

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.002

# 基于能量枢纽的综合能源系统优化规划

张夏平

(美国加利福尼亚州独立系统调度运营商, Folsom, California 95630, U. S. A.)

**摘要:** [目的]提出了基于能量枢纽的综合能源系统优化规划模型用于解决综合能源系统长期规划问题。[方法]能量枢纽(Energy Hub)是分析综合能源系统的重要模型,代表各种不同能源形式之间的耦合关系,例如电力,天然气,供热系统等。[结果]此综合能源系统优化规划模型在考虑系统可靠性,能源效率,排放指标等多种决策因素的情况下解决了不同能源形式之间的最优规划问题。[结论]综合能源系统算例分析用于验证该模型用于优化规划综合能源系统的有效性,并表明基于能量枢纽的综合能源系统针对系统的长期规划具有更大的灵活性,是研究综合能源系统规划的重要方向。

**关键词:** 能量枢纽; 综合能源系统; 优化规划

**中图分类号:** TK01; TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2019)04-0006-07

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Optimal Expansion Planning of Energy Hub with Multiple Energy Infrastructures

ZHANG Xiaping

(California Independent System Operator, Folsom, California 95630, U. S. A.)

**Abstract:** [Introduction] This paper presents an optimal expansion planning model for an energy hub with multiple energy systems. [Method] Energy hub represented a coupling among various energy infrastructures for supplying electricity, natural gas and heating loads. Combined heat and power (CHP) and natural gas furnaces were considered within the energy hub to convert energy into other forms. The multiple energy system planning problem would optimally determine appropriate investment candidates for generating units, transmission lines, natural gas furnaces, and CHPs that satisfy electricity and heating load forecasts and hub system constraints. [Result] The system performances associated with reliability, energy efficiency, and emission matrices is evaluated for the identified planning schedules. [Conclusion] Numerical simulations demonstrate the effectiveness of the proposed multiple energy system expansion planning approach based on energy hub.

**Key words:** Energy hub, multiple energy system, expansion planning

传统的能源供应形式一般由单一的能源供应设施供给工业,商业和住宅等不同用户需求。然而,最近十年的能源行业的发展体现出各种能源基础设施的相互依赖性数量显著增加。美国的天然气消耗量中用于发电的比重从2007年的32%增加到2012年的39%,并预计未来新增电量将以天然气作为主要燃料<sup>[1]</sup>。此外,还有近70 GW热电联产发电量在美国发电总容量的近7%<sup>[2]</sup>。天然气发电和热电联产广泛应用将进一步影响天然气,电力,热能等

的生产,传输和消费等各个环节。因此,对电力,天然气,热能等各种形式能源的综合协调利用的分析对系统的短期运营和长期规划都至关重要。传统的能源设施的最优规划问题解决规划期内新增能源的最优容量,位置,投产时间,但通常只优化单一形式的能源,而不考虑与其他类型能量的相互耦合。然而,随着各种形式能源的耦合逐渐加强,传统的分开规划和相对独立的运行并不能充分利用各种能源形式的灵活性,以达到能源最优配置的目的<sup>[3]</sup>。基于能量枢纽的综合能源系统优化规划模型在考虑系统可靠性,能源效率,排放指标等多种决策因素的情况下解决了不同能源形式之间的最优规

划问题。能量枢纽的概念首次在文献[4-5]中提出,代表各种不同能源形式之间的耦合关系,例如电力,天然气,供热系统等。能量枢纽被定义为多能源系统中能源,负荷,网络之间的交换耦合关系的输入输出模型。如图1所示的能力枢纽,电力和天然气为主要的输入能源,电力负荷和热负荷为主要的输出负荷,其中实现能量转换的设施包括变压器,热电联产机组 CHP(combined heat and power)和天然气炉。能量枢纽与传统能源系统的本质区别在于它可以利用不同能源形式的灵活性,例如电力负荷可由电力设施供应,也可由热电联产机组提供。

