

用户侧综合能源系统中能源储能优化配置模型研究

徐海华¹,王旭东²,朱星阳¹,赵杨阳¹,高赐威²

(1. 国网(苏州)城市能源研究院,江苏 苏州 215163;

2. 东南大学 电气工程学院,南京 210096)

Research on the optimal configuration of energy storage in user side integrated energy system

XU Haihua¹, WANG Xudong², ZHU Xingyang¹, ZHAO Yangyang¹, GAO Ciwei²

(1. State Grid (Suzhou) City & Energy Research Institute, Suzhou 215163, China; 2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

摘要:综合能源系统(integrated energy system, IES)是解决现今能源领域问题的有效方案,气、电、热、冷等多种形式的储能作为 IES 的重要组成部分,在其中扮演着重要角色。提出一种广泛适用多种 IES 架构的综合储能优化配置模型,并对模型的通用性进行分析。首先,建立用户侧 IES 的通用模型,可涵盖 IES 的各种具体架构;其次,在用户侧 IES 通用模型的基础上建立综合储能优化配置模型,使配置模型可适用于多种 IES 架构。模型以系统寿命周期内的等年值总成本最小为目标,决策各种储能的配置容量和功率;最后,以某商业建筑 IES 为研究对象进行算例分析,并对优化配置模型在其他场景中的通用性进行分析,结果表明:所提模型可以应用于多种架构的 IES,解决不同场景中综合储能的优化配置问题,在使用上具有通用性。

关键词:用户侧综合能源系统;综合储能;优化配置;通用模型

Abstract: Integrated energy system is an effective solution to solve the problems in the current energy field. Gas, electricity, heat, cold and other forms of energy storage play important roles in IES. An integrated energy storage optimization configuration model is proposed, which can be widely applied to multiple IES architectures. The universality of the model is also analyzed. Firstly, a universal model of user side IES is established. Secondly, based on the universal model of IES, an integrated energy storage optimization configuration model is established to make the configuration model applicable to various IES architectures. Aimed at minimizing the annual cost of system life cycle, the model determines the configuration capacity and power of various energy storage. Finally, a case study of IES in a commercial building is analyzed. And the universality of the optimization configuration model in other scenarios is analyzed. The result shows that the proposed model can be applied to IES of multiple architectures to solve the problem of optimal configuration of integrated energy storage in different scenarios.

Key words: user side integrated energy system; integrated energy storage; optimal configuration; universal model

0 引言

21 世纪以来,能源领域面临环境污染、用能效率低、安全性等诸多问题的挑战^[1]。以多能互联、互通、互济为特征的综合能源系统(integrated energy system, IES)通过有机协调多种能源的生产、转换、传输、存储以及消费,可以有效提高传统一次能源的利用效率,提高社会供用能系统的安全性和自愈能力^[2-3],是未来能源系统发展的重要方向。

气、电、热、冷等多种形式的储能装置作为 IES 的重要组成部分,在其中扮演着重要角色。储能可以实现 IES 中多种能量的联合调度,降低系统的运

行成本^[4-6];可以解耦能量的生产和消耗,提高可再生能源的消纳比例^[7-8];可以平抑可再生能源和用户负荷的波动性,维持系统的安全可靠运行^[9]。因此,研究 IES 中综合储能的优化配置方法,对于发挥综合储能各方面的作用具有重要意义。

针对 IES 中储能配置的研究,主要以提升系统运行经济性、平抑可再生能源功率波动、提高可再生能源消纳比例等为目标。涉及电储能优化配置的研究中,文献[10]在两部制分时电价的背景下,考虑用户侧储能的削峰收益和峰谷套利收益,利用双层规划决策电储能的配置和调度运行,可为用户带来可观的收益。文献[11]—文献[12]在分析风电功率波动特性的基础上,通过配置能量型和功率型混合储能系统,有效平滑了风电出力的波动;文献[13]将蓄电池与超级电容器结合的混合储能方式应用于园区 IES,基于能量集线器模型进行储能配置,有效提升了光伏的总利用率;文献[14]则进

收稿日期:2019-10-11;修回日期:2020-01-17

基金项目:国网(苏州)城市能源研究院研究项目(CECYJS1900006)

This work is supported by Research Project of State Grid(Suzhou) City & Energy Research Institute(No.CECYJS1900006)

