

能源微网热源系统集成优化及节能减排研究

田川¹,冯国会¹,李帅²,袁勇¹

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;

2. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院,辽宁 沈阳 110015)

摘要 目的 利用能源微网热源系统集成优化技术,解决工业园区建筑运行阶段节能减排问题。**方法** 提出了联供系统新配置模式,采用节能、经济、环保多目标优化方法,建立能源微网热源系统集成优化的 MINLP 模型,采用单纯形法结合分枝定界法求解,得到了热源系统最优的设备配置和运行策略,并分析了该系统节能减排的效果。**结果** 对于传统模式,新模式一次能源节省率为 73.88%,年总费用节省率为 70.35%,CO₂、CO、NO_x 和颗粒物四种污染物排放量分别降低了 20.26%、69.50%、13.77% 和 17.87%,验证了新模式的优点。**结论** 笔者所提出的联供系统新模式有助于能源系统节能减排,所建立的集成优化模型为工业园区能源系统配置提供理论依据。

关键词 工业园区;能源微网;工业余热;热泵;MINLP 模型

中图分类号 TU111.19+5

文献标志码 A

Integrated Optimal Configuration of Heat Source System on Energy Micro-Net and Analysis of Energy Saving and Emission Reduction

TIAN Chuan¹, FENG Guohui¹, LI Shuai², YUAN Yong¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. Institute of Economics and Technology, State Grid Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang, China, 110015)

Abstract: In order to resolve the problem of energy conservation and emission reduction in the running stage of industrial parks, how to integrate and optimize the energy system of industrial parks has become a hot topic in energy planning and building energy conservation and emission reduction research. Aiming at some problems existing in the traditional supply side system, a new fixing heat based on power mode of the cogeneration system is put forward. Based on the evaluation models of energy conservation, economy and environmental protection of cogeneration

收稿日期:2023-04-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3802000);辽宁省教育厅科研项目(LJKZ0580);辽宁省自然科学基金项目(2022-BS-192)

作者简介:田川(1989—),男,博士,主要从事区域能源规划、能源互联网、可再生能源、建筑节能等方面研究。

system, a mixed integer nonlinear programming (MINLP) model for heat source system on energy micro-net with the total annual cost as the optimization objective is established. A new mode of this heat source system with optimal equipment configuration and optimal operation strategy is obtained by the simplex method combined with the branch and bound method. Compared with the traditional mode, the new mode has a primary energy saving rate of 73.88% and an annual total cost saving rate of 70.35%. The emissions of the four pollutants CO_2 , CO , NO_x and particle matter (SP) are reduced by 20.26%, 69.50%, 13.77% and 17.87%, respectively. The results show that the new mode is helpful to energy conservation and emission reduction, and the proposed integrated optimization model can provide theoretical guidance for energy system configuration.

Key words: Industrial park; energy micro-net; industrial waste heat; heat pump; MINLP model

建筑产业中的“节能减排”是实现碳达峰和碳中和愿景的关键环节^[1]。冷热电联产系统(Combined Cooling, Heating and Power, CCHP)是一种同时满足用户电负荷需求和冷热负荷需求的一体化能源梯级利用系统。由于在单栋建筑物中或者是基于一个工业园区尺度下存在热、电负荷不同步的情况,导致将分布式热电联产同步产生的电能和热能不能完全利用,往往存在电量或热量冗余的问题^[2-3]。随着信息与通信技术(Information and Communications Technology, ICT)和互联网的快速发展,促进了以现场发电为核心、分布式热电联产和可再生能源为主要产能装置、依托实时高速的双向信息数据交互技术的“能源互联网”架构的形成。在工业园区规模下,能源互联网已成为集微电网、微热力网和微信息网于一体的能源微网。与微电网相比,微热力网存在传输损耗大、距离短、传输速度低、双向传输难度大等缺点。能源微网系统的集成优化主要包括联供系统的结构设计、设备的容量或数量配置及运行参数等多个因素^[4-9],由于各类目标不可能同时实现最优,所以运行策略优化成为了国内外研究的热点^[10-13]。E. Martelli等^[14]采用双层决策法建立了混合整型线性规划模型(Mixed-Integer Linear Programming, MILP),通过对四个案例的分析、策略优化,实现了成本效益优化目标。A. Rafinia等^[15]在精确跟踪频率偏差的基础

