

基于可靠性评估的冷热电三联产系统运行优化研究

马文静¹, 苏国萍¹, 于涛², 王旭²

(1. 国能经济技术研究院有限责任公司, 北京 102211; 2. 华北电力大学 环境科学与工程学院, 北京 102206)

摘要: 在传统能源紧缺的背景下, 发展冷热电三联产(CCHP)系统并提出兼顾可靠性的系统运行优化方案可在规避供需失衡风险的同时有效提高经济效益。本文提出基于可靠性评估的CCHP系统运行优化模型, 在传统优化模型中引入可靠性约束, 并以华东地区某宾馆为例, 分析和评估了各可靠性水平下该宾馆不同季节典型日的供能设备逐时出力情况和运行费用。结果表明: 随着可靠性水平的提高, 用户的用能需求和CCHP系统的运行费用随之增加; 系统可靠性水平的提高需要以成本支出为代价。

关键词: 可靠性评估; 冷热电三联产系统; 优化模型; 运行费用; 用能需求

中图分类号: TK019

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2023.09.006

[引用本文格式] 马文静, 苏国萍, 于涛, 等. 基于可靠性评估的冷热电三联产系统运行优化研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(9): 47-55. MA Wen-jing, SU Guo-ping, YU Tao, et al. Research on operation optimization of CCHP system based on reliability evaluation [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(9): 47-55.

Research on Operation Optimization of CCHP System based on Reliability Evaluation

MA Wen-jing¹, SU Guo-ping¹, YU Tao², WANG Xu²

(1. CHN Energy Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing, China, Post Code: 102211;

2. College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University,
Beijing, China, Post Code: 102206)

Abstract: In the context of traditional energy shortage, developing the combined cooling heating and power (CCHP) system and proposing a system operation optimization scheme that takes reliability into account can effectively improve the economic benefits while avoiding the risk of imbalance between supply and demand. In this paper, an operation optimization model of CCHP system based on reliability evaluation was proposed, where the reliability constraint was incorporated into the traditional optimization model. Taking a hotel located in East China as an example, the hourly output of each energy supply equipment and total system cost in different typical days under specific reliability levels were analyzed and evaluated. Results show that with the increase of the reliability level, the energy demand and operation cost will increase; the improvement of the system reliability level needs to be at the expense of economic cost.

Key words: reliability evaluation, CCHP system, optimization model, operating cost, energy demand

引言

随着人口增长和社会经济的不断发展,能源消耗的急剧增加和传统能源储量锐减已成为制约国家可持续发展的主要因素。同时,传统化石能源燃烧造成的环境污染、温室气体排放和极端天气频繁出现同样是亟需解决的难题。因此,大规模开发和利用以清洁能源为原料,实现能级阶梯利用的分布式能源系统,减少传统化石能源利用量,提高能源利用效率和保护环境刻不容缓。

冷热电三联产系统(Combined Cooling Heating and Power System, CCHP)作为典型的分布式能源系统,可以同时供应冷、热、电3种形式的能量,实现与可再生能源的耦合互补,在适宜的结构组成和运行策略条件下,其经济性良好,且利于提升电力系统的调节能力和灵活性,可以有效缓解能源短缺和环境污染的双重压力。目前,如何采用优化手段,设计和实施CCHP的最佳运行策略,充分发挥系统的优势和潜能,一直备受国内外学者的广泛关注。王志光等人^[1]以微型燃气轮机CCHP系统为主要研究目标,通过优化设计微型燃气轮机的容量和最低负荷率以及电制冷比,实现了系统供能效益的显著提高。周任军等人^[2]在构建准确反映CCHP系统运行状态能量流函数的基础上,建立了计及能耗成本与环境成本的CCHP系统优化调度模型,提出经济效益和环境效应俱佳的系统运行策略。Rong等人^[3]构建了以运行成本和二氧化碳排放最低为目标的冷热电三联供系统运行优化模型,求解得到的系统运行方案有效控制系统供能成本,很好地兼顾了温室气体减排。Wei等人^[4]提出了一种基于模型预测控制和反馈校正预测误差的CCHP系统在线运行优化方法,显著提高了系统供能的可靠性水平。Wang等人^[5]综合考虑了气候变化对建筑用能的影响,提出了适应气候变化的CCHP系统供能策略,保证极端气象条件下的能源供需平衡,有效避免了不必要的资源浪费和成本支出。

综上所述,现有研究普遍采用最优化技术,在深入了解CCHP系统组成要素和运行机制的基础上,

构建CCHP系统运行优化模型,设计生成最佳供能策略。然而,受制于外界气象要素(包括温度、湿度和辐射等)变化和用户自身状态(包括规模改变和生产活动安排等)调整的影响,系统的冷、热、电负荷呈现出明显的年际和年内波动变化趋势。由于供能策略未能及时跟进和调整,导致系统供需失衡的问题时有发生,严重影响了用户的用能体验。为有效解决这一问题,本文提出了一种基于可靠性评估的CCHP系统运行优化模型,在详细阐明可靠性定义并将其量化为具体数值的基础上,设计和生成了不同可靠性水平下的系统最优供能策略,很好地保障了用户的用能需求。相较于传统优化模型,该模型可有效控制系统运行成本,为用户提供优质的供能服务。

