

市场环境下的冰蓄冷空调的综合能源系统优化运行

孙轶恺¹, 漆淘懿², 张利军¹, 胡怡霜², 俞楚天¹

(1. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 杭州 310008; 2. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 综合能源系统能够提高能源效率, 促进可再生能源消纳。综合能源系统的进一步发展需要优化运行技术的支撑, 通过协调其内部各种设备在市场环境下的能源消耗, 降低整体的运营成本。因此, 为充分挖掘综合能源系统需求响应潜力以参与市场供需互动, 考虑到冰蓄冷空调不同运行模式下的能效比变化, 提出了含冰蓄冷空调的综合能源系统优化运行方法。首先建立了考虑需求响应的设备通用运行模型, 并对冰蓄冷空调、燃气轮机、蓄电池等设备进行了精细化建模。随后提出了市场环境下综合能源系统调度运行和需求响应容量的优化方法。然后, 将提出的非凸模型转换为可解决的混合整数线性规划问题进行求解。最后, 基于实际的综合能源系统运营数据, 通过算例仿真验证了所提方法的有效性。

关键词: 电力市场; 综合能源系统; 冰蓄冷空调; 需求响应; 优化运行

Optimal Operation of Integrated Energy System Including Ice-Storage Air-Conditioning in Power Market

SUN Yikai¹, QI Taoyi², ZHANG Lijun¹, HU Yishuang², YU Chutian¹

(1. Economic and Technical Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310008, China;
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The integrated energy system can improve energy efficiency and promote the consumption of renewable energy. The further development of the integrated energy system requires the support of optimized operation technology, and reduces the overall operating cost by coordinating the energy consumption of various internal equipment in the electricity market. To fully tap the demand response potential of integrated energy system to participate in the interaction between market supply and demand, considering the change of energy efficiency ratio under different operation modes of ice-storage air-conditioning, an optimal operation method of integrated energy system with ice-storage air-conditioning is proposed. First, a general equipment operation model considering demand response is established, and refined modeling of ice-storage air-conditioners, gas turbines, batteries and other equipment are carried out. Then, an optimization method for the dispatch operation and demand response capacity of the integrated energy system under the market environment is proposed. And then, the proposed non-convex model is converted into a solvable mixed integer linear programming problem for solution. Finally, based on the actual operating data of the integrated energy system, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation examples.

Key words: electricity market; integrated energy system; ice-storage air-conditioning; demand response; optimized operation

0 引言

为实现“碳达峰, 碳中和”的目标, 推进能源改革, 提高能源利用效率势在必行^[1]。综合能源系统由新能源发电、储能、燃气轮机等设备组成, 通过电、热、冷各种能源间的协调互补, 在满足系统多

能需求的基础上, 能够提高能源效率, 促进可再生能源的消纳^[2]。基于综合能源系统的多种优势, 世界上许多国家都在大力推进综合能源系统的研究和落地工程^[3-8]。以我国为例, 北京大兴机场建设了包含分布式地源热泵, 光伏发电和储能等设施的综合能源系统, 能够对机场运营中所需的电力、供热和制冷进行有效补充^[9]。上海迪士尼园区基于能量梯级利用的冷、热、电和压缩空气四联供技术, 将一次能源利用率提升到 80% 以上^[10]。

然而, 综合能源系统的发展一直被高昂的建设

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JY19000V)。
Foundation item: Supported by the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (5211JY19000V)。

成本和复杂的运营优化所困扰^[11-12]。随着通信技术的飞速发展,综合能源系统对内部负荷资源的控制能力不断增强^[13]。通过对灵活负荷更加精准地进行调控,综合能源系统不仅能够响应现货市场中实时电价,还能利用灵活负荷的需求响应能力参与辅助服务市场。山东、江苏、浙江等地针对负荷侧资源参与辅助服务市场已出台相关政策,制定了负荷侧主体参与辅助服务市场的准入条件、结算方法、考核机制等规则^[14-16]。因此,综合能源系统通过提供调频备用(regulation reserve, RR)、同步备用(synchronized reserve, SR)等辅助服务,能够获取市场补贴从而进一步降低系统运行成本。

由于燃气轮机、蓄电池等传统设备的响应潜力有限,亟需挖掘新的灵活资源为综合能源系统提供响应容量。冰蓄冷空调包括制冷机、制冰机和蓄冰槽等组件,可以在夜间低电价时段制冰并储存在蓄冰槽内,白天高电价时段融冰制冷从而降低制冷机功率,是综合能源系统重要的制冷和储冷设备^[17]。文献[18]对深圳地区的电冰蓄冷空调的典型工程应用进行了经济型研究,结果证明了冰蓄冷空调的削峰填谷作用有利于电网的健康运行和有序发展。文献[19]针对冷热电联供型微网提出了含冰蓄冷空调的多时间尺度优化模型,有效平抑了日内需求侧的随机波动,实现微网的经济稳定运行。文献[20]在含冰蓄冷空调的工厂综合能源系统中,利用冰蓄冷空调夜间蓄冰,白天融冰制冷,降低工厂运营成本。

然而,以上研究只关注了冰蓄冷空调的蓄冰时段优化,忽视了冰蓄冷空调在白天的负荷调节能力。白天冰蓄冷空调的制冷量来源于制冷机和融冰两部分,可以根据需求优化其各自的制冷量。在尖峰电价时段,冰蓄冷空调可以增加融冰制冷量,从而降低制冷机的电功率以减少用电成本。此外,不同负荷率下制冷机的能效比不同,优化过程中能效比也是必须要考虑的因素。在高电价时期,大幅降低制冷机功率而增加融冰制冷功率,不仅会使制冷机能效比显著下降,还会加速蓄冰量消耗。因此,需要综合考虑冰蓄冷空调的能效比、蓄冰量、电价等因素,实现其经济最优运行。

因此,本文充分挖掘了综合能源系统内冰蓄冷空调、蓄电池、燃气轮机等可调节资源的需求响应潜力,并在现货市场和辅助服务市场中,优化了综合能源系统的多能需求和响应容量,从而降低系统

的运营成本。首先,本文针对综合能源系统,提出了考虑需求响应的设备通用运行模型。随后,针对综合能源系统中的冰蓄冷空调、燃气轮机、蓄电池,分别建立了不同的精细化需求响应模型,并拟合了冰蓄冷空调在不同负载率下的能效比曲线。进而以经济最优为目标,基于设备的需求响应模型,采用大M法对优化系统运行中的购电量和需求响应容量。最后通过算例证明了所提优化方法在市场环境下能够有效提高综合能源系统经济性。