上,提出了一种新的最优多级自动低频减载方案,在优化框架中采用MILP模型进行求解。T. Shekari等^[16]提出了考虑了不同能量转换器和存储设备的能源微网优化调度的MILP模型,在满足能源微网不同运行限制的情况下,该模型可使能源微网运行成本达到最小。A. W. Hammad等^[17]利用混合整型非线性规划模型(Mixed-Integer Nonlinear Programming, MINLP)解决在模块化施工中缺乏针对作业调度的数学优化方法的问题,取得令人满意的效果。传统的CCHP系统配置方式分为以热定电模式和以电定热模式,这两种模式中会出现电量不足或热量不足情况,当电量不足时需要从公网购电,而当热量不足时,通过燃气锅炉燃烧补足。目前针对此方面的研究主要集中在联供系统的结构设计、设备容量或数量配置及运行参数等单一因素优化。有必要对能源微网热源系统运行优化与规划的一体化方法进一步研究,以提高整体优化的速度和效率。

综上所述,笔者提出一种新的“以热定电”模式,即以用户热负荷需求来确定电力驱动热泵(低温热源来自工业建筑余热热汇水)的电力需求,将分布式热电联产技术与高效环保的热泵技术结合,解决了分布式热电联产所发电力去向的问题,以达到最大能源效率;基于新的配置模式,采用节能、经济、环保多目标优化方法,建立能源微网热源系统集成优化的MINLP模型,采用单纯形法结

合分枝定界法求解,得到了热源系统最优的设备配置和运行的最优解,并分析了该系统的节能减排效果,为能源系统规划提供理论依据和技术支撑。

1 系统模型

1.1 模型建立

以燃气轮机+热泵系统(GTHP)为例建立模型,GTHP系统由简单循环燃气轮机机组(GT)、燃气锅炉(B)、废热排放换热器(EX)、吸收式热泵(AHP)和压缩式热泵(CHP)等设备构成,系统结构如图1所示。

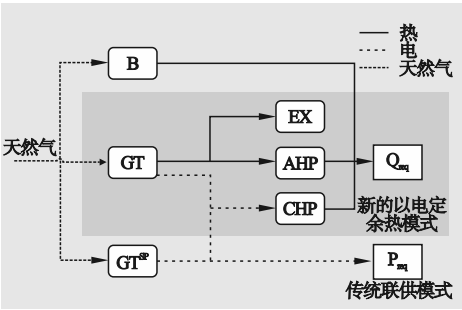


图1 GEHP两种模式联供系统示意图

Fig. 1 Two mode of GEHP system

在传统联供模式中,通过燃气轮机发电,发电机产生的余热驱动吸收式热泵供热多余热量通过废热排放换热器排掉,机组发电满足部分用户电负荷及驱动压缩式热泵制热的电负荷,不足电量从公网补充,通过燃气锅炉、吸收式热泵和压缩式热泵共同制热来满足热负荷需求。通过燃气轮机发电和公网共同满足电负荷需求,其热效率约为140%(如图2所示)。

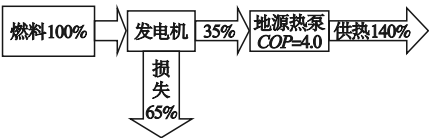


图2 我国当前平均供电效率下的热泵供热效率

Fig. 2 Heating efficiency of heat pump in traditional power supply mode

新的“以热定电”模式,即以用户热负荷

需求确定电力驱动热泵(低温热源来自工业建筑余热热汇水)的电力需求,将分布式热电联产技术与高效环保的热泵技术结合,解决了分布式热电联产所发电力去向的问题,以达到最大能源效率(如图3所示)。

