 为第 i 个能源站的建设成本; $P_{se,i}$ 为第 i 个能源站的供电设备容量; $P_{sh,i}$ 为第 i 个能源站的供热设备容量; c_s 为能源站设备单位容量投资成本。

能源站的建设费用年值为:

$$C_{sa,i} = C_{s,i} \frac{r(1+r)^A}{(1+r)^A - 1} \quad (11)$$

式中: $C_{sa,i}$ 为第 i 个能源站的建设成本年值; r 为年利率; A 为能源系统寿命年限。

RIES 的供能管线初始投资成本包含管线通道建设费用、管线材料费用和施工费用等^[7]。文献[12-15]中基于路径概念描述规划问题的方法难以在模型中建立管线成本与其容量的关系,而实际上有必要考虑这部分可变成本^[21]。基于此,单条道路上的管线投资成本年值计算公式可表示为:

$$C_{la,b} = (x_b c_p + c_{le} |S_{e,b}| + c_{lh} |P_{h,b}|) l_b \frac{r(1+r)^A}{(1+r)^A - 1} \quad (12)$$

式中: $C_{la,b}$ 为第 b 条道路中的管线建设成本年值; c_p 为管线通道单位长度的建设成本; c_{le} 为配电线路单位容量和长度的投资成本; c_{lh} 为供热管道单位容量和长度的投资成本。

供电管线上的视在功率流量满足:

$$S_{e,b}^2 = P_{e,b}^2 + Q_{e,b}^2 \quad (13)$$

式中: $P_{e,b}$ 和 $Q_{e,b}$ 为第 b 条配电线路中输送的有功功率和无功功率。

在式(12)中,若 $x_b=0$,则由式(6)或式(7)至式(9)的约束, $P_{e,b}$ 和 $P_{h,b}$ 均等于0,从而 $C_{la,b}=0$;若 $x_b=1$,则在第 b 条道路上建设通道,而 $P_{e,b}=0$ 或 $P_{h,b}=0$ 表示在该通道中不敷设电力或热力管线,相应的这部分管线成本为零。因此式(12)所示的管线成本计算公式与道路、通道和管线的建设先后关系相符合。

2.2 RIES运行维护成本

能源站的年维护费用为:

$$C_{sm,i}=(\mu_{s1}+\mu_{s2})C_{sa,i} \quad (14)$$

式中: $C_{sm,i}$ 为第 i 个能源站的年维护费用; μ_{s1} 为人工费比例系数; μ_{s2} 为能源站维护费比例系数。

供能管线的年折旧和维护费用为:

$$C_{lm,b}=(\mu_{l1}+\mu_{l2})C_{la,b} \quad (15)$$

式中: $C_{lm,b}$ 为第 b 条道路中管线的年折旧和维护费用之和; μ_{l1} 为折旧率; μ_{l2} 为管线维护费比例系数。

单条配电线路的运行成本为:

$$C_{lo,b}=\tau_{\max}c_{ep}R_b l_b \frac{P_{e,b}^2+Q_{e,b}^2}{3U_b^2} \quad (16)$$

式中: $C_{lo,b}$ 为第 b 条配电线路的年运行成本; τ_{\max} 为年最大负荷小时数; c_{ep} 为电价; U_b 为第 b 条配电线路的电压等级; R_b 为第 b 条配电线路的单位电阻。

热力管网循环水泵年运行费用为:

$$C_{wp}=\frac{G_p V_i t_p c_{ep}}{\eta_p} \quad (17)$$

式中: C_{wp} 为循环水泵年运行费用; V_i 为循环水泵的设计流量; G_p 为循环水泵的工作压力; t_p 为循环水泵的年最大工作时间; η_p 为循环水泵的效率。

供热管道的年热量损失费用为:

$$C_{hl,b}=\frac{4\pi x_b \lambda l_b T_c t_p c_{ep}}{c_{op} \ln \frac{d_b+2\delta_p+\delta_t}{d_b+2\delta_p}} \quad (18)$$

式中: $C_{hl,b}$ 为第 b 条道路中供热管道的年热量损失费用; d_b 为管道的直径; δ_p 为管道壁的厚度; δ_t 为管道保温层的厚度; c_{op} 为系统能效比。

