

基于复合能源管道供能的区域综合能源系统优化运行

李茜¹, 宾帆¹, 张安安¹, 王思远^{1,2}, 廖长江^{1,3}, 杨威¹

(1. 西南石油大学电气信息学院, 四川省成都市 610500; 2. 南京南瑞水利水电科技有限公司, 江苏省南京市 211000;
3. 成都岷山绿氢能源有限公司, 四川成都市 610094)

摘要:“双碳”背景下,大规模开发利用低碳和清洁能源是中国能源转型过程的必经之路。复合能源管道(CEP)实现了电能与液化天然气的同时输送,其传输损耗低,是当前能源传输的重要发展方向。针对中心城市等负荷集中区域能源密集程度和耦合程度显著提升等问题,构建了基于CEP供能的新型区域综合能源系统。该系统考虑了CEP冷能的梯级利用,实现了电、气、冷、热等多能耦合互补,提高了系统能源利用率。为提升系统运行的经济性,以系统购能成本、运维成本为目标,建立了考虑系统电-气综合需求响应的优化调度模型。最后,通过算例仿真,对比分析了不同场景下系统能流的优化调度结果,验证了所提系统和优化模型的可行性与经济性。

关键词: 区域综合能源系统; 复合能源管道; 多能流统一优化; 冷能梯级利用; 需求响应

0 引言

“双碳”目标下,低碳能源和清洁能源的快速发展正积极推动着中国能源结构转型。作为化石能源中最清洁的一次能源,天然气被广泛使用,是国内能源转型过程中的重要支撑力量。中国的能源资源与负荷中心呈逆向分布,西气东输、西电东送实现了能源资源优化与各地区的协调发展,但在能源传输过程中,不仅传输损耗巨大,而且输送走廊也受到地理条件限制。复合能源管道(composite energy pipeline, CEP)作为新兴的气-电协同输送方式,利用液化天然气(liquefied natural gas, LNG)混合工质作为超导电缆的冷却介质,同时输送LNG和电能,能有效降低能量传输过程中的能量损耗,节约能源走廊,是解决中国当前能源和负荷中心呈逆向分布特征的重要途径^[1]。

根据输送低温燃料的不同,能源管道分为氢电一体化输送管道和气电一体化输送管道。文献[2]提出一种采用液氢作为制冷和能源传输的双极多芯型超级电缆设计;文献[3]在概念设计的基础上,采用液氢冷却的超导直流电缆实现电力和液氢一体化输送。随着天然气输送的迅速发展,采用LNG冷却超导电缆进行电力/LNG一体化输送的CEP的研

究逐渐发展起来,文献[4]采用在两个同轴LNG管道中加入超导电缆的结构,中国科学院电工研究所也提出了一些概念性设计^[5-6],并完成了10 kV/1 kA超导直流能源管道原理验证样机研制及试验。综上所述,CEP的可行性已得到充分论证,并已经进入与实际规划和建设相结合的阶段,亟须对CEP在实际应用场景中的运行优化策略进行研究。

多能协同优化已成为以电为核心、能源耦合程度日益增加的中心城市等负荷集中区域消纳新能源的重要手段。区域综合能源系统(regional integrated energy system, RIES)具备多种能源耦合紧密和能源密集等特征,新形式的能源可以进行良好的消纳^[7]。文献[8]提出一种由核能、氢电超导电缆共同组成的超级电网,初步设计了未来以超导与液氢一体化能源管道供能的城市综合能源系统结构;文献[9]提出一种超导综合能源系统结构,详细介绍了以CEP为能源传输载体的综合能源系统工作方式。可见,将CEP作为RIES的供能终端逐渐成为CEP应用的新模式。

为引导用户合理用能、帮助能源网络平缓负荷波动,有必要考虑需求侧对RIES优化调度的影响。文献[10]从理论角度建立了价格型需求响应模型,并分析了价格弹性矩阵与负荷随电价的变化关系;文献[11]以满足系统负荷平衡为优化目标,从不同用户的角度出发,制定电能与热能的综合需求响应策略;文献[12]考虑了清洁能源加入对RIES中的电、热需求响应的影响,建立了RIES日前经济调度

收稿日期: 2022-02-27; 修回日期: 2022-07-18。

上网日期: 2022-08-15。

中央引导地方科技发展专项资助项目(2021ZYD0042); 四川省科技计划资助项目(2021YFSY0051)。

模型,对比了加入需求响应之后系统对清洁能源的消纳能力;文献[13-14]在热电联产机组的基础上,从市场角度出发,提出了考虑综合需求响应的电-气-热联合优化交易策略,对负荷聚合商如何参与多能源日前市场交易进行了分析。现有关于RIES的需求响应优化研究主要围绕以电、气输入为主的RIES,尚不足以为解决基于CEP供能的新型RIES(CEP-RIES)输入冷能消纳问题和系统电、气、冷、热、LNG等能源市场供应协调问题提供解决方案。

针对上述问题,本文首先基于CEP结构和材料参数,建立了CEP的能量传输模型,得到了CEP的能量传输特性;其次,构建了一种CEP-RIES模型,制定了梯级利用CEP携带冷能的回收策略,并基于此建立了系统能量-物质转换传输模型;然后,考虑电、气价格需求响应和气负荷激励需求响应,提出了电-气综合需求响应机制,并以系统最低成本为优化目标,建立了考虑综合需求响应的CEP-RIES多能流优化调度模型;最后,选取中国西南某地区RIES负荷数据进行算例分析,验证了所提出优化调度模型的经济性。

1 CEP传输特性

CEP作为RIES的供能设备,采用高温超导电缆输电,传输的LNG为高温超导电缆提供工作所需的过冷环境,使得电缆处于超导工作状态,极大地降低了输电过程中的损耗。

CEP结构如图1所示。当CEP运行时,电能以直流的方式通过高温超导电缆进行传输,LNG作为高温超导电缆的冷却工质,在内LNG管和外LNG管同时输送,中途通过冷泵站提供保持过冷状态所需的冷量与输送压力^[15]。

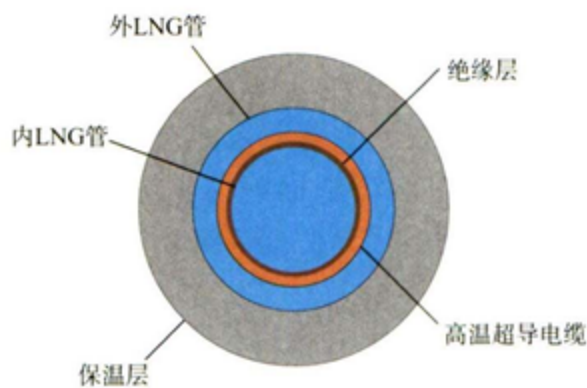


图1 CEP结构图
Fig. 1 Structure diagram of CEP

CEP的可用性与运行温度紧密相关。如式(1)、式(2)所示,当管道温度 T 低于临界温度 T_c 时,超导电缆进入超导工作状态,传输过程中的损耗忽略不计;当管道温度 T 高于临界温度 T_c 时,超导电

缆失超,电缆无法继续传输电能。

$$P_{\text{CEP}}^{\text{out}} = S_T P_{\text{CEP}}^{\text{in}} \quad (1)$$

$$S_T = \begin{cases} 0 & T > T_c \\ 1 & T \leq T_c \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{CEP}}^{\text{out}}$ 为管道末端输出电功率; $P_{\text{CEP}}^{\text{in}}$ 为管道输入电功率; S_T 为高温超导电缆状态量。