1 冷热电联供系统特点及运行机制分析

CCHP系统作为小型建筑(如酒店、医院、办公楼)的常用供能形式,可以利用辅助设备(溴化锂和余热锅炉)回收利用主体设备(燃气轮机、内燃机或者微型燃气轮机)发电过程中产生的高温余热烟气,在满足用户冷能、热能和电能需求的同时,实现能源的梯级利用、供能成本支出的显著降低及环境污染的有效控制,并可提高电力系统的调节能力和灵活性。

一般CCHP系统的设备组成和运行流程如图1所示。CCHP系统通常由主体设备、辅助设备和调节设备3部分构成^[6]。在系统运行过程中,主体设备(以燃气轮机为例)燃烧天然气产生电能,辅助设备(以溴化锂制冷机和余热锅炉为例)分别利用燃烧的副产物高温余热烟气,满足用户的冷、热需求。系统在优先利用余热、实现能源梯级利用的前提下,增加了调节设备(以电制冷机组和补燃锅炉为例)作为辅助的冷源和热源,在辅助设备的制冷量和供暖量无法满足用户需求时,补充供应冷量和热量,确保用户的用能需求得到满足。由于系统处于并网运行状态,当主体设备电能供应不足时,可通过从公共电网购电来满足用户的电需求,从而进一步提升CCHP系统供能的灵活性。

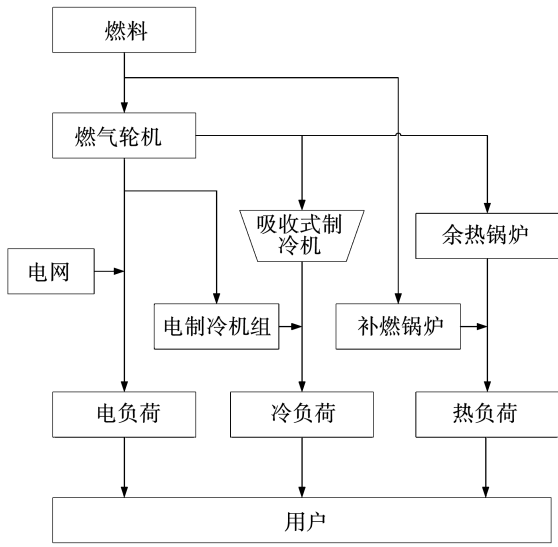


图1 CCHP系统流程图

Fig.1 The flow chart of CCHP system

2 优化模型构建

作为环境友好型和资源节约型供能形式,为CCHP系统制定适宜的运行策略,可以实现多能互补和能源梯级利用,进而降低供能成本支出。因此,构建CCHP系统运行优化模型,求解生成设备的最佳能源供应量水平,具有重要的现实意义^[7]。本文在构建以系统供能成本最小(包含燃料消耗成本、设备的运行和维护成本)为优化目标,能量流平衡、设备容量限制为约束的传统运行优化模型的基础上,创新引入可靠性约束,构建基于可靠性评估的CCHP系统运行优化模型,实现供能成本最小化,为用户提供更稳定的供能服务。

2.1 目标函数

$$\begin{cases} C_{\min} = f_1 + f_2 \\ f_1 = \sum_{t=1}^{8760} C_{ng}(t) \times [V_{gt}(t) + V_{heat_b}(t)] + \\ \quad \delta \times C_{ele}(t) \times E_{ele}(t) \\ f_2 = C_{gt} \sum_{t=1}^{8760} E_{gt}(t) + 0.278C_b \sum_{t=1}^{8760} V_{heat_b}(t) + \\ \quad 0.278C_g \sum_{t=1}^{8760} L_{cool_g}(t) + C_e \sum_{t=1}^{8760} L_{cool_e}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_1 —系统的年运行成本,元; f_2 —系统的年维护成本,元; $C_{ng}(t)$ —天然气在 t 时段的价格,元/ m^3 ;

$V_{gt}(t)$ —燃气轮机在 t 时段消耗的天然气量, m^3 ;
 $V_{heat_b}(t)$ —补燃锅炉在 t 时段补燃的天然气量, m^3 ;
 δ —常数,取0或1,当系统从公共电网购电时取1,否则取0; $C_{ele}(t)$ — t 时段公共电网的电价,元/($kW \cdot h$);
 $E_{ele}(t)$ — t 时段系统所需的购电量, $kW \cdot h$; C_{gt} —燃气轮机的单位维修成本,元/ kW ; $E_{gt}(t)$ —燃气轮机在 t 时段的发电量, kW ; C_b —补燃锅炉的单位维修成本,元/ kW ; $L_{heat_b}(t)$ —补燃锅炉在 t 时段的供热量, kW ; C_g —吸收式制冷机的单位维修成本,元/ kW ; $L_{cool_g}(t)$ —吸收式制冷机在 t 时段的供冷量, kW ; C_e —电制冷机组的单位维修成本,元/ kW ; $L_{cool_e}(t)$ —电制冷机组在 t 时段的供冷量, kW 。