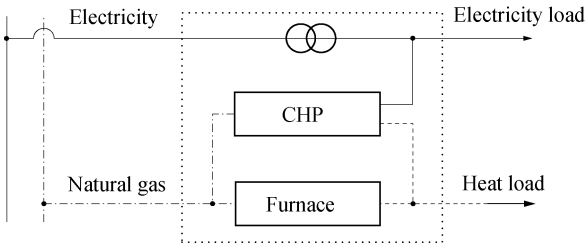


图1 含电力,天然气和热能的能量枢纽模型

Fig. 1 Energy hub with electricity, natural gas and heat systems

本文提出了基于能量枢纽的综合能源系统优化规划模型,包括电力,天然气,供热系统等。在考虑系统可靠性,能源效率,排放指标等多种决策因素的情况下,以最低成本为规划目标,解决不同能源形式之间的最优规划问题。能量枢纽提供了各种能量之间相互转换的灵活性,以满足不同的负荷需求。本文的其余部分内容如下:第一节介绍了典型的能量枢纽模型。综合能源最优规划模型详见第二节。第三节和第四节分别介绍了算例分析和结论。

## 1 能量枢纽模型

考虑具有不同能源形式  $\alpha, \beta, \dots, \gamma$  的能量枢纽模型,不同形式的能源输入相互转换用于供应不同类型负荷需求的转换关系可用以下矩阵表示:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} L_\alpha \\ L_\beta \\ \vdots \\ L_\gamma \end{pmatrix}}_L = \underbrace{\begin{pmatrix} C_{\alpha\alpha} & C_{\beta\alpha} & \cdots & C_{\gamma\alpha} \\ C_{\alpha\beta} & C_{\beta\beta} & \cdots & C_{\gamma\beta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{\alpha\gamma} & C_{\beta\gamma} & \cdots & C_{\gamma\gamma} \end{pmatrix}}_C \underbrace{\begin{pmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \\ \vdots \\ E_\gamma \end{pmatrix}}_E \quad (1)$$

其中输入的能源和输出的负荷分别表示为  $E = [E_\alpha, E_\beta, \dots, E_\gamma]$  和  $L = [L_\alpha, L_\beta, \dots, L_\gamma]$ 。矩阵  $C$

是前向耦合矩阵,它描述了从输入到输入的能量转换关系。耦合矩阵的每一个元素是耦合因子,它代表转能量枢纽内部的拓扑结构。例如将设备可将能量形式  $\alpha$  转换成  $\beta$ ,其耦合因子为  $C_{\alpha\beta}$ ,那么两种能量的转换关系可以表示为:

$$L_\beta = C_{\alpha\beta} E_\alpha \quad (2)$$

其中  $E_\alpha$  和  $L_\beta$  分别表示能量的输入量和输出量。对于单输入单输出的能量转换,耦合系数对应于转换设备的效率。转换设备的效率也可以是不同运行模式的的函数。当转换设备的效率相对稳定,就可以使用耦合矩阵代表输入输出能量之间的线性变换关系。在图1中,耦合矩阵包含三个转换设备:(1)变压器;(2)热电联产机组;(3)天然气炉。能量输入矢量  $E$  包括电力和天然气,负荷需求矢量  $L$  包括电力和供热负荷。

$$E = \begin{pmatrix} E_{el} \\ E_{gas} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$L = \begin{pmatrix} L_{el} \\ L_{th} \end{pmatrix} \quad (4)$$

转换设备的效率为  $\eta$ ,其中,  $\eta_{el}$  表示变压器的效率,  $\eta_{ge}^{CHP}$  和  $\eta_{gth}^{CHP}$  分别是热电联产机组的气电和气热转换效率,  $\eta_{gth}^{Fur}$  是燃气炉的效率。

$$L_{el} = \eta_{el} E_{el} + \eta_{ge}^{CHP} E_{gas}^{CHP} \quad (5)$$

$$L_{th} = \eta_{gth}^{Fur} E_{gas}^{Fur} + \eta_{gth}^{CHP} E_{gas}^{CHP} \quad (6)$$

另外,引入天然气分配因子  $\kappa$ ,  $\kappa E_{gas}$  是热电联产机组的天然气消耗量,  $(1 - \kappa) E_{gas}$  是天然气炉的天然气消耗量。

$$E_{gas}^{CHP} = \kappa E_{gas} \quad (7)$$

$$E_{gas}^{Fur} = (1 - \kappa) E_{gas} \quad (8)$$

考虑能量转换效率和分配因子后,耦合矩阵可以表示为:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} L_{el} \\ L_{th} \end{pmatrix}}_L = \underbrace{\begin{pmatrix} \eta_{el} & \kappa \eta_{ge}^{CHP} \\ 0 & \kappa \eta_{gth}^{CHP} + (1 - \kappa) \eta_{gth}^{Fur} \end{pmatrix}}_C \underbrace{\begin{pmatrix} E_{el} \\ E_{gas} \end{pmatrix}}_E \quad (9)$$

