

# 考虑能量梯级利用的工厂综合能源系统多能协同优化

徐航, 董树锋, 何仲潇, 施云辉

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

**摘要:** 工业园区是典型的复杂能源系统, 通过利用多能源之间的耦合机制, 实现多能互补, 可显著提升其经济效益与能源利用率。为此, 文中针对工业园区提出了一种考虑能量梯级利用的工厂综合能源系统多能协同优化模型。首先, 介绍工厂综合能源系统架构, 再对综合能源系统中的能量生产设备、能量转换设备以及能量存储设备进行独立建模。基于此, 以日运行费用最低为优化目标, 在冷热电功率平衡约束及设备物理约束下, 采用混合整数线性规划法对模型进行求解。所提模型遵循“品位对口, 梯级利用”的科学用能思想, 按热品位高低进行能量梯级利用, 实现工业生产流程与设备运行参数的综合优化。算例分析表明, 所提的优化调度策略更契合工程的实际需求, 可降低工业用户的运行费用。

**关键词:** 综合能源系统; 工业园区; 能量梯级利用; 多能协同; 经济调度

## 0 引言

综合能源系统(integrated energy system, IES)是能源互联网的重要物理载体<sup>[1]</sup>, 利用各个能源系统在时空上的耦合机制, 实现多能互补、能源梯级利用, 是破解中国能源困局的重要战略之一<sup>[2-4]</sup>。中国能源科技发展中, 第一优先主题为“工业节能”, 能源梯级综合利用技术更是其重点研究方向。工业园区是以工业负荷为主的复杂能源系统, 包含多种产能/用能设备, 供电可靠性要求高, 但普遍存在能源利用率低、能源结构不合理、峰谷电力差额大、环境污染等问题<sup>[5-6]</sup>, 有必要对工厂进行用能优化管理, 提升经济效益和能源利用率。

文献[7-8]提出了针对包含冷、热、电的区域综合能源系统的协同规划方法与系统集成方案。文献[9-11]建立了以运行成本最低为目标的含多种供能系统的经济调度模型。文献[12-15]考虑可再生资源的不确定性, 建立了热电联供(combined heat and power, CHP)的随机优化模型。文献[16]考虑了光伏出力与负荷预测的随机性, 建立了调峰调蓄优化模型, 目标为实现最小化经济成本和最大程度的削峰填谷。文献[17]根据设备特性对能源枢纽中的各类设备进行分类建模, 搭建了能源枢纽架构。文献[18]选取传递媒介作为基本母

线, 采用集中母线式的方式搭建了冷热电联供(combined cooling, heating and power, CCHP)微网系统的架构, 在此基础上对调度优化模型进行建模。文献[19]提出了包含冷、热、电、气的微型能源网的供能架构, 并将冷热电负荷进一步细分, 提高了优化控制的准确度。

综上, 综合能源系统多能协同优化模型的相关研究已较为完善, 但均未充分考虑热能的梯级利用。工业园区负荷需求量大、负荷类型多样, 能量转换过程大多涉及热的梯级利用, 只有综合考虑能量的“质与量”, 才能实现系统内动力、中温、低温余热等不同品位能量的耦合与转换利用。而目前的研究成果对工厂典型供能结构适应性不强。为此, 本文针对工厂典型供能结构, 对工厂中的能量生产设备、能量转换设备以及能量存储设备进行独立建模, 充分考虑热能对口的温度利用区间以及相应的利用技术, 实现热能的综合梯级利用, 进一步完善工厂综合能源系统多能协同优化模型。最后, 采用混合整数线性规划法进行求解, 实现工厂生产流程和设备运行参数的综合优化。算例结果分析表明, 本文所提的优化调度策略更契合工程的实际需求。通过考虑热能的梯级利用, 调节工业中各设备的运行方式与工作状态, 可降低工业用户的运行费用。

## 1 热能的梯级利用

能量的科学利用思想可表述为: “品位对口, 梯级利用”。在系统的集成过程中, 应尽可能按照各个

收稿日期: 2017-08-25; 修回日期: 2017-11-15。

上网日期: 2018-00-00。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901300)。

系统的特殊要求向其提供合适品位的输入能流。热能的综合利用主要涉及以下两个方面。

### 1) 热能的品位

热能的品位是指单位能量所具有可用能的比例,是标识热能质量的重要指标。热能品位  $A_i$  常常被认为是释放或接受热源温度所对应的卡诺循环效率,即  $A_i = 1 - T_0/T$ , 其中  $T_0$  表示低温热源温度,  $T$  表示高温热源温度<sup>[20]</sup>。更直观的表达,热源温度的高低即代表热的品位高度。热能可分为高品位热(550 °C 至燃料的理论燃烧温度)、中品位热(170~550 °C)和低品位热(环境温度-170 °C)<sup>[21]</sup>。

### 2) 热能的数量和利用效果

一般来说,温度越高则热能的品位越高,有更多可利用方式。不同的热利用技术可利用的余热数量和品位不同,热利用效果差异大,会对整体的热利用策略造成较大影响。

工厂根据热能的品位对输入的能量及内部能源进行综合利用,来达到更高的能源利用率。工厂中热能的温度利用区间与相应的利用技术如附录 A 图 A1 所示。高品位热优先对口于高温热力循环系统,如燃气轮机、内燃机等设备,将热能转化为电能。中品位热有较多可利用方式,可用于工业用汽、直接供热或作双效/单效吸收式制冷机的热源。低品位热温度较低,通常仅作为单效吸收式制冷机热源或直接供热。

