

考虑综合需求响应的港口能源系统优化运行

普月,纪历,刘皓明

(河海大学 能源与电气学院,南京 211100)

Optimal operation of port energy system considering integrated demand response

PU Yue, JI Li, LIU Haoming

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

摘要:为满足港口日益增长的能源需求,改善港口地区环境污染问题,港口能源供应方式逐渐由传统燃油、煤电供能逐渐向涵盖冷、热、电、天然气在内的综合能源供能方式转变。港口岸电建设及设施电气化改造工程的持续推进,使得港口电能需求进一步增加。针对这一现状,提出了一种考虑综合需求响应的港口综合能源系统优化运行方法,通过分析系统内各设备间的能量转换耦合联系,构建了基于能源集线器的港口综合能源系统多能耦合转换模型,并根据港口可调负荷特性,建立了港口综合需求响应模型。在此基础上,综合考虑能源价格、环境污染、能量损耗等因素对系统运行的影响,以系统运行成本最低为目标,建立了考虑综合需求响应的港口综合能源系统运行优化模型。算例结果验证了该优化方法可有效降低港口综合能源系统的运行成本,减少港口用电高峰时段的电力负荷需求。

关键词:港口综合能源系统;综合需求响应;多能耦合转换;优化运行

Abstract: In order to meet the increasing energy demand of ports and decrease the environment pollution in port areas, the mode of port energy supply has gradually transformed from the traditional mode of oil and coal-fired power supply to integrated energy supply including cooling, heating, electric power and natural gas. The development of the shore-to-ship power supply system and infrastructure electrification has furtherly increased the demand for electricity. An optimal operation method of port integrated energy system (PIES) considering integrated demand response (IDR) is proposed. A multi-energy coupling conversion model of PIES based on energy hub is built by analyzing the coupling connection of energy conversion among equipment in PIES, and an IDR model of port is established based on the classification of port loads. On this basis, comprehensively considering the impact of energy prices, environment pollution, energy loss and other factors on the operation of PIES, an optimal operation model of PIES considering IDR is constructed. The proposed method is applied to a PIES, and the simulation results show that this method can effectively reduce the total operation cost of PIES and effectively reduce the peak demand of electric power load.

Key words: port integrated energy system; integrated demand response; multi-energy coupling conversion; optimal operation

0 引言

为适应港口日益增长的能源需求,改善因传统燃油、煤电供能的能源结构导致的港口环境污染问题,虚拟电厂、可再生能源发电、能源替代、储能等技术被广泛应用于港口地区^[1-2],实现了从传统供能方式向涵盖冷、热、电、天然气在内的综合能源供能方式的转变。港口综合能源系统(port integrated energy system, PIES)的可靠运行为港口高效运转提供了重要保障。近年来,港口岸电建设和设备电气化改造工程的不断推进使得港口电能需求进一步增加。港口含有大量的柔性电力负荷,采取负荷削减、转移等需求响应(demand response, DR)措施,可有效调节港口电能需求。同时,由于PIES含冷、热、电、天然气等多种用能形式,不同能源间可进行耦合替代,除调节负荷需求外,还可通过改变用能类

型满足负荷需求。

目前,国内外学者在DR参与能源系统优化运行方面开展了相关研究。文献[3]在考虑DR的情况下,对含热电联产(combined heat and power, CHP)机组的电-气-热综合能源系统调度进行优化,结果表明DR可显著提升系统运行的经济性。文献[4]建立了电-热-气网互联的综合能源系统模型、可中断负荷的需求响应模型,通过优化出的可中断负荷量完成对电-热-气综合能源系统的协同优化。文献[5]提出了计及需求侧管理的气-电耦合系统协同优化运行策略,将DR运行约束视为系统运行约束条件之一。有关DR参与能源系统优化运行的研究已取得丰硕的成果,但鲜有考虑港口负荷DR潜力并将其作为主要影响因素开展PIES运行优化方面的研究。

本文提出了一种考虑综合需求响应(integrated demand response, IDR)的PIES运行优化方法,首先,通过分析系统内各设备间的能量转换耦合联系,构

收稿日期:2020-10-19;修回日期:2020-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607036)

建了基于能源集线器(energy hub, EH)的PIES多能耦合转换模型,并根据港口可调负荷特性,建立了港口IDR模型。然后,综合考虑能源价格、环境污染、能量损耗等因素对系统运行的影响,以系统运行成本最小为目标,建立考虑IDR的PIES运行优化模型。最后,将所提出的方法应用于某港口综合能源系统,仿真计算得到最优运行方案,验证了本文方法可有效减少PIES运行成本,降低港口用电高峰时段的电力负荷需求。