2.2 传统约束

影响系统运行结果的主要因素包括系统供能设备的容量与功率,反映用户侧的冷、热、电需求与系统所能提供的冷量、热量和电量之间关系的约束条件,包括能量平衡约束和设备容量约束。能量平衡约束主要是指系统的出力满足用户侧的冷、热、电需求。设备容量约束用来描述CCHP系统设备的状态和性能^[8]。

(1)系统设备容量约束:

$$E_{gt}(t) = y(t) \times P_{gt} \times t \quad (2)$$

$$V_{ng}(t) = \frac{3.6 \times E_{gt}(t)}{\eta_{gt} \times H_u} \quad (3)$$

$$Q_{eg}(t) = \frac{3.6 \times E_{gt}(t) \times (1 - \eta_{gt} - \eta_{loss})}{\eta_{gt}} \quad (4)$$

$$Q_{c_g}(t) = Q_{eg}(t) \times x(t) \times \eta_{a_{hr}} \times COP_a \quad (5)$$

$$V_{ng_a}(t) = \frac{Q_{c_e}(t)}{COP_a \times \eta_{a_c} \times H_u} \quad (6)$$

$$Q_{h_e}(t) = Q_{eg}(t) \times (1 - x(t)) \times \eta_{b_{hr}} \quad (7)$$

$$V_{ng_b}(t) = \frac{Q_{h_b}(t)}{\eta_{b_c} \times H_u} \quad (8)$$

(2)能量平衡约束:

$$E_{gt_a}(t) + E_z(t) = E(t) \quad (9)$$

$$E_z(t) < E(t) \quad (10)$$

$$Q_{c_g}(t) + Q_{c_e}(t) = Q_c(t) \quad (11)$$

$$Q_{c_e}(t) < Q_c(t) \quad (12)$$

$$Q_{h_e}(t) + Q_{h_b}(t) = Q_h(t) \quad (13)$$

$$Q_{h_b}(t) < Q_h(t) \quad (14)$$

式中: P_{gt} —燃气轮机的额定发电功率, kW ; $y(t)$ —燃气轮机在 t 时段的发电出力情况, $y(t) = 1$ 时,燃

气轮机满负荷运行, $y(t) = 0$ 时, 燃气轮机停止运行, $0 < y(t) < 1$ 时, 燃气轮机的出力等于 $y(t) \times P_{gt}$, kW; $V_{ng}(t)$ —燃气轮机在 t 时段消耗的天然气的量, m^3 ; η_{gt} —燃气轮机额定发电效率; H_u —天然气热值, MJ/m^3 ; $Q_{eg}(t)$ —燃气轮机在 t 时段内抽出的蒸汽量, kW; η_{loss} —燃气轮机的热损失效率; $\eta_{a,hr}$ —吸收式制冷机的热回收效率; COP_a —吸收式制冷剂的制冷系数; $V_{ng,a}(t)$ —CCHP 系统提供的冷负荷不足以满足用户冷负荷需求时通过补燃锅炉补燃的天然气的量, m^3 ; $\eta_{a,c}$ —吸收式制冷器反应器的燃烧效率; $\eta_{h,hr}$ —余热锅炉的运行效率; $V_{ng,b}$ —CCHP 系统提供的热负荷不足以满足用户热负荷需求时通过补燃锅炉补燃的天然气的量, m^3 ; $\eta_{h,c}$ —余热锅炉的燃烧效率; $E_{g,a}(t)$ —燃气轮机带动发电机在 t 时段的发电量, kW; $E_z(t)$ —系统从外网中购得的电量, kW; $E(t)$ — t 时段用户的电需求, kW; $Q_{c,g}(t)$ — t 时段吸收式制冷机产生的制冷量, kW; $Q_{c,e}(t)$ — t 时段电制冷机组制冷量, kW; $Q_c(t)$ — t 时段用户的冷需求, kW; $Q_{h,e}(t)$ — t 时段余热锅炉产生的制热量, kW; $Q_{h,b}(t)$ — t 时段的补燃锅炉产生的制热量, kW; $Q_h(t)$ — t 时段用户的热需求, kW。

2.3 可靠性约束

受制于外界气象条件变化、供能系统运行情况及用户自身状态调节等多方面因素的影响, 用户的用能需求存在明显波动变化, 仅以某一历史时期用户冷、热、电需求作为供能策略的设计依据明显不合理, 且可能导致潜在的供需失衡风险。因此, 为了确保 CCHP 系统实现稳定的能源供应, 本文在传统 CCHP 系统运行优化模型的基础上增加了可靠性约束, 通过设立低、中、高 3 种可靠性等级 (r), 分别对应于 85%、90% 和 95% 的系统稳定运行保证率, 计算得到不同 r 值下的系统运行方案, 准确表征可靠性水平对供能方案施加的影响, 很好地反映系统经济性与可靠性之间的权衡关系。