CEP的运行温度 T 不仅与管道结构及材料有关,而且受到管道中LNG流量 $W_{\text{CEP,LNG}}$ 的影响。LNG的流速过慢会使LNG在抵达下一个冷泵站之前无法维持在临界温度内;流速过快则会因摩擦造成温升,流速越快,温升越大。关系如式(3)、式(4)所示。

$$T = T_0 + \frac{Q_{\text{loss}} l + W_{\text{CEP,LNG}} u \Delta Y}{h W_{\text{CEP,LNG}}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{loss}} = (T_f - T_a) \left[\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \left(1 + \frac{2\delta}{d} \right) + \frac{1}{\pi\alpha(d + 2\delta)} \right]^{-1} \quad (4)$$

式中: T_0 为管道初始温度; Q_{loss} 为管道单位长度冷损; l 为冷泵站出口至下一个冷泵站入口的距离; u 为LNG比容; ΔY 为制冷站之间管道的压损; h 为LNG比热; T_f 为环境温度; T_a 为绝热层内表面温度; d 为绝热层内径; α 为绝热层外表面对流换热系数; λ 为管道保温层的导热系数; δ 为保温层厚度。

为维持CEP传输系统的稳定性,保证传输系统的安全性,基于温度场与LNG输送之间的关系,建立CEP传输系统的动态稳定性判据^[16]。LNG最小流量 $W_{\text{CEP,LNG,min}}$ 为:

$$W_{\text{CEP,LNG,min}} = \frac{Q_{\text{loss}} l}{25(T_c - T_0)} \quad (5)$$

式(5)表明,保持CEP传输系统稳定的最小流量 $W_{\text{CEP,LNG,min}}$ 只与超导电缆所用带材的临界温度有关,在保证实际流量不小于LNG最小流量的情况下,系统即可保持动态稳定。

2 基于CEP供能的RIES结构及模型

2.1 基于CEP供能的RIES结构

CEP输送的LNG需要释放冷能才能转化为天然气供用户使用,每标准立方米的LNG气化时会释放大量的高品位冷能。目前,尚未有研究给出这部分CEP输入冷能的处理方案。本文考虑将CEP输入的冷能引入RIES,不仅可以在这部分冷能用于发电与制冷,还可以提高RIES的多能流耦合性和系统的稳定性。本文建立的CEP-RIES模型结构如图2所示。

相比于传统能量分供系统(separate power

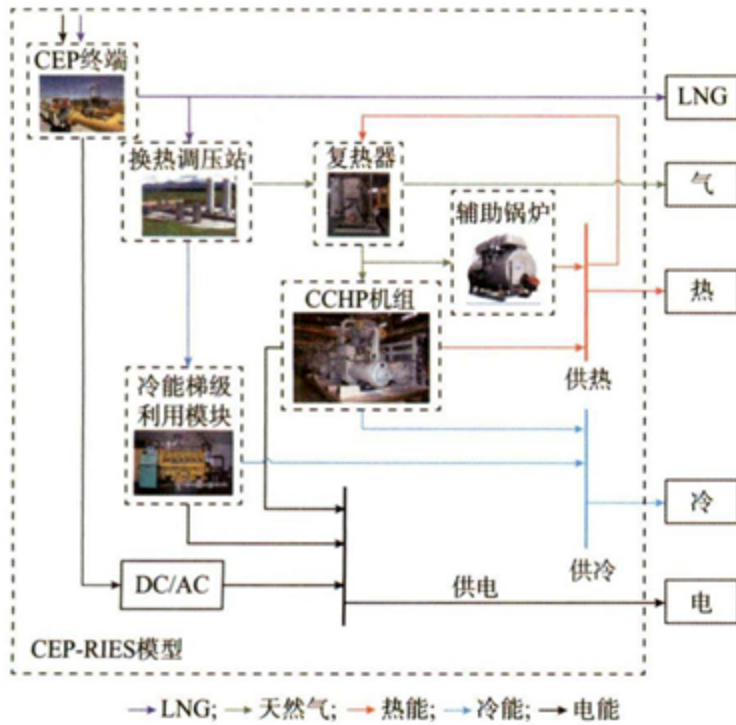


图2 CEP-RIES模型结构
Fig. 2 Structure of CEP-RIES model

system, SPS) 供能的RIES, CEP-RIES一方面实现了电、气、冷能源的综合传输;另一方面,实现了CEP冷能的梯级利用。

2.2 冷能梯级利用能量传递模型

CEP输入RIES的温度与RIES用冷温度相差较大, CEP冷能直接用于供冷将导致很大的冷量焓损失,使得冷能丢弃严重。而采用能量梯级利用的方式^[17],能够提高能源利用率、缓解能源紧缺。因此,本文采用了发电-供冷两级冷能梯级利用方案,随着LNG温度的升高逐级利用。CEP冷能梯级综合利用模块结构如图3所示。

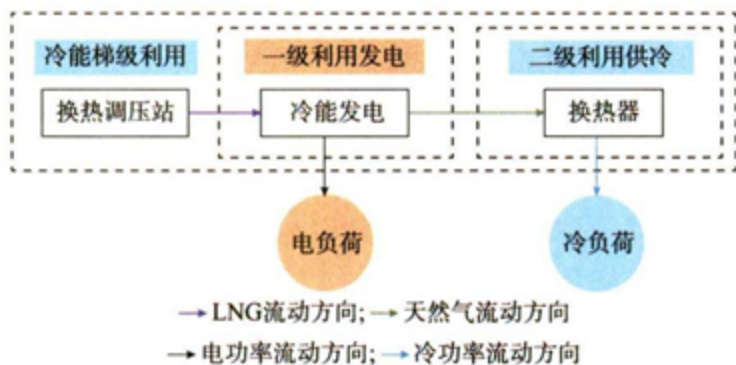


图3 冷能梯级利用示意图
Fig. 3 Schematic diagram of cooling energy cascade utilization

LNG通过CEP的终端接收站输入RIES,进入冷能梯级回收模块,可回收利用的冷能大小 Q_{LNG} 与RIES的LNG用气总量 W_G 的关系式如式(6)所示。

$$Q_{LNG} = W_G r_{cold,1} \quad (6)$$

式中: $r_{cold,1}$ 为换热调压站的冷能回收系数。

$$W_G = W_{MT} + W_{BL} + L_G \quad (7)$$

式中: W_{MT} 为燃气轮机(micro-turbine, MT)的用气

量; W_{BL} 为辅助锅炉用气量; L_G 为用户总气负荷。

LNG首先经过第1级换热,释放大量高品位冷能用于冷能发电,发电量 P_{LNG} 如式(8)所示。

$$P_{LNG} = Q_{LNG} \eta_E \quad (8)$$

式中: η_E 为冷能发电效率系数。

经过第1级换热后的LNG已气化为低温天然气,进入第2级换热,释放的冷能向RIES供冷。提供冷能的大小 Q_{RIES} 如式(9)所示。

$$Q_{RIES} = Q_{LNG} (1 - r_{cold,1} \varphi) r_{cold,2} \quad (9)$$

式中: φ 为可用于冷能发电的高品位冷能在总冷能中的占比; $r_{cold,2}$ 为冷能梯级利用模块的冷能回收系数。

2.3 冷热电联产机组的能流模型

冷热电联产(combined cooling, heating and power, CCHP)机组作为RIES的核心模块,主要包括MT、溴化锂制冷机和空调机(air conditioner, AC)。

MT和溴化锂制冷机的数学模型如式(10)一式(12)所示^[18]。

$$H_{MT} = \frac{P_{MT} (1 - \eta_{MT} - \eta_L)}{\eta_{MT}} \quad (10)$$

$$H_{ABC} = H_{MT} \eta_h \eta_r \quad (11)$$

$$Q_{ABC} = H_{MT} \eta_c \eta_r \quad (12)$$

式中: H_{MT} 和 P_{MT} 分别为MT排气余热量和输出电功率; η_{MT} 为MT的发电效率,可由三次多项式拟合进行计算; η_L 为热损失系数; H_{ABC} 和 Q_{ABC} 分别为溴化锂制冷机的制热量和制冷量; η_h 、 η_c 、 η_r 分别为溴化锂制冷机的制热、制冷系数和烟气回收率。