行多目标优化配置,在含光伏的微网中引入电储能,并考虑系统参与需求响应的收益,以光伏发电消纳比率最大和系统综合收益最大为目标,对储能的配置容量和运行调度进行优化。近年来,随着显热和相变等储热技术的发展,越来越多的学者对IES中电热冷综合储能的配置进行研究,通过多能互补和多能流的协调调度,降低系统的运行成本。文献[15]考虑用能端和供能端的电能替代,对用户侧IES中的电热冷储能进行优化配置;文献[16]—文献[17]在分析电热冷储能应用场景和盈利策略的基础上,利用双层规划求解IES中综合储能最优的配置容量和典型日的运行调度,结果表明综合储能相比单一电储能更能提升系统的经济性;文献[18]—文献[19]在常见的综合能源微网中引入电转气设备,并进一步研究电、热、气储能的优化配置,分析电转气技术对储能配置的影响。

以上文献探讨了IES中电热冷等综合储能在降低系统用能成本、平抑功率波动、提高可再生能源消纳比例等方面的应用,并对具体应用场景中综合储能的优化配置进行研究,取得了一定进展,然而上述对综合储能配置的研究大多基于IES的具体架构进行,IES中的设备也都十分具体,解决的是综合储能优化配置的具体问题。IES是协调多种能源生产、转换、传输、存储以及消费的能源一体化系统,如何从综合能源的概念出发探究综合储能对于IES中多能互补和多能流协调调度发挥的作用,构建一个普适通用的IES综合储能优化配置模型,还值得进一步的研究。

针对上述问题,本文提出了一种广泛适用多种IES架构的用户侧IES综合储能优化配置通用模型。首先,从综合能源的概念出发建立用户侧IES的通用模型;其次,在IES通用模型的基础上建立用户侧IES综合储能优化配置模型,考虑储能容量和功率约束、能量供需平衡约束、储能单元约束、能量转换单元约束、与能源供应商交互功率约束,以系统生命周期内的等年值总成本最小为目标,决策IES内各种储能装置最优配置的容量和功率;再次,以商业建筑为应用场景,将优化配置通用模型具体化,对商业建筑中的电热冷储能进行配置,说明模型在场景中的适用性;最后,对优化配置模型在其他场景中的适用性进行分析,说明模型的通用性。

1 用户侧IES的通用模型

用户侧IES的典型物理架构如图1所示^[20]。根据IES中能量生产、转换、传输、存储、消费等环节,

可将系统中的各类设备划分成不同的单元^[15]。能量生产单元主要包括光伏发电、地采暖等分布式的发电、产热设备,可独立于大型能源供应商之外向用户供应能量;能量转换单元主要包括冷热电三联供机组、空调、热泵、电制冷机、吸收式制冷机等设备,可实现气、电、热、冷等多种能量的转换;能量传输单元指各类能源的传输管道;储能单元主要包括储气罐、蓄电池、储热罐等多种能量存储设备;用能单元指对能源有需求的终端用户。

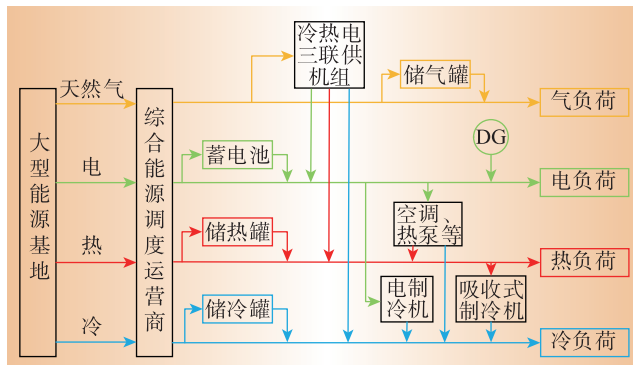


图1 用户侧IES的典型物理架构

Fig. 1 Typical structure of IES in user side

图1所示的用户侧IES包含具体的能量形式和系统设备,建立一个更具一般性的IES模型需要对其进行抽象处理。根据前文分析,用户侧IES中的设备可按功能划分成不同的单元,因此可用能量生产单元、能量转换单元、储能单元、用能单元等抽象的模块代替IES中各种具体的系统设备。IES包含的能量形式也应具有一般性。按此方法,可建立如图2所示的用户侧IES通用模型。模型包含 N 种能量形式,从能量1至能量 N 能量的品位依次降低,并假设能量只能从高品位向低品位转变。