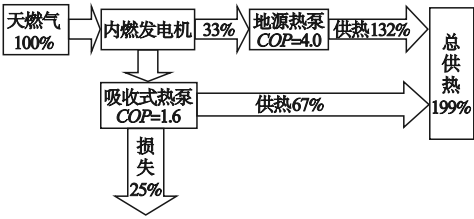


图3 应用内燃机的分布式能源系统+热泵供热的能源效率

Fig. 3 Heating efficiency of distributed energy system + heat pump

在新的“以热定电”模式中,吸收式热泵与压缩式热泵共同满足热负荷需求。原动机在设计时都有最佳运行负荷率区间,一旦低于高效运行时的最小负荷率,发电效率会急剧下降。设第 m 时刻第 n 台燃气轮机机组发电量与输入燃料量关系为

$$\eta_{GT,n} = \frac{P_{GT,m}}{F_{GT,n,m}} \quad (1)$$

式中: η_{GT} 为燃气轮机发电效率; P_{GT} 为燃气轮机的发电量,kW; F_{GT} 为燃气轮机机组输入燃气量,kW。

燃气轮机机组回收余热量与输入燃料量的线性关系式为

$$\eta_{GTh,n} = \frac{Q_{GTh,n,m}}{F_{GT,n,m}} \quad (2)$$

式中: η_{GTh} 为燃气轮机余热利用效率; Q_{GTh} 为燃气轮机余热利用量,kW。

引入整型变量 W ,表示系统中各设备的运行状态(0代表关闭,1代表运行),在最小负荷率下的实际运行区间为

$$\alpha_{GT} P_{GT,n}^{\text{rated}} W_{GT,n,m} \leq P_{GT,n,m} \leq P_{GT,n}^{\text{rated}} W_{GT,n,m}, \quad W_{GT,n,m} \in \{0,1\} \quad (3)$$

式中: α_{GT} 为燃气轮机的最小负荷率。

时刻 m 的回收总热量为

$$Q_{\text{GTh},m} = \sum_{n=0}^{N_{\text{GT}}} Q_{\text{GTh},n,m}, n = \{0, 1, \dots, N_{\text{GT}}\}. \quad (4)$$

时刻 m 的耗气总量为

$$F_{\text{GT},m} = \sum_{n=0}^{N_{\text{GT}}} F_{\text{GT},n,m}, n = \{0, 1, \dots, N_{\text{GT}}\}. \quad (5)$$

1.2 系统能量平衡方程

系统能量平衡方程包括热(冷)量平衡方程和电量平衡方程。

在新的“以热定电”模式中,系统在时刻 m 总的余热回收量为吸收式热泵的输入热量和废热换热器的输入热量之和,热平衡方程:

$$Q_{\text{GTh},m} = Q_{\text{AHP},m}^{\text{re}} + Q_{\text{EX},m}^{\text{re}}. \quad (6)$$

用户在时刻 m 的热需求为吸收式热泵和压缩式热泵之和:

$$Q_{\text{req},m} = Q_{\text{CHP},m} + Q_{\text{AHP},m}. \quad (7)$$

燃气轮机机组时刻 m 发电量全部用于满足压缩式热泵的电需求,电平衡方程为

$$P_{\text{GT},m} = P_{\text{CHP},m}. \quad (8)$$

1.3 系统评价

热源系统评价包括节能性评价、经济性评价和环保性评价等。

能源系统的节能性采用年一次能源节省率来评价:

$$H_{\text{F}} = (F^{\text{SP}} - F)/F^{\text{SP}}. \quad (9)$$

$$H'_{\text{F}} = (F^{\text{SP}} - F)/F^{\text{SP}}. \quad (10)$$

式中: H_{F} 和 H'_{F} 分别为新的“以热定电”模式的联供系统和传统联供系统相对分供系统的年能源节省率; F^{SP} 为分供系统全年一次能源消耗量; F 为新的“以热定电”模式的联供系统全年一次能源消耗量。

系统经济性采用年成本节约率、年维修费用节约率和年总运行费用节约率评价,年成本节约率:

$$H_{\text{cc}} = (C_{\text{cc}}^{\text{SP}} - C_{\text{cc}})/C_{\text{cc}}^{\text{SP}}. \quad (11)$$

$$H'_{\text{cc}} = (C_{\text{cc}}^{\text{SP}} - C'_{\text{cc}})/C_{\text{cc}}^{\text{SP}}. \quad (12)$$