2.3.1 数学模型

$$\{E_{facility}(t) \geq E(t)\} \geq r_1 \quad (15)$$

$$\{Q_c(t) \geq Q_c(t)\} \geq r_2 \quad (16)$$

$$\{Q_h(t) \geq Q_h(t)\} \geq r_3 \quad (17)$$

$$E_{facility}(t) = E_{gt}(t) + E_z(t) \quad (18)$$

$$Q_c(t) = Q_{c,g}(t) + Q_{c,e}(t) \quad (19)$$

$$Q_h(t) = Q_{h,e}(t) + Q_{h,b}(t) \quad (20)$$

式中: $E_{facility}(t)$ — t 时段系统和电网向用户提供的总电量, kW; $Q_c(t)$ — t 时段系统向用户提供的总冷量, kW; $Q_h(t)$ — t 时段系统向用户提供的总热量, kW; $r_i, i=1, 2, 3$ —低、中、高 3 种可靠性约束等级, 分别对应于 85%、90% 和 95% 的系统稳定运行的保证率。

根据文献[9-11]研究可知, t 时段用户的冷、热和电需求是独立的, 且近似服从于正态分布:

$$E_d(t) \sim N(\mu_1, \sigma_1^2) \quad (21)$$

$$Q_{c,d}(t) \sim N(\mu_2, \sigma_2^2) \quad (22)$$

$$Q_{h,d}(t) \sim N(\mu_3, \sigma_3^2) \quad (23)$$

式中: $E_d(t)$ —用户 t 时段的电需求, kW; $Q_{c,d}(t)$ —用户 t 时段的冷需求, kW; $Q_{h,d}(t)$ —用户 t 时段的热需求, kW。

通过用户已有的能量需求数据, 推算出正态分布中的 μ 与 σ 值, 计算出在一定的概率保证下 CCHP 系统需供应的冷量、热量和电量。为简化计算, 将系统的冷、热、电负荷所满足的正态分布函数转换为标准正态分布函数进行研究^[12-14], 其标准正态分布曲线如图 2 所示。

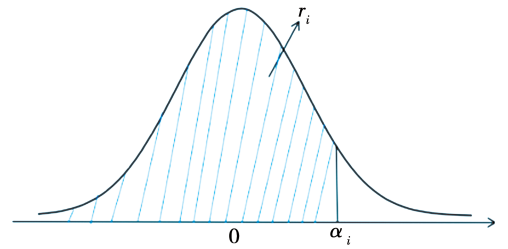


图 2 冷、热、电负荷所满足的标准正态分布曲线

Fig. 2 Standard normal distribution curve for cooling heating and power loads

2.3.2 约束条件

$$E_d(t) \geq \mu_1(t) + \alpha_1 \times \sigma_1(t) \quad (24)$$

$$Q_{c,d}(t) \geq \mu_2(t) + \alpha_2 \times \sigma_2(t) \quad (25)$$

$$Q_{h,d}(t) \geq \mu_3(t) + \alpha_3 \times \sigma_3(t) \quad (26)$$

$$\alpha_i = \varphi^{-1}(r_i) \quad (27)$$

式中: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ —对应不同可靠性水平 r_1, r_2, r_3 的指数; φ^{-1} —标准正态分布的反函数。

3 案例分析

某宾馆建筑总面积为 82 982 m²,宾馆内的能源供应需满足采暖、供冷以及电力负荷的需求。该宾馆具有客流量大、入住率高、耗能种类多、耗能量大、供能可靠性要求高的特点,故 CCHP 系统为其进行供能具有优势。为反映该宾馆系统全年运行的普遍规律及不同可靠性水平造成的影响,以该宾馆夏季、冬季和过渡季的典型日进行分析。图 3 为不同季节的典型日用户的冷、热、电需求。

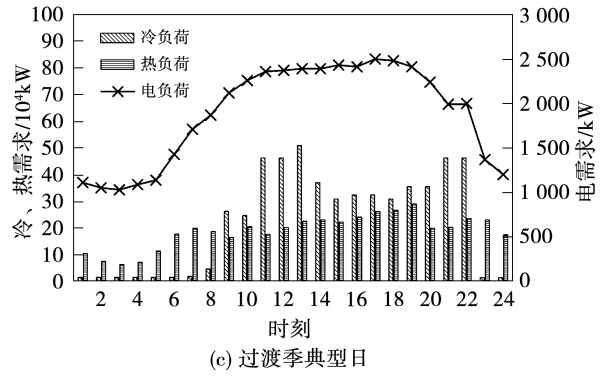
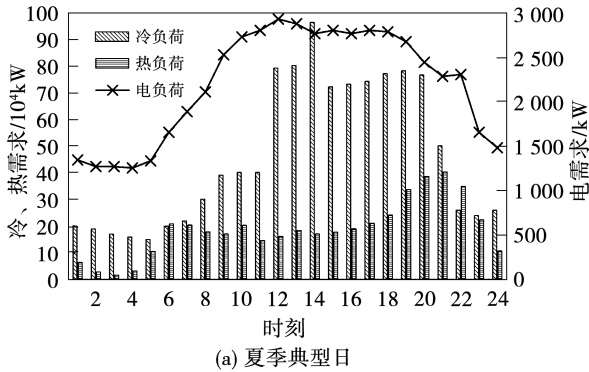
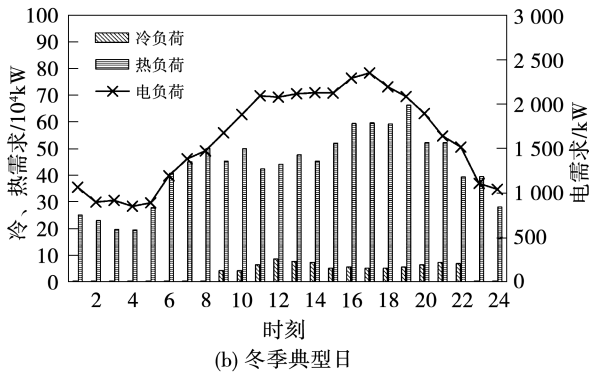


