

考虑能量梯级利用的园区综合能源系统站网协同规划

周步祥,夏海东,臧天磊

(四川大学 电气工程学院,四川 成都 610065)

摘要:为了提升综合能源系统的能源利用效率,基于能量梯级利用原理,对能源站选址、设备选型定容和能源网络布局进行协同规划;同时考虑负荷的能源品位互补特性,建立了一种考虑能量梯级利用的园区综合能源系统站网双层规划模型。上层模型以考虑能源站和能源网络投资成本最小为目标,建立能源站网协同投资模型;下层模型考虑负荷间的能源品位互补,以兼顾烟效率的运行成本最小的目标,建立能源站的运行模型。在此基础上,基于最短路径理论的枚举法,采用CPLEX求解器进行模型求解。选取了北方某园区综合能源系统对所提方法进行了仿真验证,结果表明所提方法实现了负荷间的能源品位互补,解决了传统规划时能源需求和能源供应品位不匹配的问题。

关键词:能源利用效率;梯级利用;站网规划;品位互补;烟效率;最短路径

中图分类号:TM 715;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109038

0 引言

随着社会经济的高速发展,对于能源的需求急速增长,能源危机的问题日益显现,优化能源结构和提升能源利用效率已经成为全世界各国解决能源短缺的重要战略^[1]。随着碳中和目标的提出,构建清洁低碳、安全高效的能源体系日益迫切^[2]。建设综合能源系统对于促进能源结构转型和提升能源利用效率具有重要意义。

综合能源系统包含多种形式的能量耦合和复杂的能量转化,优化利用多能源是亟待突破的关键技术。目前综合能源系统存在能源利用率低、本身的高效优势无法发挥、运营受限和费用增加等问题,这主要是因为用户能量品质需求与能源供应之间的不匹配、不均衡^[3]。能量的梯级利用是提高能源利用效率,降低天然气、化石燃料等能源消耗的有效途径,其已成为研究重点。促进负荷与能源的“品位对口,梯级利用”^[4],以清洁高效的方式满足用户的用能需求,对于实现综合能源系统低碳高效的核心价值具有重要意义。

在综合能源系统的规划中,合理规划能源站和能源网络并提升能源的利用效率是综合能源系统经济运行的关键。文献[5]提出能矩的概念,并基于电热负荷的需求响应特性,建立了考虑源荷互动的综合能源系统站网协同规划模型,但未涉及供能分区及负荷之间的互补。文献[6-8]仅考虑到了管网的

布局规划,未考虑到能源站及其配置对能源管网布局的影响。文献[9]考虑了能源站规划时不同类型负荷的时空耦合特性,将用能峰谷相互错开。文献[10]提出了基于站间互联的多能互补的园区综合能源系统规划方案,通过能源站之间的管线互联提升能源利用效率。文献[11]提出了基于能的品位的烟经济分析法,能够为复杂的能量系统运行优化提供理论支撑,但未考虑在综合能源系统规划中的应用。综上所述,在现有综合能源系统能源站和能源网络的规划中,均未考虑能量的梯级利用。

现代园区的负荷需求量大、类型多样,能量在转换过程中通常涉及热的梯级利用。在综合能源系统的规划中,只有充分考虑能量的“质与量”才能促进不同品位能量的耦合与转换利用,提升能源利用效率。为此,本文提出一种考虑能量梯级利用的能源站-能源网(下文简称能源站网)协同规划方法,主要工作如下。

1)分析了园区综合能源系统能量梯级利用的原理,在此基础上构建了一种改进的能量集线器EH(Energy Hub)模型,与传统EH模型不同的是,该模型考虑了各级品位热能的梯级输出与利用,有利于提升能源的利用效率。

2)考虑能量梯级利用的园区综合能源系统存在不同质、不同量的能量,采用总体烟效率分析方法,实现了园区综合能源系统的能效分析,进而将烟效率考虑到能源站供能范围的划分中,有利于提升能源站运行的经济性。

3)基于能量梯级利用方法,对能源网络和能源站进行初始规划,构建了考虑能量梯级利用的能源站网双层规划模型:上层模型基于能量梯级利用的能源站规划模型,结合最短路径理论和加权综合能矩,得到了能源站选址、供能分区及管网布局方案;下层模型

收稿日期:2021-05-23;修回日期:2021-08-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907097);四川省科技厅计划项目(2020JDRC0049)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51907097) and the Science and Technology Planning Project of Sichuan Province(2020JDRC0049)

结合焓效率分析方法,优化能源站供能方案,得到能源站设备配置方案,从而实现能源站网协同规划。

1 考虑能量梯级利用的园区综合能源系统

包含工业、商业、居民用户的典型园区综合能源系统如图 1 所示。园区综合能源系统包含冷、热、电、气多种形式的能量。园区内部的能源站除了给用户供应电负荷外,还包含:蒸汽负荷、高、中温热水负荷、冷水负荷。园区负荷需求量大且类型多样,按热能品位高低进行能量的梯级利用,从而提升经济效益和能源利用效率^[12]。

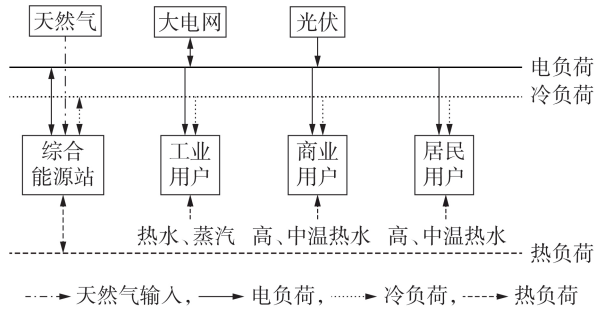


图 1 园区综合能源系统结构与能量流

Fig.1 Structure and energy flow of park integrated energy system

1.1 园区综合能源系统能量梯级利用原理

园区综合能源系统能量的梯级利用遵循“电热互补,温度对口,梯级利用”的原则。根据热能温度的不同分为不同的品位,34℃左右为低温热水、75℃为中温热水、120℃为高温热水,热能品位越高,温度越高。根据不同负荷的品位要求,尽量满足温度匹配的热能利用^[11]。在热能的梯级利用中,较高品位的热能通过循环利用和回收,逐步向低品位热能转化,从而达到能量的高效利用。另外,可在园区综合能源系统中挖掘电热设备的互补优势,深度耦合与转换电热能流,提升能量梯级利用的效率与可靠性。

能量的梯级利用过程如附录 A 图 A1 所示。在园区综合能源系统中,通过各类能源设备充分利用不同品位的能量,梯级供应不同品位的热能,从而实现能量的梯级利用^[13-14]。梯级利用过程为:余热锅炉通过回收燃气轮机废气热产生低温热水,由于低温热水直接利用的价值低,通常被电热泵、吸收式热泵等设备加热成中温热水;抽气热为高温蒸汽,一部分用于驱动吸收式热泵将大量低温热水加热成中温热水,一部分通过尖峰加热器换热将中温热水加热至高温热水,另外一部分用于供应蒸汽负荷与通过吸收式制冷制取冷水^[15]。