1 综合能源系统结构及其参与市场的条件

图1展示了含冰蓄冷空调综合能源系统的结构和能量转移过程,主要包括能量输入、能量生产、能量转换、能量储存和能量消耗5个环节。综合能源系统内能量的主要形式为电、热和冷,因此系统内包含电流,热流和冷流3种能量流动。

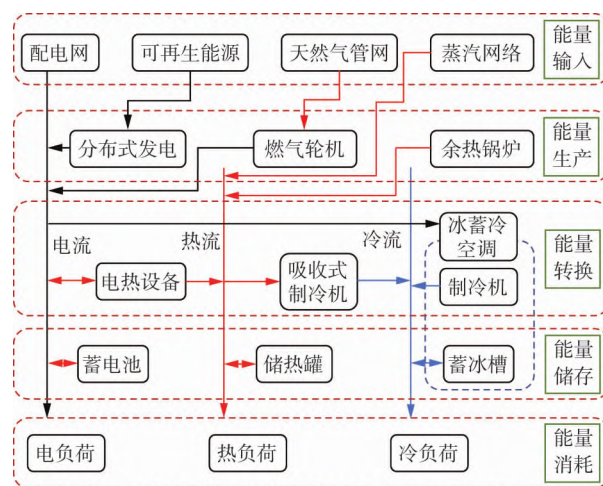


图1 含冰蓄冷空调的综合能源系统结构

Fig. 1 Integrated energy system structure including ice-storage air-conditioning

综合能源系统中能量的来源主要有两种形式,分布式发电、燃气轮机和余热锅炉等系统自身设备的生产能量和外部购买的电力、天然气等能量。为满足系统实时变化的各种能量需求,不同类型的能量可通过能量转换设备彼此转换。同时,能量储存设备可以为综合能源系统储存一定的能量,提高系统的灵活性。以冰蓄冷空调为例,其不仅可以通过制冷机将电量转换为冷量,还可以利用自身的蓄冰槽储存冷量。根据需求优化调整能量生产、能量转换和能量储存3个环节,以满足不同类型负荷的用能需求。

综合能源系统中设备具有灵活的运行方式和能量储存能力,因此其可以调整内部设备的运行状态,改变其对外界能源输入需求,从而为电力系统提供辅助服务。因此,针对综合能源系统中的冰蓄冷空调、蓄电池等设备,需要评估其能够提供的需求响应能量,通过对设备的优化调节以提供辅助服务获取补贴,从而降低综合能源系统的运行成本。

综合能源系统可以提供的辅助服务主要有调频备用和同步备用,在提供需求响应服务时,响应资源需要符合系统运营商设定的响应标准。因此,首先需要对设备的需求响应潜力进行评估,主要包括备用容量、响应时间和持续时间。美国 PJM 辅助市场中对需求侧资源最小备用容量、响应时间和持续时间有要求^[21]:需求侧资源提供调频备用时,最小备用容量为 0.1 MW,在 5 min 内响应并持续 1 h;提供同步备用时,最小备用容量 0.1 MW,在 15 min 内响应并持续 1 h。最小备用容量是单个参与者需要提供的最小响应容量;响应时间是指从接收需求响应信号到满足需求的时间间隔;持续时间是指需求响应资源可以保持备用容量或跟随需求响应信号的持续时间。尽管现阶段我国包含负荷参与的辅助服务市场建设还不够完善,但是随着电力市场改革的进一步深化,具有负荷调节能力的综合能源系统会逐渐参与到市场中来,响应电力系统的调度指令或者市场价格信号,为系统提供调峰、备用等辅助服务。

设备在实时运行过程中,只有满足响应要求时,才能提供辅助服务。为评估各设备的需求响应潜力,提出了考虑需求响应的设备运行模型,如图 2 所示。当设备提供调频备用时,主要用于平抑可再生能源的出力波动,它需要在持续时间内提供足够的上下容量,如图 2(a) 所示。当设备提供同步备用时,需要提供下调容量以解决需要削减负荷的能源短缺问题,如图 2(b) 所示。此外,设备的工作功率可能会在调频备用或同步备用的响应持续时间内发生变化。因此,需要在整个响应期间确保有足够的调频备用或同步备用容量。

2 综合能源系统设备模型

综合能源系统中包含多种设备,不同设备具有显著的响应特性差异。为准确描述设备的运行状态及需求响应潜力,本节针对不同设备,建立了考虑

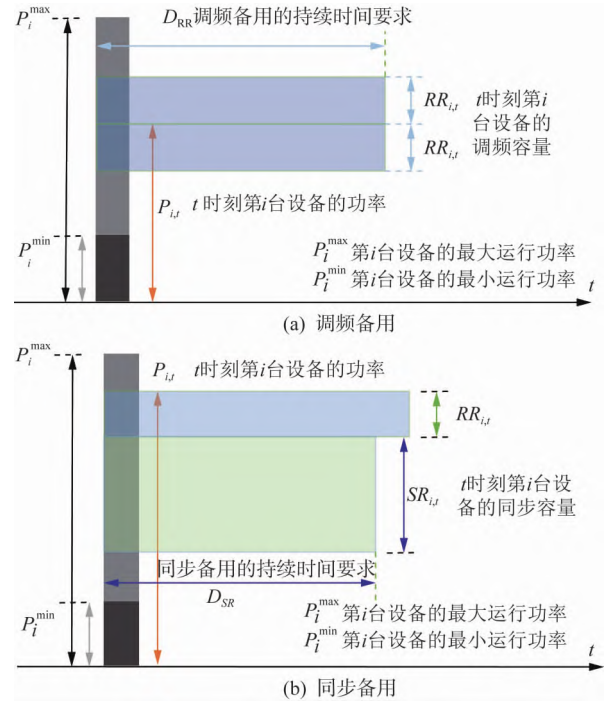


图2 设备提供辅助服务时的运行模型

Fig. 2 Operation model when equipment provides auxiliary service

需求响应的精细化模型。

2.1 冰蓄冷空调

冰蓄冷空调主要包括制冷机、制冰机和蓄冰槽 3 个组件,其运行可以分为制冰蓄冷和融冰制冷两个阶段。夜间气温低于白天,冷负荷需求较少,制冷机可以独立满足冷负荷需求。同时,夜间的电价较低,在夜间制冰蓄冷然后在白天融冰制冷,能够降低运行成本。