式中: H_{cc} 和 H'_{cc} 分别为新的“以热定电”模式

的联供系统和传统联供系统相对分供系统的年成本节约率; $C_{\text{cc}}^{\text{SP}}$ 为分供系统的年初投资费用; C_{cc} 为新的“以热定电”模式的联供系统的年初投资费用; C'_{cc} 为传统联供系统的年初投资费用。

年维修费用节约率:

$$H_{\text{mc}} = (C_{\text{mc}}^{\text{SP}} - C_{\text{mc}})/C_{\text{mc}}^{\text{SP}}. \quad (13)$$

$$H'_{\text{mc}} = (C_{\text{mc}}^{\text{SP}} - C'_{\text{mc}})/C_{\text{mc}}^{\text{SP}}. \quad (14)$$

式中: H_{mc} 和 H'_{mc} 分别为新的“以热定电”模式的联供系统和传统联供系统年维修费用节约率; $C_{\text{mc}}^{\text{SP}}$ 为分供系统的年维修费用; C_{mc} 为新的“以热定电”模式的联供系统的年维修费用; C'_{mc} 为传统联供系统的年维修费用。

年总运行费用节约率为

$$H_{\text{oc}} = (C_{\text{oc}}^{\text{SP}} - C_{\text{oc}})/C_{\text{oc}}^{\text{SP}}. \quad (15)$$

$$H'_{\text{oc}} = (C_{\text{oc}}^{\text{SP}} - C'_{\text{oc}})/C_{\text{oc}}^{\text{SP}}. \quad (16)$$

式中: H_{oc} 和 H'_{oc} 分别为新的“以热定电”模式的联供系统和传统联供系统年运行费用节约率; $C_{\text{oc}}^{\text{SP}}$ 为分供系统的年运行费用; C_{oc} 为新的“以热定电”模式的联供系统的年运行费用; C'_{oc} 为传统联供系统的年运行费用。

联供系统相对于传统联供系统排放节省率分别为

$$H_{\text{E},\text{CO}_2} = (E_{\text{CO}_2}^{\text{SP}} - E_{\text{CO}_2})/E_{\text{CO}_2}^{\text{SP}}. \quad (17)$$

$$H'_{\text{E},\text{CO}_2} = (E_{\text{CO}_2}^{\text{SP}} - E'_{\text{CO}_2})/E_{\text{CO}_2}^{\text{SP}}. \quad (18)$$

式中: H_{E,CO_2} 和 $H'_{\text{E},\text{CO}_2}$ 分别为新的“以热定电”模式的联供系统和传统联供系统排放节省率; $E_{\text{CO}_2}^{\text{SP}}$ 为分供系统的年排放量; E_{CO_2} 为新的“以热定电”模式的联供系统的年排放量; E'_{CO_2} 为传统联供系统的年排放量。

2 系统配置与运行集成优化

2.1 系统优化变量及参数

采用 G_{GT} 表示 GTHP 联供系统各设备组成的集合; $Cap_{\text{GT}}(g)$ 表示系统各设备额定安装容量的集合; $N_{\text{GT}}(g)$ 表示系统各设备安装数量的集合,均为自然数变量。

将第 m 时刻设备 n 的开闭情况设为“0/1”整型规划模型,用集合 $\Omega_{GT}(g, n, m)$ 表示;第 m 时刻第 n 台设备的输入量集合为 $IN_{GT}(g, n, m)$,输出量集合为 $OUT_{GT}(g, n, m)$;其他输出和输入变量还包括燃气轮机机组余热 $Q_{GT,n,m}^r$ 和从公网购电量 $P_{grid,m}$ 。

第 n 台设备的效率(性能系数)表示为 $\eta_{GT}(g, n)$;各设备的最小负荷率表示为 $\alpha_{GT}(g)$;各设备单位初投资费用表示为 $F_{GT}(g)$;GTHP 系统中 CO_2 、 CO 、 NO_x 和颗粒物(SP)等污染物的排放量用集合 Z_{GT} 表示。