1 港口综合能源系统

PIES涵盖了能源生产、转化、存储和利用各个环节,实现了港口电力、天然气、热能、冷能等多种能量的耦合互联。PIES基本结构如图1所示。

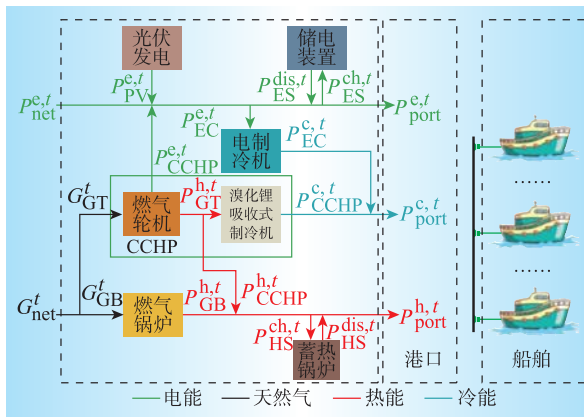


图1 PIES基本结构

Fig. 1 Basic framework of PIES

港口常配备岸电充电桩、岸桥、电动牵引车、冷藏集装箱、冷库和采暖等设备,用于货物装卸、运输、储藏作业和日常生活办公,负荷需求包含电、热、冷能需求。电能需求 $P_{\text{port}}^{e,t}$ 通过从电网购电 $P_{\text{net}}^{e,t}$ 、分布式光伏出力 $P_{\text{PV}}^{e,t}$ 和其他设备如冷热电联产机组(combined cooling, heating and power unit, CCHP)消耗天然气 G_{GT}^t 发电 $P_{\text{CCHP}}^{e,t}$ 来满足。热能需求 $P_{\text{port}}^{h,t}$ 通过 CCHP 产热 $P_{\text{CCHP}}^{h,t}$ 和其他设备如燃气锅炉(gas boiler, GB)消耗天然气 G_{GB}^t 产热 $P_{\text{GB}}^{h,t}$ 来满足。冷能需求 $P_{\text{port}}^{c,t}$ 通过 CCHP 产冷 $P_{\text{CCHP}}^{c,t}$ 和其他制冷设备如电制冷机(electric cooler, EC)消耗电能 $P_{\text{EC}}^{e,t}$ 产冷 $P_{\text{EC}}^{c,t}$ 来满足。此外,储能设备也可提供相应的负荷需求。如储电(electricity storage, ES)装置和蓄热(heat storage, HS)装置,可在系统电、热充裕时充电 $P_{\text{ES}}^{\text{ch},t}$ 、储热 $P_{\text{HS}}^{\text{ch},t}$,在电、热供应不足时放电 $P_{\text{ES}}^{\text{dis},t}$ 、放热 $P_{\text{HS}}^{\text{dis},t}$,实现了电能和热能的跨时段利用。

1.1 设备模型

1.1.1 冷热电联产

CCHP由燃气轮机(gas turbine, GT)和溴化锂吸收式制冷机构成。GT以天然气作为原料发电,同时回收排出的高温烟气来制热,其发电功率和热电关系分别如式(1)和式(2)所示^[6]

$$P_{\text{GT}}^{e,t} = \text{COP}_{\text{GT}}^e G_{\text{GT}}^t H^g \quad (1)$$

$$P_{\text{GT}}^{h,t} = \frac{(1 - \text{COP}_{\text{GT}}^e - \text{COP}_{\text{GT}}^{h,\text{loss}}) \text{COP}_{\text{GT}}^h P_{\text{GT}}^{e,t}}{\text{COP}_{\text{GT}}^e} \quad (2)$$

式中: COP_{GT}^e 、 $\text{COP}_{\text{GT}}^{h,\text{loss}}$ 和 COP_{GT}^h 分别为GT的发电效率、热损失效率和回收烟气产热效率; G_{GT}^t 为 t 时段GT消耗天然气速率, m^3/h ; H^g 为天然气热值, MWh/m^3 ; $P_{\text{GT}}^{e,t}$ 为 t 时段GT的发电功率,即 t 时段CCHP的发电功率,记为 $P_{\text{CCHP}}^{e,t}$, MW; $P_{\text{GT}}^{h,t}$ 为 t 时段GT排出烟气的可回收热功率, MW。 $P_{\text{GT}}^{h,t}$ 可直接为港口供热,也可由溴化锂吸收式制冷机吸收用于制冷,溴化锂吸收式制冷机的制冷功率如式(3)所示

$$P_{\text{CCHP}}^{c,t} = \text{COP}_{\text{AC}}^e (P_{\text{GT}}^{h,t} - P_{\text{CCHP}}^{h,t}) \quad (3)$$

式中: $P_{\text{CCHP}}^{c,t}$ 为 t 时段CCHP输出的冷功率, MW; COP_{AC}^e 为溴化锂吸收式制冷机的制冷效率; $P_{\text{CCHP}}^{h,t}$ 为 t 时段CCHP输出的热功率, MW。

1.1.2 燃气锅炉

当CCHP产热量不足以满足港口热负荷需求时,GB消耗天然气产热,其产热功率如式(4)所示

$$P_{\text{GB}}^{h,t} = \text{COP}_{\text{GB}}^h G_{\text{GB}}^t H^g \quad (4)$$

式中: $P_{\text{GB}}^{h,t}$ 为 t 时段GB的产热功率, MW; COP_{GB}^h 为GB的产热效率; G_{GB}^t 为 t 时段GB消耗天然气的速率, m^3/h 。

CCHP和GB运行所消耗的天然气由天然气网供应,供气速率为

$$G_{\text{net}}^t = G_{\text{GT}}^t + G_{\text{GB}}^t \quad (5)$$

式中: G_{net}^t 为 t 时段天然气网供气速率, m^3/h 。

1.1.3 电制冷机

当CCHP制冷量不足以满足港口冷负荷需求时,EC运行,其制冷功率如下

$$P_{\text{EC}}^{c,t} = \text{COP}_{\text{EC}}^e P_{\text{EC}}^{e,t} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{EC}}^{c,t}$ 为 t 时段EC的制冷功率, MW; COP_{EC}^e 为EC的制冷效率; $P_{\text{EC}}^{e,t}$ 为 t 时段EC运行消耗电功率, MW。

1.1.4 储电/储热装置

由于热、电负荷的大小和峰谷时段不相匹配, CCHP将受到“以热定电”或“以电定热”的刚性约束而不能高效、经济运行^[6]。储电、储热装置可缓解电、热负荷不匹配的矛盾,协调CCHP实现电、热、冷能统一调度,满足港口电、热、冷负荷需求^[7-8]。经 t 时段储能或放能后,储能装置内所剩能量为^[9]