1.2 能量梯级利用的园区综合能源系统能效分析

综合能源系统中,不同能源间的转换过程具有

“量”的守恒性和“质”的差异性。已有的能效定义仅计及了能量在数量上的变化,忽视了能量在品质上的差异,无法准确地衡量综合能源系统的能量利用水平。本文提出考虑能量梯级利用的园区综合能源系统能源站网协同规划,旨在提升能源的利用水平。文献[16-17]提出了基于焓效率的综合能效评估方法,焓效率被认为是兼顾了能量数量和品质的能源利用水平评估方法,已被较多文献使用。因此,本文考虑能量间的品位差异、多能耦合以及分布式能源的利用,建立了如图 2 所示的焓效率分析模型。

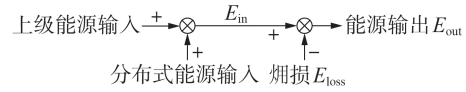


图 2 园区综合能源系统焓效率分析模型

Fig.2 Exergy efficiency analysis model of park integrated energy system

综合能源系统的总体焓效率如式(1)所示。

$$\eta_{ex} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \sum_{j \in \Omega_{out}} E_j \lambda_j / \sum_{i \in \Omega_{in}} E_i \lambda_i \quad (1)$$

式中: Ω_{in} 和 Ω_{out} 分别为输入和输出能量形式集合; E_i^in 、 E_j^out 分别为综合能源系统输入能量形式*i*和输出能量形式*j*所包含的能量,分别表现为收益焓和支付焓; η_{ex} 为焓效率; λ_i 、 λ_j 为能质系数,其受能量种类、形态、温度及环境温度的影响,具体计算方法详见文献[16-17]。为了充分消纳可再生能源,在计算过程中将可再生能源的能质系数设置为0。

1.3 园区综合能源站模型

园区综合能源系统从结构上可以分为电力网络和热力网络(包含冷、热),由综合能源站实现不同能量形式之间的耦合。综合能源站能量流如附录 A 图 A2 所示。能源站设备包含燃气轮机 GT (Gas Turbine)、燃气锅炉 GB (Gas Boiler)、吸收式热泵 AHP (Absorption Heat Pump)、吸收式制冷机组 ACH (Absorption CHiller)、电热泵 HP (Heat Pump)、电制冷机组 AC (Air Condition) 等多种能源设备,各类设备模型在文献[11-12]中已有详细说明,本文不再赘述。能源站通过联络线与大电网交互电能、消耗天然气,供应或存储冷、热、电能量。

近年来,EH模型被认为是处理多能耦合的一种有效方法^[18-19]。在能源站的规划中,除了外部各类负荷需求已知外,能源站内部结构以及设备类型和数量均未知,需要对能源站进行初始规划^[20]。考虑到能量的梯级利用过程中包含多次的能源转换,各类能源设备耦合紧密,且涉及各品位热能的相互转化及各品位热能梯级的输出,传统EH模型求解这一问题的难度将会大幅增加。为了减少计算复杂性,本文构建了一种改进的EH模型描述能源站的

内部结构,如附录A图A3所示。该模型由能源生产层、能源转换层和能源储存层构成,能够涵盖能源的生产、转换、储存等耦合过程,其包含能源生产设备($G_1—G_N$)、能源转换设备、能量储存设备($S_1—S_N$)及能量传输设备。

从能源生产角度,能源转化设备将外部能源转化为二次能源,不能满足用户多元负荷的需求,需要对二次能源进一步转化分配,满足用户的需求。通过耦合矩阵描述改进的EH的转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} P_{out}^\alpha \\ P_{out}^\beta \\ \vdots \\ P_{out}^\chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\alpha\alpha} & c_{\beta\alpha} & \cdots & c_{\chi\alpha} \\ c_{\alpha\beta} & c_{\beta\beta} & \cdots & c_{\chi\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{\alpha\chi} & c_{\beta\chi} & \cdots & c_{\chi\chi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{in}^\alpha \\ P_{in}^\beta \\ \vdots \\ P_{in}^\chi \end{bmatrix} = C_T \begin{bmatrix} P_{in}^\alpha \\ P_{in}^\beta \\ \vdots \\ P_{in}^\chi \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于能源转换和储存层,可通过二次能源的转换分配系数矩阵 M 描述二次能源的转换与分配,如式(3)所示。

$$L = M [P_{out}^\alpha \ P_{out}^\beta \ \cdots \ P_{out}^\chi]^T \quad (3)$$

从设备安装角度,通过一个 $m \times n$ (m 为层数, n 为元件总数)维的安装矩阵 X_i 对能源站的分层结构进行数学描述:

$$X_i = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad i=1, 2, 3 \quad (4)$$

式中:上标 $\alpha, \beta, \cdots, \chi$ 表示不同类型的输入、输出能量; P_{out} 和 P_{in} 分别为二次能源和一次能源输入; C_T 中元素为转换系数; L 为多元负荷; i 取值为1、2、3时分别表示能源生产层、能源转换层和能源储存层; $x_{11}, x_{12}, \cdots, x_{mn} \in \{0, 1\}$,为安装系数,取值为1、0时分别表示安装和不安装。

2 园区综合能源站网双层规划运行模型

2.1 上层综合能源站网投资规划模型

能量的梯级利用过程中,各品位热能是层层相互关联的,高品位热能产生的同时,通常伴随着低品位热能的产生。如果低品位热能无法得到充分利用,极易造成能源浪费,降低能源利用效率,可通过工业负荷、商业负荷和居民负荷之间的相互耦合,促进各级热能的消纳。为此,本文提出的考虑能量梯级利用的能源站网双层规划模型考虑各级品位的热能互补,提升能源利用效率。在上层综合能源站网投资规划模型(下文简称上层模型)中,首先在能源站选址时,为了体现能源站站址的选择对规划经济性的影响,通过负荷中心到能源站的加权综合能矩最小来确定站址;其次考虑综合能源站网的投资成本,建立综合能源站网投资规划模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} \min C_{up} = \sum_k \sum_{i \in j} \lambda_j^k l_{j,i}^k d_{\min}(n_j, i) + \sum_j C_{ATC} x_j \\ C_{ATC} = C_{inv} + C_{op} + C_{ful} + C_{env} \end{cases} \quad (5)$$

$$l_{j,i}^k = \frac{L_{j,i}^k}{\sum_{i \in j} L_{j,i}^k} \quad (6)$$

式中: C_{up} 为上层成本; $i \in j$ 表示第 i 个负荷中心归属于第 j 个供能子区域; λ_j^k 为第 j 个供能子区域区内第 k 类负荷对能源站选址的权重; $l_{j,i}^k$ 为第 j 个供能子区域内第 i 个负荷中心的第 k 类负荷标准化后的负荷值; $d_{\min}(n_j, i)$ 为第 i 个负荷中心到能源站 n_j 的最短路径; $x_j \in \{0, 1\}$,取值为1、0时分别表示选中、未选中建设能源站; C_{ATC} 为能源站全寿命周期成本,包含能源站建设成本 C_{inv} 、维护成本 C_{op} 、能耗成本 C_{ful} 及环境成本 C_{env} ; $L_{j,i}^k$ 为第 j 个供能子区域内第 i 个负荷节点的第 k 类负荷的年最大值。