2.2 系统优化配置数学模型

2.2.1 数学模型约束条件

在新的“以热定电”模式下,时刻 m 燃气轮机 α 机组余热用于驱动吸收式热泵制热,多余热量通过换热器排掉,余热平衡方程为

$$Q_{GT}^r(m) = IN_{GT}(3, m) + IN_{GT}(4, m). \quad (19)$$

时刻 m 燃气轮机机组发电量满足压缩式热泵制热电需求,系统不对外供电:

$$OUT_{GT}(1, m) \geq IN_{GT}(5, m). \quad (20)$$

时刻 m 用户热需求由压缩式热泵和吸收式热泵制热共同满足:

$$Q_{req}(m) \leq OUT_{GT}(4, m) + OUT_{GT}(5, m). \quad (21)$$

在传统模式下,余热平衡方程与新的“以热定电”模式相同。时刻 m 时 GT 机组发电量自发自用,分别满足用户电负荷需求及压缩式热泵制热电需求,如果系统发电量不能满足二者需求,再自公网购电:

$$OUT_{GT}(1, m) + P_{grid}(m) \geq IN_{GT}(5, m) + P_{req}(m). \quad (22)$$

时刻 m 燃气锅炉、吸收式热泵和压缩式热泵共同满足用户热负荷需求:

$$Q_{req}(m) \leq OUT_{GT}(2, m) + OUT_{GT}(4, m) + OUT_{GT}(5, m). \quad (23)$$

2.2.2 数学模型目标函数

工业园区的节能减排技术重点是技术的经济性,因此新的联供系统经济性指标取联供系统的年总费用,以最大的能源节省率和

最低的污染排放量为目标,以经济性指标最优为基础,寻求设备配置和运行策略的最优解,模型目标函数为

$$J = \min (C_{cc} + C_{mc} + C_{oc}). \quad (24)$$

2.2.3 数学模型的求解

由于 MINLP 模型的约束条件中含有很难求解的非线性项,常规的求解方法难以适用该优化配置问题,难以求得全局最优解,需要将模型线性化,将 MINLP 问题转化为 MILP 问题,并采用单纯形法结合分支定界法求解。

3 应用分析

3.1 应用实例

选取地处严寒 C 区的沈阳市某工业园区内一幢建筑作为例子^[18],建立分析模型。该建筑为钢筋混凝土框架结构,建筑面积 15 708 m²,分上下两层。该工业建筑体型系数为 0.11,屋顶传热系数为 0.43 W/(m²·K),外墙传热系数为 0.3 W/(m²·K),符合《工业建筑节能设计统一标准》(GB 51245—2017)的严寒 C 区围护结构传热系数限值的要求。在冬季供热运行期间对其进行逐时热负荷与电负荷测试,结果见图 4。

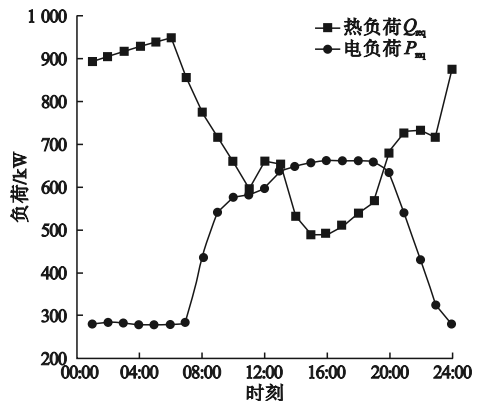


图 4 典型日逐时热负荷与电负荷曲线

Fig. 4 Hourly thermal and electrical load curves on typical day

GTHP 联供系统各设备的性能系数设置为
 $\{0.27, 0.90, 1.00, 0.70, 4.50\} \in \eta_{GT}$
 $(G, N)^{[19]}$. (25)

各设备的最小负荷率为^[20]
 $\{0.6, 0, 0, 0, 0\} \in A_{GT}(G)$. (26)

单位初投资(单位:元/kWe/th)^[21-22]设置为

$$P_{grid}(m) = \begin{cases} 0.3445125, & m \in (22:00 - 05:00); \\ 0.6352, & m \in (05:00 - 07:30, 11:30 - 17:00); \\ 0.9258875, & m \in (07:30 - 11:30, 17:00 - 21:00). \end{cases} \quad (31)$$