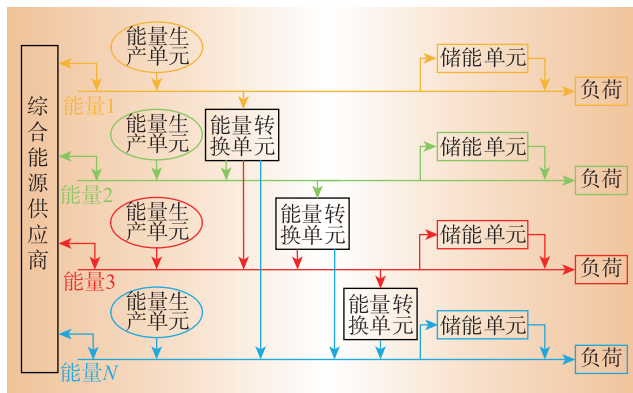


图2 用户侧IES的通用模型

Fig. 2 Universal model of IES in user side

2 用户侧IES综合储能优化配置模型

用户侧IES综合储能的优化配置可描述为,给

定各类能源的价格曲线和用户的用能曲线,在满足用户各类能源需求的前提下,以系统经济性最优为目标,优化决策各类储能的容量和功率配置以及各设备的运行调度方案。

2.1 目标函数

假设综合储能系统的寿命周期为 T 年,基准折现率为 i_0 ,优化配置以系统寿命周期内的等年值总成本最小为目标,包括储能全寿命周期的等年值成本和用户一年内购买能源的成本。

$$\min Cost = C_{LCC} + C_{int} \quad (1)$$

式中: C_{LCC} 为储能全寿命周期的等年值成本; C_{int} 为用户一年内从能源供应商购买能源的成本。

2.1.1 储能全寿命周期的等年值成本

根据储能的全寿命周期成本理论^[12],将储能购置、运行、报废阶段的各项成本等年值化,计算储能全寿命周期的等年值成本。

$$C_{LCC} = C_{inv} + C_{aux} + C_{om} + C_{rep} + C_{scr} - C_{res} \quad (2)$$

式中: C_{inv} 为等年值初始投资成本; C_{aux} 为等年值辅助设备成本; C_{om} 为运行维护成本; C_{rep} 为等年值置换成本; C_{scr} 为等年值报废处理成本; C_{res} 为回收残值。

(1) 购置阶段

等年值初始投资成本

$$C_{inv} = \sum_{s=1}^N C_{inv,s} = \sum_{s=1}^N (C_{einv,s} E_s + C_{pinv,s} P_s) \frac{i_0(1+i_0)^T}{(1+i_0)^T - 1} \quad (3)$$

式中: $C_{inv,s}$ 为第 s 种储能装置的等年值初始投资成本; E_s 和 P_s 分别为第 s 种储能装置配置的容量和功率; $C_{einv,s}$ 和 $C_{pinv,s}$ 分别为第 s 种储能装置的单位容量投资成本和单位功率投资成本。

等年值辅助设备成本

$$C_{aux} = \sum_{s=1}^N C_{aux,s} = \sum_{s=1}^N C_{eaux,s} E_s \frac{i_0(1+i_0)^T}{(1+i_0)^T - 1} \quad (4)$$

式中: $C_{aux,s}$ 为第 s 种储能装置的等年值辅助设备成本; $C_{eaux,s}$ 为第 s 种储能装置的单位容量辅助设备成本。

(2) 运行阶段

运行维护成本

$$C_{om} = \sum_{s=1}^N C_{om,s} = \sum_{s=1}^N \left(C_{pom,s} P_s + \sum_{t=1}^{8760} C_{com,s} W_{ch,s}(t) \eta_{ch,s} \right) \quad (5)$$

式中: $C_{om,s}$ 为第 s 种储能装置的运行维护成本; $C_{pom,s}$ 和 $C_{com,s}$ 分别为第 s 种储能装置的单位功率和单位容量运维成本; $W_{ch,s}(t)$ 为第 s 种储能装置在 t 时段的充能量; $\eta_{ch,s}$ 为第 s 种储能装置的充能效率。

等年值置换成本

$$C_{rep} = \sum_{s=1}^N C_{rep,s} = \sum_{s=1}^N \left(\frac{i_0(1+i_0)^T}{(1+i_0)^T - 1} \sum_{k=1}^{n_s} (C_{erep,s} E_s + C_{prep,s} P_s) (1+i_0)^{-\frac{kT}{n_s+1}} \right) \quad (6)$$

式中: $C_{rep,s}$ 为第 s 种储能装置的等年值置换成本; $C_{erep,s}$ 和 $C_{prep,s}$ 分别为第 s 种储能装置的单位容量置换成本和单位功率置换成本; n_s 为第 s 种储能装置在系统寿命周期内更换的次数。

(3) 报废阶段

等年值报废处理成本

$$C_{scr} = \sum_{s=1}^N C_{scr,s} = \sum_{s=1}^N (n_s + 1) (C_{escr,s} E_s + C_{pscr,s} P_s) \frac{i_0}{(1+i_0)^T - 1} \quad (7)$$