2.1.1 蓄冰过程

冰蓄冷空调在夜间蓄冰过程中,蓄冰槽不能同时融冰制冷,因此融冰制冷功率为 0,由制冷机满足所有的系统冷功率需求,如式(1)所示。

$$\begin{cases} Q_{e,i}^t = Q_{cooling,i}^t \\ Q_{ice,i}^t = 0 \\ S_{ice,i}^{t+1} = (1 - \sigma_{ice}) S_{ice,i}^t + \sum Q_{ice,i}^t T \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Q_{e,i}^t$ 和 $Q_{ice,i}^t$ 分别为第 i 台冰蓄冷空调在 t 时刻的制冷机制冷量和融冰制冷量; $Q_{cooling,i}^t$ 为冰蓄冷空调的总制冷量; $S_{ice,i}^{t+1}$ 和 $S_{ice,i}^t$ 分别为 t 和 $t+1$ 时刻的蓄冰量; σ_{ice} 为蓄冰槽的自损耗系数; $Q_{ice,i}^t$ 为蓄冰制冷量; T 为优化周期。

蓄冰过程中,冰蓄冷空调的功率为制冷机和制冰机的功率之和,制冷电功率、制冰电功率与冷功

率之间的关系可以表示为:

$$\begin{cases} P'_{e,i} + P'_{ice,i} = P'_{cooling,i} \\ P'_{e,i} = Q'_{e,i} / \eta'_{EER,i} \\ P'_{ice,i} = Q'_{ice,i} / I'_{icem} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P'_{e,i}$ 和 $P'_{ice,i}$ 分别为制冷机和制冰机的功率; $P'_{cooling,i}$ 为冰蓄冷空调的总功率; $\eta'_{EER,i}$ 为制冷机的能效比; I'_{icem} 为制冰机的能效比。

2.1.2 融冰过程

白天冰蓄冷空调的制冷量由制冷机和蓄冰槽融冰共同提供。根据实时的供冷需求和冰蓄冷空调的运行状态,在可调区间内,制冷功率区间可以灵活分配融冰制冷量和制冷机制冷量,如式(3)所示。

$$\begin{cases} Q'_{e,i} + Q'_{ice,i} = Q'_{cooling,i} \\ 0 \leq Q'_{e,i} \leq Q'_{e,i}^{\max} \\ 0 \leq Q'_{ice,i} \leq Q'_{ice,i}^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $Q'_{e,i}$ 和 $Q'_{ice,i}$ 分别为第 i 台冰蓄冷空调在 t 时刻的制冷机制冷量和融冰制冷量; $Q'_{e,i}^{\max}$ 和 $Q'_{ice,i}^{\max}$ 分别为制冷机的最大制冷量和融冰的最大制冷量。

$$\begin{cases} P'_{e,i} = P'_{cooling,i} \\ P'_{ice,i} = 0 \\ P'_{e,i} = Q'_{e,i} / \eta'_{EER,i} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P'_{e,i}$ 和 $P'_{ice,i}$ 分别为 t 时刻制冷机功率和制冰机的功率; $P'_{cooling,i}$ 为 t 时刻的总功率; $\eta'_{EER,i}$ 为 t 时刻制冷机的能效比。

2.1.3 冰蓄冷空调能效比

能效比是描述制冷机或者制冰机效率的指标,能效比越高,单位电量就能转换为更多的冷量。冰蓄冷空调制冰机的工作功率是恒定的,其制冰能效比可看作常量。而制冷机的功率会根据冷量需求实时调节,其能效比 η_{EER} 和负载水平密切相关,不同负载下冰蓄冷空调的效率具有显著差异。本文对冰蓄冷空调进行了部分负荷性能曲线拟合,结果如下:

$$\begin{cases} \eta_{EER} = aR_{PL}^3 + bR_{PL}^2 + cR_{PL} + d \\ R_{PL} = \frac{P_{real}}{P_{rated}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: a 、 b 、 c 和 d 分别为冰蓄冷空调能效比的拟合系数; R_{PL} 为负载比; P_{real} 和 P_{rated} 分别为制冷机的实际功率和额定功率。

从图 3 冰蓄冷空调能效比与负载率的拟合结果可以看出,在负载率小于 80% 的时候,制冷机的能

效比与负载率大致呈线性关系,随着负载率的增加,能效比也随之提高。制冷机的最高能效比能够达到 5.5,但是最低能效比只有 2.23。因此,在冰蓄冷空调制冷机制冷量和融冰制冷量的优化分配过程中,能效比是不可忽视的一个因素,应尽量保证冰蓄冷空调运行在高效区间。

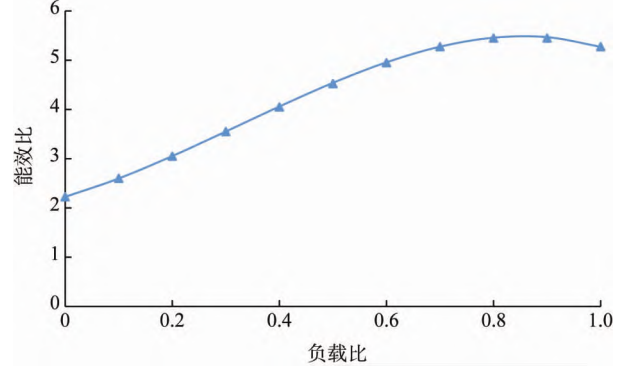


图 3 冰蓄冷空调能效比与负载率之间的关系

Fig. 3 Relationship between EER and PLR of ice-storage air-conditioner

2.1.4 备用约束

参与辅助服务市场时,冰蓄冷空调提供调频备用和同步备用的约束如式(6)所示。 t 时刻冰蓄冷空调的功率 $P'_{e,i}$ 加上同步备用容量和向上调频备用容量不能超过空调的最大功率;同时, t 时刻冰蓄冷空调的功率 $P'_{e,i}$ 减去向下调频备用容量必须大于等于最低功率。并且在冰蓄冷空调提供的调频备用容量和同步备用容量都不为负值,如式(7)所示。

$$\begin{cases} P'_{e,i} + x'_{ice,SR} \cdot S'_{SRI} + x'_{ice,RR} \cdot S'_{RRI} \leq P_I^{\max} \\ 0 \leq P'_{e,i} - x'_{ice,RR} \cdot S'_{RRI} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} S'_{RRI} \geq 0 \\ S'_{SRI} \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x'_{ice,RR}$ 和 $x'_{ice,SR}$ 为 0-1 变量,当冰蓄冷空调能够提供调频备用或者同步备用的时候值为 1; S'_{RRI} 和 S'_{SRI} 分别为 t 时刻冰蓄冷空调的调频备用容量和同步备用容量,下标 RR 表示调频备用,SR 表示同步备用; P_I^{\max} 为冰蓄冷空调的最大功率。