2.3 RIES布局规划模型

本文以能源站及供能管线的投资建设成本和后期运行成本之和最小化为RIES布局规划的目标,根据2.1节和2.2节给出的各项成本计算公式,得到的目标函数为:

$$\min C = \sum_{n_i \in \Omega_s} \beta_i (C_{sa,i} + C_{sm,i} + C_{wp}) + \sum_{b=1}^{N_r} (C_{la,b} + C_{lm,b} + C_{lo,b} + C_{hl,b}) \quad (19)$$

式中: C 为RIES投资建设和后期运行总成本年值; N_r 为规划区域内的道路总数。

3 求解方法

3.1 杂交变异粒子群算法

由式(1)至式(17)可知,RIES能源站和管线布局规划为混合整数非线性规划问题,常采用启发式算法进行求解。采用杂交变异粒子群算法^[22]对该问题进行求解。相比于标准粒子群算法,该算法具有较好的全局寻优能力,在迭代过程中引入了遗传算法的繁殖和变异思想,随机选中种群中的粒子进行杂交,再随机选中粒子进行高斯变异。粒子进行杂交的位置和速度更新公式分别为:

$$\begin{cases} p_{iu,1}' = e_u p_{iu,1} + (1 - e_u) p_{iu,2} \\ p_{iu,2}' = e_u p_{iu,2} + (1 - e_u) p_{iu,1} \end{cases} \quad (20)$$

式中: e_u 为 $[0,1]$ 间满足均匀分布的随机数; $p_{iu,1}'$ 和 $p_{iu,2}'$ 为第 i 组的2个子粒子第 u 维的位置; $p_{iu,1}$ 和 $p_{iu,2}$ 为第 i 组的2个父粒子第 u 维的位置。

$$\begin{cases} s_{i,1}' = \frac{s_{i,1} + s_{i,2}}{|s_{i,1} + s_{i,2}|} |s_{i,1}| \\ s_{i,2}' = \frac{s_{i,1} + s_{i,2}}{|s_{i,1} + s_{i,2}|} |s_{i,2}| \end{cases} \quad (21)$$

式中: $s_{i,1}'$ 和 $s_{i,2}'$ 为第 i 组的2个子粒子的速度向量; $s_{i,1}$ 和 $s_{i,2}$ 为第 i 组的2个父粒子的速度向量。

再随机选中部分粒子进行高斯变异:

$$p_i'' = p_i (1 + \xi_i) \quad (22)$$

式中: p_i 为选中的第 i 个粒子的位置向量; p_i'' 为粒子变异后的位置向量; ξ_i 为满足均值为0、方差为 ϵ 的高斯分布随机变量值。

杂交变异粒子群与标准粒子群算法的优化步骤大体相同,不同之处在于更新粒子的位置和速度后,再利用式(20)至式(22)随机对部分粒子进行杂交变异。

3.2 模型简化与求解

采用3.1节的改进粒子群算法求解本文规划问题,仍易陷入局部极小值点。为了提高求解的收敛性,对原问题进行适当近似与等价变形处理,从而使原问题的松弛问题成为凸优化问题,并可采用商业优化软件进行求解。式(10)所示的能源站建设成本公式中包含幂函数,其指数小于1,为凹函数。文献[23]提出利用正交多项式逼近潮流方程组中复杂的非线性关系,相比于泰勒级数逼近,该方法具有较好的全局逼近能力。本文采用二阶正交多项式逼近式(10)中的幂函数,将其转化为凸函数,首先对其中

的自变量进行归一化处理。令

$$q = \frac{P_{se,i} + P_{sh,i}}{S_{e,i} + S_{h,i}} \quad (23)$$

式中： q 为引入的中间变量，取值范围为 $[0, 1]$ ； $S_{e,i}$ 为第 i 个能源站可建设的最大供电容量； $S_{h,i}$ 为第 i 个能源站可建设的最大供热容量。