## 2 工厂综合能源系统供能架构

综合能源系统包含冷、热、电、气 4 种能源形式,系统中负荷种类多样、功能设备丰富。本文研究的工厂综合能源系统的主要设备有燃气轮机、光伏机组、余热锅炉、吸收式制冷机、户用空调、燃气锅炉、电池储能、冰蓄冷装置和各类蒸汽驱动设备。该系统通过集中式电力母线和公共电网交换电力,采用“自发自用、余量上网”的运行机制。同时,园区内存在大型热电联供系统,园区内的工业用户可向热电联供系统购买蒸汽,以满足蒸汽负荷需求。工厂典型综合能源供能架构如图 1 所示。

由燃气轮机、余热锅炉和吸收式制冷机共同构成了冷热电联供系统,其工艺流程如附录 A 图 A2 所示。天然气在燃烧室中产生 1 100 °C 以上的高温烟气(高品位热),进入燃气轮机膨胀做功带动发电机发电。排出的 530 °C 高温烟气(中品位热)通过余热锅炉加以利用,向外提供蒸汽。所产生的蒸汽进入分气缸,分配到各路管道中去,可以用作工业用汽、吸收式制冷机制冷/热、制备热水等,不足的热量可由燃气锅炉进行补充。对余热锅炉最后排出的

120 °C 低温烟气(低品位热)进行回收,用于制备热水或吸收式制冷机制冷/热<sup>[21-23]</sup>。蒸汽驱动设备以中品位热蒸汽作为驱动热源,并可对剩余蒸汽进行回收利用,回收的低品位蒸汽同样可用于吸收式制冷机制冷/制热及供应热水。在供冷/热系统中,户用空调可提供空间冷热负荷,作为空间冷热负荷的调峰设备。冰蓄冷装置在制冷量满足当前所需且电价较低时储存冷量,待需要时释放冷量。

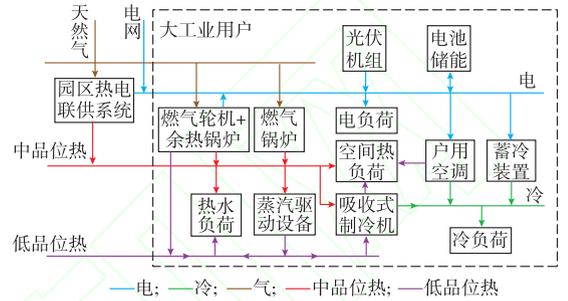


图 1 工厂综合能源系统能流示意图

Fig.1 Schematic diagram of energy flow in the integrated energy system of a plant

由于工厂中的高、中、低品位热在品位和数量上都存在区别,且工厂热力管网的温度保持恒定,主要是通过阀门控制管道中的蒸汽流量。本文以热能可供的等效热负荷表示其所具备的可用能,即

$$H_{\text{grad}}^t = \frac{F_{\text{grad}}^t \lambda_{\text{grad}}}{3\ 600} \quad (1)$$

式中:  $F_{\text{grad}}^t$ 、 $\lambda_{\text{grad}}$ 、 $H_{\text{grad}}^t$  分别为该品位蒸汽的消耗速率、热值和等效热负荷,  $1\ \text{kW} \cdot \text{h} = 3\ 600\ \text{kJ}$ 。

所述系统架构优先向各个能量循环子系统提供合适品位的输入能流,从系统层面合理安排各种能量之间的配合与转换利用,充分利用循环余热,实现“品位对口”的能量综合梯级利用。基于此,本文建立了工厂综合能源系统多能协同优化模型。下文将具体介绍综合能源系统内的主要设备模型。

### 2.1 能量生产设备

#### 1) 燃气轮机

燃气轮机是冷热电联供系统中的核心设备,其电功率和回收的热功率可由式(2)一式(4)表示。

$$P_{\text{GT},i}^t = \eta_{\text{GT}}^e \lambda_{\text{gas}} F_{\text{GT},i}^t \quad (2)$$

$$H_{\text{WH},\text{mid},i}^t = \eta_{\text{WH},\text{mid}}^h (1 - \eta_{\text{GT}}^e) \lambda_{\text{gas}} F_{\text{GT},i}^t \quad (3)$$

$$H_{\text{WH},\text{low},i}^t = \eta_{\text{WH},\text{low}}^h (1 - \eta_{\text{GT}}^e) \lambda_{\text{gas}} F_{\text{GT},i}^t \quad (4)$$

式中:  $P_{\text{GT},i}^t$  和  $F_{\text{GT},i}^t$  分别为第  $i$  个燃气轮机在时段  $t$  输出的电功率和燃气消耗速率;  $\lambda_{\text{gas}}$  为天然气热值;  $H_{\text{WH},\text{mid},i}^t$  和  $H_{\text{WH},\text{low},i}^t$  分别为余热锅炉输出的中品位和低品位热功率;  $\eta_{\text{GT}}^e$ 、 $\eta_{\text{WH},\text{mid}}^h$ 、 $\eta_{\text{WH},\text{low}}^h$  分别为燃气轮机发电效率、余热锅炉中品位热和低品位热回收效