式中: $C_{scr,s}$ 为第 s 种储能装置的等年值报废处理成本; $C_{escr,s}$ 和 $C_{pscr,s}$ 分别为第 s 种储能装置的单位容量、功率报废处理成本。

回收残值

$$C_{res} = \sigma_{res} (C_{inv} + C_{aux} + C_{rep}) (1+i_0)^{-T} \quad (8)$$

式中: σ_{res} 为回收残值率。

2.1.2 用户一年内购买能源的成本

一年内用户从能源供应商购买能源的花费

$$C_{int} = \sum_{s=1}^N C_{int,s} = \sum_{s=1}^N \sum_{t=1}^{8760} (p_{buy,s}(t) W_{buy,s}(t) - p_{sell,s}(t) W_{sell,s}(t)) \quad (9)$$

式中: $C_{int,s}$ 为一年内第 s 种能源的购买花费; $W_{buy,s}(t)$ 和 $W_{sell,s}(t)$ 分别为第 s 种能源在 t 时段的购买量和销售量; $p_{buy,s}(t)$ 和 $p_{sell,s}(t)$ 分别为第 s 种能源在 t 时段的购买价格和销售价格。

2.2 约束条件

(1) 储能容量和功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq E_s \leq E_s^{\max} \\ 0 \leq P_s \leq P_s^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $s=1,2,\dots,N$; E_s 和 P_s 分别为第 s 种储能装置配置的容量和功率(决策变量); $E_s^{\max}$ 为第 s 种储能装置配置的最大容量限制; $P_s^{\max}$ 为第 s 种储能装置配置的最大功率限制。

(2) 能量供需平衡约束

$$W_{buy,s}(t) + W_{pro,s}(t) + \sum_{i=1}^{s-1} K_{i,s}(t) W_{i,s}(t) + W_{dis,s}(t) = W_{sell,s}(t) + \sum_{j=s+1}^N W_{s,j}(t) + W_{ch,s}(t) + W_{load,s}(t) \quad (11)$$

式中: $s=1,2,\dots,N$; $W_{dis,s}(t)$ 和 $W_{ch,s}(t)$ 分别为第 s 种储能装置在 t 时段的放能量和充能量; $W_{pro,s}(t)$ 为第 s 种能源的能量生产单元在 t 时段生产的能量值(已知量); $W_{load,s}(t)$ 为第 s 种能源在 t 时段的用户负荷(已知量)。在能量的转换方面,假设能量只能从高品位向低品位转变: $W_{i,s}(t)$ 为 t 时段能量 i 转换成能

量 s 消耗的能量 i 的量 ($i < s$), $K_{i,s}(t)$ 为对应能量转换设备的转换效率; $W_{s,j}(t)$ 为 t 时段能量 s 转换成能量 j 消耗的能量 s 的量 ($j > s$)。

(3) 储能单元约束

储能装置的运行应符合其物理模型,如式(12)。储能装置存储的能量不应超过其容量限制,如式(13)。储能装置在各时段的充、放能量存在充放速率限制,如式(14)。为了保证调度的连续性,使储能能在每个调度周期的起始时刻和终止时刻存储的能量相同,如式(15)。

$$E_s(t+1)=(1-\delta_s)E_s(t)+W_{ch,s}(t)\eta_{ch,s}-\frac{W_{dis,s}(t)}{\eta_{dis,s}} \quad (12)$$

$$0 \leq E_s(t) \leq E_s \quad (13)$$

$$\begin{cases} 0 \leq W_{ch,s}(t)\eta_{ch,s} \leq P_s \Delta t \\ 0 \leq \frac{W_{dis,s}(t)}{\eta_{dis,s}} \leq P_s \Delta t \end{cases} \quad (14)$$

$$E_s(t_{start})=E_s(t_{start}+t_{period}) \quad (15)$$

式中: $E_s(t+1)$ 和 $E_s(t)$ 分别为第 s 种储能装置在 $t+1$ 时段前和 t 时段前存储的能量; δ_s 为第 s 种储能装置的自放能率; $\eta_{ch,s}$ 和 $\eta_{dis,s}$ 分别为第 s 种储能装置的充能效率和放能效率; t_{start} 为调度周期的起始时刻; t_{period} 为调度周期时长,通常选取一天为一个调度周期,此时 $t_{period}=24$ 。

(4) 能量转换单元约束

能量从高品位向低品位转换时不应超过能量转换单元的转换上限,且能量转换效率应符合能量转换单元的运行特性。

$$\begin{cases} 0 \leq W_{i,j}(t) \leq W_{i,j}^{max} \\ K_{i,j}(t)=f(W_{i,j}(t)) \\ i,j=1,2,\dots,N \quad i < j \end{cases} \quad (16)$$