在综合能源系统中,可能存在多个能量枢纽。如图2所示,含具有三个能量枢纽(H1-H3)的综合能源系统包括了天然气,电力和供热的三个系统,同时与相邻的综合能源系统相连。

常见的综合能源系统拓扑连接矩阵可以表示为:

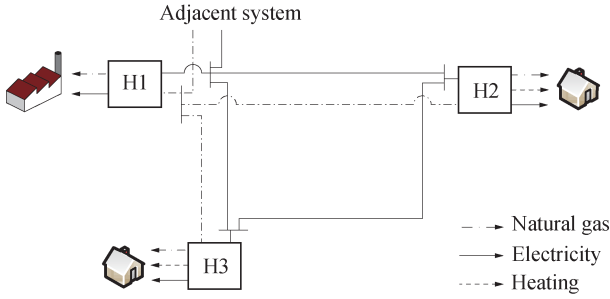


图2 含三个能量枢纽的综合能源系统

Fig. 2 Interconnected three-node energy hub system

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}_{1\alpha} \\ \vdots \\ \mathbf{E}_{i\alpha} \\ \vdots \\ \mathbf{E}_{\alpha} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & \cdots & s_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{i1} & \cdots & s_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{f}_{1\alpha} \\ \vdots \\ \mathbf{f}_{j\alpha} \\ \vdots \\ \mathbf{f}_{\alpha} \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中  $\mathbf{E}_{\alpha}$  表示输入的能量,  $\mathbf{S}_{\alpha}$  表示综合能源系统网络拓扑结构连接矩阵, 其元素可能为  $\{0, +1, -1\}$ ,  $\mathbf{F}_{\alpha}$  则代表通过某能源网络的能量流, 例如输电线路的输送功率, 天然气管道的送气量等。

## 2 综合能源优化规划模型

综合能源优化规划模型目标是在满足各种系统约束的同时最小化投资期内系统规划运行总现值。目标函数年度投资和运营成本, 包括发电机组, 输电线路, 天然气炉和热电联产机组, 以及失负荷成本。式(11)中,  $\tau_t = 1/(1+d)^{t-1}$  是拟投资设施在规划期结束时的现值系数。发电成本(12)包括拟建发电机组投资成本和所有机组的运行成本。拟建发电机组的投资成本是单位容量的函数。式(13)代表了拟建输电线路的投资成本。残值系数代表了初始投资的贬值的百分比。供暖系统成本(14)包括拟建燃气炉的投资运行成本和现有燃气炉的运行成本。式(15)表示拟建热电联产机组的的投资运行成本。失负荷成本(expected energy not supplied, EENS)由失负荷值和单位失负荷价值(value of lost load, VOLL, MYM/kWh)决定。

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum_t \sum_{i \in \text{CG}} \tau_t GC_{it} + \sum_t \sum_{l \in \text{CL}} \tau_t TC_{lt} + \sum_t \sum_{f \in \text{CF}} \tau_t FC_{ft} \\ + \sum_t \sum_{c \in \text{CH}} \tau_t HC_{ct} + \text{VOLL} \sum_t \tau_t \text{EENS}_t \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} GC_{it} = GIC_i P_i^{\max} (z_{it} - z_{i(t-1)}) - \frac{\tau_T}{\tau_t} \gamma_{it} GIC_i P_i^{\max} \\ (z_{it} - z_{i(t-1)}) + \sum_h \sum_b DT_{bht} OC_i P_{ibht} \quad (12) \end{aligned}$$

$$TC_{lt} = TIC_l (y_{lt} - y_{l(t-1)}) - \frac{\tau_T}{\tau_t} \gamma_{lt} TIC_l (y_{lt} - y_{l(t-1)}) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} FC_{ft} = FIC_f (X_{ft} - X_{f(t-1)}) - \frac{\tau_T}{\tau_t} \gamma_{ft} FIC_f (X_{ft} - X_{f(t-1)}) \\ + \sum_h \sum_b DT_{bht} OC_f H_{fbht} \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} HC_{ct} = HIC_c (U_{ct} - U_{c(t-1)}) - \frac{\tau_T}{\tau_t} \gamma_{ct} HIC_c \\ (U_{ct} - U_{c(t-1)}) + \sum_h \sum_b DT_{bht} OC_c P_{cbht} \quad (15) \end{aligned}$$