率。

## 2) 燃气锅炉

燃气锅炉是常用的热源设备,作为冷热电联供系统的调峰设备,可产生中品位热蒸汽,满足蒸汽负荷、热负荷需求,有

$$H_{GB,i}^t = \eta_{GB}^h \lambda_{gas} F_{GB,i}^t \quad (5)$$

式中: $H_{GB,i}^t$ 和 $F_{GB,i}^t$ 分别为第 $i$ 个燃气锅炉在时段 $t$ 输出的热功率和燃气消耗速率; $\eta_{GB}^h$ 为燃气锅炉的供热效率。

## 3) 光伏机组

光伏机组预测出力与其光伏电池板面积和辐照强度有关,即

$$P_{PV,i}^t = \eta_{PV}^e S \varphi_{PV,i}^t \quad (6)$$

式中: $P_{PV,i}^t$ 为第 $i$ 个光伏机组的预测出力; $\eta_{PV}^e$ 为太阳能电池板效率; $S$ 为电池板面积; $\varphi_{PV,i}^t$ 为第 $i$ 个光伏机组单位面积光照强度。

## 2.2 能量转换设备

能量转换设备包括吸收式制冷机、户用空调和冰蓄冷装置等,该类设备用于不同能量形式之间的转换,是冷热电耦合的关键。

### 1) 吸收式制冷机

吸收式制冷机利用能源生产设备产生的余热作为热源,进行制冷或制热作业,其制冷/热功率与其热能输入量成正比。需要指出的是,双效吸收式制冷机能够利用中品位热(170℃以上),并具有更高的能效系数(制冷能效比为1.2以上),但热源温度较低时(例如低于170℃),通常只能采用性能系数比较低(制冷能效比为0.8左右)的单效吸收式制冷机组。本文采用单效吸收式制冷机模型<sup>[21,23]</sup>,如式(7)和式(8)所示。

$$Q_{Br,i}^t = I_{Br}^c H_{Br,in,i}^t \quad (7)$$

$$H_{Br,i}^t = I_{Br}^h H_{Br,in,i}^t \quad (8)$$

式中: $Q_{Br,i}^t$ 和 $H_{Br,i}^t$ 分别为第 $i$ 个吸收式制冷机在时段 $t$ 内的供冷功率和供热功率; $H_{Br,in,i}^t$ 为吸收式制冷机的耗热功率; $I_{Br}^c$ 和 $I_{Br}^h$ 分别为吸收式制冷机的制冷能效比和制热能效比。

### 2) 户用空调

电制冷/热户用空调可以利用制冷机,在消耗电能的情况下产生冷量或热量,其制冷量/供热量与其电能输入量成正比,具体表达式见式(9)和式(10)。本文中的户用空调包括中央空调、热泵等设备,其主要区别体现在设备的制冷/热能效比不同。

$$Q_{cond,i}^t = I_{cond}^c P_{cond,c,i}^t \quad (9)$$

$$H_{cond,i}^t = I_{cond}^h P_{cond,h,i}^t \quad (10)$$

式中: $Q_{cond,i}^t$ , $H_{cond,i}^t$ , $P_{cond,c,i}^t$ , $P_{cond,h,i}^t$ 分别为第 $i$ 个

户用空调在时段 $t$ 内的制冷功率、制热功率、制冷消耗的电功率和制热消耗的电功率; $I_{cond}^c$ 和 $I_{cond}^h$ 分别为户用空调的制冷能效比和制热能效比。

### 3) 冰蓄冷装置

冰蓄冷装置一般在夜间用电低谷时进行制冷,利用蓄冷介质储存冷量,并在白天用电高峰时段释放冷量,以满足工厂的供冷需求。在蓄冰工况时,制冷机存储冷量于蓄冰槽中;在制冷工况时,制冷机与蓄冰槽同时制冷。冰蓄冷模型可由式(11)~式(15)表示。

$$Q_{ref,i}^t + Q_{tank,i}^t = Q_{ice,i}^t \quad (11)$$

$$P_{ref,i}^t + P_{tank,i}^t = P_{ice,i}^t \quad (12)$$

$$Q_{ref,i}^t = P_{ref,i}^t I_{ref}^c \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_{tank,i}^t \geq 0, Q_{tank,i}^t = 0 & t \in T_{melt} \\ P_{tank,i}^t = 0, Q_{tank,i}^t \geq 0 & t \in T_{ref} \end{cases} \quad (14)$$

$$S_{tank,i}^{t+1} = (1 - \sigma_{tank}^c) S_{tank,i}^t + \sum_{t \in T_{ref}} P_{tank,i}^t I_{tank}^c T - \sum_{t \in T_{melt}} \frac{Q_{tank,i}^t T}{\eta_{tank}^m} \quad (15)$$

式中: $Q_{ice,i}^t$ , $Q_{ref,i}^t$ , $Q_{tank,i}^t$ 分别为时段 $t$ 第 $i$ 个冰蓄冷装置、制冷机和蓄冰槽的制冷功率; $P_{ref,i}^t$ , $P_{tank,i}^t$ , $P_{ice,i}^t$ 分别为时段 $t$ 第 $i$ 个制冷机耗电功率、蓄冰槽耗电功率和冰蓄冷装置总的耗电功率; $T_{melt}$ 为融冰时段集合; $T_{ref}$ 为蓄冰时段集合;式(14)表示蓄冰槽的蓄冰与融冰作业不可同时进行; $I_{ref}^c$ 为制冷机的制冷能效比; $I_{tank}^c$ 和 $\eta_{tank}^m$ 分别为蓄冰槽的制冰能效比和融冰效率; $S_{tank,i}^{t+1}$ 和 $S_{tank,i}^t$ 分别为第 $i$ 个蓄冰槽在时段 $t+1$ 和时段 $t$ 的蓄冰容量; $\sigma_{tank}^c$ 为蓄冰槽的自损耗系数; $T$ 为单位时段长度。