此外,在提供调频备用或者同步备用过程中,从响应开始到响应结束期间,冰蓄冷空调提供的调频备用容量和同步备用容量都必须保持不变,如式(8)所示。

$$\begin{cases} S'_{SRI} = S_{SRI}^{t+1} = \dots = S_{SRI}^{t+D_{SR}-1} \\ S'_{RRI} = S_{RRI}^{t+1} = \dots = S_{RRI}^{t+D_{RR}-1} \end{cases} \quad (8)$$

式中 D_{SR} 为提供辅助服务的持续时间。

2.2 燃气轮机

燃气轮机是综合能源系统中的典型能源生产设备,大多数燃气轮机都配备有余热锅炉。燃气轮机以天然气作为能源,输出电能和热能。电能和热能的生产可以表示为:

$$\begin{cases} P_G^t = \eta_G^e \cdot \lambda_{gas} \cdot F_G^t \\ H_G^t = \eta_G^h \cdot (1 - \eta_G^e) \cdot \lambda_{gas} \cdot F_G^t \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_G^t 、 H_G^t 和 F_G^t 分别为 t 时刻的发电量、供热量和天然气消耗量; η_G^e 和 η_G^h 分别为发电率和发热率; λ_{gas} 为天然气的热值。

燃气轮机参与需求响应时的约束和冰蓄冷空调类似,可参照式(6)一(8)得到,此处不再赘述。

2.3 燃气锅炉

燃气锅炉是综合能源系统中重要的能源转换设备,燃气锅炉以天然气为能量来源,产生热蒸汽从而满足综合能源系统的热负荷需求,其产热功率可以表示为:

$$H_{GB,i}^t = \eta_{GB} \cdot \lambda_{gas} \cdot F_{GB,i}^t \quad (10)$$

式中: $H_{GB,i}^t$ 为燃气锅炉的产热量; η_{GB} 为燃气锅炉的效率; $F_{GB,i}^t$ 为天然气消耗速率。

燃气锅炉既不消耗也不产生电能,不能提供辅助服务。通过优化其运行时间,可以补充其他设备由于提供辅助服务而减少的热量供应。

2.4 吸收式制冷机

吸收式制冷机将热量转化为冷量,可以有效利用能源生产过程中的余热,补充综合能源系统的冷负荷需求。吸收式制冷机的制冷功率和吸热量成正比,如式(11)所示^[22]。

$$Q_{AR,i}^t = \eta_{AR} \cdot H_{AR,i}^t \quad (11)$$

式中: $Q_{AR,i}^t$ 和 $H_{AR,i}^t$ 分别为 t 时刻第 i 台吸收式制冷机的制冷功率和耗热功率; η_{AR} 为吸收式制冷机的转换效率。

吸收式制冷机既可以作为综合能源系统供冷的补充,也可以为电力系统提供辅助服务,其参与需求响应的约束可以参照式(6)一(8)得到。

2.5 蓄电池

能量存储设备可以存储能量,并在需要时释放能量,打破能量供需同时性的限制。以蓄电池为例,蓄电池的放电和充电过程可以表示为:

$$\begin{cases} S^{t+1} = (1 - \sigma) \cdot S^t + (\eta_s \cdot P_s^t - P_r^t / \eta_r) \cdot T \\ S^{\min} \leq S^t \leq S^{\max} \\ S^{\text{start}} = S^{\text{end}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: S^t 为 t 时刻的存储容量; T 为仿真步长; P_s^t 和 P_r^t 分别为 t 时刻的放电和充电速率; σ 为电能损耗率; η_s 和 η_r 分别为充电和放电速率; S^{\max} 和 S^{\min} 分别为最大和最小存储容量; S^{start} 和 S^{end} 分别为蓄电池在初始时刻和结束时刻的存储容量。

在蓄电池充放电过程中,充放电速率不能超过最大值,其约束可表示为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_s^t \leq \gamma_s^t \cdot P_s^{\max} \\ 0 \leq P_r^t \leq \gamma_r^t \cdot P_r^{\max} \\ 0 \leq \gamma_s^t + \gamma_r^t \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中: γ_s^t 和 γ_r^t 均为 $0-1$ 变量,当电池在 t 时刻处于充电过程时 $\gamma_s^t = 1$, $\gamma_r^t = 0$,处于放电过程时 $\gamma_s^t = 0$, $\gamma_r^t = 1$; P_s^{\max} 和 P_r^{\max} 分别为最大充电和最大放电速率。

为保证在提供需求响应服务的持续时间内都能够提供足够的同步备用和调频备用容量,避免在响应未结束时电池就无法提供响应容量,因此电池的实时电量不能超过最大和最小电量,其约束可表示为:

$$\begin{cases} S_{\text{down}}^t = (1 - \sigma) D \cdot S^t - \sum_{j=t}^{j=t+D-1} (1 - \sigma)^{t+D-1-j} \cdot \frac{P_r^j + S_{RRs}^j + S_{SRs}^j}{\eta_r} \cdot T \\ S_{\text{up}}^t = (1 - \sigma) D \cdot S^t + \sum_{j=t}^{j=t+D-1} (1 - \sigma)^{t+D-1-j} \cdot \eta_s \cdot (P_s^j + S_{RRs}^j) \cdot T \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} D = \max(D_{SR}, D_{RR}) \\ S^{\min} \leq S_{\text{down}}^t \\ S_{\text{up}}^t \leq S^{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中: D 为参与需求响应要求的持续时间; D_{SR} 和 D_{RR} 分别为同步备用和调频备用的持续时间; S_{down}^t 和 S_{up}^t 分别为蓄电池在 $t+D$ 时刻的最大电量和最小电量。 S_{RRs}^j 和 S_{SRs}^j 分别为蓄电池提供的调频备用和同步备用容量。

3 市场环境下综合能源系统优化运行模型

基于以上考虑需求响应的设备模型,本节提出综合能源系统的最优运行模型。然后,对部分非线性约束进行线性化处理,以降低计算难度。最后,通过求解线性化后形成的整数线性规划问题,获得最优运行结果。