### 2.1 系统规划约束

综合能源优化规划模型所有备选投资设施均受限于建设和调试时间(16)~(19)。确定为拟建设施后直至规划期结束, 其投资状态变量为1, 如式(20)~(23)。年度电力计划约束(24)要求拟建和现有发电机组可以供给预测的负荷峰值需求和系统备用需求。

$$z_{it} = 0 \quad \forall i \in \text{CG}, \quad \forall t < T_i^{\text{com}} \quad (16)$$

$$y_{lt} = 0 \quad \forall l \in \text{CL}, \quad \forall t < T_l^{\text{com}} \quad (17)$$

$$X_{ft} = 0 \quad \forall f \in \text{CF}, \quad \forall t < T_f^{\text{com}} \quad (18)$$

$$U_{ct} = 0 \quad \forall c \in \text{CH}, \quad \forall t < T_c^{\text{com}} \quad (19)$$

$$z_{i(t-1)} \leq z_{it} \quad \forall i \in \text{CG}, \quad \forall t \quad (20)$$

$$y_{l(t-1)} \leq y_{lt} \quad \forall l \in \text{CL}, \quad \forall t \quad (21)$$

$$X_{f(t-1)} \leq X_{ft} \quad \forall f \in \text{CF}, \quad \forall t \quad (22)$$

$$U_{c(t-1)} \leq U_{ct} \quad \forall c \in \text{CH}, \quad \forall t \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in \text{EG}} P_i^{\max} + \sum_{i \in \text{CG}} P_i^{\max} z_{it} + \sum_{i \in \text{CH}} P_c^{\max} U_{ct} \\ \geq PD_{bht} + R_{bht} \quad \forall b, \forall h, \forall t \quad (24) \end{aligned}$$

### 2.2 能量枢纽约束

对于能量枢纽的每个节点, 稳态电力和天然气流量守恒方程表示为(25), (26)。其中所有支路能量流的总和等于注入该能量枢纽的能量。 $S^E$  和  $S^G$  代表电力和天然气网络连通矩阵。PL 和 F 表示电力和天然气在输电线路和天然气管网中的流量。电力和天然气供应量由  $P_{bht}$  和  $V_{bht}$  向量表示。在能量枢纽内, 能量通过耦合矩阵转换(27), (28)供应负荷。电力负荷由电力供应

$$E_{bht}^{\text{el}} = S^E * PL_{bht} + A * P_{bht} \quad \forall b, \forall h, \forall t \quad (25)$$

$$E_{bht}^{\text{gas}} = S^G * F_{bht} + B * V_{bht} \quad \forall b, \forall h, \forall t \quad (26)$$

$$L_{bht}^{\text{el}} - DL_{bht} = C^E * E_{bht}^{\text{el}} \quad \forall b, \forall h, \forall t \quad (27)$$

$$L_{bht}^{\text{th}} = C^T * E_{bht}^{\text{gas}} \quad \forall b, \forall h, \forall t \quad (28)$$

现有和拟建发电机组受制于容量限制(29),

(30)。热电联产机组所产生的电力和热量受到机组容量和可用的天然气流量(31)~(34)限制。天然气炉的热量输出受其容量和可用的天然气限制(35)~(37)。

$$0 \leq P_{ibht} \leq P_i^{\max} \quad \forall i \in EG, \forall b, \forall h, \forall t \quad (29)$$

$$0 \leq P_{ibht} \leq P_i^{\max} z_{it} \quad \forall i \in CG, \forall b, \forall h, \forall t \quad (30)$$

$$0 \leq P_{cbht} \leq P_c^{\max} U_{ct} \quad \forall c \in CC, \forall b, \forall h, \forall t \quad (31)$$

$$0 \leq H_{cbht} \leq H_c^{\max} U_{ct} \quad \forall c \in CC, \forall b, \forall h, \forall t \quad (32)$$

$$P_{cbht} = \kappa \eta_{ge}^{\text{CHP}} E_{mbht}^{\text{gas}} \quad \forall c \in CC, \forall b, \forall h, \forall t \quad (33)$$

$$H_{cbht} = \kappa \eta_{gth}^{\text{CHP}} E_{mbht}^{\text{gas}} \quad \forall c \in CC, \forall b, \forall h, \forall t \quad (34)$$

$$0 \leq H_{fbht} \leq H_f^{\max} \quad \forall f \in EF, \forall b, \forall h, \forall t \quad (35)$$

$$0 \leq H_{fbht} \leq H_f^{\max} X_{ft} \quad \forall f \in CF, \forall b, \forall h, \forall t \quad (36)$$

$$H_{fbht} = (1 - \kappa) \eta_{gth}^{\text{Fur}} E_{mbht}^{\text{gas}} \quad \forall f \in EF, CF, \forall b, \forall h, \forall t \quad (37)$$