将 q 代入式(10)，得到能源站的投资成本为：

$$C_{s,i} = \left[2.118 \left(\frac{(S_{e,i} + S_{h,i})c_s}{10^7} q \right)^{0.9198} + 27.54 \right] \times 10^7 \quad (24)$$

以 q 为自变量的多项式函数为：

$$H_k(q) = \sum_{i=0}^k a_i q^i \quad (25)$$

式中： k 为多项式阶数； $H_k(q)$ 为关于自变量 q 的 k 阶多项式； a_i 为多项式系数，其中 $a_k \neq 0$ 。

设 M 为一非负整数，若多项式系 $\{H_k(q), k=0, 1, \dots, M\}$ 中的元素在内积空间中两两正交，即满足式(26)，则其为正交多项式系。

$$\begin{cases} \int H_i(q)H_j(q)\omega(q)dq = 0 & i \neq j \\ \int H_i(q)H_j(q)\omega(q)dq \neq 0 & i = j \end{cases} \quad (26)$$

式中： $\omega(q)$ 为正交权函数，通过改变该函数可得到不同的正交多项式系。

式(24)中幂函数的定义域为有限区间，可采用Legendre多项式对其进行逼近，即 $\omega(q)$ 在其定义域内取值为1。根据式(26)计算得到前二阶正交多项式基函数为：

$$\begin{cases} H_0(q) = 1 \\ H_1(q) = q - \frac{1}{2} \\ H_2(q) = q^2 - q + \frac{1}{6} \end{cases} \quad (27)$$

采用Galerkin法计算多项式逼近系数，有

$$v_i = \frac{\int \Psi(q)H_i(q)\omega(q)dq}{\int H_i^2(q)\omega(q)dq} \quad (28)$$

式中： $\Psi(q)$ 为待逼近的函数； v_i 为逼近函数表达式中 i 阶多项式基函数 $H_i(q)$ 的系数。

根据式(28)计算得到式(27)中幂函数的多项式逼近表达式为：

$$q^{0.9198} \approx 0.5209H_0(q) + 0.9845H_1(q) - 0.0999H_2(q) \quad (29)$$

2个函数接近程度可用如式(30)所示的逼近度衡量^[24]。

$$\sigma = \|g(q) - h(q)\|_2 = \sqrt{\int (g(q) - h(q))^2 dq} \quad (30)$$

式中： $g(q)$ 和 $h(q)$ 为关于自变量 q 的函数； σ 为函数 $g(q)$ 与 $h(q)$ 的平方逼近度。

根据式(30)计算得到式(29)所示的多项式逼近函数与原函数的平方逼近度为 2.2×10^{-3} ，逼近误差较小，能够满足工程分析需要。进一步消去二次项与整数变量的乘积项，令

$$y_i = \beta_i q^2 \quad (31)$$

$$-\beta_i W \leq y_i \leq \beta_i W \quad (32)$$

$$-(1 - \beta_i)W \leq y_i - q^2 \leq (1 - \beta_i)W \quad (33)$$

式中： y_i 为引入的变量； W 为一足够大的常数。

容易证明若式(32)和式(33)成立，则式(31)成立：当 $\beta_i = 1$ 时，式(32)不起作用，由式(33)可得 $y_i = q^2$ ；当 $\beta_i = 0$ 时，式(33)不起作用，由式(32)可得 $y_i = 0$ 。2种情况下均有 $y_i = \beta_i q^2$ ，因此引入变量 y_i 和式(32)和式(33)可消去二次项与整数变量的乘积项。

式(19)中包含的管线投资成本年值计算公式中存在绝对值函数，其非处处可导，为此可利用文献[25]中引入变量的方式对绝对值函数进行简化，如式(34)所示，式(35)为各变量需满足的约束条件。

$$|S_{e,b}| = F_{e,b}(\omega_{e,b1} + \omega_{e,b3}) \quad (34)$$

$$\begin{cases} S_{e,b} = -F_{e,b}\omega_{e,b1} + F_{e,b}\omega_{e,b3} \\ z_{e,b1} + z_{e,b2} = 1 \\ \omega_{e,b1} + \omega_{e,b2} + \omega_{e,b3} = 1 \\ \omega_{e,b1} \leq z_{e,b1}, \omega_{e,b2} \leq 1, \omega_{e,b3} \leq z_{e,b2} \\ z_{e,b1}, z_{e,b2} = 0 \text{ 或 } 1 \\ \omega_{e,b1}, \omega_{e,b2}, \omega_{e,b3} \geq 0 \end{cases} \quad (35)$$