3.1 优化目标

模型的目标函数是使综合能源系统的运行成本最低, 包括能源购买成本 C_{en}^t (电力、天然气和蒸汽的购买成本)、设备运行和维护成本 C_{om}^t 、需求响应服务收入 I_{dr}^t 和需求响应服务成本 C_{dr}^t 。

$$\min f = \sum_t (C_{en}^t + C_{om}^t - I_{dr}^t + C_{dr}^t) \cdot T \quad (16)$$

$$\begin{cases} C_{en}^t = P_{buy}^t \cdot \xi_e^t + \sum F^t \cdot \xi_{gas} + H_{buy}^t \cdot \xi_{steam} \\ C_{om}^t = \sum P^t \cdot \xi_{om} \\ I_{dr}^t = \sum (S_{SR}^t \cdot \xi_{e,SR}^t + S_{RR}^t \cdot \xi_{e,RR}^t) \\ C_{dr}^t = \sum (S_{SR}^t \cdot \xi_{c,SR}^t + S_{RR}^t \cdot \xi_{c,RR}^t) \end{cases} \quad (17)$$

式中: ξ 为单位价格或单位成本; T 为仿真步长; P_{buy}^t 和 H_{buy}^t 分别为从外部电网传输的电量和从外部加热网购买的蒸汽量。其中下标 e 表示电力, gas 表示燃气, $steam$ 表示蒸汽; $\xi_{c,SR}$ 、 $\xi_{c,RR}$ 分别为同步备用和调频备用的单位价格。

3.2 约束条件

综合能源系统的运行除了受电力系统约束, 供热系统约束, 制冷系统约束, 系统中各组件还需要满足文章第 2 节“综合能源系统设备模型”中所述的运行约束。

如式(18)所示, 综合能源系统产生的电力和购买的电力之和应始终等于电力消耗。同时, 综合能源系统中通常同时存在交流系统和直流系统。式(18)为交流系统约束, 式(19)为直流系统约束。式(20)表示这两个系统之间的转换。

$$P_{buy}^t + \sum P_G^t = \sum P_{cooling,i}^t + \sum P_{AC}^t + L_{ac}^t + P_{ac-dc}^t \quad (18)$$

$$P_{dc}^t + \sum P_{G,dc}^t = L_{dc}^t + \sum (P_s^t - P_r^t) \quad (19)$$

$$P_{ac-dc}^t = \begin{cases} \eta_{ac-dc} \cdot P_{dc}^t, P_{dc}^t \geq 0 \\ \eta_{dc-ac} \cdot P_{dc}^t, P_{dc}^t < 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中: P_{AC}^t 为空调的功率; P_{ac-dc}^t 为交流-直流转换的功率, 大于零表示交流向直流转换, 小于零表示直流向交流转换; P_{dc}^t 为由交流系统转换得到的直流功率; L_{ac}^t 和 L_{dc}^t 分别为交流和直流负载; η_{ac-dc} 和 η_{dc-ac} 分别为交流到直流和直流到交流的转换比; $P_{G,dc}^t$ 为直流系统中的分布式光伏等发电设备。

系统的热量应满足热水、蒸汽、空间加热以及吸收式制冷机的需求。冷却能量主要满足部分设备的冷却需求和空间冷却。因此, 供热和冷却系统的约束可以分别表示为:

$$H_{buy}^t + \sum H_G^t - \sum (H_s^t - H_r^t) = \sum (H_{steam}^t + H_{space}^t + H_{water}^t + H_{AR}^t) \quad (21)$$

$$\sum Q_{AR,i}^t + \sum Q_{cooling,i}^t = Q_{load}^t + Q_{space}^t \quad (22)$$

式中: H_s^t 和 H_r^t 分别为储热装置在 t 时刻储存和释放热量的速率; H_{steam}^t 、 H_{space}^t 和 H_{water}^t 分别为 t 时刻系统的蒸汽需求、热量需求和热水需求; Q_{load}^t 和 Q_{space}^t 分别为系统在 t 时刻的设备冷却能量需求和制冷需求。

3.3 求解方法

由于设备参与需求响应的过程中存在非线性约束, 求解难度较大, 因此, 本文采用大 M 法对约束进行线性化处理。大 M 法能够将包含 0-1 变量非线性约束线性化, 通过引入人为设定的 M 值, 在 0-1 变量的取值为 0 或 1 时, 分别松弛掉两个互补条件中不起作用的一个条件^[23]。以式(6)为例, 使用大 M 法可以将其转换为式(23)。

$$\begin{cases} P_e^t + S_{SRI}^t + S_{RRI}^t \leq P_1^{\max} \\ 0 \leq P_e^t - S_{RRI}^t \\ S_{SRI}^t \leq x_{ice,SR}^t \cdot M \\ S_{RRI}^t \leq x_{ice,RR}^t \cdot M \end{cases} \quad (23)$$

式中 M 为一个非常大的正整数。其余各式的非线性约束, 可以通过类似的方法转换成线性约束, 此处不再赘述。

式(20)为分段函数, 可以用以下线性表达式替换。

$$\begin{cases} -(1 - x_{dc}) \cdot M \leq P_{dc}^t \leq x_{dc} \cdot M \\ \eta_{ac-dc} \cdot P_{dc}^t - (1 - x_{dc}) \cdot M \leq P_{ac-dc}^t \\ P_{ac-dc}^t \leq \eta_{ac-dc} \cdot P_{dc}^t + (1 - x_{dc}) \cdot M \\ \eta_{ac-dc} \cdot P_{dc}^t - x_{dc} \cdot M \leq P_{ac-dc}^t \\ P_{ac-dc}^t \leq \eta_{ac-dc} \cdot P_{dc}^t + x_{dc} \cdot M \end{cases} \quad (24)$$

式中 x_{dc} 为一个 0-1 变量, 当 P_{dc}^t 大于 0 时为 1, 反之其值为 0。

4 算例分析

基于第 3 节给出的设备需求响应模型和求解方法, 本文以中国广州某工厂为研究对象, 建立了含冰蓄冷空调的综合能源系统模型, 并利用美国 PJM 市场中的实际数据进行了仿真分析^[24]。综合能源系统中各设备的相关参数如表 1 所示, 每日的交流