其中,MT耗气量与MT发电量之间的非线性数学关系如式(13)所示。

$$W_{MT} = \frac{P_{MT}}{\eta_{MT}} \frac{1}{V_G} \quad (13)$$

式中: V_G 为天然气低温热值,取 $9.78(\text{kW} \cdot \text{h})/\text{m}^3$ 。

AC通过消耗电能进行制热和制冷,其制热量和制冷量分别为:

$$H_{AC} = P_{AC} (1 - \eta_{L,h}) \eta_{AC,h} J_{AC,h} \quad (14)$$

$$Q_{AC} = P_{AC} (1 - \eta_{L,c}) \eta_{AC,c} J_{AC,c} \quad (15)$$

式中: H_{AC} 、 Q_{AC} 和 P_{AC} 分别为AC制热、制冷和用电功率; $\eta_{AC,h}$ 和 $\eta_{AC,c}$ 分别为AC制热和制冷效率; $\eta_{L,h}$ 和 $\eta_{L,c}$ 分别为制热和制冷能量损失系数; $J_{AC,h}$ 和 $J_{AC,c}$ 分别为AC制热能效比和制冷能效比。

3 电-气综合需求响应优化调度模型

3.1 电-气综合需求响应模型

传统的需求响应模型仅对电负荷进行调节,调

节方式通常利用价格信号刺激用户主动改变用电习惯,对单一能源负荷采取需求响应策略具有很大的局限性,不能充分发挥RIES的灵活性。在CEP-RIES中,负荷包含电、气、冷、热等多种能量类型,其中天然气与电能一样拥有市场商品的属性,也可以参与需求响应调节,以提高系统整体调节能力以及调节的经济性。同时,CEP-RIES内各种能源间的相互耦合使得负荷可以相互转换与替代,能以多能互补的方式参与需求响应。本文所构建的需求响应模型包含负荷转移和负荷替代两部分内容,通过负荷在时间上的平移与电、气、冷、热等多种能源耦合互补的方式来实现平抑负荷、削峰填谷。

3.1.1 电-气价格型需求响应

本文在分时电(气)价的基础上,采用需求价格弹性理论来建立电(气)负荷的价格型需求响应(price-based demand response, PBDR)模型,采用分时价格分析PBDR对CEP-RIES优化调度的影响。需求价格弹性反映了不同时期能源负荷对能源价格的敏感度,即一定时期内负荷变化率与价格变化率的比值^[19-21]。电(气)负荷价格弹性矩阵由自弹性系数 $c_{x,t}$ 和交叉弹性系数 $c_{x,tk}$ 组成,其中, $x \in \{E, G\}$,E表示电负荷、G表示气负荷;自弹性系数 $c_{x,t}$ 表征 t 时段电(气)负荷对当前时段电(气)价变化的响应,交叉弹性系数 $c_{x,tk}$ 表征 t 时段电(气)负荷对 k 时段电(气)价变化的响应。

根据需求价格弹性矩阵,实施PBDR后电(气)负荷需求与价格存在以下关系:

$$L_{x,t} = L_{x,t_0} + L_{x,t_0} \left(c_{x,t} \frac{q_{x,t} - q_{x,t_0}}{q_{x,t_0}} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq t}}^N c_{x,tk} \frac{q_{x,k} - q_{x,k_0}}{q_{x,k_0}} \right) \quad (16)$$

式中: L_{x,t_0} 和 $L_{x,t}$ 分别为PBDR实施前、后 t 时段的电(气)负荷量; q_{x,t_0} 和 $q_{x,t}$ 分别为PBDR实施前、后 t 时段电(气)价格; q_{x,k_0} 和 $q_{x,k}$ 分别为PBDR实施前、后 k 时段电(气)价格; N 为一天总时段数,取值为24。

PBDR实施前后,电(气)价格分别为分时电(气)价和实时电(气)价。实时电(气)价与分时电(气)价可由式(17)求得^[22]。

$$\begin{cases} \beta_{x,t} = \frac{L_{x,t_0} N}{\sum_{t=1}^N L_{x,t_0}} \\ q_{x,t} = \beta_{x,t} q_{x,t_0} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\beta_{x,t}$ 为 t 时段电(气)负荷价格的浮动因子。

3.1.2 气负荷激励型需求响应

CEP-RIES从CEP接收LNG,转化为天然气,对释放的冷能进行统一回收,再将转化的天然气分配向下游天然气配网,其气负荷不仅包括区域内各用户的气负荷,也包含配气网下游的天然气需求。CEP-RIES作为整个区域的天然气调配中心,可以代表整个区域参与天然气网络的调节,且可调节幅度相对于配网的各个小用户更大。因此,本文考虑加入天然气负荷的激励型需求响应(incentive-based demand response, IBDR),CEP-RIES内的可削减气负荷参与天然气市场的IBDR。CEP-RIES与天然气运营公司签订需求响应协议,配合对方进行市场调度,通过在指定时段内对天然气需求量进行增减来获得相应的经济激励。所获得的经济收益 F_{IBDR} 的表达式如式(18)所示。

$$F_{IBDR} = \sum_{t=1}^N [\rho_{up} q_{G,t} \omega_t \Delta L_{G,t}^{up} + \rho_{down} q_{G,t} (1 - \omega_t) \Delta L_{G,t}^{down}] \quad (18)$$

式中: ρ_{up} 和 ρ_{down} 分别为系统实施IBDR后气负荷增加、削减所获得的气价折扣率; ω_t 为布尔变量,表示 t 时段CEP-RIES的IBDR情况,同一时段只能增加或者削减,不能同时参与响应; $\Delta L_{G,t}^{up}$ 和 $\Delta L_{G,t}^{down}$ 分别为实施需求响应后 t 时段气负荷的增加量与削减量; $q_{G,t}$ 为实施需求响应后 t 时段的气价。本文考虑一天内削减与增加的气负荷大小相等,即 $\Delta L_{G,t}^{up}$ 的总和与 $\Delta L_{G,t}^{down}$ 的总和相等。

3.1.3 用户满意度模型

在将PBDR加入CEP-RIES的优化调度后,当价格提高时,会抑制用户的用能需求,用户会主动放弃一部分或全部可避免型负荷,并将一部分或全部分时避免型负荷转移到别的时段使用。这种方式在改变负荷曲线的同时,也给用户带来不便。如果仅以用能价格来对负荷进行优化调整,不考虑用户体验,则实质上一定程度地损害了用户的利益。本文采用文献[23]提出的用户用能方式满意度 m_s 和用能费用支出满意度 m_p 作为用户满意度指标,并将其作为约束条件,二者的数学表达式如式(19)、式(20)所示。

$$m_s = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{t=1}^N |\Delta L_{E,t}|}{\sum_{t=1}^N L_{E,t_0}} + \frac{\sum_{t=1}^N |\Delta L_{G,t}|}{\sum_{t=1}^N L_{G,t_0}} \right) \quad (19)$$

$$m_p = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{t=1}^N \Delta q_{E,t}}{\sum_{t=1}^N q_{E,0}} + \frac{\sum_{t=1}^N \Delta q_{G,t}}{\sum_{t=1}^N q_{G,0}} \right) \quad (20)$$