$E_{\varepsilon}^t = (1 - \tau_{\varepsilon})E_{\varepsilon}^{t-1} + (P_{\varepsilon}^{\text{ch},t} \eta_{\varepsilon}^{\text{ch}} - P_{\varepsilon}^{\text{dis},t} / \eta_{\varepsilon}^{\text{dis}}) \cdot \Delta t$ (7)

式中: $\varepsilon \in \{\text{ES}, \text{HS}\}$; E_{ε}^t 、 E_{ε}^{t-1} 分别为 t 时段、 $(t-1)$ 时段结束时 ε 内剩余能量, MWh; τ_{ε} 、 $\eta_{\varepsilon}^{\text{ch}}$ 和 $\eta_{\varepsilon}^{\text{dis}}$ 分别为单位时间内 ε 的自放能损耗率、储能效率及放能效率; $P_{\varepsilon}^{\text{ch},t}$ 、 $P_{\varepsilon}^{\text{dis},t}$ 分别为 t 时段 ε 的储、放能功率, MW; Δt 为单时段时长, h。

1.2 PIES模型

较单一设备能量转化而言, PIES的能量转化是设备间多能耦合转化关系的集合。本文构建了基于EH的PIES多能耦合转化模型, 该模型直观表示了系统内部能量生产、转化、存储和利用过程, 反映出能源供给和多能负荷需求间的平衡^[10]。基于设备能量转化关系, 综合式(1)至式(7)构建PIES多能耦合转化模型如下

$$\begin{bmatrix} P_{\text{port}}^{\text{e},t} \\ P_{\text{port}}^{\text{h},t} \\ P_{\text{port}}^{\text{c},t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\beta & 1 \\ 0 & 0 \\ \beta \text{COP}_{\text{EC}}^{\text{c}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \text{COP}_{\text{GT}}^{\text{c}} H^{\varepsilon} \\ (\alpha(1 - \text{COP}_{\text{GT}}^{\text{c}} - \text{COP}_{\text{GT}}^{\text{h,loss}}) \text{COP}_{\text{GT}}^{\text{h}} \gamma + (1-\alpha) \text{COP}_{\text{GB}}^{\text{h}}) H^{\text{g}} \\ \alpha(1 - \text{COP}_{\text{GT}}^{\text{c}} - \text{COP}_{\text{GT}}^{\text{h,loss}}) \text{COP}_{\text{GT}}^{\text{h}} (1-\gamma) \text{COP}_{\text{AC}}^{\text{c}} H^{\text{g}} \end{bmatrix} \cdot (8)$$

$$\begin{bmatrix} P_{\text{net}}^{\text{e},t} \\ P_{\text{PV}}^{\text{e},t} \\ G_{\text{net}}^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{\text{ES}}^{\text{dis},t} \\ P_{\text{ES}}^{\text{ch},t} \\ P_{\text{HS}}^{\text{dis},t} \\ P_{\text{HS}}^{\text{ch},t} \end{bmatrix}$$

式中: $P_{\text{port}}^{\text{e},t}$ 、 $P_{\text{port}}^{\text{h},t}$ 和 $P_{\text{port}}^{\text{c},t}$ 分别为 t 时段港口的电、热、冷能需求, MW; $P_{\text{net}}^{\text{e},t}$ 为电网供电功率, MW; $P_{\text{PV}}^{\text{e},t}$ 为光伏发电功率, MW; α 为GT消耗天然气速率在气网供气速率中所占的比重, 即 $\alpha = G_{\text{GT}}^t / G_{\text{net}}^t$; β 为EC消耗的电功率在电网供电功率中所占的比重, 即 $\beta = P_{\text{EC}}^{\text{e},t} / P_{\text{net}}^{\text{e},t}$; γ 为CCHP输出热功率在GT总产热功率中所占的比重, 即 $\gamma = P_{\text{CCHP}}^{\text{h},t} / P_{\text{GT}}^{\text{h},t}$ 。

1.3 港口多能需求响应模型

港口包含大量的柔性电力负荷, 根据负荷灵活可调能力, 港口负荷可分为: 基荷负荷、可削减负荷、可转移负荷和可替代负荷。

(1) 基荷负荷: 该类负荷因灵活调节能力较差, 一般认为其不具备参与响应的能力, 包括港作机械、港口基本照明等设备。

(2) 可削减负荷: 指在不影响正常作业的前提下, 可适当削减的负荷, 主要包括冷藏集装箱、冷库等连续运行的冷藏设备。当外界环境温度为20℃左右时, 冷藏集装箱停止制冷5h, 箱内温度基本不变^[11]。该类负荷在港口电力负荷中占比较大, 具有较大的可调潜力。

(3) 可转移负荷: 该类负荷用电时间可灵活转

移, 包括岸桥、门式起重机等起重运输机械设备、电动牵引车等虚拟储能设备及港口岸电设备等。因受靠港船舶数量和作业工况影响, 负荷波动较大。可转移类负荷为港口主要用电负荷, 可调潜力较大^[12]。

(4) 可替代负荷: 是指通过改变用能类型及供能方式来响应负荷需求, 如在电价高峰时段减少从电网购电, 通过增加CCHP出力来满足港口电能需求。负荷可替代特性体现于PIES能源耦合转化关系中, 如式(8)所示。因选择用能种类时需考虑能源价格因素, 该类负荷的可调潜力受电价、天然气价格影响。

根据上述分析, 建立港口IDR模型如下

$$P_{\text{dr}}^{\text{e},t} = P_{\text{dr,red}}^{\text{e},t} + P_{\text{dr,sd}}^{\text{e},t} - P_{\text{dr,su}}^{\text{e},t} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{dr}}^{\text{e},t}$ 为 t 时段港口参与IDR的电力负荷, MW; $P_{\text{dr,red}}^{\text{e},t}$ 为 t 时段电力负荷削减量, MW; $P_{\text{dr,sd}}^{\text{e},t}$ 、 $P_{\text{dr,su}}^{\text{e},t}$ 分别为由 t 时段转移至其他时段的电力负荷和从其他时段转移至 t 时段的电力负荷。由于电力负荷替代量已体现于PIES能源耦合转化关系中, 不再重复计及。