图 3 各季节典型日的用户侧冷、热、电需求

Fig.3 Cooling heating and power demand of customer in a typical day in each season



(a) 夏季典型日



(b) 冬季典型日

3.1 参数分析

本文在对目标宾馆进行现场调研、确定宾馆供能系统的设备组成并收集相关参数的基础上,对 CCHP 系统各设备性能参数的受影响程度进行打分。汇总结果显示,外界因素对吸收式制冷机组和电制冷机组的制冷系数及余热锅炉和补燃锅炉的制热系数施加的影响有限,可按设备铭牌进行取值;燃气轮机的效率容易受到外界环境条件、设备服役时间和工作人员操作水平等多方面因素的影响,需要结合专家意见对其进行赋值(以专家调查结果的平均值为准)。表 1 给出了该 CCHP 系统各设备的运行参数和维修费用等相关参数。

表 1 CCHP 系统关键参数表

Tab.1 The main parameters of CCHP system

设备	参数	数值	数据来源
燃气轮机	额定功率 $P_{gt,n}/kW$	300	现场调查
	发电效率 $\eta_{gt}/\%$	35	专家咨询
	热损失效率 $\eta_{loss}/\%$	10	专家咨询
	维修费用 $C_{gt}/元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	0.03	现场调查
吸收式制冷机	额定功率 $P_{ec,n}/MW$	800	现场调查
	制冷系数 COP_a	1.2	专家咨询/铭牌取值
	维修费用 $C_{ac}/元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	0.000 8	现场调查
电制冷机组	额定功率 P_{cn}/MW	1 000	现场调查
	制冷系数 COP_e	1.2	专家咨询/铭牌取值

表 1 续

设备	参数	数值	数据来源
余热锅炉	维修费用 $C_{ec}/\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	0.002	现场调查
	额定功率 $P_{REB,n}/\text{MW}$	900	现场调查
	制热系数 $\eta_{b,c}/\%$	85	专家咨询/铭牌取值
补燃锅炉	维修费用 $C_b/\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	0.002	现场调查
	额定功率 $P_{REC,n}/\text{MW}$	900	现场调查
	制热系数 $\eta_{b,c}/\%$	80	专家咨询/铭牌取值
经济参数	维修费用 $C_{b,c}/\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	0.002	现场调查
	天然气价格 $C_{ng}/\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$	2.74	现场调查
	高峰时段电 $C_{ele1}/\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	0.9	现场调查
	平时段电价 $C_{ele2}/\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	0.6	现场调查
	低谷时段电 $C_{ele3}/\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	0.3	现场调查

3.2 结果分析

3.2.1 电能供应

由于用户不同时间点的用能负荷不同,系统各组成部分的出力情况也不同。根据可靠性的定义和计算方法,随着可靠性等级的提高,用户的用电量增大,为保证用户的用电需求,燃气轮机的出力也相应提高。不同季节典型日燃气轮机在不同可靠性下的出力水平如图 4 所示。

由图 4 可知,由于典型日用户侧逐时电需求不同,引起系统电力供应方式发生相应改变。例如,在夏季典型日时用户电需求最低时刻为夜间 4:00 时,随着可靠性水平从 85% 增长至 95%,燃气轮机谷值的发电量分别为 1 389, 1 723 和 2 204 kW。由于使用燃气轮机发电的成本更低,故在燃气轮机满足用户负荷的条件下,该时段内用电量全部由燃气轮机发电产生,不需从电网购电。夏季典型日时用户电需求最高时刻为 13:00 时,随着可靠性水平从 85% 增长至 95%,燃气轮机峰值的发电出力均为 3 000 kW,峰值购电量分别为 0, 711 和 1 747 kW。该时段内由于燃气轮机功率的限制,供电量不能满足用户的需求,故在保证燃气轮机完全利用的基础上采取购电的方式作为补充,使供电成本更低。冬季和过渡季典型日燃气轮机出力规律与夏季典型日相似,随着可靠性水平的提高,燃气轮机的出力水平增大,但在燃气轮机的功率达到最大时,采用电网购电补充满足用户的电需求是最经济的方式。