式中: $W_{i,j}(t)$ 为 t 时段能量 i 转换成能量 j 消耗的能量 i 的量; $W_{i,j}^{max}$ 为能量 i 转换成能量 j 的上限; $K_{i,j}(t)$ 为 t 时段能量 i 转换成能量 j 的效率,函数 f 与能量转换单元的运行特性有关。

(5) 与能源供应商交互功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq W_{buy,s}(t) \leq W_{buy,s}^{max} \\ 0 \leq W_{sell,s}(t) \leq W_{sell,s}^{max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $s=1,2,\dots,N$; $W_{buy,s}^{max}$ 和 $W_{sell,s}^{max}$ 分别为第 s 种能源的购买上限和销售上限。

2.3 求解方法

综合储能优化配置模型中能量转换单元的运行特性可能为非线性,因此模型整体为非线性规划。利用分段线性化方法可将非线性规划转化为混合整数线性规划,在 MATLAB 中调用商业求解器

CPLEX 进行求解。

3 算例分析

算例以商业建筑为应用场景,IES 的具体架构如图 3 所示。将用户侧 IES 综合储能优化配置的通用模型具体化,研究模型在商业建筑场景中的适用性。

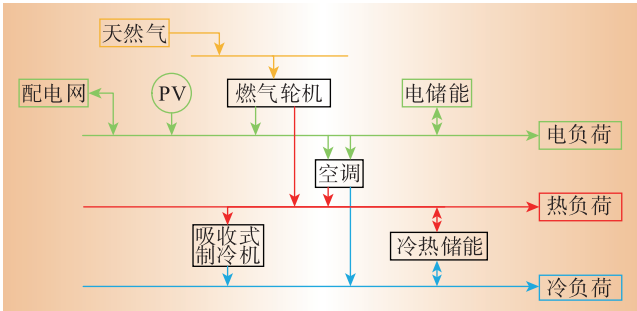


图3 商业建筑 IES 架构

Fig. 3 Structure of IES of a commercial building

3.1 基础数据

建筑用能可划分成 3 个典型日:供热季、供冷季、过渡季。一天内天然气的价格保持不变,为 3.15 元/ m^3 。系统分时电价如表 1 所示。

表 1 分时电价表

Table 1 Time-of-use price

时段	时间	购电/ (元· kWh^{-1})	售电/ (元· kWh^{-1})
高峰时段	8:00~12:00	1.123 4	0.942 9
	17:00~21:00		
平时段	12:00~17:00	0.748 9	0.641 4
	21:00~24:00		
低谷时段	0:00~8:00	0.374 5	0.301 5

配置的储能设备参数如表 2 所示。

表 2 储能设备参数

Table 2 Parameters of energy storage

	电储能	冷热储能
单位容量投资成本/(元· kWh^{-1})	1 000	150
单位功率投资成本/(元· kW^{-1})	600	1 000
单位容量辅助设备成本/(元· kWh^{-1})	100	20
单位容量运维成本/(元· kWh^{-1})	0.043	0.011
单位容量置换成本/(元· kWh^{-1})	250.0	37.5
单位功率置换成本/(元· kW^{-1})	150	250
单位容量报废处理成本/(元· kWh^{-1})	100	15
单位功率报废处理成本/(元· kW^{-1})	60	100
寿命/a	10	25
能量耗散率	0.002	0.020
充能效率	0.900	0.950
放能效率	0.900	0.950
SOC_{min}	0.2	0
SOC_{max}	1	1

系统内的能量转换单元包括燃气轮机、空调和吸收式制冷机,其中燃气轮机和空调的转换效率随负荷率的增大而增大。

3.2 优化结果分析

综合储能系统的寿命周期为25年,基准折现率5%,对商业建筑IES的电储能和冷热储能进行优化配置。

为了更好地说明电热冷综合储能的经济性优势,计算无储能、仅电储能、仅冷热储能、电热冷综合储能4种方案的配置优化结果和系统的等年值总成本,如表3所示。从表3中可以看到,在建筑IES中配置电热冷综合储能具有最好的经济性,电储能和冷热储能可以转移电价高峰时段的电负荷和冷热负荷,显著降低用户购买能源的成本,该方案相比无储能方案等年值总成本降低了15.9%。如果系统仅配置电储能,则电储能不仅需要转移电价高峰时段的常规电负荷,还需要转移空调制热或制冷消耗的大量电能,该方案相比电热冷综合储能方案具有更高的电储能容量和功率,由于储能成本较高,等年值总成本的降低并不明显。如果系统仅配置冷热储能,等年值总成本降低也比较多,但是由于缺少电储能,无法转移电价高峰时段的电负荷,该方案的经济性较电热冷综合储能方案稍差。