考虑IDR的港口电能需求为

$$P_{\text{port}}^{\text{e},t} = P_{\text{port,0}}^{\text{e},t} - P_{\text{dr}}^{\text{e},t} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{port,0}}^{\text{e},t}$ 为不考虑IDR时的港口电能需求, MW。

2 港口综合能源系统运行优化建模

本文提出一种考虑IDR的PIES运行优化方法, 该方法综合考虑需求响应、能源价格、环境污染、能量损耗等因素对系统运行的影响, 以PIES运行成本最低为目标, 进行PIES多能运行优化。

2.1 目标函数

$$\min C = C_{\text{net}} + C_{\text{em}} + C_{\varepsilon,\text{loss}} + C_{\text{om}} + C_{\text{dr}} \quad (11)$$

式中: C 为系统运行总成本, 元; C_{net} 、 C_{em} 、 $C_{\varepsilon,\text{loss}}$ 、 C_{om} 和 C_{dr} 分别为用能成本、碳排放成本、储能损耗成本、机组设备运行维护成本和参与需求响应成本, 元。

2.1.1 用能成本

用能成本包含从电网购电费用和从天然气网购气费用

$$C_{\text{net}} = \sum_{t \in T} (1000 \lambda_{\text{ep}}^t P_{\text{net}}^{\text{e},t} + \lambda_{\text{gp}}^t G_{\text{net}}^t) \cdot \Delta t \quad (12)$$

式中: λ_{ep}^t 为 t 时段的电价, 元/kWh; λ_{gp}^t 为 t 时段的的气价, 元/m³; T 为一个调度周期时长, h。

2.1.2 碳排放成本

碳排放成本包括用电、用气产生的等热值碳排放的污染处理成本

$$C_{\text{em}} = \lambda_{\text{em}} \sum_{t \in T} (\mu_{\text{em}}^{\text{e}} P_{\text{net}}^{\text{e},t} + \mu_{\text{em}}^{\text{g}} G_{\text{net}}^t) \cdot \Delta t \quad (13)$$

式中: λ_{em} 为碳排放成本参数, 元/kg; $\mu_{\text{em}}^{\text{e}}$ 为用电碳

排放参数, kg/MW; μ_{em}^g 为燃气碳排放参数, kg/m³。

2.1.3 储能能量损耗成本

因储、放能效率导致储能消耗的能量与实际储、放能量间存在差值,即储能能量损耗。储能损耗成本如下

$$C_{e,loss} = \lambda_{e,loss} \sum_{t \in T} (P_e^{ch,t}(1 - \eta_e^{ch}) + P_e^{dis,t}(1/\eta_e^{dis} - 1)) \Delta t \quad (14)$$

式中: $\lambda_{e,loss}$ 为储能能量损耗成本参数, 元/MWh。

2.1.4 设备运维成本

设备运维成本包括 CCHP、PV、GB、EC、ES 及 HS 的运行维护成本

$$C_{om} = \sum_{t \in T} \sum_{\xi} (P_{\xi}^t \lambda_{\xi,om}) \cdot \Delta t \quad (15)$$

式中: $\xi \in \{CCHP, PV, GB, EC, ES, HS\}$; P_{ξ}^t 为各机组设备运行产能功率, MW; $\lambda_{\xi,om}$ 为设备单位运维成本参数, 元/MWh。

2.1.5 参与需求响应成本

参与需求响应成本是电网给予参与负荷削减和负荷转移用户的经济补偿, 包括用户响应电网需求削减当前时刻负荷用电量的补贴和将当前时刻运行的电力负荷转移至其他时刻运行的补贴, 为

$$C_{dr} = \sum_{t \in T} (P_{dr,red}^{e,t} \lambda_{dr,red}^e + P_{dr,sd}^{e,t} \lambda_{dr,sd}^e) \cdot \Delta t \quad (16)$$

式中: $\lambda_{dr,red}^e$ 和 $\lambda_{dr,sd}^e$ 分别为负荷削减、负荷转移的成本参数, 元/MWh。

2.2 约束条件

2.2.1 能量平衡约束

能量平衡约束包括电、热、冷能供需平衡, 分别如式(17)至式(19)所示

$$P_{net}^{e,t} + P_{CCHP}^{e,t} + P_{PV}^{e,t} + P_{ES}^{dis,t} = P_{ES}^{ch,t} + P_{EC}^{e,t} + P_{port}^{e,t} \quad (17)$$

$$P_{CCHP}^{h,t} + P_{GB}^{h,t} + P_{HS}^{dis,t} = P_{HS}^{ch,t} + P_{port}^{h,t} \quad (18)$$

$$P_{CCHP}^{c,t} + P_{EC}^{c,t} = P_{port}^{c,t} \quad (19)$$

2.2.2 设备运行约束

设备运行约束包括 GT 出力上、下限约束、热回收功率上、下限约束和爬坡速率约束, CCHP 对外供冷、供热功率上、下限约束, GB 产热功率上、下限约束和爬坡速率约束, EC 运行功率约束, 储能设备需满足储、放能功率上、下限约束及储能容量上、下限约束。分别如式(20)至式(30)所示

$$0 \leq P_{GT}^{e,t} \leq P_{GT}^{e,max} \quad (20)$$

$$0 \leq P_{GT}^{h,t} \leq P_{GT}^{h,max} \quad (21)$$

$$R_{GT}^{min} \cdot \Delta t \leq P_{GT}^{e,t} - P_{GT}^{e,t-1} \leq R_{GT}^{max} \cdot \Delta t \quad (22)$$