3.2 求解结果

图5为GTHP联供系统传统模式最优运行策略。由图5(b)可知,燃气轮机机组在处于峰时电价下的时间段时,均接近满负荷运

$$\{5570, 830, 455, 1820, 965\} \in \Gamma_{GT}(G).$$
 (27)

环保性参数设置为^[19]
 $\{808.16, 0.13, 2.14, 0.07\} \in Z_{GT}$. (28)

$$\{252.55, 0.03, 0.19, 0.02\} \in Z_B.$$
 (29)

$$\{594.24, 0.55, 1.95, 0.05\} \in Z_{GTSP}.$$
 (30)

行,系统发电量可以满足用户电负荷需求,不用从公网购电;而处于谷时电价下的时间段时则大多在最小负荷率附近运行,需要从公网购电来满足电负荷需求。

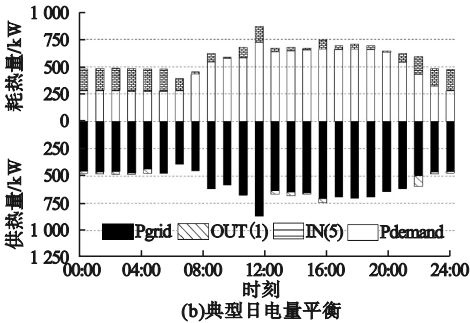
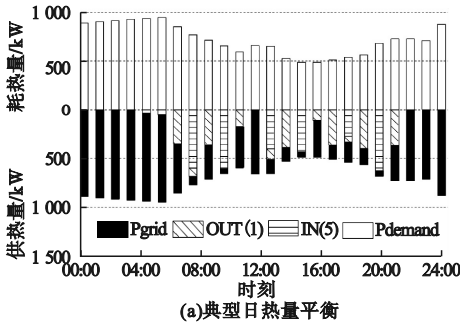


图5 GTHP 联供系统传统模式最优运行策略

Fig. 5 The optimal running strategy of traditional mode for GTHP system

图6为GTHP联供系统新模式最优运行策略。

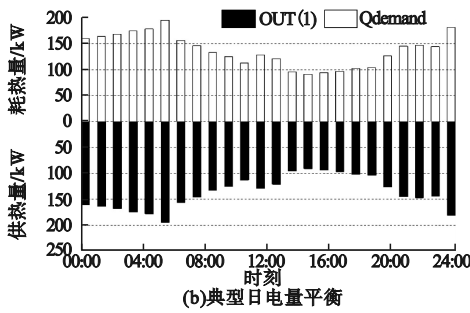
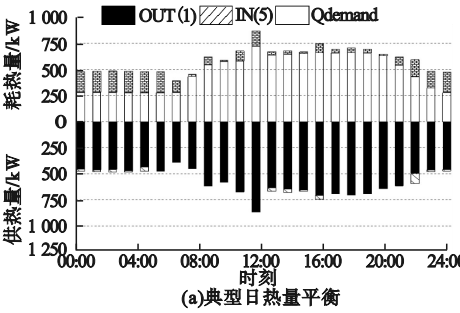


图6 GTHP 联供系统新模式最优运行策略

Fig. 6 The optimal running strategy of the new mode for GTHP system

由图6(a)可知,在时刻05:00~07:00、12:00~14:00,系统电负荷逐渐增大,而燃气轮机机组未满足负荷运行,因此压缩式热泵的电负荷占比较小,需要燃气轮机机组余热和燃气

锅炉负担部分热负荷。从图6可以分析得到,联供机组在传统模式下,运行策略受电价影响较大。最优容量配置结果如表1所示。

表1 GTHP 联供系统最优容量配置

Table 1 The optimal capacities of GTHP kW

设备类型	传统模式	新的“以热定电”模式
GT	870.295 3	195.051 0
B	948.160 0	—
EX	1 047.364 0	195.370 0
AHP	1 035.269 0	170.260 0
CHP	904.690 0	877.730 0