考虑到多能负荷间存在不同的数量级,难以进行直接比较,需要将多能负荷进行标准化,并计算各类负荷对应的权重如式(7)所示。

$$\lambda_j^k = \frac{\sum_{i \in j} L_{j,i}^k A^k C^k}{\sum_k \sum_{i \in j} L_{j,i}^k A^k C^k} \quad (7)$$

式中: A^k 为第 k 类负荷的年供能天数; C^k 为建设第 k 类负荷的供能管道的单位长度费用。

能源站建设成本、维护成本分别如式(8)、(9)所示。

$$C_{inv} = \sum_{j=1}^{N_{station}} \sum_{i=1}^M \frac{r(1+r)^{T_i}}{r(1+r)^{T_i} - 1} P_i \phi_i \quad (8)$$

$$C_{op} = \sum_{j,s,t} P_{j,s,t} c_{op}^s \quad (9)$$

式中: $N_{station}$ 和 M 分别为能源站数量和能源站内设备总数; r 为贴现率; P_i, T_i, ϕ_i 分别为设备 i 的规划容量、生命周期和设备单位容量建设成本; $P_{j,s,t}$ 和 c_{op}^s 分别为 t 时刻能源站 j 内设备 s 的出力和设备 s 单位容量的维护成本。

2.2 下层能源站优化运行模型

根据2.1节上层模型确定的能源管网布局及能源站的供能分区,下层能源站优化运行模型(下文简称下层模型)通过求解运行优化问题,能为多种能源和负荷的互补耦合提供更加灵活的方式,在运行优化过程中计及烟效率,将下层运行结果返回上层模型中调整供能分区,使各类型负荷相互配合,实现各级品位热能的充分消纳和系统运行成本的降低。

$$C_{low} = \mu_1 (C_{ful} + C_{env}) - u_2 \eta_{ex} \quad (10)$$

式中: C_{low} 为下层成本; C_{ful} 为能耗成本; μ_1 和 u_2 分别为经济性指标和烟效率指标的权重系数。

1) 能耗成本。

$$C_{ful} = C_{gas} + C_{grid} \quad (11)$$

$$C_{gas} = \rho_{gas}^t \left(\sum_j \sum_t P_{GT,j}^t + \sum_j \sum_t P_{GB,j}^t \right) \quad (12)$$

$$C_{\text{grid}} = \sum_{i,j} (\lambda_j^{\text{buy}} p_{i,j}^{\text{buy}} \rho_t^{\text{buy}} - \lambda_j^{\text{sell}} p_{i,j}^{\text{sell}} \rho_t^{\text{sell}}) \quad (13)$$

$$\lambda_j^{\text{buy}} + \lambda_j^{\text{sell}} \leq 1 \quad (14)$$

式中: C_{gas} 和 C_{grid} 分别为购气和购电成本; ρ_t^{gas} 为 t 时刻的天然气价格; $P_{\text{GT},j}^t$ 和 $P_{\text{GB},j}^t$ 分别为 t 时刻能源站 j 内燃气轮机和燃气锅炉的天然气消耗量; $p_{i,j}^{\text{buy}}$ 和 $p_{i,j}^{\text{sell}}$ 分别为 t 时刻能源站 j 向电网购买和出售电能的功率; ρ_t^{buy} 和 ρ_t^{sell} 分别为 t 时刻向电网购买和出售电能的价格; λ_j^{buy} 、 λ_j^{sell} 分别为购、售电的 0-1 变量, $\lambda_j^{\text{buy}} + \lambda_j^{\text{sell}} \leq 1$ 表示不可同时购售电。

2) 环境成本。

$$C_{\text{env}} = \sum (E_{\text{grid}} P_{\text{net}}^e(t) + E_{\text{gas}} P_{\text{net}}^g(t)) \omega^{\text{Clax}} \quad (15)$$

式中: E_{grid} 和 E_{gas} 分别为单位购电量和燃烧单位天然气的 CO_2 排放量; ω^{Clax} 为单位 CO_2 碳税; $P_{\text{net}}^e(t)$ 和 $P_{\text{net}}^g(t)$ 分别为 t 时刻向电网购电量和燃气轮机发电量。

2.3 约束条件

1) 设备选型约束。

$$\theta_j^s P_s^{\min} \leq P_s \leq \theta_j^s P_s^{\max} \quad (16)$$

$$\sum_i \theta_j^i \leq 1 \quad (17)$$

式中: $\theta_j^s \in \{0, 1\}$, 为能源站 j 内设备 s 的安装系数, 取值为 1、0 分别表示安装、未被安装; P_s 为设备 s 的安装容量; $P_s^{\min}$ 和 $P_s^{\max}$ 分别为设备 s 安装容量的最小值和最大值; $\theta_j^i \in \{0, 1\}$, 为选型系数, 取值为 1、0 分别表示设备 s 的第 i 种类型被选中 and 未被选中, 所有选型系数之和为 1 可使设备 s 有且仅有 1 种类型。

2) 功率平衡约束。

能源站运行时, 需要保证能源母线上的供需平衡, 功率平衡约束如式 (18)~(23) 所示。

$$P_E^{\text{load}} = P_t^{\text{grid}} + P_t^{\text{GT}} + P_t^{\text{PT}} - P_t^{\text{HP}} - P_t^{\text{AC}} - \lambda P_t^{\text{ESS}} \quad (18)$$

$$H_S^{\text{load}} = H_t^{\text{GT},S} + H_t^{\text{GB},S} - H_t^{\text{ACH},S} - H_t^{\text{AHP},S} - H_t^{\text{PH},S} \quad (19)$$

$$H_H^{\text{load}} = H_t^{\text{PH},H} \quad (20)$$

$$H_M^{\text{load}} = H_t^{\text{HP},M} + H_t^{\text{AHP},M} - H_t^{\text{PH},M} - \lambda H_t^{\text{tank},M} \quad (21)$$

$$H_L^{\text{load}} = H_t^{\text{GT},L} + H_t^{\text{ACH},L} - H_t^{\text{AHP},L} \quad (22)$$

$$H_C^{\text{load}} = H_t^{\text{AC},C} + H_t^{\text{ACH},C} - \lambda H_t^{\text{tank},C} \quad (23)$$

式中: P_E^{load} 、 H_S^{load} 、 H_H^{load} 、 H_M^{load} 、 H_L^{load} 、 H_C^{load} 分别为电负荷、蒸汽负荷、高温热水负荷、中温热水负荷、低温热水负荷和冷负荷, 分别由不同的能源设备供应; P_t^{grid} 、 P_t^{GT} 、 P_t^{PT} 和 P_t^{HP} 、 P_t^{AC} 、 P_t^{ESS} 分别为电网、燃气轮机、光伏提供的电功率和热泵、电制冷机组、蓄电池储存的电功率; $H_t^{\text{GT},S}$ 、 $H_t^{\text{GB},S}$ 和 $H_t^{\text{ACH},S}$ 、 $H_t^{\text{AHP},S}$ 、 $H_t^{\text{PH},S}$ 分别为燃气轮机、燃气锅炉提供的蒸汽功率和吸收式制冷机组、吸收式热泵机组、尖峰加热器消耗的蒸汽功率; $H_t^{\text{PH},H}$ 为尖峰加热器功率; $H_t^{\text{HP},M}$ 、 $H_t^{\text{AHP},M}$ 和 $H_t^{\text{PH},M}$ 、 $H_t^{\text{tank},M}$ 分别为热泵、吸收式热泵提供的中温热水功率和尖峰加热器、储热水箱储存的中温热水功率; $H_t^{\text{GT},L}$ 、 $H_t^{\text{ACH},L}$ 和 $H_t^{\text{AHP},L}$ 分别为燃气轮机余热回收产生的低温热水功率、吸收式制冷机组生产的低温热水功率和吸收式