### 2.3 传输网络流量约束

网络流量模型包括电力网络中电压和电流, 天然气网络中气压和天然气流量之间的关系。

电网约束: 采用线性的直流潮流模型<sup>[6]</sup>, 经过线路的潮流与节点两端相角之间为线性关系(38)~(41)。如果线路还未投产, 拟建线路的状态变量为零, 约束(41)将为零潮流约束。电力系统松弛节点包含电压相角为零(42)。

### 2.4 天然气网络约束

天然气系统一般有三个主要部分: 天然气供应商从多个天然气气井或储存设施收集天然气, 通过远距离天然气输气管道输送天然气, 以及终端供气商将天然气配送给用户<sup>[7]</sup>。类似于电力系统高压输电网母线有电压运行范围限制, 天然气系统也需调节每个高压输气网络节点的气压, 以保证终端用户的气压在合适范围内。天然气管道通过的天然气流量是末端节点处的压力的二次函数, 气流方向由管道两端气压差决定, 管道常数取决于温度, 长度, 直径, 摩擦和气体成分等特性<sup>[8]</sup>。在本文所考虑的长期规划模型中, 我们采取简化的线性天然气网络流量约束。天然气管道流量受到管道容量的约束(43)。天然气供应商包括天然气井或储存设施。天然气供应量在注入节点受限于其下限和上限(44)。位于析出节点的天然气炉和热电联产机组则代表天然气的负荷。

$$f_p^{\min} \leq f_p \leq f_p^{\max} \quad \forall b, \forall h, \forall t \quad (43)$$

$$V_{sp}^{\min} \leq V_{sp} \leq V_{sp}^{\max} \quad \forall b, \forall h, \forall t \quad (44)$$

### 2.5 系统指标评估

针对系统解出的规划方案, 进一步评估系统的可靠性, 能源效率, 二氧化碳排放指标等。其中, 可靠性指标采用来失负荷成本(expected energy not supplied, EENS)来衡量。当有负荷损失时, 年度失负荷值为(45), 而失负荷成本已包含在目标函数总投资成本中。年度失负荷值总和不应超过设定上限(46)。

$$EENS_t = \sum_h \sum_b DT_{bht} DL_{bht} \quad \forall t \quad (45)$$

$$EENS_t \leq EENS_t^{\text{limit}} \quad \forall t \quad (46)$$

综合能源系统的效率定义为系统总的能量输出(电力  $W_E^{\text{out}}$  和热能  $Q_{\text{TH}}$  净输出)和能量输入(电力  $W_E^{\text{in}}$  和天然气  $Q_{\text{FUEL}}$  净输入)之间的比例, 如式(47)所示。其中, 天然气的热值与电力功率之间的转换关系为: 1 MW = 3.412 MMBtu。

$$\eta_0 = \frac{W_E^{\text{out}} + Q_{\text{TH}}}{W_E^{\text{in}} + Q_{\text{FUEL}}} \quad (47)$$

综合能源系统的环保评价通过其二氧化碳排放指标来评估。对于每个设备, 碳排放值与其运行模式相关, 例如发电机组输出功率, 热电联产机组产热与发电的运行模式。

### 2.6 模型优化方法

如本节所讨论的详细模型, 本文所提出的综合能源优化规划模型为基于直流潮流方程和简化的天然气网络方程线性优化模型。因此, 所求解的问题为凸的混合整数线性规划问题, 可通过常用的优化求解器(CPLEX)得到最优解。求解综合能源优化规划模型的输入数据包括:

- 1) 现有和备选拟建发电机组, 输电线路和网络结构, 和电力负荷持续时间曲线。
- 2) 天然气供应商, 天然气网络拓扑结构。
- 3) 现有和备选拟建天然气炉, 和供热负荷持续时间曲线。

求解的主要步骤如下:

- 1) 首先处理输入数据以形成综合能源系统的耦合矩阵和系统拓扑连接矩阵。
- 2) 求解式(11)~(44)所代表的综合能源系统优化问题, 得到投资规划方案。
- 3) 基于步骤2所得到的投资方案, 评估系统的可靠性, 能源效率, 二氧化碳排放指标。
- 4) 如该投资方案的可靠性指标违反约束(46),