式中: $|\Delta L_{E,t}|$ 和 $|\Delta L_{G,t}|$ 分别为实施前、后 t 时段电负荷和气负荷改变量的绝对值; $L_{E,0}$ 和 $L_{G,0}$ 分别为实施前 t 时段的电、气负荷量; $\Delta q_{E,t}$ 和 $\Delta q_{G,t}$ 分别为实施前、后 t 时段的电、气价格变化量; $q_{E,0}$ 和 $q_{G,0}$ 分别为实施前 t 时段的电价和气价。

3.2 优化调度模型

3.2.1 目标函数

CEP-RIES的经济调度目标是在满足系统运行约束条件的情况下,通过合理调度各个能量耦合元件的出力,使系统运行成本最低。因此,考虑综合需求响应的CEP-RIES优化调度模型的目标函数如式(21)所示。

$$\min F = \min (F_E + F_G + F_{OM} - F_{IBDR}) \quad (21)$$

式中: F 为优化目标; F_E 为系统从CEP终端的购电成本; F_G 为系统从CEP终端的购气成本; F_{OM} 为CEP-RIES设备的运维成本。其中, F_E 、 F_G 、 F_{OM} 的计算式如下:

$$F_E = \sum_{t=1}^N (q_{E,t} P_{CEP,t}^{out}) \quad (22)$$

$$F_G = \sum_{t=1}^N (q_{G,t} W_{G,t}) \quad (23)$$

$$F_{OM} = \sum_{t=1}^N \left(\sum_{i=1}^j m_i |P_{i,t}| \right) \quad (24)$$

式中: $P_{CEP,t}^{out}$ 为 t 时段从CEP购得的电功率; $W_{G,t}$ 为 t 时段CEP-RIES的耗气量; $q_{E,t}$ 为需求响应实施后 t 时段的电价; j 为设备总数量; m_i 为设备 i 的单位维护费用; $P_{i,t}$ 为 t 时段设备 i 的出力大小。

3.2.2 约束条件

CEP-RIES优化模型中的约束条件不仅包括前文所述的CEP与RIES设备模型和需求响应模型,还应包括以下约束。

1) 负荷平衡约束

整个系统需要满足电、气、冷、热、LNG各种能源的供需平衡,满足用户的能量需求。系统的能量平衡方程如式(25)所示。

$$\begin{cases} L_{E,t} = P_{CEP,t}^{out} + P_{MT,t} + P_{LNG,t} - P_{AC,t} \\ L_{H,t} = H_{BL,t} + H_{MT,t} - H_{R,t} - H_{AC,t} \\ L_{C,t} = Q_{AC,t} + Q_{MT,t} + Q_{RIES,t} \\ W_{CEP,LNG,t} = W_{MT,t} + W_{BL,t} + L_{G,t} + L_{LNG,t} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $P_{MT,t}$ 、 $P_{LNG,t}$ 和 $P_{AC,t}$ 分别为 t 时段MT、LNG的发电功率和AC的耗电量; $H_{BL,t}$ 、 $H_{MT,t}$ 、 $H_{R,t}$ 和 $H_{AC,t}$

分别为 t 时段辅助锅炉发热量、MT发热量、复热器耗热量和AC耗热量,其中, $H_{R,t}$ 和 $H_{BL,t}$ 分别由式(26)、式(27)表示; $Q_{AC,t}$ 、 $Q_{MT,t}$ 、 $Q_{RIES,t}$ 分别为 t 时段AC制冷量、溴化锂制冷机制冷量和系统直接用于供冷的冷能回收量; $W_{CEP,LNG,t}$ 、 $W_{MT,t}$ 、 $W_{BL,t}$ 、 $L_{G,t}$ 和 $L_{LNG,t}$ 分别为 t 时段管道LNG流量、MT耗气量、锅炉耗气量、系统气负荷量和系统LNG负荷量; $L_{E,t}$ 、 $L_{H,t}$ 和 $L_{C,t}$ 分别为 t 时段系统电负荷总量、热负荷总量和冷负荷总量。

$$H_{R,t} = W_{G,t} r_G \quad (26)$$

$$H_{BL,t} = W_{BL,t} \eta_H \quad (27)$$

式中: r_G 为天然气复热系数,与天然气的温度以及下游管道的要求有关; η_H 为辅助锅炉的制热效率。

2) 设备功率约束

为保证系统的安全可靠运行,CEP-RIES内设备(余热回收锅炉、溴化锂制冷机、辅助锅炉、冷能回收装置、冷能发电装置)的出力,均需要保持安全范围。这些设备应当满足式(28)所示的约束条件。

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (28)$$

式中: $P_{i,\min}$ 和 $P_{i,\max}$ 分别为设备 i 的最小和最大功率。

其中,MT的运行还受到功率、爬坡以及启停时间的约束,如式(29)一式(31)所示。

$$u_t P_{MT,\min} \leq P_{MT,t} \leq u_t P_{MT,\max} \quad (29)$$

$$\begin{cases} P_{MT,t} - P_{MT,t-1} \leq P_{MT}^{up} \\ P_{MT,t} - P_{MT,t-1} \geq P_{MT}^{down} \end{cases} \quad (30)$$

$$\sum_{t=1}^N u_t (1 - u_{t-1}) \leq 3 \quad (31)$$

式中: u_t 为MT在 t 时段的启停状态,0表示停机、1表示开机; $P_{MT,\max}$ 和 $P_{MT,\min}$ 分别为MT发电功率的最大值和最小值; P_{MT}^{up} 和 P_{MT}^{down} 分别为在一段时间内MT机组增加和减少有功功率的限值。

3) 管道传输约束

根据动态判据,为了保证管道传输安全, $P_{CEP,t}^{out}$ 和 $W_{CEP,LNG,t}$ 满足如式(32)所示的关系。

$$\begin{cases} P_{CEP,\min}^{out} \leq P_{CEP,t}^{out} \leq P_{CEP,\max}^{out} \\ W_{CEP,LNG,\min} \leq W_{CEP,LNG,t} \leq W_{CEP,LNG,\max} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $P_{CEP,\min}^{out}$ 和 $P_{CEP,\max}^{out}$ 分别为CEP内传输电量的最小值和最大值; $W_{CEP,LNG,\min}$ 和 $W_{CEP,LNG,\max}$ 分别为CEP内LNG流量的最小值和最大值。

CEP在传输电力和LNG过程中受自身独特的结构约束,电力传输功率 $P_{CEP,t}^{out}$ 和LNG传输流量 $W_{CEP,LNG,t}$ 存在如式(1)一式(4)所示的关系。

4) 用户用能舒适性约束

$$m_s \geq m_{s,\min} \quad (33)$$

$$m_p \geq m_{p,\min} \quad (34)$$

式中： $m_{s,\min}$ 和 $m_{p,\min}$ 分别为用能方式满意度和用能费用支出满意度的最小值。

3.2.3 模型求解方法

本文所建立的数学模型是一个混合整数非线性规划(MINLP)问题,可利用文献[24]的方法将其转化为混合整数线性规划问题,具体线性化原理详见附录A。在MATLAB环境下,采用YALMIP建模并调用CPLEX求解器快速求解,得到需求响应策略及优化目标函数值。

4 算例仿真

4.1 算例基本描述

本文以中国西南地区某调压站数据与一个典型RIES作为研究对象。本文采用日前优化调度,单位调度时间 $\Delta t=1\text{ h}$, Δt 内各装置出力及交互功率恒定不变。取分时电价的需求响应自弹性系数为-0.2,交叉弹性系数为0.03;取分时天然气价格的需求响应自弹性系数为-0.58,交叉弹性系数为0.1^[25]。参与IBDR的气负荷为可削减型气负荷,占总气负荷的5%,允许这部分负荷在必要时进行切除,参与IBDR的气负荷补偿价格为2.5元/ m^3 ,并根据削减量进行经济补偿。