表3 不同储能方案的优化结果

Table 3 Optimization results in different schemes

	无储能	仅电储能	冷热储能	电热冷
电储能容量/kWh	0	1 833.0	0	505.8
电储能功率/kW	0	189.7	0	63.7
冷热储能容量/kWh	0	0	2 051.0	2 051.0
冷热储能功率/kW	0	0	503.5	501.6
储能等年值成本/万元	0	22.3	6.8	13.1
购买能源成本/万元	38.9	14.0	27.1	19.6
等年值总成本/万元	38.9	36.4	33.9	32.7

下面分析不同典型日下设备的优化运行,说明电热冷综合储能提高系统经济性的原因。

系统在供热季的优化运行方案如图4、图5所示,其中图4为供热季的电能供需平衡图,图5为供热季的热能供需平衡图。

分析供热季的电能供需平衡可得出:电储能的充电主要源于谷时段从电网购电以及平时段光伏和燃气轮机发出的多余电能,电储能的放电则在峰时段进行,可节省系统高昂的购电费用,在允许向电网售电的情况下还可出售电能获取收益。

分析供热季的热能供需平衡,热储能可将电价峰时段和平时段的热负荷转移至电价谷时段:谷时段空调以较高的负荷率制热并向热储能充热,峰时段和平时段热储能放热并结合燃气轮机满足系统

的热能需求。

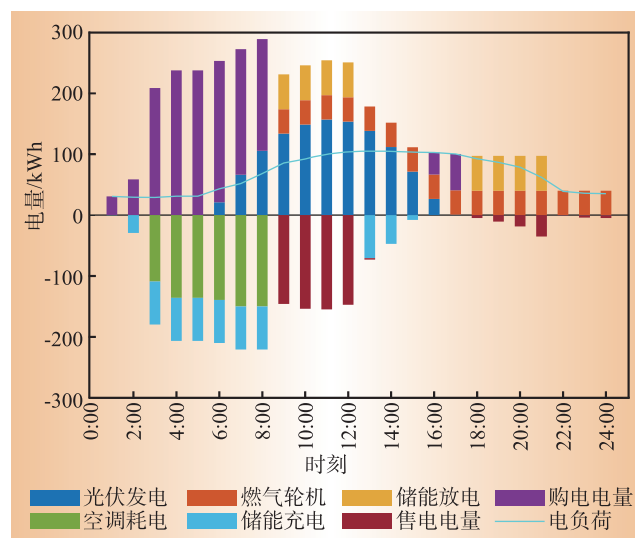


图4 供热季的电能供需平衡图

Fig. 4 Power balance in heating season

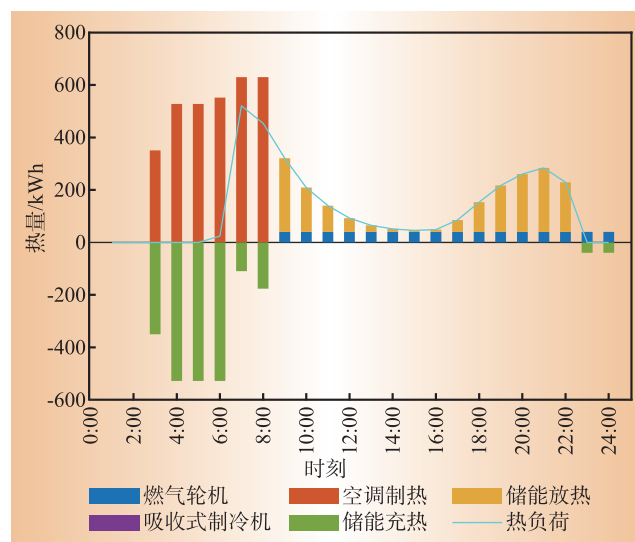


图5 供热季的热能供需平衡图

Fig. 5 Heat balance in heating season

系统在供冷季的优化运行方案(图6)与在供热季类似,需要注意的是12:00进入第一个电价平时段,由于系统的冷能需求很大,冷储能存储的冷量不足以满足后续时间内的冷负荷,因此平时段空调开始制冷。空调以最大负荷率制冷满足冷负荷,多余的冷量充入冷储能中,这种运行方式可保证空调具有最大的制冷效率,运行的经济性最优。

根据上述对典型日下设备运行的分析,总结电热冷储能降低用户用能成本的原因如下:① 电储能通过两个方面降低成本:一是低储高发套利,电储能可以在电价低谷时充电或存储过剩的光伏发电,在电价高峰时放电满足电负荷或向电网出售电能,通过峰谷电价差获得收益;二是可以使燃气轮机工作在最大负荷率状态,提高发电效率,一定程