则将可靠性约束添加到步骤2的优化问题中进行下一次迭代计算直至规划方案满足可靠性指标。

5)最后计算综合能源系统的效率和二氧化碳排放值,用于综合评估规划方案的能效排放指标。

### 3 算例分析

本节采用的算例是含有六个能量枢纽的综合能源系统(如图3所示),包含天然气和电力,供热系统。其中六节点电力系统包含三台燃气机组,七条输电线路,待定规划方案六台备选燃气机组,七条备选输电线路。六节点天然气和供热系统由五条天然气管道,两个天然气供应商,三个天然气炉供热,待定规划方案中包含四个备选天然气炉,四个备选热电联产机组。本算例采用的系统适用于同时经营天然气,电力供应和供热业务,并管理规划多种不同的能源设施的实体。随着清洁能源技术,分布式发电系统、微电网等应用的快速发展,以及电力市场对不同类型配售电实体的逐步准入和开放,区域能源互联网将会成为更为高效管理能源,提升能源利用效率的解决方案。传统能源和可再生能源,天然气作为一次能源被输送给冷热电三联供(CCHP)系统或微电网,为用户提供综合能源供应。而综合能源系统模式的经济性和高能效也将促进传统的供电,供热,燃气企业逐步转型为综合能源业务供应商,尤其在负荷密度高,燃料价格波动较大的区域具有更高的商业应用价值。

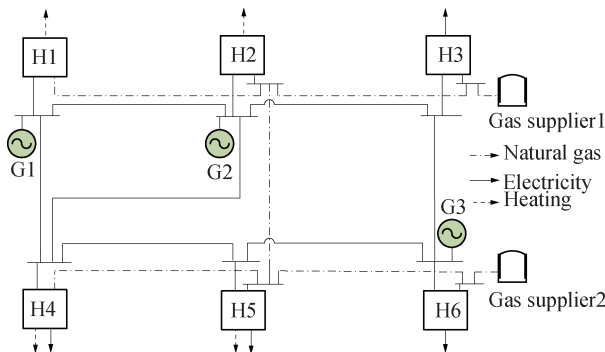


图3 综合能源系统

Fig. 3 Multiple energy system

本文考虑求解十年规划期的最优投资方案,每个拟建备选设备考虑安装在年初。每个计划年度含12个月,每月的电力负荷选择三个代表性基准负荷,峰荷,谷荷,基本负荷,如图4所示。每月的代表性基准负荷由于季节性因素也有所不同。系统

热负荷考虑与环境温度的高度相关性,可作为月平均温度的函数。在总投资规划期内,初始电力峰值负荷为29.8 MW,年均负荷增长率为3%。供热负荷初始峰值负载为88.3 MMBtu,年均负荷增长率为0.8%。系统备用需求考虑为负荷的5%。平均单位失负荷价值为10美元/MWh。以下两组算例用于阐述本文所提出的基于能源枢纽的综合能源优化规划模型,并对算例进行比较分析投资成本,能源效率,排放和可靠性等评估指标。

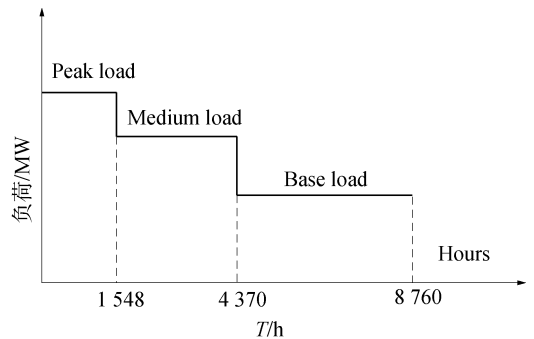


图4 分段负荷曲线

Fig. 4 Discretized load duration curve

#### 算例1: 独立的能源系统优化规划

本算例考虑在综合能源系统中,电力和天然气,供热系统分开独立规划。电力负荷只能由发电机组供电,热负荷由天然气炉供热。综合能源系统在十年规划期间内基于最优成本的设备建设计划表如表1~表4所示,其中最右边两列代表设备最优规划。表1和表2显示了电力系统中备选机组和输电线路的建设计划。为满足规划期内电力负荷增长需求,需新增发电容量14 MW在能量枢纽节点1(8 MW)和3(6 MW)和一条输电线路位于能量枢纽节点1和4之间,总投资成本为2.143亿美元。电力负荷损失主要发生在第二年和第三年之间,位于能量枢纽节点3和4。十年规划期内总失负荷电量为511 MWh,失负荷成本为511万美元,其中采用的平均单位失负荷成本为10美元/kWh,低于常用的大型商业和工业客户(20~100美元/kWh)。因此在本算例中,允许在第二年和第三年发生失负荷提供了一种可行且更经济的选择。在能量枢纽节点3和4新增发电机组的成本高于失负荷的成本。表3显示了系统天然气炉建设计划,天然气,供热系统需新增天然气炉安装在能量枢纽节点1和2处,总投资成本为2.023亿美元。本算例中,电力和天