式中： $\omega_{e,b1}, \omega_{e,b2}, \omega_{e,b3}, z_{e,b1}$ 和 $z_{e,b2}$ 为辅助变量。

对于 $|P_{h,b}|$ 可进行同样的处理。将式(29)、式(31)和式(34)代入式(19)，将RIES的布局规划转化为混合整数二次规划问题，且其松弛问题为凸优化问题。相比原问题，上述简化后的模型求解难度显著降低，可利用割平面和分支定界法处理整数变量，利用内点法求解松弛问题，并可采用CPLEX等通用优化软件对该问题进行求解。

4 算例分析

4.1 算例概况

本文采用图1所示的某城市待规划区域验证所提出的RIES能源站和管线布局规划方法，该区域共有20个负荷中心。首先根据市政规划方案和地

理信息系统在该区域筛选出可建设能源站的位置和可以建设地下通道的道路,得到8个候选能源站站址和345条候选道路,如图1所示。图中给出了各节点的编号,各条道路的长度如附录A表A1所示,各负荷中心节点的负荷需求功率如附录A表A2所示,附录A表A3给出了RIES能源站和管线布局规划中所需的常量参数。

4.2 RIES布局规划结果与分析

在能源站和管线布局规划中考虑1.1节所述的RIES拓扑特性,以投资建设和后期运行成本最小化为目标,在图1中选择最优的能源站站址和敷设管线的道路,并确定能源站和管线的建设容量。使用CPLEX优化软件求解本文的RIES能源站和管线布局规划简化模型,得到的结果如图2所示。

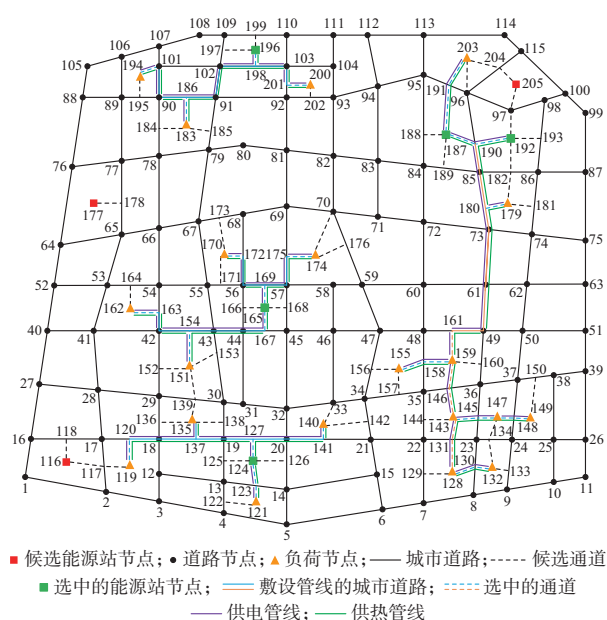


图2 RIES布局规划结果示意图

Fig.2 Result diagram of RIES layout planning

图2所示的优化结果在8个候选能源站站址中选择了5个建设能源站,在345条候选道路中选择了62条建设地下通道。通道中可能包含供电、供热管线中的1种或2种。从图中可看出能源站和管线规划方案符合1.1节所述的RIES拓扑特性。选中的各能源站规划容量及其建设和运行成本如表1所示。

图2中建设的各条地下通道内所敷设的供电、供热管线上的电能、热能功率流量,以及通道和管线的建设、运行损耗总成本如附录A表A4所示。采用本文简化模型得到的RIES规划总成本年值为19 666.9万元,其中,能源站建设总成本为17 350.5万元,管线敷设总成本为2 316.4万元。优