热泵的低温热水消纳功率; $H_t^{\text{AC},C}$ 、 $H_t^{\text{ACH},C}$ 、 $H_t^{\text{tank},C}$ 分别为电制冷机组、吸收式制冷机组制冷功率和储冷水箱储存功率; $\lambda = 1$ 、 $\lambda = -1$ 分别表示储能、放能。

3) 设备爬坡约束。

能源站内各设备在运行时, 需要满足设备的最大最小运行功率约束和爬坡约束, 如式 (24) 所示。

$$\begin{cases} P_{s,\min} \leq P_{s,i}^t \leq P_{s,\max} \\ -D_s \Delta t \leq P_{s,i}^{t+1} - P_{s,i}^t \leq B_s \Delta t \end{cases} \quad (24)$$

式中: $P_{s,\min}$ 、 $P_{s,\max}$ 分别为设备 s 的最小、最大运行功率; $P_{s,i}^t$ 为设备 s 在 t 时刻的运行功率; D_s 、 B_s 分别为设备 s 的向下、向上爬坡率; Δt 为爬坡时间。

3 模型求解

为了实现考虑能量梯级利用的园区综合能源系统的能源站优化配置以及能源网络规划, 模型求解过程分为两部分: 首先上层模型基于最短路径理论的枚举法和综合能矩对能源站选址、供能分区、能源网络进行规划, 然后下层模型考虑能源站内各类设备的优化运行, 求解能源设备配置。在 MATLAB 中借助 YALMIP 优化工具箱调用 CPLEX 求解器对能源站网双层规划模型进行求解, 求解流程如下。

上层模型基于最短路径理论的枚举法, 通过遍历解空间中所有可行解得到最优解, 具体步骤如下。

1) 输入园区负荷及地理信息参数, 确定园区新建能源站数量, 输入目标函数初值 $\min C_{\text{up}}$ 为无穷大。

2) 选择一个数量方案, 初始化能源站站址, 集合 Q 为空集; 根据节点和位置信息, 计算边矩阵 E , 矩阵中的元素表示节点 i 、 j 的位置关系, 元素取值为 1、0 分别表示节点 i 、 j 相邻、不相邻。

3) 以初始化的能源站站址为中点, 采用 Floyd 算法搜索能源站的供能范围, 记录最短路径矩阵 $D_{\min}$; 将能源站供能范围内的负荷点 i 计入集合 Q , 依次计算直至所有负荷点都有对应能源站供能, 并计算能源站负荷点 i 和 j 的最小综合能矩。

4) 计算上层目标函数 C_{up} , 其中能源站建设成本由下层目标函数进行计算。

5) 若计算值 $C_{\text{up}} < \min C_{\text{up}}$, 则 C_{up} 为当前最小值, 并更新目标值 $\min C_{\text{up}} = C_{\text{up}}$, 保存集合 Q ; 否则移动能源站站址, 返回步骤 3)。

6) 更新数量方案, 返回步骤 2)。

7) 输出上层目标函数最优值 $\min C_{\text{up}}$ 、选择的能源站数量及位置、各负荷中心与能源站的对应关系及供能网络的铺设方案。

下层模型为能源站的运行优化模型, 对能源站进行运行经济性分析, 具体步骤如下:

1) 根据上层模型得到的参数, 给出能源站供能范围内的电、热、冷负荷量;

2)根据负荷信息得到能源站运行情况,计算下层目标函数 C_{low} ,得到能源站内的设备配置结果和运行情况;

3)根据运行情况,将设备配置情况反馈至上层模型的步骤4)的计算过程中。

园区综合能源系统能源站网双层规划优化模型的求解流程见附录A图A4。

4 算例分析

4.1 算例描述

本文选取北方某园区作为算例测试园区。该园区面积约为 3.34 km^2 ,共有68个负荷节点和62个道路节点,包含工业、商业、居民3种负荷类型,规划区域如附录A图A5所示,各负荷节点的位置信息及负荷信息如附录A表A1所示。该规划区域内的电负荷、中温热水负荷、高温热水负荷、蒸汽负荷、冷负荷分别为 3.94 、 0.63 、 3.2 、 0.5 、 3.8 MW 。能源站内规划设备可选用燃气轮机、燃气锅炉、吸收式热泵、吸收式制冷、电热泵、电制冷机组、尖峰加热器、电储能、储热水箱、储冷水箱等,设备寿命周期为 20 a ,各设备主要参数如附录A表A2所示。

进行规划时,考虑到项目周期较长,如果采用逐时计算的方式进行优化规划,将会由于整个问题规模巨大而难以求解。因此,本文按照电、热、冷负荷及光伏和风机出力的季节特性,将每年分为3个典型季节:冬季(1月—3月、11月、12月),夏季(6月—9月),过渡季为剩余月份。首先考虑负荷的季节特性,通过合成聚类的方法,生成各负荷中心的典型日场景。其次,根据各典型日光照和温度情况计算得到光伏出力曲线,如附录A图A6所示。本文采用分时电价:10:00—15:00和18:00—23:00采用峰电价 $1.3902\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$;07:00—10:00和15:00—18:00采用平电价 $0.8645\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$;23:00至次日07:00采用谷电价 $0.3648\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

4.2 规划方案

本文在能源站的优化配置规划过程中设置3种规划方案,并对3种规划方案进行经济性评估。

1)方案1:按照传统冷热电联供的方式进行供能,不考虑能量的梯级利用与负荷间的能源品位互补,具体供能策略见文献[21];在传统冷热电联供模式下进行能源站的优化配置时,将中温热水负荷和高温热水负荷统一归为高温热负荷,通过热网供应。

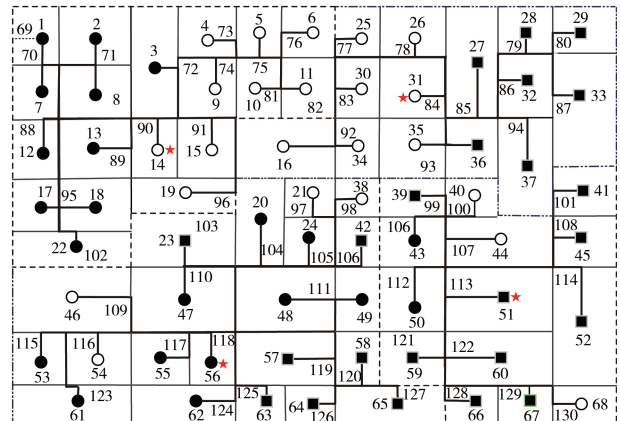
2)方案2:仅采用能量梯级利用的供能策略,不考虑各类负荷之间的互补特性。

3)方案3:采用能量梯级利用的冷热电联供模式,考虑用户多样的用能需求与能源品位互补,根据“温度对口,梯级利用”的原则,满足用户温度对口的热能需求,提升能量的利用效率。