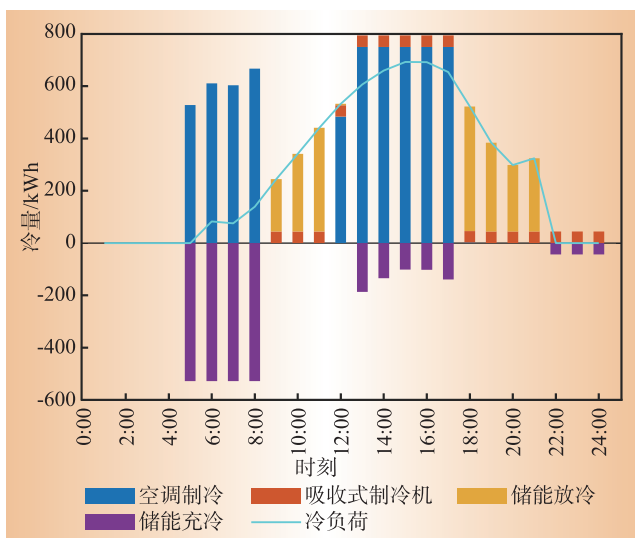


图6 供冷季的冷能供需平衡图

Fig. 6 Cool balance in cooling season

度上减少购气费用；② 冷热储能通过两个方面降低成本：一是将电价高峰时段的冷热负荷转移至电价低谷时段，降低空调的运行成本；二是可以通过存储多余的热能、冷能，维持空调处于负荷率较高的工作状态，提高其制热制冷效率，减少电费支出。

3.3 储能单位成本对配置的影响

为研究储能单位成本对电热冷综合储能配置的影响，分别改变电储能和冷热储能的单位容量投资成本，计算并分析储能的配置结果。

将冷热储能的单位容量投资成本固定为150元/kWh，电储能的单位容量投资成本从500元/kWh变化至1500元/kWh，储能的容量配置结果如图7所示。

从图7中可以看到，改变电储能的单位容量投资成本，冷热储能的容量和功率存在转折点（电储能单位容量投资成本为1000元/kWh时）：在转折点左侧，减少电储能的单位成本，由于电储能可以代替冷热储能转移部分电价高峰时段的冷热负荷，电

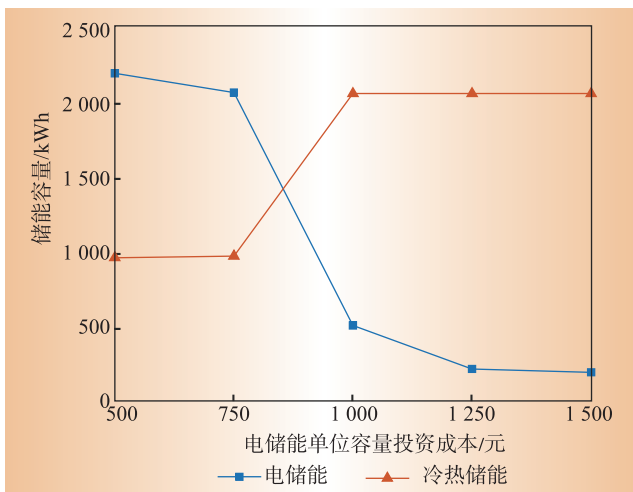


图7 储能容量的配置结果

Fig. 7 Configuration results of energy storage capacity

储能的容量和功率增加，冷热储能的容量和功率减少；在转折点右侧，增加电储能的单位成本，此时电价高峰时段的冷热负荷已全部由冷热储能转移，冷热储能的容量和功率保持不变，同时电储能配置成本的上升使电储能配置的容量和功率减少。

电储能的单位容量投资成本固定为1000元/kWh，冷热储能的单位容量投资成本从50元/kWh变化至180元/kWh。由于电储能和冷热储能在转移冷热负荷方面的可替代性，二者的容量、功率配置呈现出互补的特征。

商业建筑场景的算例分析结果表明：电储能主要通过低储高发、提高发电设备的效率来降低用能成本，冷热储能主要通过转移电价峰时的冷热负荷、提高空调等制热制冷设备的效率来降低成本，电储能对冷热储能具有替代性，这些结论与文献[16]和文献[17]的分析是一致的。基于以上分析，可认为本文建立的IES综合储能优化配置通用模型适用于商业建筑场景中的储能配置。

4 优化配置模型的通用性分析

由于优化配置模型中的能量和设备都是抽象的，模型还可用于其他具体场景，解决场景中综合储能的优化配置问题，现有对具体场景中储能配置的研究都可看作是该模型的实例化。下面以综合能源微网场景、含电转气的场景为例，进一步说明所建模型的通用性。