化计算消耗的时间为69 s,能够满足实际应用需要。

表1 能源站规划容量和成本
Table 1 Planned capacity and cost of energy stations

能源站编号	有功容量/ kW	无功容量/ kW	供热容量/ kW	成本年值/ 万元
124	3 153	1 251	2 099.1	3 416.5
165	2 796	1 303	2 842.8	3 474.2
187	2 853	1 800	3 011.8	3 507.6
192	3 200	780	2 550.0	3 490.7
198	2 648	1 701	2 905.0	3 461.5

采用3.1节所述的杂交变异粒子群算法求解本文的RIES布局规划原始模型。粒子种群数量取为10 000,粒子杂交概率设置为0.5,变异概率设置为0.2,变异参数 ϵ' 设置为其对应变量可取区间长度的10%。求得的能源站和管线布局规划方案如图2所示,与简化模型得到的方案相同。但采用该改进的粒子群算法求解原始模型仍容易陷入局部极值点,只有当存在粒子的初始位置与最优位置较为接近时,才能收敛到最优解,这也导致应用该算法难以判断所求得的是否为最优解,因此有必要对原始模型进行适当的简化,以降低模型的求解难度。

若采用文献[13]中的廊道规划方法,其用到的供电路径数量随图中环路数量呈指数趋势增长,对于图1所示网络,从中搜索得到的供电路径数量达到了 10^8 以上,计算无法收敛,因此该方法不适用于RIES布局规划问题。

忽略供电、供热管线容量因素对成本的影响,采用文献[15]中基于最短路径的方法,计算得到的RIES能源站和管线布局规划结果如图3所示。

采用文献[15]中模型(模型1)、本文原始模型(模型2)和简化模型(模型3)得到的能源站建设总成本、管线通道总长度、供能管线敷设总成本及RIES规划总成本如表2所示。

对比图3和图2可知,利用本文方法和文献[15]中方法得到的能源站定址结果相同,但部分供能管线的敷设方案不同。如图2中的橙色线段所示,本文方法规划结果中能源站187和192共用了管线通道190-85-180-73-61-49-161-159-146-143-131-128。而图3中各能源站的供能管线均不相交,即基于最短路径的方法忽视了供能管线通过共用地下通道降低成本的情况。由表2可得本文规划方案的管线敷设成本相比采用文献[15]中方法减小了14.2%。当管线共通道敷设时,避免了重复报批、设

计和挖沟等环节,成本显著降低。上述结果表明充分考虑 RIES 的拓扑特性后,能得到经济性更优的能源站和管线布局规划方案。

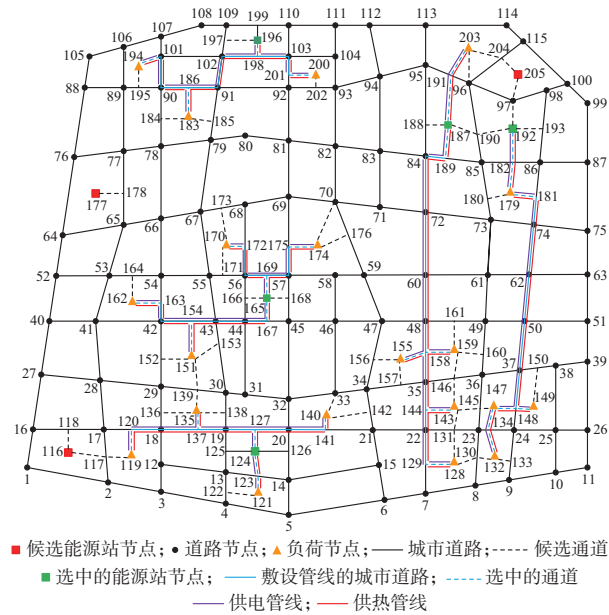


图3 利用文献[15]中方法的 RIES 布局规划结果
Fig.3 RIES layout planning result based on the method in reference [15]

表2 不同模型计算结果

Table 2 Calculation results of different models

模型	能源站建设总成本/万元	管线通道总长度/km	管线敷设总成本/万元	RIES 规划总成本/万元
模型1	17 349.2	31.95	2 699.8	20 048.9
模型2	17 349.9	27.29	2 316.4	19 666.3
模型3	17 350.5	27.29	2 316.4	19 666.9