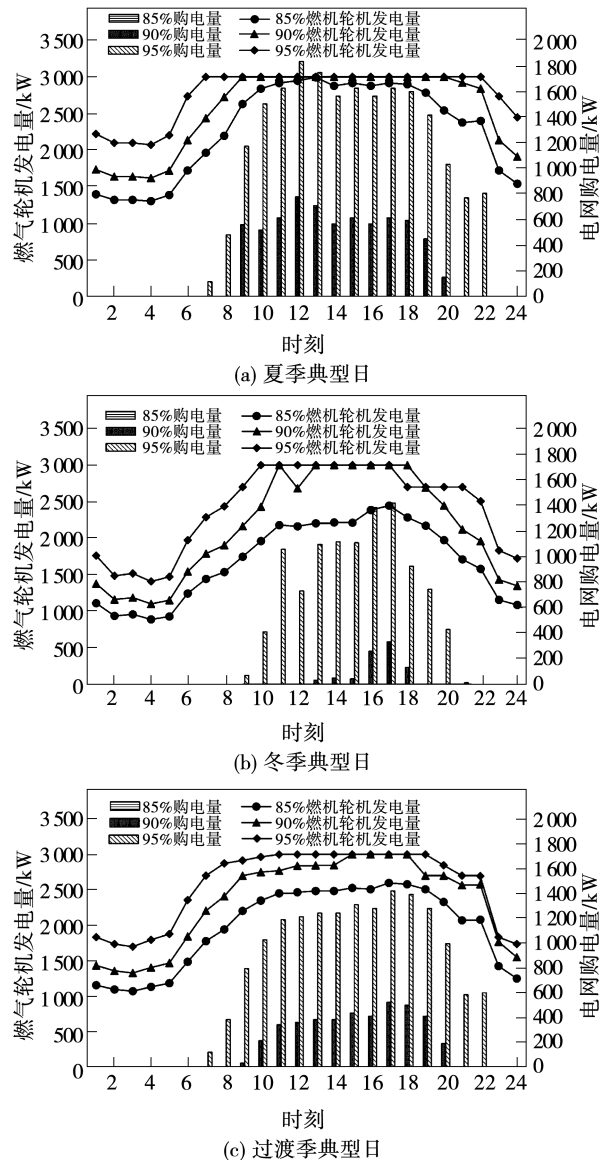


图 4 不同可靠性水平下各季节的典型日电能供应策略
Fig.4 Electricity energy supply strategy in a typical day in each season under different reliability levels

3.2.2 热能供应

基于经济最优原则的考虑,不同可靠性水平下夏季、冬季和过渡季典型日的热量供应策略存在明显差异,系统供热设备的出力情况如图5所示。

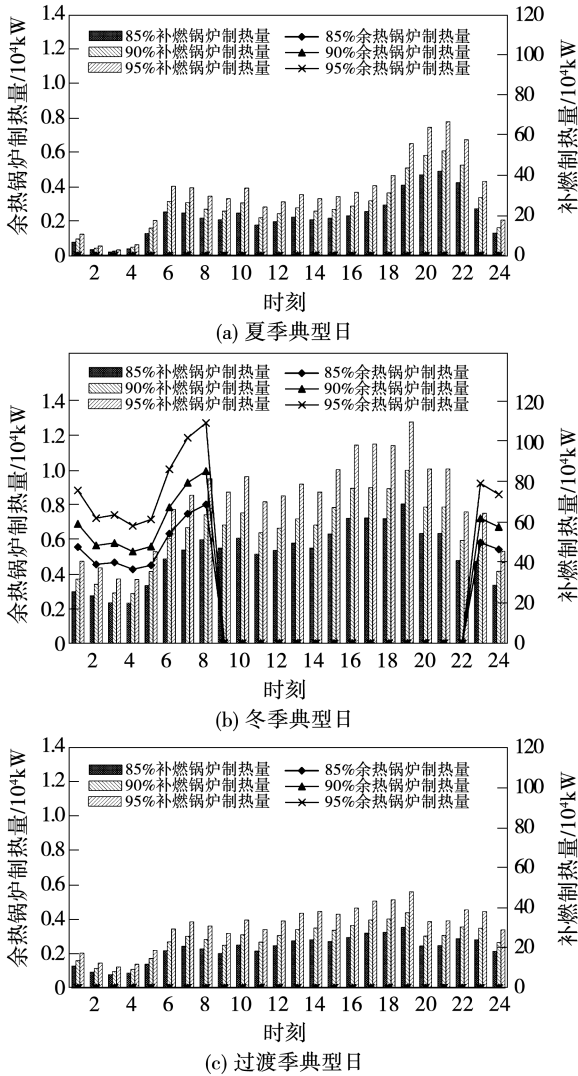


图5 不同可靠性水平下各季节的典型日热能供应策略
Fig.5 Heat energy supply strategy in a typical day in each season under different reliability levels

由图5可知,用户侧的热负荷同样随着可靠性的提高而相应增加,造成系统的出力方式发生改变。夏季典型日用户侧的热需求相对较低,全部由补燃锅炉来满足。因为在燃气轮机输出功率偏低的前提下,将其产生的高温烟气全部用于夏季制冷更符合经济节约的原则。不同可靠性水平下系统补燃锅炉供热的趋势大致相同,于18:00~23:00补燃锅炉制热量最高。随着可靠性水平从85%增长至95%,该