峰、平、谷时的分时电价与天然气分时气价分别如表1和表2所示。

表1 各时段的分时电价

Table 1 Time-of-use electricity price of each time period

时段	时段	电价/(元·(kW·h) ⁻¹)
谷时	01:00—07:00, 23:00—24:00	0.25
平时	08:00—11:00, 15:00—18:00	0.68
峰时	12:00—14:00, 19:00—22:00	1.10

表2 各时段的分时气价

Table 2 Time-of-use gas price of each time period

时段	时段	气价/(元· m^{-3})
谷时	08:00—10:00, 14:00—20:00	1.6
平时	01:00—02:00, 11:00—13:00, 21:00—24:00	2.0
峰时	03:00—07:00	2.5

电、冷、热、LNG四种负荷的预测数值详见附录B图B1。

为验证本文所提CEP-RIES较传统SPS的优越性,以及考虑综合需求响应的CEP-RIES优化调度模型的有效性,设置了如表3所示的4种场景对CEP-RIES优化调度结果进行对比分析。

表3 场景分类

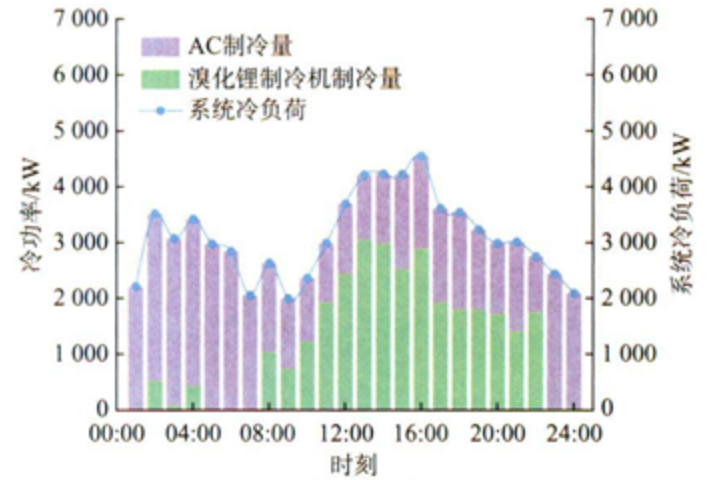
Table 3 Scenario classification

场景	供能方式	冷能回收	冷能梯级利用	需求响应类型
场景1	SPS	×	×	×
场景2	CEP	✓	×	×
场景3	CEP	✓	✓	×
场景4	CEP	✓	✓	综合需求响应

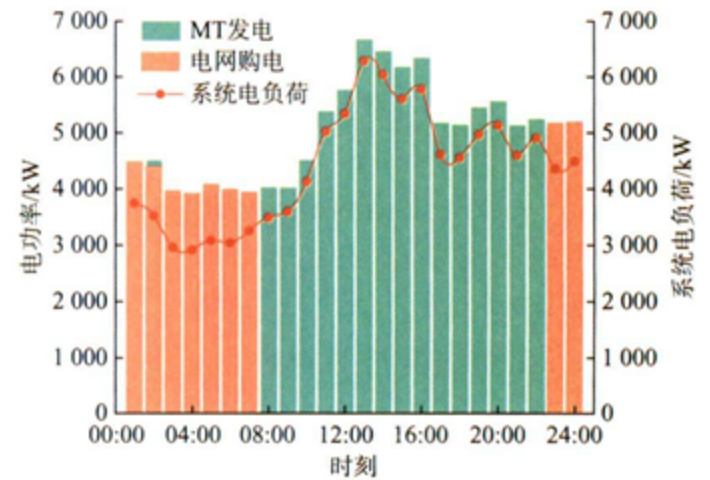
注:“✓”表示使用了此种策略;“×”表示未使用此种策略。

4.2 CEP-RIES优化分析

为验证本文所构建的冷能梯级利用模块对于提高系统能源利用率的有效性,以及CEP-RIES较传统SPS能提高系统运行的经济性,以夏季数据为例,对场景1、2、3分别进行仿真分析。3种场景下系统中各供冷元件、供电元件的优化出力分别如图4、图5和图6所示。



(a) 供冷元件出力



(b) 供电元件出力

图4 场景1夏季优化调度后供冷/供电元件出力
Fig. 4 Output of cooling and electricity supply components after optimal dispatch in summer in scenario 1

场景1中,图4(a)和(b)反映了系统受分时电价的影响,在00:00—07:00和23:00—24:00电价低谷期,基本采用电制冷。系统在电价较高的下午采用MT发电,大比例地使用溴化锂制冷,但仍需提供额外的电能用于AC制冷,满足系统冷负荷。

场景2中,如图5(a)所示,CEP输入的LNG冷

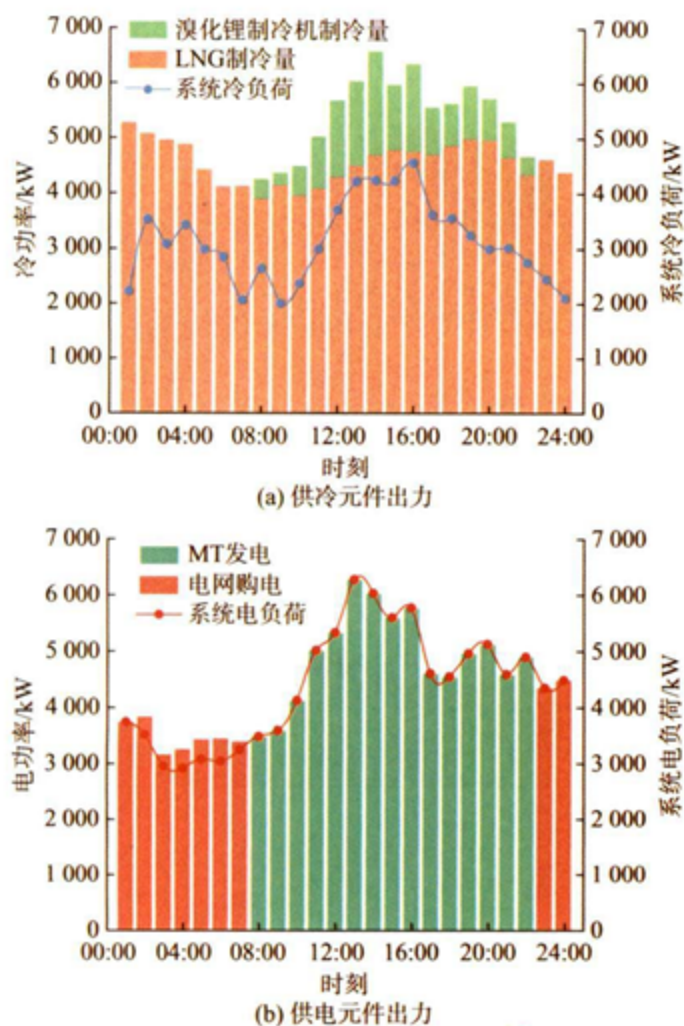


图5 场景2夏季优化调度后供冷/供电元件出力
Fig. 5 Output of cooling and electricity supply components after optimal dispatch in summer in scenario 2