在新的“以热定电”模式下,压缩式热泵的电需求完全由燃气轮机机组满足,系统热负荷由压缩式热泵供热和机组余热组成,其中压缩式热泵在供热量中占比很大。与传统模式相比,新的“以热定电”模式不从公网购电,因此不受电价影响。

3.3 优化结果分析

3.3.1 联供系统与分供系统优化结果比较

由优化结果可知,与分供系统相比,联供系统一次能源节省率为81.8%,总效率提高到234.35%,节省了7 617 373 kW·h的燃气,说明联供系统能源有效利用率远远高于分供系统。联供系统的年初投资费用和维修费用节省率为8.03%;联供系统年平均运行费用相对于分供系统节省率达到88.79%,最终得到联供系统年总费用节省率达到82.38%,采用优化配置的联供系统经济性优势明显。对联供系统和分供系统进行环保性对比分析,即使在优化目标函数不是CO₂、CO、NO_x和SP这四种污染物排放最低的情况下,相对于分供系统还是分别降低了51.56%、89.7%、53.39%和49.52%,采用优化配置的联供系统具有良好的环保性能。

3.3.2 传统模式与新的“以热定电”模式优化结果比较

由优化结果可知,相对于传统模式,新的“以热定电”模式取得73.88%的一次能源节省率,能源节省量达4 794 446 kW·h。传统模式的年初投资费用、维修费用和年运行费用均比新的以热定电模式高出很多,最终新的“以热定电”模式取得年总费用节省率为70.35%,表明新的“以热定电”模式具有较

好的经济性。新的“以热定电”模式中,CO₂、CO、NO_x和SP四种污染物排放量分别降低了20.26%、69.50%、13.77%和17.87%。

4 结 论

(1) 针对供应侧传统联供系统热量和电量无法完全利用、所发电力无法上网、综合能效偏低等问题,提出了新的“以热定电”模式联供系统;基于热源系统各主要设备性能特征,建立热源系统的节能性、经济性和环保性分析的评价模型。

(2) 建立了多目标热源系统集成优化的混合整数非线性规划模型(MINLP)。为了同时求解最优设备配置和运行策略,在模型中引入设备配置优化变量与运行策略优化变量。所建立的模型可以为工业园区规划阶段提供高效准确的热源系统容量配置与运行策略方案,并同时得到系统节能与环保性能。

(3) 对沈阳某工业建筑能源微网热源系统集成优化,得出了GTHP系统在传统模式和新的“以热定电”模式下的包括最优容量配置和最优运行策略,优化结果对比分析显示,相对于传统模式,联供系统新的“以热定电”一次能源节省率为73.88%,年总费用节省率为70.35%,CO₂、CO、NO_x和SP四种污染物排放量分别降低了20.26%、69.50%、13.77%和17.87%。

参考文献

[1] 赵秋叶,施晓清,石磊. 国内外产业共生网络研究比较述评[J]. 生态学报,2016,36(22): 7288-7301.
(ZHAO Qiuye, SHI Xiaoqing, SHI Lei. A review of the industrial symbiosis network [J]. Acta ecologica sinica, 2016, 36(22): 7288-7301.)

[2] 龙惟定,白玮. 城区需求侧能源规划与能源微网技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
(LONG Weiding, BAI Wei. Demand side community planning and energy micro-net technologies [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)

[3] 张璇哲,孙峻. 天然气分布式系统“以电定热”与“以热定电”运行模式分析研究[J]. 科技创新与应用,2019(36): 80-82.