$$0 \leq P_{CCHP}^{c,t} \leq P_{CCHP}^{c,max} \quad (23)$$

$$0 \leq P_{GT}^{h,t} - P_{CCHP}^{c,t} / COP_{AC}^e \leq P_{CCHP}^{h,max} \quad (24)$$

$$0 \leq P_{GB}^{h,t} \leq P_{GB}^{h,max} \quad (25)$$

$$R_{GB}^{min} \cdot \Delta t \leq P_{GB}^{h,t} - P_{GB}^{h,t-1} \leq R_{GB}^{max} \cdot \Delta t \quad (26)$$

$$0 \leq P_{EC}^{e,t} \leq P_{EC}^{e,max} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{\varepsilon}^{ch,t} \leq P_{\varepsilon}^{ch,max} \cdot u_{\varepsilon}^{ch,t} \quad (28)$$

$$0 \leq P_{\varepsilon}^{dis,t} \leq P_{\varepsilon}^{dis,max} \cdot u_{\varepsilon}^{dis,t} \quad (29)$$

$$E_{\varepsilon}^{min} \leq E_{\varepsilon}^t \leq E_{\varepsilon}^{max} \quad (30)$$

$$0 \leq u_{\varepsilon}^{ch,t} + u_{\varepsilon}^{dis,t} \leq 1 \quad (31)$$

$$E_{\varepsilon}^T = E_{\varepsilon}^0 \quad (32)$$

式中: $P_{GT}^{e,max}$ 和 $P_{GT}^{h,max}$ 分别为 GT 的最大发电功率和最大热回收功率, MW; R_{GT}^{max} 和 R_{GT}^{min} 分别为 GT 的最大、最小爬坡速率, MW/min; $P_{CCHP}^{h,max}$ 和 $P_{CCHP}^{c,max}$ 分别为 CCHP 的最大产热功率和最大产冷功率, MW; $P_{GB}^{h,max}$ 为 GB 的最大产热功率, MW; R_{GB}^{max} 和 R_{GB}^{min} 分别为 GB 的最大、最小爬坡速率, MW/min; $P_{EC}^{e,max}$ 为 EC 运行的最大用电功率, MW; $P_{\varepsilon}^{ch,max}$ 和 $P_{\varepsilon}^{dis,max}$ 分别为储能设备的最大储、放能功率, MW; E_{ε}^{min} 和 E_{ε}^{max} 分别为储能设备的最小和最大存储容量, MWh; $u_{\varepsilon}^{ch,t}$ 、 $u_{\varepsilon}^{dis,t} \in \{0, 1\}$, 分别为储、放能状态变量。式(31)表示储能和放能不同时进行; 式(32)表示一个调度周期 T 结束时的储能 E_{ε}^T 与初始时刻的储能 E_{ε}^0 相同。

2.2.3 负荷响应约束

负荷响应约束包含电力负荷削减量约束、电力负荷转移量约束, 分别如式(33)至式(35)所示。式(34)表示由 t 时段转移至其他时刻的负荷量约束; 式(35)表示由其他时刻转移至 t 时刻的负荷量约束

$$0 \leq P_{port,red}^{e,t} \leq P_{port,0}^{e,t} \cdot D_{dr,red}^e \quad (33)$$

$$0 \leq P_{port,sd}^{e,t} \leq P_{port,0}^{e,t} \cdot D_{dr,sd}^e \cdot u_{dr,sd}^{e,t} \quad (34)$$

$$0 \leq P_{port,su}^{e,t} \leq P_{port,0}^{e,t} \cdot D_{dr,su}^e \cdot u_{dr,su}^{e,t} \quad (35)$$

$$0 \leq u_{dr,sd}^{e,t} + u_{dr,su}^{e,t} \leq 1 \quad (36)$$

$$\sum_{t \in T} P_{port,su}^{e,t} = \sum_{t \in T} P_{port,sd}^{e,t} \quad (37)$$

式中: $P_{port,red}^{e,t}$ 为 t 时段电力负荷削减量; $P_{port,sd}^{e,t}$ 、 $P_{port,su}^{e,t}$ 分别为可由 t 时段转移到其他时段、可由其他时段转移到 t 时段的电力负荷; $D_{dr,red}^e$ 为港口可削减电力负荷在总电力负荷中所占比例; $D_{dr,sd}^e$ 、 $D_{dr,su}^e$ 分别为可由 t 时段转移到其他时段、可由其他时段转移至 t 时段的电力负荷占总电力负荷的比例; $u_{dr,sd}^{e,t}$ 、 $u_{dr,su}^{e,t} \in \{0, 1\}$, 分别为是否进行电力负荷转移, 0 表示不转移, 1 表示转移。式(36)表示同一时段负荷转移减少和转移增加不同时进行; 式(37)表示一个调度周期内转移的电力负荷总量保持平衡。

2.2.4 网络约束

网络约束包含电网供电功率约束和天然气网供气速率约束, 分别如式(38)和式(39)所示

$$0 \leq P_{net}^{e,t} \leq P_{net}^{e,max} \quad (38)$$

$$0 \leq G_{net}^t \leq G_{net}^{max} \quad (39)$$

式中: $P_{\text{net}}^{\text{max}}$ 为电网最大供电功率, MW; $G_{\text{net}}^{\text{max}}$ 为气网最大供气速率, m^3/h 。