4.3 能源站选址及供能网络规划结果

根据文献[1,9]中对园区综合站初始规划数量的研究,综合考虑园区面积及能源站的供能半径和经济性,拟在园区内建设2—4座能源站。方案1—3的能源站选址、管网布局分别如图3—5所示。图中69处对应图A5中的待选通道,算例中并未选择该通道。

由图3可知,方案1将规划区域划分为4个子区域,能源站点分别为节点14、31、51、56。可以看出,各供能子区域供能面积大小相差不大,且供能区域内的工业负荷较为集中。由图4可知,方案2将规划区域划分为3个子区域,能源站分别为节点14、35、59,各类型负荷在供能区域较为集中。由图5可知,方案3将规划区域划分为3个子区域,能源站点分别为节点13、35、58,各供能子区域较为狭长,且工业负荷在各区域分布较为均匀。

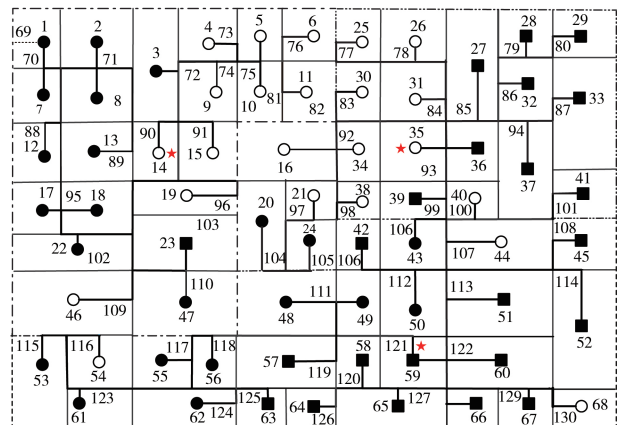


---, --- 供能子区域边界; — 能源管线; — 已有街道

★ 能源站; ● 工业负荷; ○ 居民负荷; ■ 商业负荷

图3 方案1的能源站选址及网络规划结果

Fig.3 Energy station location and network planning results of Scheme 1



---, ---, --- 供能子区域边界; — 能源管线; — 已有街道

★ 能源站; ● 工业负荷; ○ 居民负荷; ■ 商业负荷

图4 方案2的能源站选址及网络规划结果

Fig.4 Energy station location and network planning results of Scheme 2

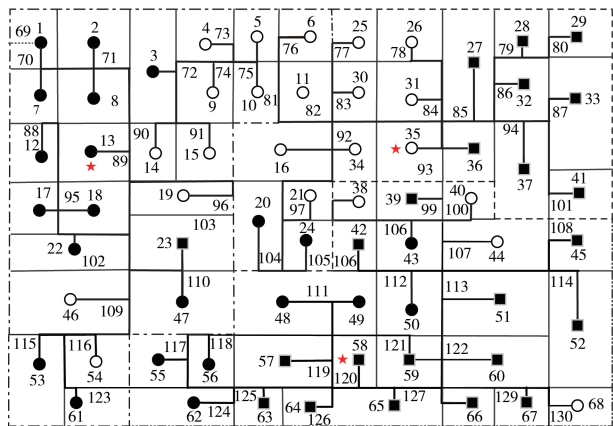


图5 方案3的能源站选址及网络规划结果

Fig.5 Energy station location and network planning results of Scheme 3

4.4 能源站优化配置结果及经济性分析

3种方案的设备配置结果分别如表1—3所示,具体分析如下。

1)方案1在不考虑能量梯级利用的情况下,供热依靠一次能源设备直接换热,能量的利用效率较低;在运行过程中,消耗大量蒸汽,且在运行过程中,各品位能量只能一次利用,导致燃气轮机和燃气锅炉等供热设备的容量增加。与考虑能量梯级利用策略的方案2、3相比,方案1的燃气轮机总配置容量均增加了1000 kW,燃气锅炉总配置容量分别增加了500、1000 kW。

2)方案2、3均考虑能量的梯级供能策略,但是方案2不考虑负荷间的互补特性,由负荷分区可知,方案2在规划时热能利用集中在单一品位的热能,不能实现各级品位热能的充分利用,导致燃气锅炉、吸收式热泵、储热设备的规划容量较方案3分别增加了500 kW、400 kW、10 t。

3)方案3考虑能量的梯级利用过程中,各品位的热能之间可以通过电热耦合设备相互转化,因此其电热泵、电制冷机组配置容量较方案1分别增加了200、400 kW。

各方案的经济性分析结果如表4所示,具体分析如下。

1)方案1仅在能源管网的投资成本上低于方案2、3(分别低666.38万元和638.93万元)。方案1将中温热水和高温热水统一为热水负荷,在铺设管道时,只铺设1类热水管道,管道铺设成本较低。而方案2、3铺设多类热水管道,管道铺设费用较高。但是在能源设备投资成本、运行成本、环境成本费用上,方案1均高于方案2、3。

2)在设备选型定容方面,方案1不涉及能量的梯级利用,在供冷、供热时需要消耗高品位热源,导致配置设备的容量增加,因此方案1的设备成本较方案2、3分别增加了555.41、851.09万元。且在运行过程中,方案1对蒸汽的需求量较大,使得燃气锅炉和燃气轮机处于高负荷运行状态,从而导致方案1的购气成本和排放量增加,运行成本、环境成本较方案2分别增加了210.74、77.49万元/a。

3)在整体经济投资上,方案1比不考虑能量梯

表1 方案1的能源站配置

Table 1 Energy station configuration of Scheme 1

能源站	燃气轮机 容量/kW	燃气锅炉 容量/kW	吸收式热泵 容量/kW	吸收式制冷 容量/kW	电热泵 容量/kW	电制冷机组 容量/kW	蓄电池 容量/kW	储热水箱 容量/t	储冷水箱 容量/t
14	1500	1500	600	1000	0	600	3000	15	10
31	2000	1500	1000	1500	1000	1000	3500	20	10
51	1000	1500	600	1000	600	600	3000	10	15
56	1000	1000	600	0	0	0	3000	10	10

表2 方案2的能源站配置

Table 2 Energy station configuration of Scheme 2

能源站	燃气轮机 容量/kW	燃气锅炉 容量/kW	吸收式热泵 容量/kW	吸收式制冷 容量/kW	电热泵 容量/kW	电制冷机组 容量/kW	蓄电池 容量/kW	储热水箱 容量/t	储冷水箱 容量/t
14	2000	2000	600	1000	600	1000	3000	20	15
35	1000	1500	1000	1500	600	1000	3500	20	10
59	1500	1500	1000	1000	600	600	3000	15	15

表3 方案3的能源站配置

Table 3 Energy station configuration of Scheme 3

能源站	燃气轮机 容量/kW	燃气锅炉 容量/kW	吸收式热泵 容量/kW	吸收式制冷 容量/kW	电热泵 容量/kW	电制冷机组 容量/kW	蓄电池 容量/kW	储热水箱 容量/t	储冷水箱 容量/t
13	1500	1500	600	1000	600	1000	3000	15	15
35	1500	1500	1000	1500	600	1000	3500	20	10
58	1500	1500	600	1000	600	600	3000	10	15