负荷和直流负荷如图4所示,每日的冷负荷和热负荷的需求如图5所示。

表2中列出了综合能源系统内部可以提供不同类型需求响应的设备,其中Y和N分别表示设备可以提供或不能提供相应的辅助服务。

表1 综合能源系统设备参数

Tab. 1 Equipment parameters of integrated energy system

设备名称	参数名称	取值
冰蓄冷空调	制冷机最大功率/kW	600
	蓄冰槽制冷能效比	3
	蓄冰槽融冰效率	0.9
燃气轮机	最大发电功率/MW	1
	最小发电功率/kW	50
	发电效率	0.33
燃气锅炉	最大输出功率/MW	1
	供热效率	0.9
吸收式制冷机	最大耗热功率/MW	1
	制冷能效比	0.8
蓄电池	最大充/放电功率/MW	2
	充/放电效率	0.9
	容量/MWh	1
	初始荷能状态/kWh	600

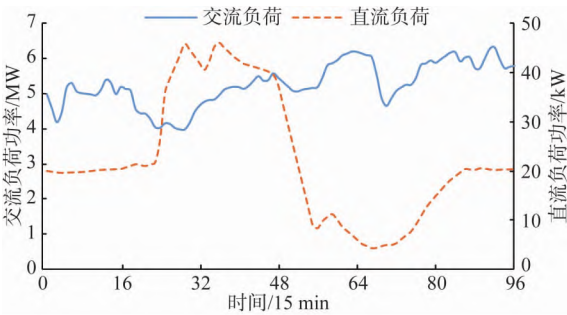


图4 综合能源系统的日交流直流负荷曲线

Fig. 4 AC/DC load curves of integrated energy system

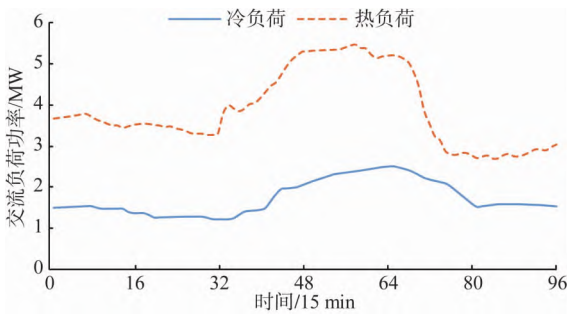


图5 综合能源系统的日冷热负荷曲线

Fig. 5 Daily cooling and heating load curves of integrated energy system

表2 综合能源系统设备及需求响应能力

Tab. 2 Components of the IES and their DR ability

设备名称	调频备用	同步备用
燃气轮机及余热锅炉	N	Y
燃气锅炉	N	N
分布式光伏	N	N
吸收式制冷机	Y	Y
电池系统	Y	Y
冰蓄冷空调	Y	Y

图6展示了2020年6月2日PJM数据中的电价,调频备用的价格和同步备用的价格^[25]。并将天然气价格设定为5美元/千立方英尺,蒸汽价格设置为5美元/千立方英尺(1立方英尺约为0.028 317 m³)。仿真的优化步长设置为15 min。

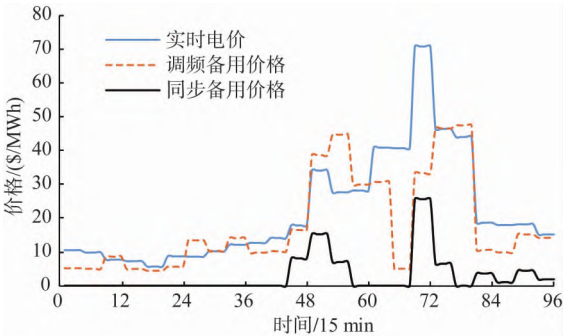


图6 实时电价、调频备用价格和同步备用价格

Fig. 6 Real time electricity prices, RR prices and SR prices

图7为综合能源系统内部的交流侧电量、直流侧电量、冷量和热量的生产及消耗情况。从图7(a)和(b)中可以看出,在49—80时段内,电价相对较高。为降低综合能源系统的购电费用,交流侧的燃气轮机开始工作,同时直流侧的电池开始放电以满足系统用电需求。从图7(c)中可以看出,冰蓄冷空调也降低了用电功率,减少的制冷量由融冰制冷和吸收式制冷机共同补充以满足系统需求。图7(d)中余热锅炉随着燃气轮机的启动也开始产生热量,因此系统的购热量也随之降低。

图8为冰蓄冷空调的运行情况,从图中可以看出,在1—40时段,此时电价最低,为冰蓄冷空调的蓄冰过程,因此融冰制冷量小于0,此时冰蓄冷空调的制冷量全部由制冷机提供。在40—84时段,冷负荷需求较高,同时电价也高于夜间,因此蓄冰槽开始融冰制冷,和制冷机联合满足冷负荷需求。在考虑不同负载率下制冷机的能效比差异显著的情况下,制冷机一直维持在相对稳定的功率,因此能