### 4) 蒸汽驱动设备

蒸汽驱动设备是工厂中需以中品位热蒸汽作为热源进行工业生产的设备,可对剩余蒸汽进行回收利用,产生低品位热蒸汽,如硫化机等,其具体回收利用过程可由式(16)表示。

$$H_{steam,low,i}^t = H_{steam,i}^t \eta_{steam,low}^h \quad (16)$$

式中: $H_{steam,i}^t$ 为时段 $t$ 第 $i$ 个蒸汽驱动设备的蒸汽需求热功率; $H_{steam,low,i}^t$ 为时段 $t$ 第 $i$ 个蒸汽驱动设备回收的低品位热功率; $\eta_{steam,low}^h$ 为低品位热的回收效率。

## 2.3 能量存储设备

### 1) 电池储能

电池储能的容量与充放电功率之间的关系如下:

$$S_{ES,i}^{t+1} = (1 - \sigma_{ES}^e) S_{ES,i}^t + \left( \eta_{ES}^s P_{ES,s,i}^t - \frac{P_{ES,r,i}^t}{\eta_{ES}^r} \right) T \quad (17)$$

式中:  $S_{ES,i}^t, P_{ES,s,i}^t, P_{ES,r,i}^t$  为储能设备  $i$  在时段  $t$  的储能、充电功率与放电功率;  $\sigma_{ES}^e$  为储能设备的自损耗系数;  $\eta_{ES}^s$  和  $\eta_{ES}^r$  分别为储能设备的充电效率和放电效率。

### 3 综合能源系统多能协同优化模型

#### 3.1 优化目标

本文将一天划分为 96 个时段, 以运行维护成本  $C_{OM}$ 、购电成本  $C_{ES}$ 、购热成本  $C_H$ 、储能折旧成本  $C_{BW}$  以及燃料成本  $C_F$  构成的日运行费用  $C_{ATC}$  最小为优化的目标函数, 有

$$\min C_{ATC} = C_{OM} + C_E + C_{BW} + C_F + C_H \quad (18)$$

1) 运行维护成本:

$$C_{OM} = \sum_t \sum_i \xi_{OM,i} P_{out,i}^t T \quad (19)$$

式中:  $\xi_{OM,i}$  为设备  $i$  单位输出功率的运行维护费用;  $P_{out,i}^t$  为第  $i$  个设备在时段  $t$  的输出功率。

2) 购电成本

$$C_E = \sum_t (\xi_{buy}^t P_{buy}^t - \xi_{sell}^t P_{sell}^t) T \quad (20)$$

式中:  $\xi_{buy}^t$  和  $P_{buy}^t$  分别为时段  $t$  的购电价格和购电功率;  $\xi_{sell}^t$  和  $P_{sell}^t$  分别为时段  $t$  的售电价格和售电功率。

3) 购热成本

$$C_H = \sum_t \xi_{buy}^h H_{buy}^t T \quad (21)$$

式中:  $\xi_{buy}^h$  和  $H_{buy}^t$  分别为购热价格和时段  $t$  的购热功率。

4) 燃料成本

$$C_F = \sum_t \left( \sum_i F_{GT,i}^t \xi_{gas} + F_{GB,i}^t \xi_{gas} \right) T \quad (22)$$

式中:  $\xi_{gas}$  为气价。

5) 储能折旧成本

随着放电深度的加深, 电池储能的充放电可循环次数降低, 但循环充放电总量基本不变。假设电池储能在全寿命周期内的充放电总量恒定, 则储能的折旧成本可用式(23)表示。

$$C_{BW} = \sum_t \sum_i \frac{C_{BR}}{q_L} P_{ES,s,i}^t T \quad (23)$$

式中:  $C_{BR}$  为储能的更换成本;  $q_L$  为储能单体全寿命输出总量。

#### 3.2 约束条件

1) 电功率平衡约束

交流母线总负荷约束:

$$P_{buy}^t - P_{sell}^t + \sum_i P_{GT,i}^t = P_{AC,load}^t + P_{AC-DC}^t + \sum_i P_{cond,i}^t + \sum_i P_{ice,i}^t \quad (24)$$

式中:  $P_{AC,load}^t$  为时段  $t$  的交流负荷;  $P_{AC-DC}^t$  为交直流转化器的电功率。

交直流转换器效率约束:

$$P_{AC-DC}^t = \begin{cases} \eta_{AC/DC} P_{DC}^t & P_{DC}^t > 0 \\ 0 & P_{DC}^t = 0 \\ \eta_{DC/AC} P_{DC}^t & P_{DC}^t < 0 \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $P_{DC}^t$  为时段  $t$  的直流母线总负荷;  $\eta_{AC/DC}$  为交流到直流的转换效率;  $\eta_{DC/AC}$  为直流到交流的转换效率。

直流母线总负荷约束:

$$P_{DC}^t + \sum_i P_{PV,i}^t = P_{DC,load}^t + \sum_i P_{ES,s,i}^t - \sum_i P_{ES,r,i}^t \quad (26)$$