表4 各方案的能源站及能源管网经济性分析

Table 4 Economic analysis of energy station and energy pipe network for each scheme

方案	能源管网 成本/万元	能源设备 成本/万元	运行成本/ (万元·a ⁻¹)	环境成本/ (万元·a ⁻¹)
1	882.35	8463.62	2068.77	528.35
2	1548.73	7908.21	1858.03	450.86
3	1521.28	7612.53	1736.71	432.85

级利用的方案2、3整体投资成本偏高。对比考虑能量梯级利用的方案2、3的经济性可知,方案2的整体投资成本较高,特别是在能源设备和运行成本方面较方案3分别增加了295.68万元和121.32万元/a。原因是方案2未考虑不同类负荷之间的品位互补,使得热能需求的品位单一,其他品位的热能无法被利用,导致提供高品位热能的设备及储热设备容量增加,且增加了运行成本。因此,采用能量梯级利用且考虑负荷品位互补的供能方案能够降低投资成本、减少碳排放量、提升经济性。

4.5 焓效率分析

为了体现能量梯级利用供能方案相对于传统冷热电联供方案的优势,以及考虑分布式能源对焓效率的提升,对方案1、3的焓效率及可再生能源对焓效率的影响进行分析,结果如表5所示。由表可见,考虑能量的梯级利用后,能量得到了充分的利用,相比于传统方案提升了11.27%,分布式能源接入后使得焓效率提升了6.79%,即考虑焓效率指标有利于提升新能源的消纳。

表5 方案1、3的焓效率及可再生能源对焓效率的影响

Table 5 Exergy efficiency of Scheme 1 and Scheme 3, and influence of renewable energy on exergy efficiency

方案	焓效率/%	
	含分布式能源	不含分布式能源
1	73.75	68.35
3	85.02	78.23

5 结论

本文构建了考虑能量梯级利用的综合能源系统站网双层规划模型,并通过算例仿真验证了模型及其求解的有效性,得到了如下结论:

1)基于改进的EH的能源系统模型,降低了规划过程中能源设备的耦合复杂性,并充分利用燃气轮机、吸收式制冷机的低温热能,提升了能量利用率;

2)在能源设备选型定容中,考虑能量的梯级利用,减少了燃气轮机、燃气锅炉等设备的建设容量,减少了能源站的投资成本;

3)在供能范围和管网布局中,分析园区综合能源系统的整体焓效率,实现了负荷间的能源品位互补,提升了系统的能量利用效率和分布式能源的消纳。

本文所提的设备模型均为稳态模型,尚未考

虑设备运行的非线性特性,未来将利用数据拟合、人工智能等手段对各类能源设备的可运行区间、变工况特性、工作寿命等进行精细化建模,以此作为规划基础。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 刘洪,郑楠,葛少云,等. 考虑负荷特性互补的综合能源系统站网协同规划[J]. 中国电机工程学报,2021,41(1):52-64,397. LIU Hong, ZHENG Nan, GE Shaoyun, et al. Station and network coordinated planning of integrated energy systems considering complementation of load characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 52-64, 397.
- [2] 蔡含虎,向月,杨昕然. 计及需求响应的综合能源系统容量经济配置及效益分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):186-194. CAI Hanhu, XIANG Yue, YANG Xinran. Economic capacity allocation and benefit analysis of integrated energy system considering demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 186-194.
- [3] 黄子硕,何桂雄,闫华光,等. 园区级综合能源系统优化模型功能综述及展望[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):10-18. HUANG Zishuo, HE Guixiong, YAN Huagang, et al. Overview and prospect of optimization model function for community-scale integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 10-18.
- [4] 吕佳炜,张沈习,程浩忠,等. 考虑互联互通的区域综合能源系统规划研究综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(12):4001-4021. LÜ Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review on district-level integrated energy system planning considering interconnection and interaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4001-4021.
- [5] 黄伟,柳思岐,叶波. 考虑源-荷互动的园区综合能源系统站-网协同优化[J]. 电力系统自动化,2020,44(14):44-53. HUANG Wei, LIU Siqi, YE Bo. Station-network cooperative optimization of integrated energy system for park considering source-load interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 44-53.
- [6] ZENG Jing, HAN Jie, ZHANG Guoqiang. Diameter optimization of district heating and cooling piping network based on hourly load[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107: 750-757.
- [7] LI Xiangli, LIN Duanmu, SHU Haiwen. Optimal design of district heating and cooling pipe network of seawater-source heat pump[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(1): 100-104.
- [8] 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 Bing. Research on “stations-pipelines” layout and optimization of regional energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 675-684.
- [9] 姚志力,王志新. 考虑负荷特性的区域冷热电联供系统站网协同优化设计方法[EB/OL]. 电工技术学报. [2021-05-23]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201372>.
- [10] 胡泉,尚策,陈东文,等. 考虑能量品质的区域综合能源系统多目标规划方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(19):22-31,139. HU Xiao, SHANG Ce, CHEN Dongwen, et al. Multi-objective planning method for regional integrated energy systems considering energy quality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 22-31, 139.
- [11] 亓海青,韩巍,张娜,等. 基于能的品位概念的焓经济分析方法及其案例分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(12):3223-3231.

- QI Haiqing, HAN Wei, ZHANG Na, et al. Exergoeconomic analysis methodology based on energy level and case study[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3223-3231.
- [12] 黄文焘, 王萧博, 邹能灵, 等. 电热微网能量耦合转换模型与梯级优化利用方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6804-6815.
- HUANG Wentao, WANG Xiaobo, TAI Nengling, et al. Energy coupling conversion model and cascade utilization method for microgrid with heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6804-6815.
- [13] WANG Xuan, JIN Ming, FENG Wei, et al. Cascade energy optimization for waste heat recovery in distributed energy systems[J]. Applied Energy, 2018, 230: 679-695.
- [14] LI Yan, WANG Weiqin, MA Yifeng, et al. Study of new cascade heating system with multi-heat sources based on exhausted steam waste heat utilization in power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 136: 475-483.
- [15] 戴世刚. 电热联合微网协调消纳与梯级优化策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- DAI Shigang. Research on coordinated accommodation and step utilization optimization in a combined heat and power microgrid[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [16] 刘洪, 赵越, 刘晓鸥, 等. 计及能源品位差异的园区多能源系统综合能效评估[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2835-2843.
- LIU Hong, ZHAO Yue, LIU Xiaou, et al. Comprehensive energy efficiency assessment of park-level multi-energy system considering difference of energy grade[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2835-2843.
- [17] 刘晓鸥, 葛少云. 区域综合能源系统的能效定义及其相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 8-18.
- LIU Xiaou, GE Shaoyun. Definition and correlation analysis on energy utilization efficiency of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 8-18.
- [18] 仇知, 王蓓蓓, 贾树俊, 等. 计及不确定性的区域综合能源系统双层优化配置规划模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 176-185.
- QIU Zhi, WANG Beibei, BEN Shujun, et al. Bi-level optimal configuration planning model of regional integrated energy system considering uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 176-185.
- [19] MU Yunfei, CHEN Wanqing, YU Xiaodan, et al. A double-layer planning method for integrated community energy systems with varying energy conversion efficiencies[J]. Applied Energy, 2020, 279: 182-194.
- [20] 黄武靖, 张宁, 董瑞彪, 等. 多能源网络与能量枢纽联合规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5425-5437.
- HUANG Wujing, ZHANG Ning, DONG Ruibiao, et al. Coordinated planning of multiple energy networks and energy hubs[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5425-5437.
- [21] 王奖, 邓丰强, 张勇军, 等. 园区能源互联网的规划与运行研究综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 24-32, 55.
- WANG Jiang, DENG Fengqiang, ZHANG Yongjun, et al. Review on planning and operation research of park energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 41(2): 24-32, 55.