效比也一直维持在较高水平。

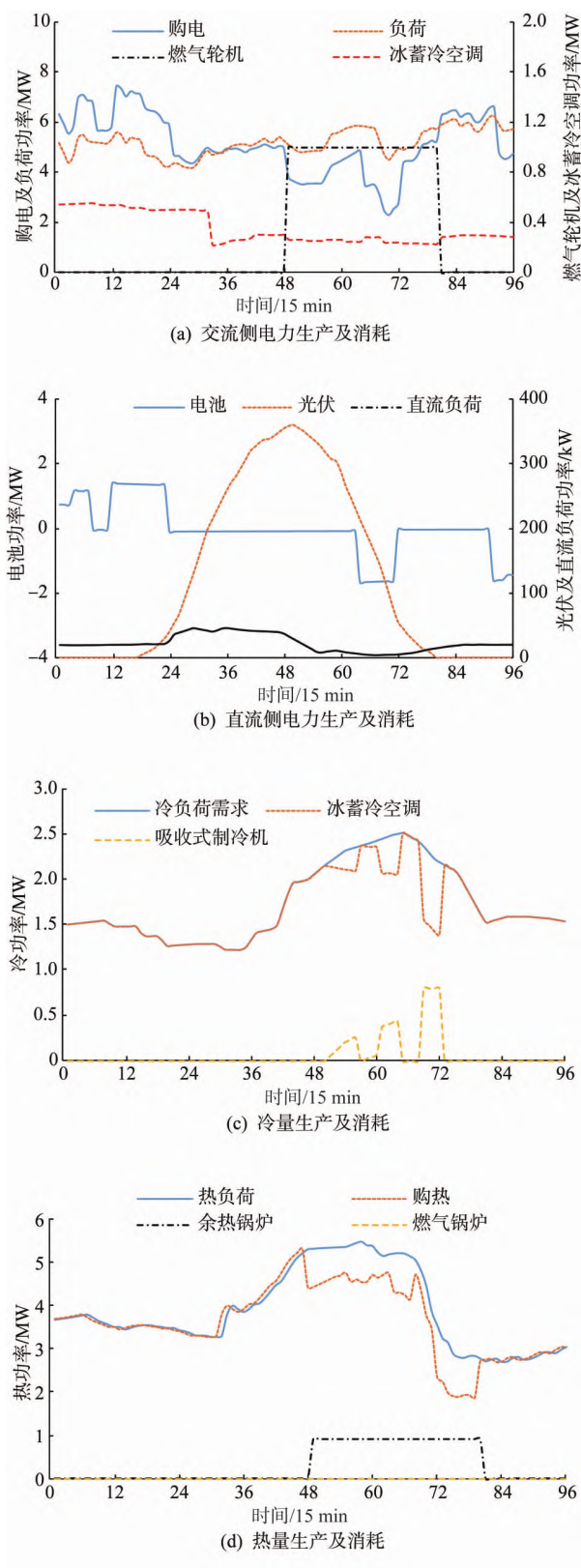


图7 综合能源系统优化运行结果

Fig. 7 Optimized operation results of integrated energy system

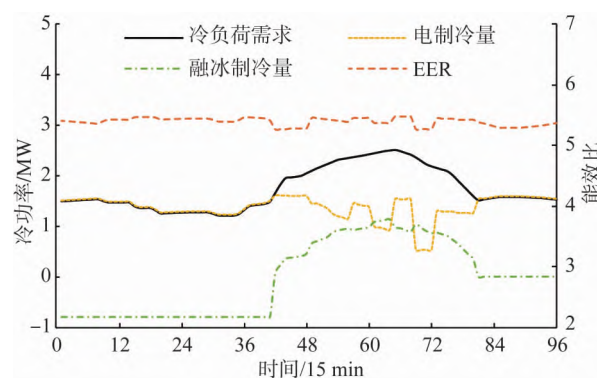


图8 冰蓄冷空调运行情况

Fig. 8 Operation status of ice-storage air-conditioning

图9为冰蓄冷空调和电池的辅助服务提供情况。冰蓄冷空调可以同时提供调频备用和同步备用，空调会根据实时的调频备用和同步备用价格调整制冷机制冷量和融冰制冷量。在50—56时段，调频备用价格较高，因此冰蓄冷空调降低电功率，增加融冰量满足系统需求，从而增加调频备用。例如在64—67时段，调频备用价格大幅降低，因此制冷机增加功率减少调频备用，减少融冰量以用在随后需要降低制冷机功率的时期。

表3为冰蓄冷空调优化前后的运行费用对比。从表中可以看出，冰蓄冷空调运行优化后，购电费用从原本的278美元上升至282美元，增加了4美元。这是由于在提供辅助服务时，冰蓄冷空调需要实时调整电制冷量和融冰制冷量，导致效率稍有降低。但是通过提供调频备用和同步备用服务，冰蓄冷空调分别获得了115美元和24美元的收益，使得最终运行成本从278美元下降为153美元，大幅降低了冰蓄冷空调的运行成本。

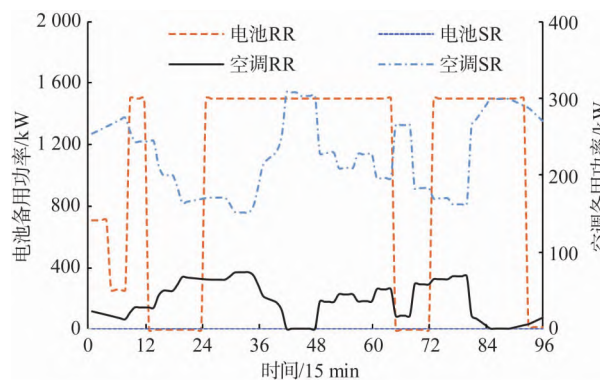


图9 冰蓄冷空调和电池的辅助服务提供情况

Fig. 9 Ancillary services provided by ice storage air-conditioning and battery system

表3 冰蓄冷空调优化前后运行费用

Tab. 3 Operation cost of ice-storage air-conditioner before and after optimization 美元

费用类别	购电费用	调频备用收益	同步备用收益	总费用
优化前	278	0	0	278
优化后	282	115	24	153

电池相较于冰蓄冷空调,主要提供调频备用。在11—12时段,由于调频备用价格突然增加,电池的充电功率迅速从1.14 MW下降到0,将调频备用从270 kW迅速提升到了1 500 kW。在65—69时段,调频备用价格大幅下降,电池也随之将调频备用功率降为0。但是在提供辅助服务期间,电池不会完全充满电或者用完电,需要一直为调频备用保留一定的余量。

参与辅助服务可以为电力系统提供更多可调节的容量,并减少综合能源系统的运营成本。表4为综合能源系统优化前后的运行费用对比,综合能源系统运行成本从3 762美元降低至3 160美元,降低了16%。和冰蓄冷空调类似,优化前后系统的购电和购热费用几乎没有差别。系统运行总费用的降低主要来自于提供同步备用和调频备用获得的收益。

表4 综合能源系统优化前后运行费用

Tab. 4 Operation cost of IES before and after optimization 美元

费用类别	优化前	优化后
购电总费用	2 232	2 236
购热总费用	1 530	1 534
同步备用收益	0	577
调频备用收益	0	33
运行总费用	3 762	3 160

5 结语

综合能源系统的最优运行在消纳可再生能源和提高能源效率方面发挥着重要作用。为降低综合能源系统运营成本并促进其发展,本文充分发掘了冰蓄冷空调的调度潜力,通过优化冰蓄冷空调的电制冷量和融冰制冷量,提高了综合能源系统的需求响应容量。仿真结果表明,市场环境下综合能源系统能够根据实时的电价、调频备用价格和同步备用价格,调度系统内各设备以实现系统最优运行。经过优化,综合能源系统中冰蓄冷空调的运行成本降低