时段内系统补燃锅炉供热量峰值均出现在21:00时,峰值补燃锅炉供热量分别为413 075,532 468和677 416 kW。冬季是用户侧热需求的高峰期,冬季典型日酒店的热需求是通过余热锅炉供热和补燃锅炉供热共同保证。在23:00~8:00时,由于热需求较低,此时通过余热锅炉和补燃锅炉供热协同运行更为经济;在9:00~22:00时,全部通过补燃锅炉供热的方式来满足用户更大的热需求。不同可靠性水平下的供热规律相同,在可靠性85%,90%和95%下的热负荷峰值均出现在19:00时,分别为698 441,837 584和1 195 354 kW。过渡季典型日用户侧的热需求较低,全部由补燃锅炉来满足,这主要是因为燃气轮机的高温烟气全部用于溴化锂制冷机制冷更符合经济成本最小化原则。

3.2.3 冷能供应

随着可靠性等级的提高,用户侧冷需求增大,致使系统冷负荷出力水平相应变化。用户侧的冷负荷供应主要采用电制冷和溴化锂制冷机组供冷,不同可靠性下夏季、冬季、过渡季典型日系统供冷出力情况如图6所示。由图6可知,夏季典型日时冷需求较高,由于燃气轮机容量较小,故系统全天需通过额外电制冷以保证用户需求。用户侧冷需求高峰期出现在12:00~20:00时,此时段系统所需电制冷量最多。随着可靠性水平从85%增长至95%,该时段内系统电制冷量峰值均出现在14:00时,峰值补燃供冷量分别为986 185,1 227 276和1 574 446 kW。

冬季典型日时冷需求较小,为了使经济条件最优,系统供冷采用溴化锂制冷机制冷和电制冷共同运行的方式。在23:00~8:00时,由于用户此时段需冷量较少,故该时段内采用溴化锂制冷机制冷;在9:00~22:00时,用户冷需求较高,需通过电制冷补充。不同可靠性水平下的供冷规律相同,在可靠性85%,90%和95%下的冷负荷峰值均出现在12:00时,峰值冷负荷分别为90 032.5,111 674.9和142 840.1 kW。过渡季典型日时冷负荷相对较大,为保证系统经济性,故采用溴化锂制冷机组供冷和电制冷协同供冷。用户侧冷需求高峰期出现在11:00~22:00,此时段系统所需电制冷量最多。随

着可靠性水平从 85% 增长至 95%, 该时段内系统补燃供冷量峰值均出现在 13:00 时, 峰值电制冷量分别为 529 106, 656 295 和 839 447 kW。

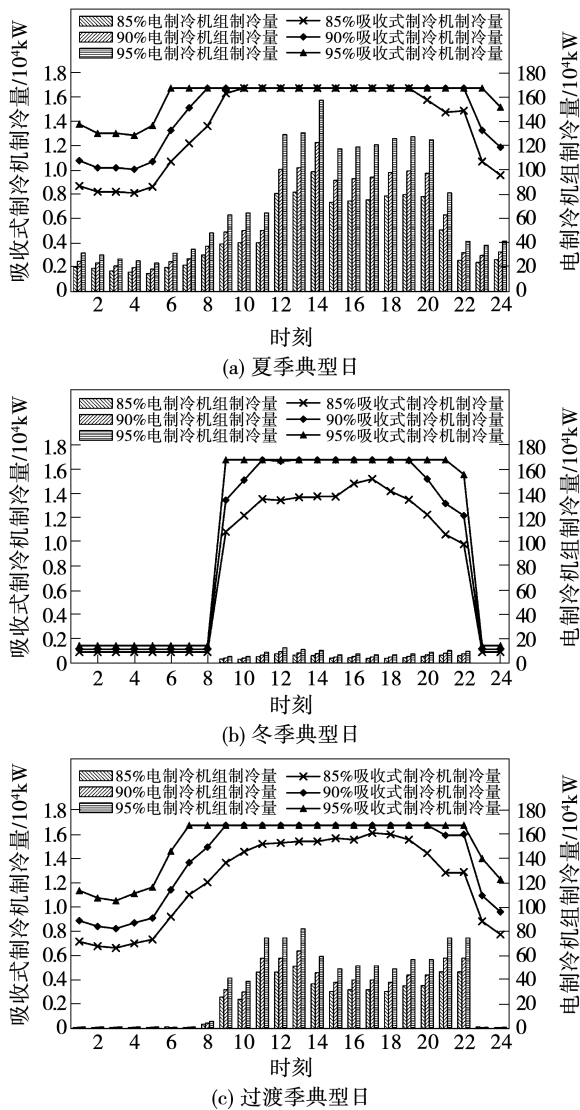


图 6 不同可靠性水平下各季节的典型日冷能供应策略

Fig. 6 Cold energy supply strategy in a typical day in each season under different reliability levels