由表2可得简化模型与原始模型得到的 RIES 规划总成本仅相差 0.004%,因此 3.2 节所述的简化方法在有效降低模型求解难度的同时能够使计算结果保持较高的精度。

5 结语

本文提出了考虑区域综合能源系统拓扑特性的能源站和管线规划方法,其特点如下。

1) 充分考虑 RIES 的拓扑特性,考虑了城市道路、通道和管线在建设中的先后关系。算例结果表明相比现有方法可得到更优的规划方案。

2) 规划目标中兼顾了 RIES 初期建设和后期运行的经济性,使规划方案更符合实际。

3) 采用正交多项式逼近等方法对优化模型进行合理的简化处理,提高问题求解的收敛性。

本文考虑电、热耦合,在区域负荷分布已知的条件下进行 RIES 布局规划,下一步将研究考虑区域

综合能源系统形态演化以及冷、热、电、气多能耦合的能源站和综合管网布局规划问题。

本文受到浙江中新电力工程建设有限公司“以智能电网为核心的园区综合能源系统及能源智慧化管理顶层设计研究”项目的资助,谨此致谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 郝然,艾芊,姜子卿.区域综合能源系统多主体非完全信息下的双层博弈策略[J].电力系统自动化,2018,42(4):194-201. DOI:10.7500/AEPS20170612013.
HAO Ran, AI Qian, JIANG Ziqing. Bi-level game strategy for multi-agent with incomplete information in regional integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 194-201. DOI: 10.7500/AEPS20170612013.
- [2] 陈柏森,廖清芬,刘涤尘,等.区域综合能源系统的综合评估指标与方法[J].电力系统自动化,2018,42(4):174-182. DOI:10.7500/AEPS20170605005.
CHEN Baisen, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Comprehensive evaluation indices and methods for regional integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 174-182. DOI: 10.7500/AEPS20170605005.
- [3] 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):2934-2943.
GUAN Lin, CHEN Peng, TANG Zongshun, et al. Integrated energy station design considering cold and heat storage [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2934-2943.
- [4] YANG Yun, ZHANG Shijie, XIAO Yunhan. Optimal design of distributed energy resource systems based on two stage stochastic programming [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 1358-1370.
- [5] 沈欣炜,郭庆来,许银亮,等.考虑多能负荷不确定性的区域综合能源系统鲁棒规划[J].电力系统自动化,2019,43(7):34-41. DOI:10.7500/AEPS20180511003.
SHEN Xinwei, GUO Qinglai, XU Yinliang, et al. Robust planning method for regional integrated energy system considering multi-energy load uncertainties [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 34-41. DOI: 10.7500/AEPS20180511003.
- [6] 雷霞,唐文左,李竹云,等.考虑区域综合能源系统优化运行的配电网扩展规划[J].电网技术,2018,42(11):2459-3468.
LEI Xia, TANG Wenzuo, LI Zhuyun, et al. Distribution network expansion planning considering optimal operation of regional integrated energy system [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 2459-3468.
- [7] 陈浩忠,胡泉,王莉,等.区域综合能源系统规划研究综述[J].电