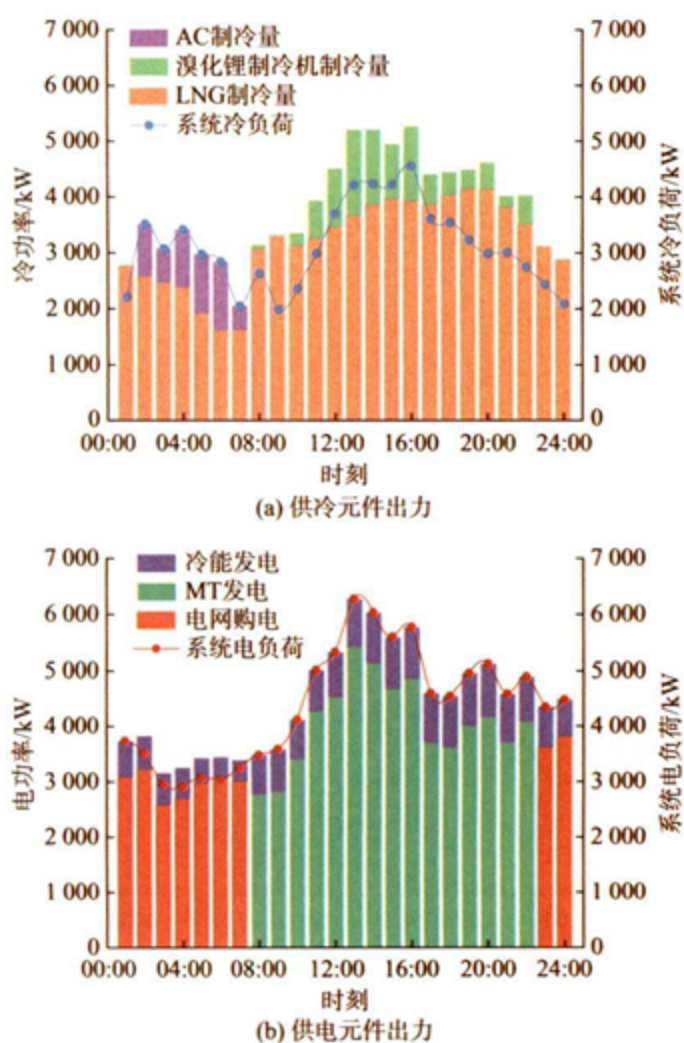


图6 场景3夏季优化调度后供冷/供电元件出力
Fig. 6 Output of cooling and electricity supply components after optimal dispatch in summer in scenario 3

能进行回收后全部用于供冷,系统大部分冷负荷由LNG冷能回收供应。从图5(b)可以看出,在电价较高的时段,系统采用MT发电来满足电负荷和热负荷需求,多余的热量通过溴化锂制冷机转化为冷能进行消纳。对比场景1,场景2虽然对LNG冷能进行了回收利用,但系统冷能供应处于过剩状态,冷能利用效率不高。

场景3中,对LNG冷能进行梯级利用。由图6(a)和(b)可以看出,CEP输入冷能除向系统供冷之外,还可以用于发电,可以更加灵活地参与多能流的联合调度。对比图5(a)可以看出,系统的弃冷量大大减少,这主要是因为过剩的冷能被转化为电能。

从经济角度分析,表4是场景1~3在夏季典型日的调度结果。从表中可以看出:1)购电量(购气量):场景1>场景2>场景3;2)能源利用率/焓效率/单日盈利:场景1<场景2<场景3,场景2与场景3的系统每日利润较场景1分别提高了13.8%和28.3%。可以看出,通过CEP冷能回收,系统大量减少了电制冷的耗电量,冷能的梯级利用的发电量也满足了一部分的电负荷。因此,相较于传统SPS,由CEP供能的RIES能源利用率和系统的盈利能力都得到了较大的提高。

表4 各场景夏季典型日调度结果
Table 4 Dispatch results of typical summer days in each scenario

场景	购电量/(kW·h)	购气量/m ³	能源利用率/%	焓效率/%	单日盈利/元
1	39 096	7 198 051	75.00	36.5	46 207
2	33 094	7 177 045	77.77	40.0	53 080
3	28 107	7 141 443	81.24	44.0	63 326

4.3 综合需求响应优化分析

为验证本文所提出的综合需求响应模型与CEP-RIES优化调度模型的有效性与可行性,验证考虑需求响应后的优势,对场景3和场景4仿真结果进行对比分析。

图7(a)和(b)分别为系统采取综合需求响应前后的电、气负荷的变化对比图。

从图7(a)和(b)可以看出,PBDR模型很好地起到了负荷引导的作用,负荷随电价的变化而变化,抑制了部分高峰时段(11:00—21:00)的可避免型电、气负荷,并引导分时可避免型电、气负荷转移到低谷时段(01:00—08:00、22:00—24:00)。

气负荷则在经过PBDR后,按照事先签订的协议配合天然气运营公司的调度指令,采用IBDR进

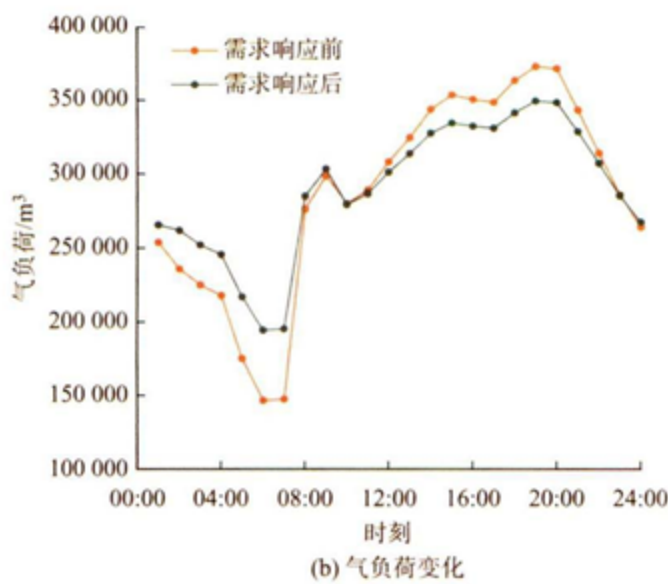
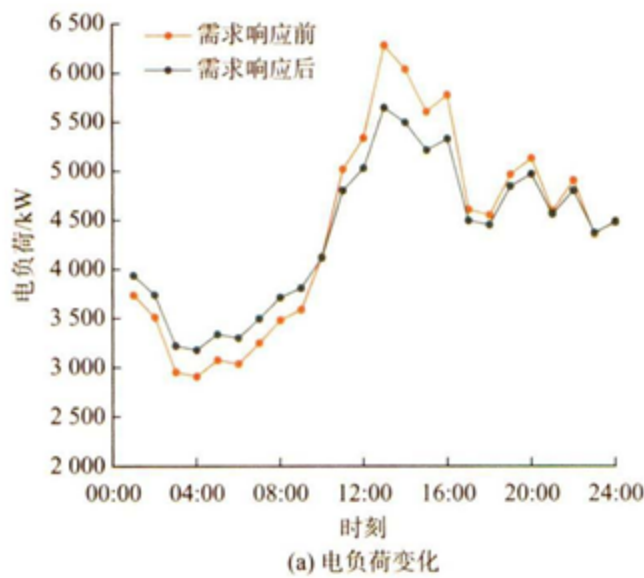


图7 需求响应前后的电/气负荷变化
Fig. 7 Electricity and gas load changes before and after demand response

一步缩小气负荷的峰谷差。从电、气负荷变化图中可以看出,采用综合需求响应后,用户电负荷的峰谷差相较于不考虑综合需求响应下降了24.71%,气负荷的峰谷差则下降了28.64%。因为采用了PBDR, CEP-RIES的单日内总电负荷下降了0.93%,单日内总气负荷下降了1.01%,占总负荷比例极小,不会影响系统。

根据综合需求响应的理论,系统采用电价、气价作为引导,对比图8(a)和(b)的电能优化调度结果可知,CEP-RIES根据电价的变化调整供电方案,在低电价时段采用电网购电满足系统的电负荷,在高电价时段则采用CCHP燃气发电。综合需求响应机制平缓了CEP-RIES的电负荷波动幅度,可以有效缓解CEP的供能压力,使得CEP-RIES以更加高效、经济的方式运行。