作者简介:



周步祥

周步祥(1965—),男,四川成都人,教授,博士,主要研究方向为调度自动化、配电网自动化、电网规划、综合能源新技术(E-mail: hiway_scu@126.com);

夏海东(1995—),男,四川眉山人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统规划(E-mail: 2577620996@qq.com);

臧天磊(1986—),男,内蒙古通辽人,特聘副研究员,博士,通信作者,主要研究方向为综合能源系统运行优化与控制(E-mail: zangtianlei@126.com)。

(编辑 任思思)

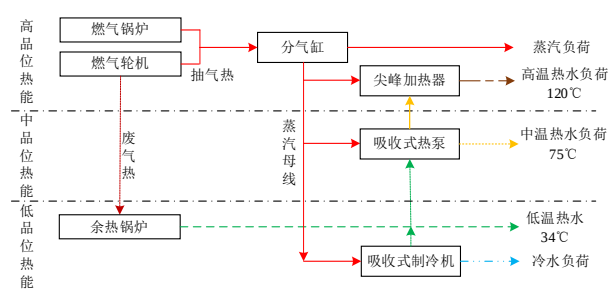
Station and network coordinated planning of park integrated energy system considering energy cascade utilization

ZHOU Buxiang, XIA Haidong, ZANG Tianlei

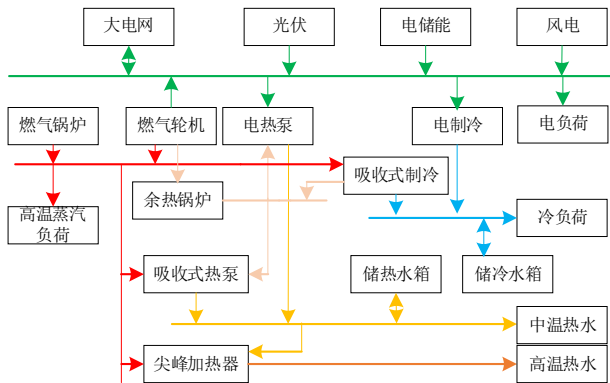
(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to improve the energy utilization efficiency of integrated energy system, based on the principle of energy cascade utilization, the site selection of energy stations, equipment selection and capacity determination, and energy network layout are coordinated. At the same time, considering the complementary characteristics of energy grade of load, a bi-level planning model of station and network of park integrated energy system is established. The upper-level model aims to minimize the investment cost of energy stations and energy networks and establishes a collaborative investment model of energy stations and networks. The lower-level model considers the energy grade complementation among loads, and establishes the operation model of energy station with the goal of minimizing the operation cost while taking the exergy efficiency into account. On this basis, based on the enumeration method of shortest path theory, CPLEX solver is used to solve the model. A north park integrated energy system is selected to verify the proposed method by simulation. The results show that the proposed method realizes the energy grade complementation among loads and solves the problem of mismatch between energy demand and energy supply grade in traditional planning.

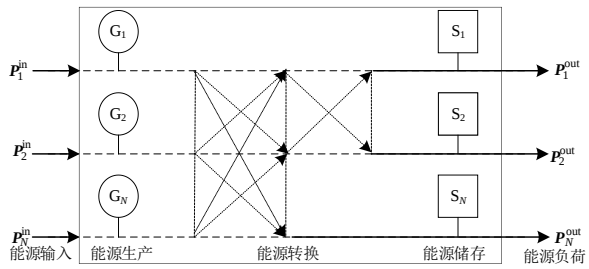
Key words: energy utilization efficiency; cascade utilization; station and network planning; grade complementation; exergy efficiency; shortest path



图A1 能量的梯级利用过程
Fig.A1 Cascade utilization process of energy



图A2 园区综合能源站能量流示意图
Fig.A2 Schematic diagram of energy flow of park integrated energy system



图A3 改进的EH模型
Fig.A3 Improved EH model

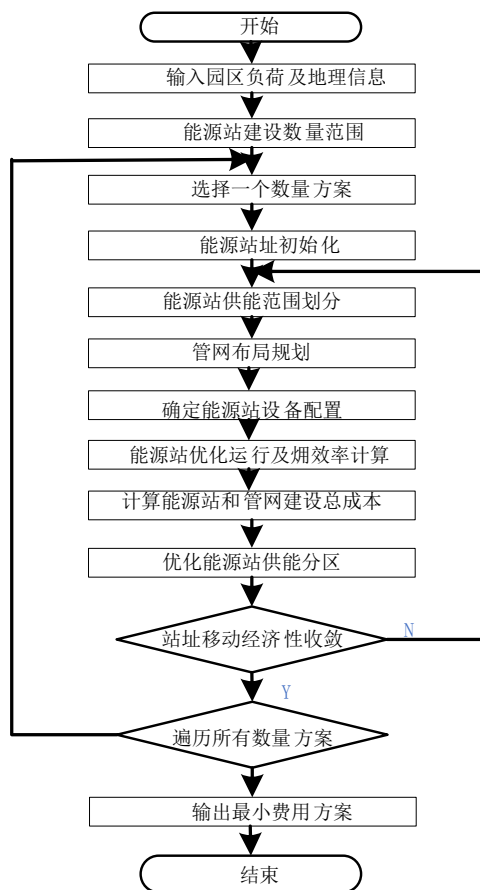


图 A4 园区综合能源系统站网规划流程图

Fig.A4 Flowchart of station and network planning of park integrated energy system