然气，供热系统分开独立规划情况下的十年规划期总投资成本为 4.165 亿美元。

表 1 机组数据和安装计划

Tab. 1 Candidate unit characteristics and installation year

机组	母线	容量 /MW	建造时间 /a	算例 1	算例 2
1	1	8	3	3	—
2	2	10	4	—	4
3	3	6	6	10	—
4	4	8	5	—	—
5	5	10	6	—	—
6	6	8	8	—	—

表 2 输电线路数据和安装计划

Tab. 2 Candidate line characteristics and installation year

线路	母线	容量 /MW	建造时间 /a	算例 1	算例 2
1	1 2	15	5	—	—
2	2 3	10	2	—	—
3	1 4	10	4	8	—
4	2 4	10	6	—	7
5	4 5	10	5	—	—
6	5 6	10	3	—	—
7	3 6	10	2	—	—

表 3 天然气炉数据和安装计划

Tab. 3 Candidate gas furnace characteristics and installation year

天然气炉	节点	容量/MMBtu	建造时间/a	算例 1	算例 2
1	1	80	5	6	—
2	2	60	4	4	—
3	4	50	3	—	—
4	5	60	3	—	—

表 4 热点联产机组炉数据和安装计划

Tab. 4 Candidate CHP plant characteristics and installation year

热电联产	节点	效率	容量 /MW	建造时间/a	算例 1	算例 2
1	1	32% / 46%	16	2	—	2
2	2	31% / 45%	12	3	—	4
4	4	30% / 47%	12	2	—	—
5	5	33% / 44%	10	4	—	—

( $\eta_{ge}/\eta_{gth}$ 表示热电联产机组的天然气转化为电，和天然气转化为热的效率)

算例 2：综合能源系统优化规划

本算例考虑在综合能源系统中，电力和天然气，供热系统综合优化规划。为满足规划期内电力负荷增长需求，新增发电容量 10 MW 在能量枢纽节点 1 和 2 和一条输电线路位于能量枢纽节点 2 和 4 之间，电力系统总投资成本为 1.689 亿美元，低于算例一情况下电力系统总投资成本。在十年规划期内，在第 2 年和第 4 年内新增两个热电联产机组用于供给能量枢纽节点 1 和 2 增长的热负荷。由于电力负荷供应主要来自于热电联产机组，仅需在能量枢纽节点 2 新增一台常规发电机组。

如表 5 所示，相较算例 1，算例 2 的总投资成本增加了 310 万美元，主要是由于热电联产的平均投资成本相比常规发电机组和天然气炉更高。然而，热电联产机组由于能量转换效率更高，运行成本与算例 1 相比减少了 550 万美元。此外，电力负荷损失仅发生在第十年，位于能量枢纽节点 4，总失负荷电量为 51.4 MWh 时，失负荷成本为 51.4 万美元。与算例 1 相比，失负荷成本减少 460 万美元。因此，采用综合能源系统优化规划的方法提供了更为经济的投资规划方案。投资高能量转换效率的热电联产机组可以同时供应电力和热负荷的增长。

表 5 算例 1 和算例 2 对照

Tab. 5 Comparison of case1 and case2

成本/百万美元		算例 1	算例 2
投资成本	机组	9.051	6.289
	输电线路	0.064	0.061
	天然气炉	23.35	—
	热电联产机组	—	29.21
运行成本	供电	200.0	—
	供热	178.9	373.4
失负荷成本		5.110	0.514
总成本		416.5	409.5

算例 1 和算例 2 中综合能源系统的能源效率如图 5 所示，排放和可靠性指标值。热电联产机组的运行使得综合能源系统的效率从 40.4% 提高到 44.0%。常见的热电联产机组能源效率可以达到 60% ~ 80%，而常规的发电机组平均效率一般在 33% 左右。热电联产机组的投产使得算例 2 的系统总排放量在十年规划期内相比算例 1 减少了 8.3%。系统可靠性指标也有较大的改善，总失负荷电量从