3 算例仿真

将本文方法运用于某一港口综合能源系统, 其主要设备技术参数如表 1 所示。选取全天 24 h 为一个完整运行周期, 即 $T=24\text{ h}$, 将其分为 96 个相等时段开展优化, 即 $\Delta t=15\text{ min}$ 。PIES 主要设备参数如表 1 所示。该地区天然气价格为 3.1 元/ m^3 。电价执行“峰-平-谷”分时电价, 各时段电价分别为 1.35 元/kWh、0.90 元/kWh、0.47 元/kWh。PIES 优化运行问题可视为混合整数线性规划 (mixed integer linear programming, MILP) 问题, 本文采用 Cplex 在 YALMIP 平台下进行求解。

表 1 PIES 主要设备技术参数

Table 1 Technical parameters of main equipment in PIES

参数	取值	参数	取值
$P_{\text{net}}^{\text{max}}/\text{MW}$	30	$E_{\text{HS}}^0/\text{MWh}$	3
$P_{\text{GT}}^{\text{max}}/\text{MW}$	10	$G_{\text{net}}^{\text{max}}/(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	4 000
$P_{\text{GT}}^{\text{h,max}}/\text{MW}$	16	$H^0/(\text{MWh}\cdot\text{m}^{-3})$	0.009 8
$P_{\text{CCHP}}^{\text{h,max}}/\text{MW}$	16	$R_{\text{GT}}^{\text{max}}/(\text{MW}\cdot\text{min}^{-1})$	0.2
$P_{\text{CCHP}}^{\text{d,max}}/\text{MW}$	20	$R_{\text{GT}}^{\text{min}}/(\text{MW}\cdot\text{min}^{-1})$	-0.2
$P_{\text{GB}}^{\text{h,max}}/\text{MW}$	5	$R_{\text{GB}}^{\text{max}}/(\text{MW}\cdot\text{min}^{-1})$	0.25
$P_{\text{EC}}^{\text{h,max}}/\text{MW}$	5	$R_{\text{GB}}^{\text{min}}/(\text{MW}\cdot\text{min}^{-1})$	-0.25
$P_{\text{ES}}^{\text{ch,max}}/\text{MW}$	3	$\lambda_{\text{dr,red}}^0/(\text{元}\cdot\text{MWh}^{-1})$	210
$P_{\text{ES}}^{\text{dis,max}}/\text{MW}$	3	$\lambda_{\text{dr,rd}}^e/(\text{元}\cdot\text{MWh}^{-1})$	150
$P_{\text{HS}}^{\text{ch,max}}/\text{MW}$	3	τ_{ES}	0.000 01
$P_{\text{HS}}^{\text{dis,max}}/\text{MW}$	3	τ_{HS}	0.000 1
$E_{\text{ES}}^{\text{max}}/\text{MWh}$	12.5	$\eta_{\text{ES}}^{\text{ch}}、\eta_{\text{ES}}^{\text{dis}}$	0.9、0.9
$E_{\text{ES}}^{\text{min}}/\text{MWh}$	2.5	$\eta_{\text{HS}}^{\text{ch}}、\eta_{\text{HS}}^{\text{dis}}$	0.95、0.95
$E_{\text{ES}}^0/\text{MWh}$	3.5	$D_{\text{dr,red}}^c$	0.1
$E_{\text{HS}}^{\text{max}}/\text{MWh}$	9	$D_{\text{dr,rd}}^c、D_{\text{dr,rd}}^d$	0.2、0.2
$E_{\text{HS}}^{\text{min}}/\text{MWh}$	2		

本文对 3 种情况下 PIES 的运行结果进行仿真, 如下所述。

情形 1: 不考虑 IDR, PIES 无优化运行, 即系统运行满足港口负荷需求即可, 运行成本不含参与需求响应成本, 约束条件不含负荷响应约束;

情形 2: 不考虑 IDR, PIES 以运行成本最低为目标运行, 运行成本不含参与需求响应成本, 约束条件不含负荷响应约束;