作为CEP输入冷能的另一种使用方式,CEP输入冷能供冷的出力变化如图9所示。可以看出,受气负荷变化影响,CEP输入冷能供冷的出力也

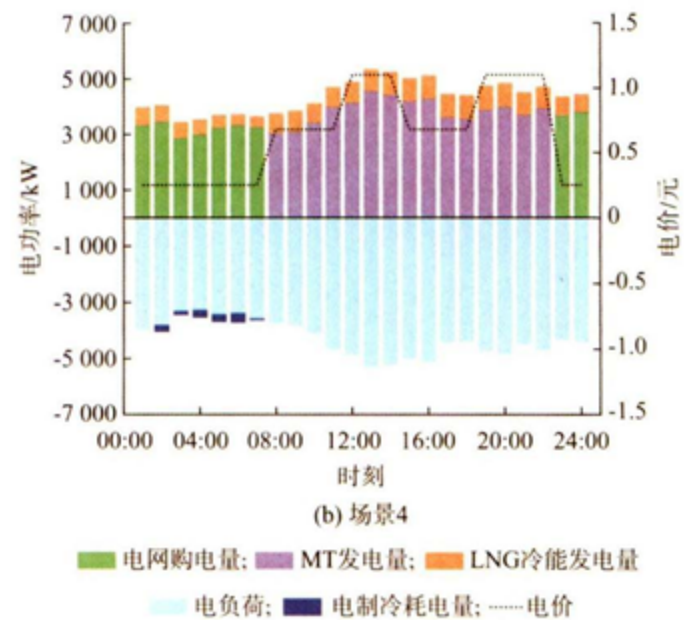
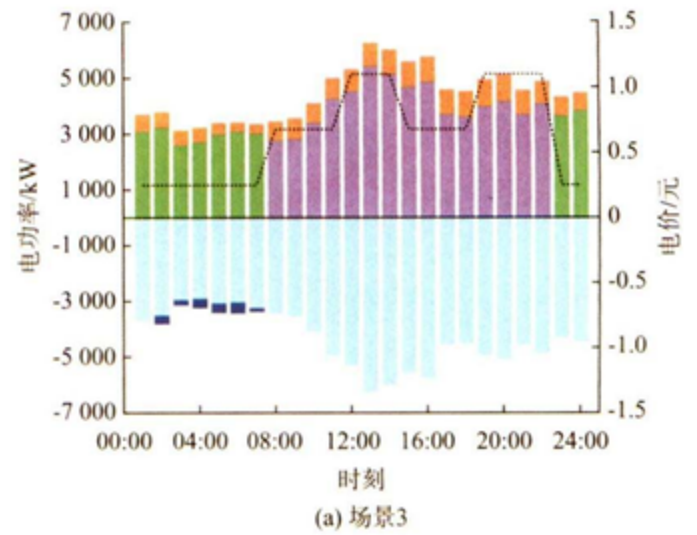


图8 不同场景下电能的优化调度结果
Fig. 8 Optimal dispatch results of electric energy in different scenarios

变得平缓。需求响应前,单日内CEP输入冷能供冷出力为76.063 MW,需求响应后下降到75.787 MW,下降了0.36%。

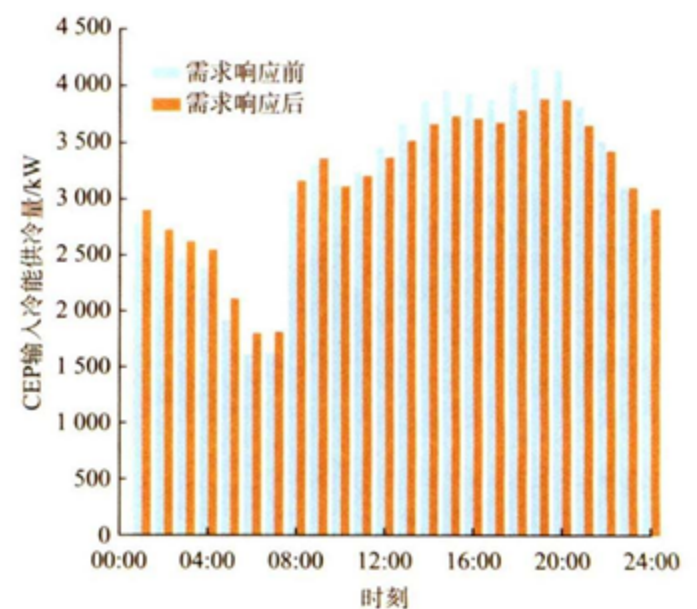


图9 需求响应前后CEP输入冷能供冷量变化示意图
Fig. 9 Schematic diagram of changes in cooling energy supply of CEP before and after demand response

表5为两种不同场景下的CEP-RIES优化调度结果的运维成本。场景4考虑综合需求响应的优化调度的总运维费用比场景3降低了6.63%,即提升了CEP-RIES的经济性与可靠性。对比场景3与场景4可知,采用综合需求响应机制使得CEP-RIES主动转移负荷,在减少购能费用的同时,也得到了一定的IBDR经济补偿。CEP-RIES对CEP输入冷能的消纳在较大程度上减少了能源的消耗,提高了能源利用效率,在系统优化调度中考虑综合需求响应机制,可以充分挖掘多能流耦合系统的需求响应潜力,尤其是对天然气市场的需求响应潜力。在满足系统日常负荷需求的基础上,参与电力市场与天然气市场的灵活调度,可以提高系统稳定运行的经济性与可靠性,也缓解了外部能源网络的供能压力。

表5 各场景下的CEP-RIES运维费用
Table 5 Operation and maintenance costs of CEP-RIES in different scenarios

场景	成本/元	IBDR经济补偿/元	总运维费用/元
3	157 869.584		157 869.584
4	152 894.141	2 230.535	150 663.606

5 结语

本文通过对CEP能量传输模型的研究,构建了一种基于CEP供能的RIES,并针对CEP输入冷能回收利用方式单一及冷能回收效率低的问题,提出一种CEP冷能发电与供冷梯级利用的集成方案。同时,考虑电、气能源市场供能需求波动的问题,建立了考虑电-气综合需求响应的优化调度模型,并得到以下结论:

1)在能量传输过程中,管内LNG流量和冷能损耗会影响CEP的工作温度,并且传输过程的冷能损耗与管道参数和传输距离呈正相关。

2)相较于场景1中的传统SPS,场景2、3所建立的CEP-RIES每日盈利分别提高了13.8%和28.3%,表明CEP-RIES能够有效解决系统能源利用率低的问题。

3)考虑综合需求响应的RIES的优化调度能够平缓负荷波动,用户电、气负荷的峰谷差相较于不考虑综合需求响应时分别下降了24.71%和28.64%,表明引入电-气综合需求响应后,激发了CEP-RIES运行的灵活性,能够有效平缓负荷侧的能源波动。