式中:  $P_{DC,load}^t$  为时段  $t$  的直流负荷。

联络线约束与购售电状态约束:

$$0 \leq P_{buy}^t \leq \gamma_{buy}^t P_{buy}^{max} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{sell}^t \leq \gamma_{sell}^t P_{sell}^{max} \quad (28)$$

$$0 \leq \gamma_{buy}^t + \gamma_{sell}^t \leq 1 \quad (29)$$

式中:  $P_{buy}^{max}$  和  $P_{sell}^{max}$  分别为系统向电网购电和售电的功率上限;  $\gamma_{buy}^t$  和  $\gamma_{sell}^t$  分别为时段  $t$  处于购电和售电的 0-1 状态变量,  $\gamma_{buy}^t$  取 1 表示购电,  $\gamma_{sell}^t$  取 1 表示售电, 式(29)限定了系统不能同时购售电。

2) 热功率平衡约束

$$H_{mid}^t = H_{buy}^t + \sum_i H_{GB,i}^t + \sum_i H_{WH,mid,i}^t \quad (30)$$

$$H_{low}^t = \sum_i H_{WH,low,i}^t + \sum_i H_{steam,low,i}^t \quad (31)$$

$$H_{mid}^t \geq \sum_i H_{steam,i}^t \quad (32)$$

$$H_{mid}^t - \sum_i H_{steam,i}^t + H_{low}^t \geq H_{water}^t + \sum_i H_{Br,in,i}^t \quad (33)$$

$$\sum_i H_{Br,i}^t + H_{cond,i}^t \geq H_{space}^t \quad (34)$$

式中:  $H_{mid}^t$  和  $H_{low}^t$  分别为系统中所有的中品位热与低品位热;  $H_{water}^t$  和  $H_{space}^t$  分别为时段  $t$  的热水负荷和空间热负荷。

式(30)和式(31)表示中品位热主要包括外购蒸汽、燃气锅炉产生的热蒸汽及余热锅炉回收的中温蒸汽; 低品位热主要包括余热锅炉回收的低温烟气及蒸汽驱动设备回收的低品位热蒸汽。式(32)表示中品位热必须满足蒸汽驱动设备的蒸汽需求; 式(33)表示低温蒸汽只能用于制备热水或吸收式制冷机制冷/热, 而热水负荷为刚性需求, 优先满足热水负荷。若低品位热不足以满足热水负荷, 缺额部分由中品位热进行补充。若在满足热水负荷的基础上, 仍有余热, 则作为吸收式制冷机的驱动热源。当吸收式制冷机无充足的低品位热源, 而其他制冷设

备均已满发仍不能满足冷负荷需求,则补充中品位热,增加吸收式制冷机的供冷量。

### 3) 冷功率平衡约束

$$\sum_i Q_{br,i}^t + \sum_i Q_{cond,i}^t + \sum_i Q_{ice,i}^t = Q_{load}^t \quad (35)$$

式中: $Q_{load}^t$ 为冷负荷。

### 4) 设备运行约束

除了考虑冷热电功率平衡约束,还需考虑设备自身的约束,即冷热电功率的上下限约束与爬坡率约束。因篇幅限制,统一用下式表示设备运行约束:

$$\omega_{in,i}^{\min} \leq \omega_{in,i}^t \leq \omega_{in,i}^{\max} \quad (36)$$

$$\omega_{out,i}^{\min} \leq \omega_{out,i}^t \leq \omega_{out,i}^{\max} \quad (37)$$

$$-D_{in,i} T \leq \omega_{in,i}^t - \omega_{in,i}^{t-1} \leq R_{in,i} T \quad (38)$$

$$-D_{out,i} T \leq \omega_{out,i}^t - \omega_{out,i}^{t-1} \leq R_{out,i} T \quad (39)$$

式中: $\omega_{in,i}^t$ 和 $\omega_{out,i}^t$ 分别为设备 $i$ 在时段 $t$ 的输入、输出功率; $\omega_{in,i}^{\max}$ 和 $\omega_{in,i}^{\min}$ 分别为设备 $i$ 在时段 $t$ 输入功率的上下限; $\omega_{out,i}^{\max}$ 和 $\omega_{out,i}^{\min}$ 分别为设备 $i$ 在时段 $t$ 输出功率的上下限; $R_{in,i}$ 和 $D_{in,i}$ 分别为设备 $i$ 输入功率的向上和向下爬坡速率; $R_{out,i}$ 和 $D_{out,i}$ 分别为设备 $i$ 输出功率的向上和向下爬坡速率。

### 5) 储能设备约束

储能设备需要满足储能状态约束与充放电功率约束。为了保证调度的连续性,调度周期前后,储能设备的储能量应保持一致,如式(41)所示。

$$S_i^{\min} \leq S_i^t \leq S_i^{\max} \quad (40)$$

$$S_{L,i} = S_{T,i} \quad (41)$$

$$0 \leq \omega_{r,i}^t \leq \gamma_{r,i}^t \omega_{r,i}^{\max} \quad (42)$$

$$0 \leq \omega_{s,i}^t \leq \gamma_{s,i}^t \omega_{s,i}^{\max} \quad (43)$$

$$0 \leq \gamma_{s,i}^t + \gamma_{r,i}^t \leq 1 \quad (44)$$

式中: $S_i^{\max}$ 和 $S_i^{\min}$ 分别为储能设备 $i$ 的最大和最小的储存容量; $S_{L,i}$ 和 $S_{T,i}$ 分别为储能设备 $i$ 的初始状态和终止状态; $\omega_{r,i}^{\max}$ 和 $\omega_{s,i}^{\max}$ 分别为储能设备 $i$ 的最大充电和放电功率; $\gamma_{s,i}^t$ 和 $\gamma_{r,i}^t$ 分别为储能设备 $i$ 在时段 $t$ 处于充能和放能的0-1状态变量, $\gamma_{s,i}^t$ 取1表示充能, $\gamma_{r,i}^t$ 取1表示放能;式(44)保证储能不能同时充放能。