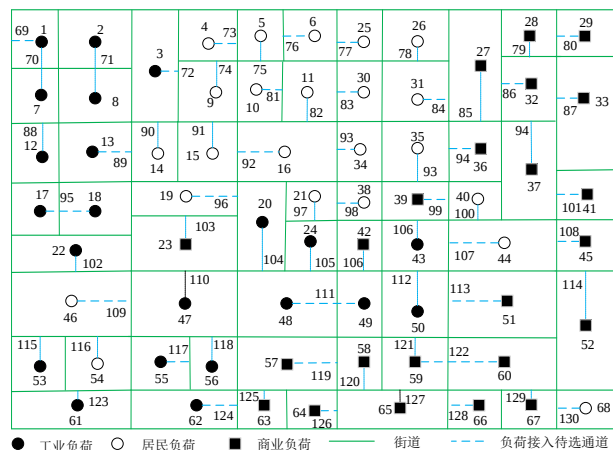


图 A5 待规划区域负荷及道路示意图

Fig.A5 Schematic diagram of area load and road to be planned

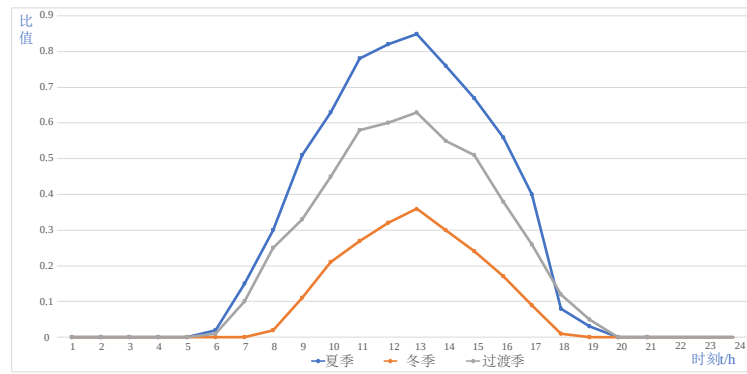


图 A6 PV 出力与装机容量比值

Fig.A6 Ratio of photovoltaic output to installed capacity

表 A1 负荷节点数据

TableA1 Data of load node

负荷序号	横坐标/km	纵坐标/km	电负荷/MW	中温热水负荷/MW	高温热水负荷/MW	蒸汽负荷/MW	冷负荷/MW
1	0.37	2.45	0.04056	0.0066	0.033	0.01485	0.039
2	0.58	2.4	0.05720	0.0094	0.047	0.02115	0.055
3	0.82	2.33	0.05096	0.0082	0.041	0.01845	0.049
4	1.05	2.45	0.07384	0.0122	0.061		0.071
5	1.25	2.45	0.05408	0.0088	0.044		0.052
6	1.45	2.45	0.07696	0.0126	0.063		0.074
7	0.37	2.22	0.03744	0.0060	0.030	0.01350	0.036
8	0.58	2.18	0.06448	0.0104	0.052	0.02340	0.062
9	1.06	2.24	0.05096	0.0082	0.041		0.049
10	1.22	2.22	0.07072	0.0116	0.058		0.068
11	1.45	2.22	0.08112	0.0132	0.066		0.078
12	0.37	2.02	0.06032	0.0100	0.050	0.02250	0.058
13	0.58	2.02	0.05408	0.0088	0.044	0.01980	0.052
14	0.85	2.02	0.06032	0.0100	0.050		0.058
15	1.05	2.0	0.06760	0.0110	0.055		0.065
16	1.34	2.02	0.04056	0.0066	0.033		0.039
17	0.37	1.71	0.03744	0.0060	0.030	0.01300	0.036
18	0.58	1.71	0.08112	0.0132	0.066	0.02970	0.078
19	0.91	1.78	0.07072	0.0116	0.058		0.068
20	1.22	1.60	0.05720	0.0094	0.047	0.02610	0.055
21	1.45	1.71	0.05408	0.0088	0.044		0.052
22	0.51	1.52	0.03744	0.0060	0.030	0.01980	0.036
23	0.91	1.53	0.06760	0.0110	0.055		0.065
24	1.45	1.53	0.03744	0.0060	0.030	0.01350	0.036
25	1.66	2.45	0.05096	0.0082	0.041		0.049
26	1.87	2.45	0.07072	0.0116	0.058		0.068
27	2.09	2.33	0.07072	0.0116	0.058		0.068
28	2.30	2.45	0.09776	0.0160	0.080		0.094
29	2.51	2.45	0.10816	0.0176	0.088		0.104
30	1.66	2.22	0.03016	0.0050	0.025		0.029
31	1.87	2.18	0.07696	0.0126	0.063		0.074
32	2.30	2.23	0.04680	0.0078	0.039		0.045
33	2.51	2.10	0.07072	0.0116	0.058		0.068
34	1.66	2.02	0.06032	0.0100	0.050		0.058
35	1.87	2.02	0.04680	0.0078	0.039		0.045
36	2.09	2.02	0.06760	0.0110	0.055		0.065
37	2.30	1.85	0.05096	0.0082	0.041		0.049
38	1.66	1.73	0.03744	0.0060	0.030		0.036
39	1.87	1.75	0.03016	0.0050	0.025		0.029
40	2.09	1.75	0.06760	0.0110	0.055		0.065
41	2.51	1.75	0.04680	0.0078	0.039		0.045
42	1.66	1.53	0.05408	0.0088	0.044		0.052
43	1.87	1.53	0.07384	0.0122	0.061	0.02745	0.071
44	2.22	1.53	0.06448	0.0104	0.052		0.062
45	2.51	1.53	0.06032	0.0100	0.050		0.058
46	0.50	1.33	0.04056	0.0066	0.033		0.039
47	0.92	1.33	0.05096	0.0082	0.041	0.01845	0.049
48	1.34	1.33	0.07072	0.0116	0.058	0.02610	0.068
49	1.66	1.33	0.05408	0.0088	0.044	0.01980	0.052
50	1.87	1.33	0.10400	0.0170	0.085	0.03825	0.100
51	2.22	1.33	0.03328	0.0056	0.028		0.032
52	2.51	1.22	0.03328	0.0056	0.028		0.032
53	0.37	1.05	0.04056	0.0066	0.033	0.01485	0.039
54	0.58	1.05	0.07072	0.0116	0.058	0.02610	0.068
55	0.85	1.05	0.09776	0.0160	0.080	0.0360	0.094
56	1.05	1.05	0.06032	0.0100	0.050	0.02250	0.058
57	1.34	1.05	0.07384	0.0122	0.061		0.071
58	1.66	1.05	0.04368	0.0072	0.036		0.042
59	1.87	1.05	0.05096	0.0082	0.041		0.049
60	2.22	1.05	0.05720	0.0094	0.047		0.055
61	0.50	0.85	0.04056	0.0066	0.033	0.01485	0.039
62	0.92	0.85	0.06448	0.0104	0.052	0.02340	0.062
63	1.25	0.85	0.05408	0.0088	0.044		0.052
64	1.46	0.85	0.03328	0.0056	0.028		0.032
65	1.81	0.85	0.04056	0.0066	0.033		0.039
66	2.10	0.85	0.03744	0.0060	0.030		0.036
67	2.31	0.85	0.07696	0.0126	0.063		0.074
68	2.50	0.85	0.03744	0.0066	0.033		0.036

表 A2 设备参数

TableA2 Parameters of equipments

设备名称	待选容量 /kW	设备参数	数值		设备名称	待选容量/kW	设备参数	数值
燃气轮机	500	发电效率	0.25/0.30/0.30		电制冷机组	600	能效比	3
	1000	抽气比例	0.55/0.66/0.66			1000		
	1500	余热回收效率	0.3		电热泵	600	能效比	3
燃气锅炉	1500	蒸汽效率	0.88			1000		
	2000		0.9		尖峰加热器	\	蒸汽利用率	0.9
吸收式热泵	800	能效比	3		电储能	3000	充电效率	0.98
	1000					3500	放电效率	0.98
吸收式制冷	1000	能效比	1.8		储热水箱	25	最大进出水速率	5t/h
		蒸汽利用率	0.92			30		
		1500	低温水产生比例		1.5	储冷水箱	25	最大进出水速率
	30							