情形 3: 考虑 IDR, PIES 以运行成本最低为目标运行, 即本文所提方法。

将情形 1 的 PIES 无优化运行结果作为参考, 情形 2 和情形 3 的 PIES 优化运行结果分别如图 2 至图 5、图 6 至图 9 所示。

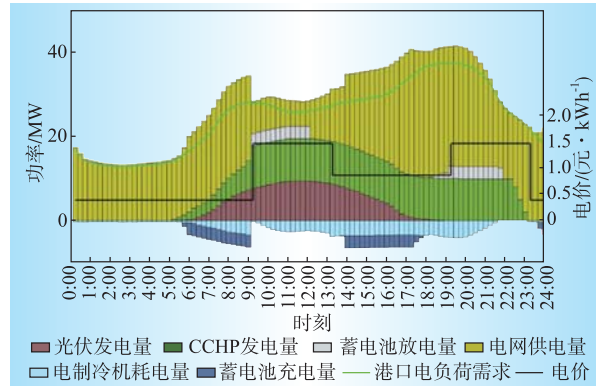


图 2 不考虑 IDR 的电能优化结果

Fig. 2 Optimal results of electric power without considering IDR

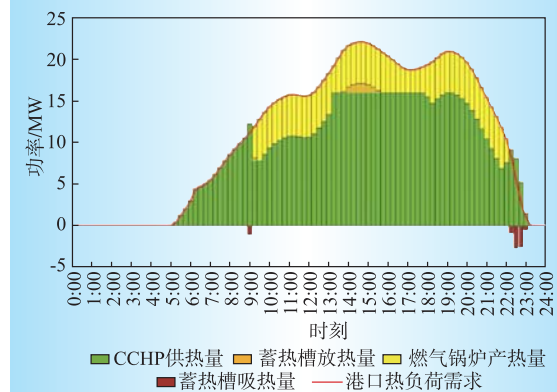


图 3 不考虑 IDR 的热能优化结果

Fig. 3 Optimal results of heating without considering IDR

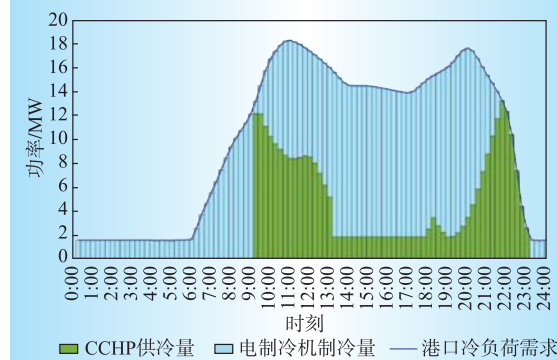


图 4 不考虑 IDR 的冷能优化结果

Fig. 4 Optimal results of cooling without considering IDR

对比 2 种情况下 PIES 电、热、冷能和天然气的最优运行结果可看出, 系统运行主要受电价影响。具体表现如下。

(1) 在电价低谷时段, 即 0:00—9:00、23:00—24:00, 主要从电网购电来满足港口电能需求。期间, 5:00 时热能需求开始增加, CCHP 运行消耗天然气增加产热来满足热能需求, 产生电量供应部分电能需求。6:00 时冷能需求开始增加, 因电价较低, EC 运

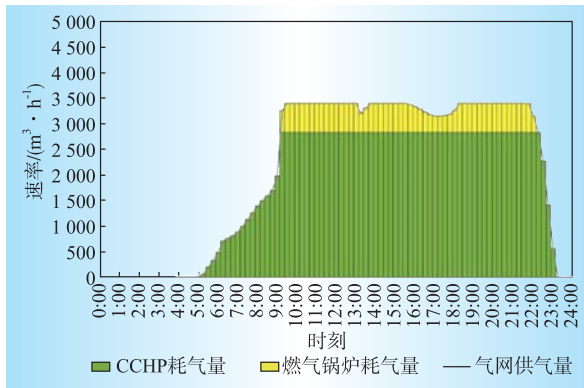


图5 不考虑IDR的天然气用量优化结果

Fig. 5 Optimal results of natural gas consumption without considering IDR

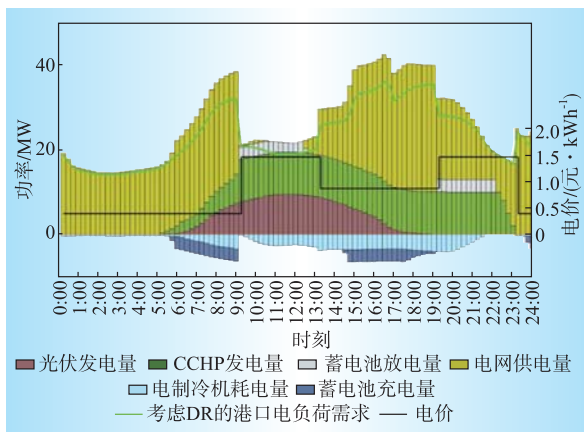


图6 考虑IDR的电能优化结果

Fig. 6 Optimal results of electric power considering IDR

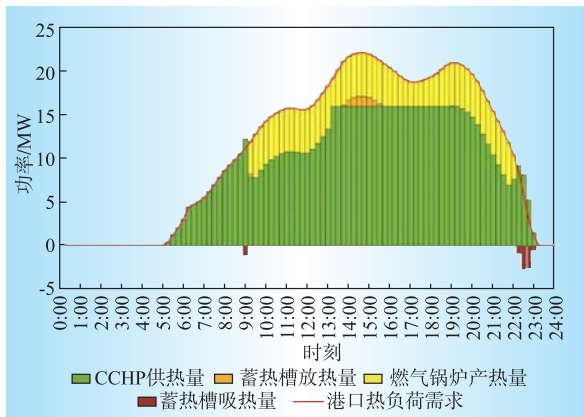


图7 考虑IDR的热能优化结果

Fig. 7 Optimal results of heating considering IDR

行制冷满足冷能需求,同时光伏出力增加使得PIES电能相对充裕,蓄电池开始充电。

(2) 在电价高峰时段,即9:00—13:00,19:00—23:00,购电量减少,由CCHP、光伏、蓄电池为港口供电。该时段EC减少用电使得制冷量减少,为满足增长的冷能需求,CCHP增加供冷,而供热不足的问题由

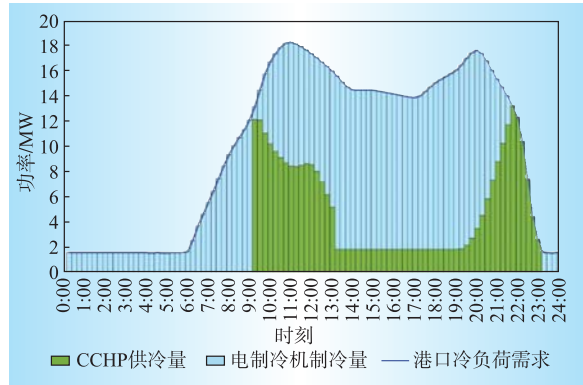


图8 考虑IDR的冷能优化结果

Fig. 8 Optimal results of cooling considering IDR

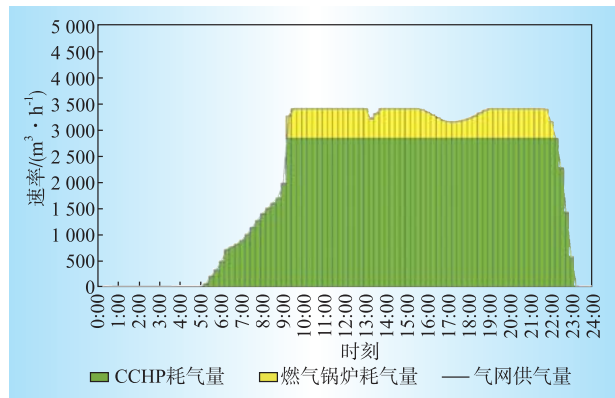


图9 考虑IDR的天然气用量优化结果

Fig. 9 Optimal results of natural gas consumption considering IDR

GB提供热能解决。

(3) 在电价平时段,即13:00—19:00,电能需求持续增加,由于CCHP发电量已达到最大,光伏出力逐渐减小,需增加购电量来满足港口电能需求。EC制冷量增加,CCHP增加供热来满足热能需求的增长。期间,15:00时热能需求增加到峰值,由CCHP、GB、蓄热槽共同为港口供热。