## 3.3 优化求解

式(7)一式(16)为系统中能量转换设备的模型,用于能源不同形式之间的转换,是冷热电耦合的关键;式(24)一式(34)为冷热电功率平衡约束,使冷热电3种能源相互约束。以上两者共同作用,实现了系统的多能互补。式(30)一式(33)将传统的热功率平衡约束改为考虑能量品位的热平衡约束,明确了工厂中热能对口的利用技术及循环利用技术,从而实现了能量的梯级利用与优化。

由于式(27)一式(29)以及式(42)一式(44)存在

二进制离散变量,式(25)为分段线性函数,采用混合整数线性规划法来求解上述优化模型。

## 4 算例分析

本文以广州某工业园区为研究对象进行分析。工业园区中各设备的相关参数如附录B表B1和表B2所示。各个设备的运行维护费用如附录B表B3所示。

分时电价数据如附录B表B4所示,峰时段为14:00—17:00,19:00—22:00;平时段为08:00—14:00,17:00—19:00,22:00—24:00;谷时段为00:00—08:00。同时天然气价格为3.45元/ $m^3$ ,折合成单位热值价格为0.349元/( $kW \cdot h$ );蒸汽价格为348元/t,折合成单位热值价格为0.35元/( $kW \cdot h$ )。冷热电以及蒸汽负荷曲线以及光伏出力如附录B图B1—图B3所示。由于该工厂夜间仍进行生产作业,整体负荷较为平稳。交直流转换效率设为0.95。采用以上数据进行仿真,图2—图4为工厂电、热、冷功率的优化调度结果。

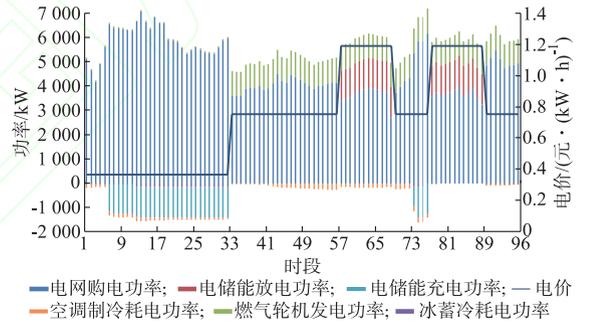


图2 电功率优化调度结果  
Fig.2 Optimal dispatch results of electric power

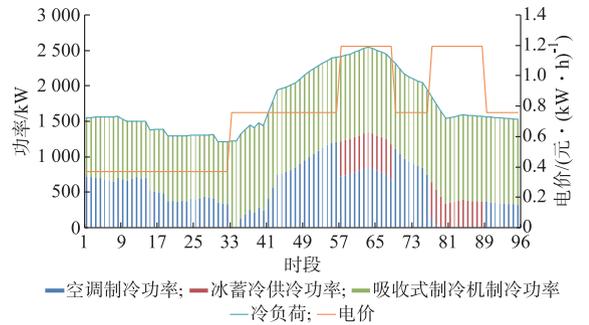


图3 冷功率优化调度结果  
Fig.3 Optimal dispatch results of cold power

根据以上调度结果可得到以下结论。

1) 00:00—08:00为谷时段,从电网购电满足电负荷更为经济。电池储能在谷时段进行充电,在平时段补充电量,在峰时段放电,起到削峰填谷的作

用。在平时段和峰时段,燃气轮机发电的收益高于电网购电,达到满发状态。

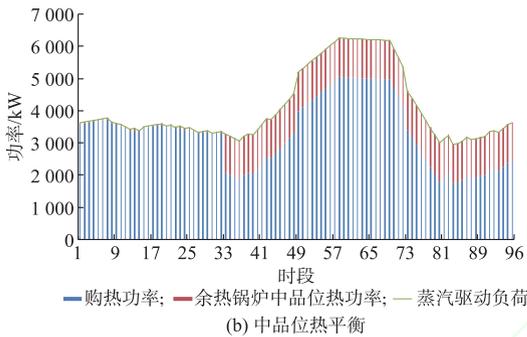
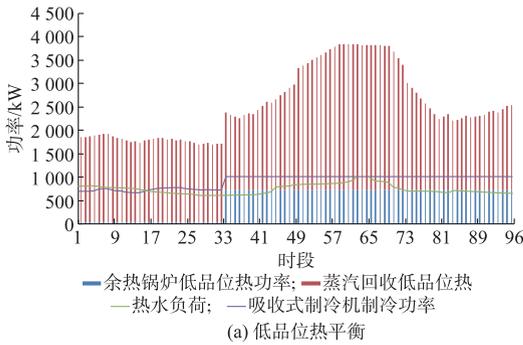