需要指出的是,本文在构建综合需求响应模型时,并未将冷、热负荷纳入考虑。同时,对冷能梯级回收利用的具体实施方案也需要在后续研究中

展开。

本文在撰写过程中,得到西南石油大学自然科学“揭榜挂帅”项目(2021JBGS06)的资助,特此感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 张杨,厉彦忠,谭宏博,等.天然气与电力长距离联合高效输送的可行性研究[J].西安交通大学学报,2013,47(9):1-7.
ZHANG Yang, LI Yanzhong, TAN Hongbo, et al. Efficient long-distance energy transmission conception [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(9): 1-7.
- [2] GRANT P M. The SuperCable: dual delivery of chemical and electric power [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1810-1813.
- [3] TREVISANI L, FABBRI M, NEGRINI F. Long distance renewable-energy-sources power transmission using hydrogen-cooled MgB₂ superconducting line [J]. Cryogenics, 2007, 47(2): 113-120.
- [4] QIU Q Q, ZHANG G M, XIAO L Y, et al. General design of ±100 kV/1 kA energy pipeline for electric power and LNG transportation[J]. Cryogenics, 2020, 109: 103120.
- [5] WANG L N, BAIG N, ZHANG R T, et al. Concept design of 1 GW LH₂-LNG-superconducting energy pipeline [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1-2.
- [6] CHEN J H, ZHANG G M, QIU Q Q, et al. Simulation and experiment on superconducting DC energy pipeline cooled by LNG[J]. Cryogenics, 2020, 112: 103128.
- [7] 武梦景,万灿,宋永华,等.含多能微网群的区域电热综合能源系统分层自治优化调度[J].电力系统自动化,2021,45(12): 20-29.
WU Mengjing, WAN Can, SONG Yonghua, et al. Hierarchical autonomous optimal dispatching of district integrated heating and power system with multi-energy microgrids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 20-29.
- [8] GRANT P M. Hydrogen lifts off—with a heavy load [J]. Nature, 2003, 424(6945): 129-130.
- [9] 陈宇.面向区域建筑的超导综合能源系统构架与本质安全化研究[D].成都:四川师范大学,2021.
CHEN Yu. Research on the architecture and intrinsic safety of superconducting integrated energy system for regional buildings [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2021.
- [10] KIRSCHEN D S, STRBAC G, CUMPERAYOT P, et al. Factoring the elasticity of demand in electricity prices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 612-617.
- [11] 徐航,董树锋,何仲潇,等.基于多能互补的电/热综合需求响应

- [J]. 电网技术, 2019, 43(2): 480-489.
- XU Hang, DONG Shufeng, HE Zhongxiao, et al. Electro-thermal comprehensive demand response based on multi-energy complementarity [J]. Power System Technology, 2019, 43 (2): 480-489.
- [12] 刘天琪, 卢俊, 何川, 等. 考虑联合热电需求响应与高比例新能源消纳的多能源园区日前经济调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 261-268.
- LIU Tianqi, LU Jun, HE Chuan, et al. Day-ahead economic dispatch of multi-energy parks considering integrated thermo-electric demand response and high penetration of renewable energy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39 (8): 261-268.
- [13] 刘珮云, 丁涛, 贺元康, 等. 基于综合需求响应的负荷聚合商最优市场交易策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 224-231.
- LIU Peiyun, DING Tao, HE Yuankang, et al. Optimal trading strategy for load aggregator based on integrated demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39 (8): 224-231.
- [14] 窦迅, 王俊, 王湘艳, 等. 基于演化博弈的区域电-气互联综合能源系统用户需求侧响应行为分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3775-3786.
- DOU Xun, WANG Jun, WANG Xiangyan, et al. Analysis of user demand side response behavior of regional integrated power and gas energy systems based on evolutionary game [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3775-3786.
- [15] ZHANG Y, TAN H B, LI Y Z, et al. Feasibility analysis and application design of a novel long-distance natural gas and electricity combined transmission system [J]. Energy, 2014, 77: 710-719.
- [16] 张国民, 陈建辉, 邱清泉, 等. 超导直流能源管道的研究进展[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4389-4398.
- ZHANG Guomin, CHEN Jianhui, QIU Qingquan, et al. Research progress on the superconducting DC energy pipeline [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (21): 4389-4398.
- [17] 张安安, 张红, 李茜, 等. 电-气联合储能的海上微能系统模糊随机规划[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5915-5925.
- ZHANG An'an, ZHANG Hong, LI Qian, et al. Fuzzy stochastic programming of offshore MIES including electricity and associated gas storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5915-5925.
- [18] 孙亮, 李佳雯, 杨心贺, 等. 含相变储能的冷热电联供型微网多目标优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 60-66.
- SUN Liang, LI Jiawen, YANG Xinhe, et al. Multi-objective optimal configuration of combined cooling, heating and power microgrid with phase change material energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 60-66.
- [19] ALDAOUDEYEH A M I, KAVASSERI R G, LIMA I T. Characterization of forward electricity market price variations and price-responsive demands [C]// 2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), March 29-31, 2017, Denver, USA: 211-218.
- [20] THIMMAPURAM P R, KIM J. Consumers' price elasticity of demand modeling with economic effects on electricity markets using an agent-based model [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 390-397.
- [21] ZHANG C, XU Y, DONG Z Y, et al. Robust coordination of distributed generation and price-based demand response in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9 (5): 4236-4247.
- [22] 张安安, 冯雅婷, 林冬, 等. 考虑天然气压力能综合利用的微电网气-电需求响应模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 19-27.
- ZHANG An'an, FENG Yating, LIN Dong, et al. Gas-electricity demand response model for micro-energy grid considering comprehensive utilization of natural gas pressure energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (8): 19-27.
- [23] 张虹, 马鸿君, 闫贺, 等. 计及 WCVaR 评估的微电网供需协同两阶段日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 55-63.
- ZHANG Hong, MA Hongjun, YAN He, et al. Two-stage day-ahead optimal microgrid scheduling with coordination between supply and demand considering WCVaR assessment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 55-63.
- [24] 卢艺, 卢苑, 梁俊文, 等. 含抽水蓄能电网安全约束机组组合问题的混合整数线性规划算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 39-47.
- LU Yi, LU Yuan, LIANG Junwen, et al. Mixed integer linear programming algorithm for solving security constrained unit commitment problem of power grid with pumped storage hydro [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47 (3): 39-47.
- [25] 杨海柱, 李梦龙, 江昭阳, 等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48 (10): 30-37.
- YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas loads response [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48 (10): 30-37.

李茜(1988—),女,博士,副教授,主要研究方向:电力系统稳定与控制、分布式发电和综合能源系统。E-mail: swpuliqian@163.com

宾帆(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向:综合能源系统。E-mail: 2983323955@qq.com

张安安(1977—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:综合能源系统、电-气协调控制。E-mail: ananzhang@swpu.edu.cn

(编辑 章黎)

Optimal Operation of Regional Integrated Energy System Based on Energy Supply Through Composite Energy Pipeline

LI Qian¹, BIN Fan¹, ZHANG An'an¹, WANG Siyuan^{1,2}, LIAO Changjiang^{1,3}, YANG Wei¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Nanjing NARI Water Conservancy and Hydropower Technology Co., Ltd., Nanjing 211000, China;

3. Minshan Hydrenergy Co., Ltd., Chengdu 610094, China)

Abstract: In the background of “carbon emission peak and carbon neutrality”, the large-scale development and utilization of low-carbon and clean energy is the only way for China’s energy transition process. Composite energy pipeline (CEP) realizes the simultaneous transmission of electric energy and liquefied natural gas (LNG) with low transmission loss, which is an important development direction of energy transmission at present. In view of the significant increase in energy intensity and coupling degree in load-concentrated areas such as central cities, a new regional integrated energy system (RIES) based on the energy supply through CEP is constructed. The system considers the cascade utilization of CEP cooling energy, realizes the multi-energy coupling and complementation of electricity, gas, cooling and heat, and improves the energy utilization rate of the system. In order to improve the economy of system operation, an optimal dispatch model considering the electricity-gas integrated demand response of the system is established with the objectives of system energy purchase cost, and operation and maintenance cost. Finally, through simulation example, the optimal dispatch results of system energy flow in different scenarios are compared and analyzed, and the feasibility and effectiveness of the proposed system and optimization model are verified.

This work is supported by Central Government Funds for Guiding Local Scientific and Technological Development of China (No. 2021ZYD0042) and Sichuan Provincial Science and Technology Program of China (No. 2021YFSY0051).

Key words: regional integrated energy system (RIES); composite energy pipeline (CEP); multi-energy flow unified optimization; cascade utilization of cooling energy; demand response