- 力系统自动化, 2019, 43(7): 2-13. DOI: 10.7500/AEPS20180416006.
- CHEN Haozhong, HU Xiao, WANG Li, et al. Review on research of regional integrated energy system planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 2-13. DOI: 10.7500/AEPS20180416006.
- [8] WANG Wenhua, CHENG Xuetao, LIANG Xingang. Optimization modeling of district heating networks and calculation by the Newton method [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61(2): 163-170.
- [9] 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.
- [10] HUANG Guori, WEN Fushuan, 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.
- [11] 郑玉平,王丹,万灿,等.面向新型城镇的能源互联网关键技术及应用 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 1-14. DOI: 10.7500/AEPS20181130012.
- ZHENG Yuping, WANG Dan, WAN Can, et al. Key technology and application of Energy Internet oriented to new-type towns [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 1-14. DOI: 10.7500/AEPS20181130012.
- [12] 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.
- [13] 徐航,董树锋,朱嘉麒,等.基于路径描述的配电网电力廊道规划方法 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 80-86. DOI: 10.7500/AEPS20180131007.
- XU Hang, DONG Shufeng, ZHU Jiaqi, et al. Path description based planning method for power corridor of distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 80-86. DOI: 10.7500/AEPS20180131007.
- [14] RAMOS E R, EXPOSITO A G, SANTOS J R, et al. Path-based distribution network modeling: application to reconfiguration for loss reduction [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 556-564.
- [15] 易文飞,俞永增,张艺伟,等.基于p-中位模型的区域综合能源系统能源站优化规划 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 107-112. DOI: 10.7500/AEPS20180228002.
- YI Wenfei, YU Yongzeng, ZHANG Yiwei, et al. P-median model based optimal planning of energy station for regional integrated energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 107-112. DOI: 10.7500/AEPS20180228002.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市综合管廊工程技术规范:GB 50838—2015[S].2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. Technical code for urban utility tunnel engineering: GB 50838—2015[S]. 2015.
- [17] LAVORATO M, FRANCO J F, RIDER M J, et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 172-180.
- [18] PATERAKIS N G, MAZZA A, SANTOS S F, et al. Multi-objective reconfiguration of radial distribution systems using reliability indices [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1048-1062.
- [19] 姚帅,顾伟,张雪松,等.热网特性对于综合能源系统超短期调度的影响 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 83-90. DOI: 10.7500/AEPS20170914007.
- YAO Shuai, GU Wei, ZHANG Xuesong, et al. Effect of heating network characteristics on ultra-short-term scheduling of integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 83-90. DOI: 10.7500/AEPS20170914007.
- [20] HAGHIGHAT H, ZENG Bo. Distribution system reconfiguration under uncertain load and renewable Generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2666-2675.
- [21] LI Furong, TOLLEY D L. Long-run incremental cost pricing based on unused capacity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1683-1689.
- [22] 方睿,董树锋,唐坤杰,等.基于最大测点正常率与GPU并行加速的不良数据辨识方法 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 93-100. DOI: 10.7500/AEPS20181029003.
- FANG Rui, DONG Shufeng, TANG Kunjie, et al. Bad data identification method based on MNMR model and GPU parallel acceleration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 93-100. DOI: 10.7500/AEPS20181029003.
- [23] WU Hao, ZHOU Yongzhi, DONG Shufeng, et al. Probabilistic load flow based on generalized polynomial chaos [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 820-821.
- [24] LORENTZ G, GOLITSCHKE M, MAKOVOZ Y. Constructive approximation: advanced problems [M]. Berlin, German: Springer, 2011.
- [25] BORGHETTI A. A mixed-integer linear programming approach for the computation of the minimum-losses radial configuration of electrical distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1264-1273.
- 徐成司(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统规划。E-mail:3140103128@zju.edu.cn
- 董树锋(1982—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:状态估计、有源配电网分析。E-mail:dongshufeng@zju.edu.cn
- 吴金城(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向:配电网规划、储能系统规划。E-mail:21710148@zju.edu.cn

(编辑 施冬敏)

Planning of Energy Station and Pipeline Considering Topological Characteristics of Regional Integrated Energy System

XU Chengsi¹, DONG Shufeng¹, WU Jincheng¹, HAN Rongjie², SHOU Ting², LI Jianbin²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Hangzhou Xiaoshan Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311200, China)

Abstract: In order to scientifically determine the number and location of energy stations and the distribution of energy supply pipelines in regional integrated energy system, the planning method of energy stations and pipelines considering topological characteristics of regional integrated energy system is proposed. Firstly, the topological characteristics of regional integrated energy system are summarized. According to the urban planning scheme and geographic information system, the optional energy station sites and pipeline channels are obtained. Secondly, a topological description model of energy system is established based on energy flow balance constraints and heating network characteristics. To minimize the cost of initial construction and later operation, the layout planning model of energy station and energy supply pipeline is established, and orthogonal polynomial approximation is used to simplify the optimization model. The simulation results show that the proposed method could obtain a more economical planning scheme.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0901300).

Key words: regional integrated energy system; topological characteristic; location selection of energy station; pipeline layout