图 4 热功率优化调度结果

Fig.4 Optimal dispatch results of thermal power

2) 户用空调、冰蓄冷空调和吸收式制冷机是工厂中主要的供冷设备。冰蓄冷空调主要在谷时段进行蓄冰作业,并在峰时段释放冷量。吸收式制冷机可利用工厂生产过程中排出的余热进行制冷,是三者中最经济的制冷设备。

3) 低品位热优先满足热水负荷,若有剩余低品位热则作为吸收式制冷机的驱动热源。

在谷时段,剩余低品位热较少且电价较低,吸收式制冷机无法满发且制冷量无法满足冷负荷需求,缺额冷量由户用空调补充。

08:00 之后,低品位热充足,吸收式制冷机持续满发。在峰时段,吸收式制冷机与冰蓄冷空调为主要供冷设备,户用空调起调峰作用。

在平时段,户用空调的制冷能效比高于冰蓄冷制冷机,吸收式制冷机和户用空调为主要供冷设备。

4) 外部够买的中品位蒸汽主要用于满足蒸汽驱动设备需求。由于吸收式制冷机制冷性能系数较低,蒸汽价格较高,且工厂中并未出现极端冷负荷需求,因此并未增加外购买蒸汽作为吸收式制冷机的补充热源。此外,由于天然气价格较高,燃气锅炉产热并未列入中品位热供应方案。

综上,优化后的供能方案可满足工厂全天的生产能源需求,实现多能耦合与协调优化。为突出本

文所提调度策略的经济性优势,进行未考虑热品位区别的调度场景与未优化场景下的仿真,计算日运行费用,并与本文仿真结果进行比较分析,结果如表 1 所示。

表 1 不同调度策略下的工厂日运行费用  
Table 1 Operating cost of the plant under different dispatch strategies

| 策略编号 | 控制策略            | 日运行费用/元   |
|------|-----------------|-----------|
| 1    | 考虑热品位区别的优化调度策略  | 122 544.3 |
| 2    | 未考虑热品位区别的优化调度策略 | 133 565.6 |
| 3    | 未优化(全部采用调峰设备供能) | 145 571.6 |

其中,策略 1 为本文所提的优化调度策略,日运行费用为 122 544.3 元。策略 2 为未考虑热品位区别的优化调度策略,日运行费用为 133 565.6 元,其冷、热平衡协调优化结果如附录 B 图 B4 和图 B5 所示。可知,策略 2 在平谷时段,余热锅炉产热与外部购热主要用于满足热负荷需求,户用空调和冰蓄冷空调为主要制冷设备,吸收式制冷机起调峰作用。然而,在实际工程中,吸收式制冷机可利用工厂生产过程中所产生的余热,制冷成本为 0,其运行成本远低于冰蓄冷空调和户用空调,因此该供能方案不符合实际工程经验。策略 3 的未优化指的是工厂电负荷全部由电网购入,园区热电联供系统购热满足热负荷需求,冷负荷由户用空调满足,日运行费用为 145 571.6 元。策略 1 较策略 2 和策略 3 日运行费用分别降低了 8.3% 和 15.8%。因此,本文所提的优化策略较传统优化策略不仅更贴近工程实际,通过调度工厂内各个设备的运行方式与出力,充分利用工厂内的循环余热,可显著降低系统日运行费用,实现工厂综合能源系统的经济优化运行。

## 5 结语

本文针对工厂综合能源系统的多能协同优化问题,遵循“品位对口,梯级利用”的科学用能思想,按热能品位高低进行梯级利用,对综合能源系统中的能量生产设备、能量转换设备以及能量存储设备进行独立建模,提出了考虑能量梯级利用的多能协同模型,进一步完善了综合能源系统经济优化调度模型。采用混合整数线性规划法对所提模型进行求解。算例分析表明,本文所提的优化策略有以下几个优势。