了45%,系统运行成本降幅也达到了16%,具有显著的经济效益。

参考文献

- [1] 朱继忠,何晨可,陈婧韵,等. 综合能源系统环境下电动汽车充换电设施规划综述[J]. 南方电网技术, 2022, 16(1): 14-32.
ZHU Jizhong, HE Chenke, CHEN Jingyun, et al. Overview of electric vehicle charging and swapping facilities planning under the environment of integrated energy system [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 14-32.
- [2] 汤翔鹰,胡炎,耿琪,等. 考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 81-90.
TANG Xiangying, HU Yan, GENG Qi, et al. Multi-time-scale optimal scheduling of integrated energy system considering multi-energy flexibility [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 81-90.
- [3] 陈皓勇,陈思敏,陈锦彬,等. 面向综合能源系统建模与分析的能量网络理论[J]. 南方电网技术, 2020, 14(2): 62-74.
CHEN Haoyong, CHEN Simin, CHEN Jinbin, et al. Energy network theory for modeling and analysis of integrated energy systems [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(2): 62-74.
- [4] 邹嘉嘉,张小辉,黄学劲,等. 考虑负荷不确定性与运行可靠性的综合能源系统资产利用效率分析[J]. 南方电网技术, 2021, 15(2): 56-63.
XUN Jiajia, ZHANG Xiaohui, HUANG Xuejin, et al. Asset utilization efficiency analysis of integrated energy system considering load uncertainty and operation reliability [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(2): 56-63.
- [5] 郑涛,戴则梅,姚家豪,等. 综合能源系统控制自由度指标及其对经济调度的影响[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 94-106, 118.
ZHENG Tao, DAI Zemei, YAO Jiahao, et al. Control freedom index of integrated energy system and its impact on economic dispatch [J]. Electric Power, 2021, 54(4): 94-106, 118.
- [6] 廖宗毅,万文略,陈曦. 考虑价格引导机制的园区综合能源系统日前优化调度方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(9): 53-60.
LIAO Zongyi, WAN Wenlue, CHEN Xi. Day-ahead optimal scheduling method of park integrated energy system considering price guidance mechanism [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(9): 53-60.
- [7] 王昀,谢海鹏,孙啸天,等. 计及激励型综合需求响应的电-热综合能源系统日前经济调度[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1926-1934.
WANG Yun, XIE Haipeng, SUN Xiaotian, et al. Day-ahead economic dispatch for electricity-heating integrated energy system considering incentive integrated demand response [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1926-1934.
- [8] 李鹏,吴迪凡,李雨薇,等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1307-1321.

- LI Peng, WU Difan, LI Yuwei, et al. Optimal dispatch of multi-microgrids integrated energy system based on integrated demand response and stackelberg game [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1307–1321.
- [9] 湖南睿日光伏. 100% 绿电供应大兴机场成为全球绿色能源新地标 [EB/OL]. (2019-10-14). https://www.sohu.com/a/346905110_100038373.
- [10] 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 Binggen, 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.
- [11] BAO M, DING Y, SINGH C, et al. A multi-state model for reliability assessment of integrated gas and power systems utilizing universal generating function techniques [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6271–6283.
- [12] 陈晚晴, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 考虑设备变工况特性的区域综合能源系统优化调度方法 [J]. 电网技术, 2021, 45(3): 951–958.
- CHEN Wanqing, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Operation optimization method for regional integrated energy system considering part-load performances of devices [J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 951–958.
- [13] HUI H, DING Y, SHI Q, et al. 5G network-based Internet of Things for demand response in smart grid: A survey on application potential [J]. Applied Energy, 2020(257): 113972.
- [14] 国家能源局山东监管办公室. 山东能源监管办关于《山东电力辅助服务市场运营规则(试行)(2021年修订版)(征求意见稿)》公开征求意见的公告 [EB/OL]. (2021-07-21). http://www.cnea.gov.cn/tzgg/content_6873.
- [15] 国家能源局江苏监管办公室. 关于印发《江苏电力市场用户可调负荷参与辅助服务市场交易规则(试行)》的通知 [EB/OL]. (2020-11-10). <http://jsb.nea.gov.cn/news/2020-11/20201110100742.htm>.
- [16] 新华网. 浙江开展负荷响应专项市场试点交易 [EB/OL]. http://www.zj.xinhuanet.com/2021-09/06/c_1127833292.htm, 2021.
- [17] 徐笑强, 陈振乾. 基于负荷预测的冰蓄冷空调系统优化运行 [J]. 建筑热能通风空调, 2018, 37(1): 1–5, 10.
- XU Xiaoqiang, CHEN Zhenqian. Study on economic optimal control strategy of ice storage air-conditioning system based on neural network prediction [J]. Building Energy & Environment, 2018, 37(1): 1–5, 10.
- [18] 丁庆, 段绍辉, 王执中, 等. 冰蓄冷空调在高峰谷负荷差地区应用的经济性 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 28(1): 72–75, 80.
- DING Qing, DUAN Shaohui, WANG Zhizhong, et al. Economy of ice-storage air-condition used in the area of high peak-valley load difference [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2014, 28(1): 72–75, 80.
- [19] 程杉, 黄天力, 魏荣宗. 含冰蓄冷空调的冷热电联供型微网多时间尺度优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 30–38.
- CHENG Shan, HUANG Tianli, WEI Rongzong. Multi-time-scale optimal scheduling of echp microgrid with ice-storage air-conditioning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 30–38.
- [20] 孙可, 何德, 李春筱, 等. 考虑冰蓄冷空调多模式的工厂综合能源系统多能协同优化模型 [J]. 电力建设, 2017, 38(12): 12–19.
- SUN Ke, HE De, LI Chunxiao, et al. Multi-energy cooperative optimization model of factory ies considering multi-model of ice storage [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(12): 12–19.
- [21] PJM. Day-ahead and real-time market operations [Z]//PJM. PJM Manual 11: Energy & Ancillary Service Market Operations. Pennsylvania: PJM, 2019.
- [22] 徐航, 董树锋, 何仲潇, 等. 考虑能量梯级利用的工厂综合能源系统多能协同优化 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 123–130.
- XU Hang, DONG Shufeng, HE Zhongxiao, et al. Multi-energy cooperative optimization of integrated energy system in plant considering stepped utilization of energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 123–130.
- [23] 丁涛, 孙宏斌, 柏瑞, 等. 考虑最大风电容量接入的带禁止区间实时经济调度模型 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 759–765.
- DING Tao, SUN Hongbin, BO Rui, et al. Real-time economic dispatch model with prohibited zones considering maximum wind power injection [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 759–765.
- [24] 何仲潇. 多能协同的综合能源系统协调调度方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [25] PJM. Markets & operations [EB/OL]. (2020-05-13). <https://pjm.com/markets-and-operations.aspx>.

收稿日期: 2021-10-21

作者简介:

孙轶恺(1988), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为储能技术、综合能源系统, sunyikai@zj.sgcc.com.cn;

漆淘懿(1998), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为需求管理、储能技术, qty_sgoal@163.com;

张利军(1973), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制, zhanglijun@zj.sgcc.com.cn。