- (ZHANG Xuanzhe, SUN Jun. Research on the operation mode of “determining heat by electricity” and “determining electricity by heat” in natural gas distributed systems[J]. Technology innovation and application, 2019(36): 80–82.)
- [4] BEJAN A, TSATSARONIS G, MORAN M J. Thermal design and optimization [M]. New York: Wiley, 1996.
 - [5] ZHANG J, CAO S, YU L, et al. Comparison of combined cooling, heating and power (CCHP) systems with different cooling modes based on energetic, environmental and economic criteria [J]. Energy conversion and management, 2018, 160(3): 60–73.
 - [6] LI Y, TIAN R, WEI M, et al. An improved operation strategy for CCHP system based on high-speed railways station case study [J]. Energy conversion and management, 2020(216): 112936.
 - [7] ZHENG C Y, WU J Y, ZHAI X Q. A novel operation strategy for CCHP systems based on minimum distance [J]. Applied energy, 2014(128): 325–335.
 - [8] AGHAEI A T, SARAY R K. Optimization of a combined cooling, heating, and power (CCHP) system with a gas turbine prime mover: A case study in the dairy industry [J]. Energy, 2021(229): 120788.
 - [9] WANG J, LIU Y, REN F, et al. Multi-objective optimization and selection of hybrid combined cooling, heating and power systems considering operational flexibility [J]. Energy, 2020(197): 117313.
 - [10] GIANNANTONI C, LAZZARETTO A, MACOR A. Multicriteria approach for the improvement of energy systems design [J]. Energy, 2005, 30(10): 1989–2016.
 - [11] 金锋, 姜国良, 解鸣, 等. 基于 k-means 聚类 and MILP 模型的 CCHP 系统运行优化. 暖通空调, 2020, 50(11): 74–80.
(JIN Feng, JIANG Guoliang, XIE Ming, et al. CCHP system operation optimization based on k-means clustering and MILP model [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2020, 50(11): 74–80.)
 - [12] 甘中学, 郑超越, 许裕栗, 等. 三联供能源系统优化建模与调度方法. 控制工程, 2020, 27(6): 1103–1112.
(GAN Zhongxue, ZHENG Chaoyue XU Yushu, et al. Energy optimization modeling and scheduling method for CCHP system [J]. Control engineering of China, 2020, 27(6): 1103–1112.)
 - [13] 祝永刚. 多能协同三联供系统多目标优化配置模型. 自动化应用, 2021(6): 7–10.
(ZHU Yonggang, Multi-objective optimization configuration model of CCHP system [J]. Automation application, 2021(6): 7–10.)
 - [14] MARTELLI E, FRESCHINI M, ZATTI M. Optimization of renewable energy subsidy and carbon tax for multi energy systems using bilevel programming [J]. Applied energy, 2020, 267: 115089.
 - [15] RAFINIA A, MOSHTAGH J, REZAEI N. Towards an enhanced power system sustainability: An MILP under-frequency load shedding scheme considering demand response resources [J]. Sustainable cities and society, 2020, 59: 102168.
 - [16] SHEKARI T, GHOLAMI A, AMINIFAR F. Optimal energy management in multi-carrier microgrids: an MILP approach [J]. Journal of modern power systems and clean energy, 2019, 7(4): 876–886.
 - [17] HAMMAD A W, GRZYBOWSKA H, SUTRISNA M, et al. A novel mathematical optimization model for the scheduling of activities in modular construction factories [J]. Construction management and economics, 2020, 38(6): 534–551.
 - [18] 胥富强. 沈阳市工业园区能源总线供热系统的研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
(XU Fuqiang. Research on energy bus heating system in Shenyang industrial park [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
 - [19] GAMOU S, YOKOYAMA R, ITO K. Parametric study on economic feasibility of microturbine cogeneration systems by an optimization approach [J]. Journal of engineering for gas turbines and power, 2005, 127(2): 389–396.
 - [20] CAMPANARI S, BONCOMPAGNI L, MACCHI E. Microturbines and trigeneration: optimization strategies and multiple engine configuration effects [J]. Journal of engineering for gas turbines and power, 2004, 126(1): 92–101.
 - [21] 孔祥强, 李瑛, 王如竹, 等. 燃气轮机冷热电联供系统优化与节能经济性研究[J]. 暖通空调, 2005, 35(7): 4–8.
(KONG Xiangqiang, LI Ying, WANG Ruzhu, et al. Energy efficiency and economic analysis of CCHP driven by gas turbine based on optimization [J]. Heating ventilating & air conditioning, 2005, 35(7): 4–8.)
 - [22] 安青松. 基于燃气轮机的冷热电三联供系统优化模拟[D]. 天津: 天津大学, 2004.
(AN Qingsong. Optimization simulation of system for combined cooling heat and power based on gas turbine [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.)
(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)