1) 通过尽可能向各系统提供合适品位的输入能流,实现各种能量之间的配合与转换利用关系的合理安排。

2) 充分利用了工厂中的循环余热,实现系统流程和参数的综合优化,减小系统的不可逆损失,获得

总能系统性能最优。

3)较传统优化策略,系统的日运行费用更低,更贴近工程实际。

本文尚未考虑可再生能源与冷热电负荷的随机性。当日内运行时,可再生能源出力或负荷波动较大时,应如何及时调整各个设备的运行方式,是本文下一步的研究方向。

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

## 参 考 文 献

- [1] 付学谦,孙宏斌,郭庆来,等.能源互联网供能质量综合评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):1-7.  
FU Xueqian, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Comprehensive evaluation of energy quality for energy internet [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 1-7.
- [2] 王英瑞,曾博,郭经,等.电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J].电网技术,2016,40(10):2942-2950.  
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2950.
- [3] 张勇军,陈泽兴,蔡泽祥,等.新一代信息能源系统:能源互联网[J].电力自动化设备,2016,36(9):1-7.  
ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, CAI Zexiang, et al. New generation of cyber-energy system: energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 1-7.
- [4] 彭克,张聪,徐丙垠,等.多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J].电力自动化设备,2017,37(6):3-10.  
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10.
- [5] 姜子卿,郝然,艾芊.基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究[J].电力自动化设备,2017,37(6):260-267.  
JIANG Ziqing, HAO Ran, AI Qian. Interaction mechanism of industrial park based on multi-energy complementation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 260-267.
- [6] 沈颖忱.工业园区能源供给系统优化配置方法研究[D].重庆:重庆大学,2016.
- [7] 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.DOI:10.7500/AEPS20130523006.  
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. DOI: 10.7500/AEPS20130523006.
- [8] 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.
- [9] 靳小龙,穆云飞,贾宏杰,等.融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J].中国电机工程学报,2017,37(2):581-591.  
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building micro-grid considering virtual storage at demand side [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-591.
- [10] 卫志农,张思德,孙国强,等.基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行[J].电力系统自动化,2016,40(15):9-16.DOI:10.7500/AEPS20151109004.  
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16. DOI: 10.7500/AEPS20151109004.
- [11] 刘涤尘,马恒瑞,王波,等.含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J].电力系统自动化,2017,41(4):113-120. DOI:10.7500/AEPS20170512002.  
LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 113-120. DOI: 10.7500/AEPS20170512002.
- [12] 刘星月,吴红斌.太阳能综合利用的冷热电联供系统控制策略和运行优化[J].电力系统自动化,2015,39(12):1-6. DOI: 10.7500/AEPS20140626004.  
LIU Xingyue, WU Hongbin. A control strategy and operation optimization of combined cooling heating and power system considering solar comprehensive utilization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 1-6. DOI: 10.7500/AEPS20140626004.
- [13] 裴玮,邓卫,沈子奇,等.可再生能源与热电联供混合微网能量协调优化[J].电力系统自动化,2014,38(16):9-15. DOI: 10.7500/AEPS20130903010.  
PEI Wei, DENG Wei, SHEN Ziqi, et al. Energy coordination and optimization of hybrid microgrid based on renewable energy and CHP supply [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 9-15. DOI: 10.7500/AEPS20130903010.
- [14] 顾伟,吴志,王锐.考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化[J].电力系统自动化,2012,36(14):177-185.  
GU Wei, WU Zhi, WANG Rui. Multi-objective optimization of combined heat and power microgrid considering pollutant emission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 177-185.
- [15] 徐立中,杨光亚,许昭,等.考虑风电随机性的微电网热电联合调度[J].电力系统自动化,2011,35(9):53-60.  
XU Lizhong, YANG Guangya, XU Zhao, et al. Combined scheduling of electricity and heat in a microgrid with volatile wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 53-60.
- [16] 杨永标,于建成,李奕杰,等.含光伏和蓄能的冷热电联供系统调峰调蓄优化调度[J].电力系统自动化,2017,41(6):6-12. DOI:10.7500/AEPS20160610002.

- YANG Yongbiao, YU Jiancheng, LI Yijie, et al. Optimal load leveling dispatch of CCHP incorporating photovoltaic and storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 6-12. DOI: 10.7500/AEPS20160610002.
- [17] 崔鹏程, 史俊祎, 文福拴, 等. 计及综合需求侧响应的能量枢纽优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 101-109.
- CUI Pengcheng, SHI Junyi, WEN Fushuan, et al. Optimal energy hub configuration considering integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 101-109.
- [18] 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.
- [19] 徐青山, 曾艾东, 王凯, 等. 基于 Hessian 内点法的微型能源网日前冷热电联供经济优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1657-1665.
- XU Qingshan, ZENG Aidong, WANG Kai, et al. Day-ahead optimized economic dispatching for combined cooling, heating and power in micro energy-grid based on Hessian interior point method [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1657-1665.
- [20] 金红光, 林汝谋. 能的综合梯级利用与燃气轮机总能系统[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [21] 金红光, 郑丹星, 徐建中. 分布式冷热电联产系统装置及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [22] 金红光, 隋军, 徐聪, 等. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150-3161.
- JIN Hongguang, SUI Jun, XU Cong, et al. Research on theory and method of multi-energy complementary distributed CCHP system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3150-3161.
- [23] 林世平. 燃气冷热电分布式能源技术应用手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- 徐航(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 综合需求响应。E-mail: xuhang\_1994@zju.edu.cn
- 董树锋(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向: 综合需求响应。E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn
- 何仲潇(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 综合需求响应。E-mail: hezx@zju.edu.cn

(编辑 蔡静雯)

## Multi-energy Cooperative Optimization of Integrated Energy System in Plant Considering Stepped Utilization of Energy

XU Hang, DONG Shufeng, HE Zhongxiao, SHI Yunhui

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The industrial park is a typical complex energy system. Making use of the coupling mechanism of multiple energy sources can achieve multi-energy complementation, which can significantly enhance the economic efficiency and energy utilization of plant. Thus, this paper proposes a multi-energy cooperative optimization model of integrated energy system in the plant considering stepped utilization of energy. Firstly, the structure of the integrated energy system in a plant is described. Then, the energy production equipment, energy conversion devices, and energy storage devices in the integrated energy system are independently modeled. Based on this, taking the lowest daily operation cost as the optimization objective, the mixed integer linear programming method is used to solve the model under the constraints of cooling and thermal power balance and the physical constraints of equipment. The proposed model follows the idea of scientific energy use of "grade counterparts, stepped utilization", which achieves the stepped utilization of energy according to the grade of heat. Thus the optimization of industrial production process and equipment operating parameters is realized. Finally, the example analysis shows that the proposed optimal dispatch strategy is more suitable for the actual demand of engineering, and can reduce the operation costs of industrial users.

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

**Key words:** integrated energy system (IES); industrial park; stepped utilization of energy; multi-energy cooperation; economic dispatch