3.3 经济性分析

通过夏季、冬季和过渡季典型日不同可靠性水平下系统的出力分析可知, 系统运行的可靠性可通过提高冷能、热能和电能的供应量进一步得到保证。但是, 系统的运行费用随之增加。表 2 给出了不同可靠性水平下 CCHP 系统的全年运行费用计算结果。

表 2 不同可靠性水平下系统费用计算结果表

Tab. 2 Calculation results of system costs under different reliability levels

可靠性水平/%	运营费用/万元
85	2 333. 85
90	2 866. 28
95	3 637. 97

结果表明, 随着可靠性水平的提高, CCHP 系统的运营费用呈现明显的上升趋势。其中, 在 85%, 90% 和 95% 可靠性水平下, 系统全年运营费用分别为 2 333. 85, 2 866. 28 和 3 637. 97 万元, 均高于不考虑系统运行可靠性的传统模型全年运营费用 (2 248. 89 万元)。由此看出, 为确保用户的高用能可靠性, 系统的成本支出显著提高。因此, 在实际工程中, 决策者可以根据不同用户对可靠性的敏感程度, 确定合理的可靠性水平并据此制定合理的供能策略, 更好地平衡供能经济性和用户服务可靠性。

4 结论

提出一种基于可靠性评估的冷热电三联产 (CCHP) 系统运行优化模型, 以华东地区某宾馆为主要研究对象, 在将可靠性量化成具体数值的基础上, 重点分析了该宾馆不同季节典型日对应于各可靠性水平的供能设备逐时出力情况, 并计算得到了对应的系统运行成本, 得到以下结论:

(1) 随着用户侧用能可靠性水平的提高, 用户的能源需求和供能系统的运行成本提高。

(2) 随着可靠性水平从 85% 增加至 90% 和 95%, 供能系统的全年运营费用分别提升约 22. 81% 和 55. 88%。相较于传统优化模型, 85%, 90%, 95% 可靠性模型所需运营费用分别增加约 3. 78%, 27. 45% 和 61. 76%。

(3) 为保证用户的高用能可靠性, 系统的成本支出明显提高, 因此需根据实际情况选定合适的可靠性水平。

参考文献:

[1] 王志光, 黄志鹏, 王玉璋, 等. 冷热电联供系统微燃机组配置

- 和运行优化[J]. 动力工程学报,2019,39(4):338-344.
- WANG Zhi-guang, HUANG Zhi-peng, WANG Yu-zhang, et al. Configuration and operation optimization of the micro gas turbine units in a CCHP system [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2019,39(4):338-344.
- [2] 周任军,康信文,李绍金,等. 冷热电联供系统能量流函数及运行策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):1-5.
- ZHOU Ren-jun, KANG Xin-wen, LI Shao-jin, et al. Energy flow function and operational strategy of CCHP system [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):1-5.
- [3] RONG A, LAHDELMA R. An efficient linear programming model and optimization algorithm for trigeneration [J]. Applied Energy, 2005,82(1):40-63.
- [4] WEI G, WANG Z H, ZHAO L, et al. An online optimal dispatch schedule for CCHP microgrids based on model predictive control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2017,8(5):2332-2342.
- [5] WANG X, XU Y, BAO Z, et al. Operation optimization of a solar hybrid CCHP system for adaptation to climate change [J]. Energy Conversion and Management,2020,220:113010.
- [6] ZENG L, XU J, WU M, et al. Day-ahead interval optimization for CCHP system considering uncertainty of wind power and PV [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2022, 138:107895.
- [7] CHEN L, TANG H, WU J, et al. A robust optimization framework for energy management of CCHP users with integrated demand response in electricity market [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2022,141:108181.
- [8] 沈玉清,郑莆燕,杨涵文,等. 混合分布式供能系统联产与分产的经济性分析[J]. 热能动力工程,2020,35(4):24-29.
- SHEN Yu-qing, ZHENG Pu-yan, YANG Yong-wen, et al. Economic analysis of heat-electricity-cooling trigeneration and separated generation based on hybrid distributed energy supply system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(4):24-29.
- [9] SONG Z H, YAN J, et al. Study on the optimization and sensitivity analysis of CCHP systems for industrial park facilities [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120:105984.
- [10] FENG L, DAI X, MO J, et al. Analysis of simplified CCHP users and energy-matching relations between system provision and user demands [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 152:532-542.
- [11] DEYMI-DASHTEBAYAZ M, NORANI M. Sustainability assessment and energy analysis of employing the CCHP system under two different scenarios in a data center [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 150:111511.
- [12] FU C, LIN K P, ZHOU Y T. Optimal capacity configuration of CCHP system with improved operation strategies using improved multi-objective multi-universe algorithm [J]. Expert Systems with Application, 2022, 199:117183.
- [13] ZHU C, XU B, NIE Y Z. An integrated design and operation optimal method for CCHP system [J]. Energy Procedia, 2019, 158:1360-1365.
- [14] QIAN J, WU J, YAO L, et al. Comprehensive performance evaluation of wind-solar-CCHP system based on energy analysis and multi-objective decision method [J]. Energy, 2021, 230:120779.

(刘颖编辑)