对比图2和图6可看出,IDR的加入令电价高峰时段的电能需求明显减少,减少的部分需求被转移至电价低谷时段与平时段。相比之下,若无IDR参与调节,港口电能负荷将达到峰值,电网电量供应紧张,EC减少制冷,为满足此时港口冷能需求,CCHP增加供冷,供热不足由GB提供,天然气消耗量因此增加。3种情况下PIES的运行成本如表2所示。

相较于不考虑IDR无优化时的PIES运行成本,以运行成本最低为目标进行优化可使系统运行成本降低6.68%,若优化过程中考虑港口负荷参与IDR,系统运行成本可降低17.59%。由于IDR有效减少了电价高峰时段港口的电能需求,该时段系统的用能成本减少,系统运行总成本进一步降低。

表2 不同PIES方案的运行成本
Table 2 Operation costs of different cases of PIES

运行方案	情形1	情形2	情形3
用能成本	561 393.13	514 499.59	435 465.71
污染成本	17 734.27	18 419.00	17 673.06
储能损耗成本	603.85	3 534.97	3 558.42
运行维护成本	15 022.90	18 579.62	18 581.85
需求响应成本			14 871.47
总成本	594 754.15	555 033.18	490 150.51

4 结束语

本文在构建PIES能量耦合转化EH模型和港口IDR模型的基础上,提出了一种考虑IDR的PIES运行优化方法。将由该方法得到的PIES优化运行结果与不考虑IDR且不对PIES进行优化、不考虑IDR以运行成本最低为目标对PIES进行优化2种运行结果进行对比,证明了以运行成本最低为目标对PIES进行优化,并在优化过程中采取一定的需求响应激励措施,可有效减少用电高峰时段港口的电能需求和用能成本,降低PIES总运行成本。D

参考文献:

- [1] 王峰,周珏. 港口岸电电能替代技术与效益分析[J]. 电力需求侧管理, 2015, 17(3):35-37.
WANG Feng, ZHOU Jue. Port power substitution technique and benefit analysis[J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(3):35-37.
- [2] PARISE G, PARISE L, MARTIRANO L, et al. Wise port and business energy management: port facilities, electrical power distribution[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(1):18-24.
- [3] 于雪风,徐桂芝,刘其辉,等. 含电转气及电转热的园区综合能源系统建模与优化运行[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(1):58-63, 80.
YU Xuefeng, XU Guizhi, LIU Qihui, et al. Modeling and optimal scheduling of integrated energy system for parks including power to gas and power to heat[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(1):58-63, 80.
- [4] 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):44-61.
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):44-61.
- [5] SALEHIMALEH M, AKBARIMAJ D A, VALIPOUR K,

- et al. Generalized modeling and optimal management of energy hub based electricity, heat and cooling demands [J]. Energy, 2018, 159:669-685.
- [6] 王杰,刘念. 多主体综合能源系统分布式优化运行方法[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3):98-104, 115.
WANG Jie, LIU Nian. Distributed optimal operation method of integrated energy system with multi - agents [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(3):98-104, 115.
- [7] 付中洲,袁铁江,皮霞. 含储热的电热联合系统优化调度模型[J]. 电器与能效管理技术, 2018(14):63-68, 78.
FU Zhongzhou, YUAN Tiejia, PI Xia. Optimized dispatching model of combined heat and power system included thermal energy storage [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018, 14:63-68, 78.
- [8] 白中华,苗常海,王雯,等. 储热技术在综合能源系统中的应用价值[J]. 供用电, 2019, 36(3):14-19.
BAI Zhonghua, MIAO Changhai, WANG Wen, et al. The value of thermal storage technology in integrated energy system[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(3):20-26.
- [9] 朱少杰,刘皓明,唐宇,等. 含多个能源站的区域综合能源系统建模及协同优化运行策略[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(4):60-66.
ZHU Shaojie, LIU Haoming, TANG Yu, et al. Modeling and collaborative optimal operation strategy for multiple energy stations of regional integrated energy system [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(4):60-66.
- [10] 乔彦哲,颜宁,马少华,等. 考虑多能互补的综合能源系统联合规划及发展综述[J]. 电器与能效管理技术, 2019(19):15-22.
QIAO Yanzhe, YAN Ning, MA Shaohua, et al. Summary of joint planning and development of integrated energy system considering multi - energy complementarity [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019, 19:15-22.
- [11] AHAMAD N B B, SU C X, XIAO Z X, et al. Energy harvesting from harbor cranes with flywheel energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4):3 354-3 364.
- [12] KANELLOS F D, VOLANIS E M, HATZIARGYRIOU N D. Power management method for large ports with multi-agent systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2):1 259-1 268.

作者简介:

普月(1996),女,云南玉溪人,硕士研究生,研究方向为综合能源系统优化运行;

刘皓明(1977),男,江苏盐城人,教授,博士,主要研究方向为智能电网、电力系统优化运行和电力市场。

(责任编辑 徐文红 赵雨昕)