为 511 MWh 下降至 51.4 MWh。

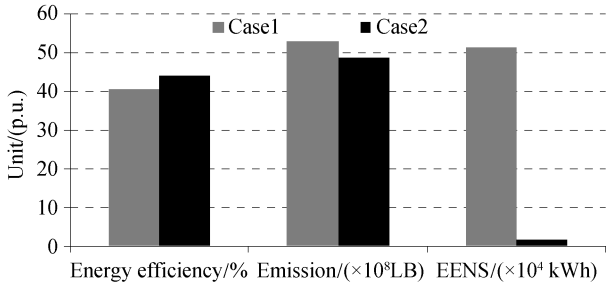


图 5 算例 1 和算例 2 系统指标对照

Fig. 5 Comparison of system performance of case1 and case2

## 4 结论

本文提出了基于能量枢纽的综合能源系统优化规划模型,包括电力,天然气,供热系统等。在考虑系统可靠性,能源效率,排放指标等多种决策因素的情况下,以最低成本为规划目标,解决不同能源形式之间的最优规划问题。算例分析表明,以能量枢纽为终端节点的综合能源系统具有不同形式能量之间相互转换的灵活性,可以满足不同类型的负荷增长需求。热电联产机组的投资可改善系统的能源利用效率,并有效地降低系统排放值,改进系统可靠性指标。

在本文中,我们采用了可以表达为线性耦合矩阵的能量枢纽模型,用于简化综合能源系统优化规划的数学模型。目前储能设备的大量应用给能量枢纽模型提供了更多能量储存,分时利用的可能性。关于如何利用储能设备进一步改进综合能源系统各项指标的课题仍然值得进一步探讨和分析。

## 参考文献:

- [1] EIA. Annual energy outlook [EB/OL]. (2014-1-16)[2019-09-16]. <http://www.eia.gov>.
- [2] Environmental Protection Agency. [EB/OL]. [2019-09-16]. <http://www.epa.gov>.
- [3] HEMMES K. Towards multi-source multi-product and other integrated energy system [J]. International Journal of Integrated Energy System, 2009, 1(1): 1-15.
- [4] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers [J]. IEEE Trans. Power Syst, 2007, 22(1): 145-155.
- [5] Geidl M. Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems [D]. Zürich: ETH, 2007.
- [6] ROH J. H, SHAHIDEHPOUR M, WU L. Market-based generation and transmission planning with uncertainties [J]. IEEE Trans. Power Syst, 2009, 24(3): 1587-1598.
- [7] ZHANG X P, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Hourly electricity demand response in the stochastic day-ahead scheduling of coordinated electricity and natural gas networks [J]. IEEE Trans. Power Syst, 2016, 31(1): 592-601.
- [8] Naturalgas.org. [EB/OL]. [2019-09-16]. <http://www.naturalgas.org>.

## 作者简介:



ZHANG X P

张夏平(通信作者)

1984-,女,美国加州独立系统调度运行商电力工程师,2015年毕业于美国伊利诺伊州理工大学,获电气工程博士学位。曾任美国西部电网系统调度可靠性机构电力工程师。博士主要研究方向:电力市场优化,电力与天然气协同调度,综合能源系统运行与规划,可再生能源(e-mail) zhangxiaping@gmail.com。

(责任编辑 李辉)

## 中国能建广东院获评国家知识产权优势企业

2019年12月,国家知识产权局公布了2019年度国家知识产权优势示范企业评审和复验结果,中国能建广东院获评“国家知识产权优势企业”。这是广东院在企业知识产权管理领域获得的又一殊荣。

国家知识产权优势企业是国家为培育一批具有自主知识产权和知名品牌、具备国际竞争优势的中国知识产权领军企业而开展的重点工程。参评企业经地方知识产权部门申报,由国家知识产权局择优审核选定。入选“国家知识产权优势企业”后,企业可在知识产权相关金融、财政政策,重点技术领域专利审查、企业知识产权管理、维权、人才培养等诸多方面享受相应的政策支持。

近年来,中国能建广东院以提升企业核心竞争力为重点,制定了完善的知识产权管理制度和知识产权管理体系,先后获广东省知识产权示范企业、广东省企业专利创新百强企业、广东省知识产权保护重点企业、粤港澳大湾区企业专利创新百强企业等称号,《核电机组驱动级专用逻辑控制装置》获国家第二十届中国专利优秀奖。截至目前,广东院已拥有有效专利820项,其中国内发明专利344项,国外发明专利2项,实用新型专利460项。

(中国能建广东院 杨波)