(1) 综合能源微网场景

综合能源微网的典型架构如图8所示，主要包含风机、热电联产机组、电锅炉、电储能、热储能等设备，文献[4]和文献[7]以综合能源微网经济性最优为目标，对电储能、热储能的容量、功率进行配置。上述研究表明电、热储能可以解耦热电联产机组“以热定电”的方式，通过电热联合调度提升系统的经济性，还可促进风电消纳。

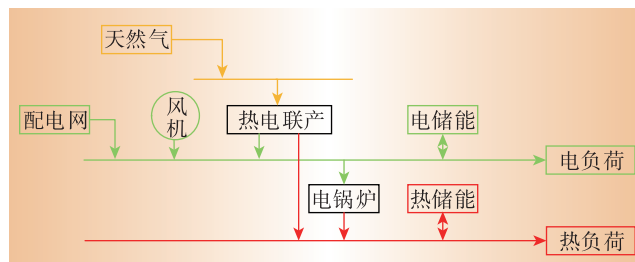


图8 综合能源微网的典型架构

Fig. 8 Typical structure of integrated energy microgrid

图8是一种具体的IES架构，可基于本文建立的IES综合储能优化配置通用模型，构建该场景下综

合储能配置的具体模型,从而解决综合能源微网中电、热储能的配置问题。

图8包含3种能量形式,能量生产单元为风电机组,能量转换单元包括热电联产机组、电锅炉,储能单元包括电储能、热储能,用能单元为电负荷和热负荷。因此,可将通用模型具体化,建立综合能源微网场景中电热储能的优化配置模型,模型的目标函数为微网的等年值总成本(包括电、热储能的等年值成本和微网每年的购电、购气费用)最小,约束条件则包括气电热3种能量的供需平衡约束、电储能和热储能的约束、热电联产机组和电锅炉的运行约束等。

由上述分析可知,IES综合储能优化配置通用模型可以应用于综合能源微网场景,据此建立的模型与文献[7]中模型在原理上是一致的。

(2) 含电转气的场景

电转气是近年来日渐成熟的技术,不少文献在图8架构的基础上增设电转气装置(可以将富余电能转换为天然气出售),研究电转气对电热储能配置的影响^[19]。

本文建立的IES综合储能优化配置通用模型也可应用于含电转气的场景,对电热储能进行配置,通用模型具体化后,目标函数为系统的等年值总成本(包括电、热储能的等年值成本和系统每年与天然气商、配电网的能源交互成本)最小,约束条件则包括气电热3种能量的供需平衡约束、电储能和热储能的约束、热电联产机组和电锅炉和电转气装置的运行约束等。

综上所述,本文从综合能源的概念出发对IES的架构进行抽象,建立的综合储能优化配置模型并不局限于某一储能配置的具体场景,而是可以应用于多种IES架构,解决不同的问题,具有通用性。

5 结束语

从综合能源的概念出发,建立了用户侧IES的通用模型,并在此基础上提出了用户侧IES综合储能优化配置模型,模型具有通用性。针对商业建筑、综合能源微网等不同的综合储能应用场景,都可根据本文建立的优化配置通用模型构建得到该场景中储能配置模型的具体表达,进而去进行综合储能的优化配置。未来IES中可能会加入储气等新的设备,或出现新的能量形式,也可根据本文构建的IES综合储能优化配置通用模型去考虑综合储能的配置。

本文提出的综合储能优化配置模型只考虑了峰谷电价差套利这一种收益来源,如何将储能参与

辅助服务市场、需求响应获取的收益纳入配置模型中,将成为下一步的研究方向。D

参考文献:

- [1] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2015,(7):198-207.
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiancong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,(7):198-207.
- [2] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹. 对我国综合能源系统发展的思考[J]. 电力建设,2015,36(1):16-25.
JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1):16-25.
- [3] 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]. Low Voltage Apparatus, 2019,(19):15-22.
- [4] 李正茂,张峰,梁军,等. 含电热联合系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报,2015(14):3 569-3 576.
LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Optimization on microgrid with combined heat and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015(14):3 569-3 576.
- [5] 刘涤尘,马恒瑞,王波,等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化,2018, 42(4):113-120,141.
LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):113-120, 141.
- [6] 门向阳,曹军,王泽森,等. 能源互联微网型多能互补系统的构建与储能模式分析[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(19):5 727-5 737.
MEN Xiangyang, CAO Jun, WANG Zesen, et al. The constructing of multi-energy complementary system of energy internet microgrid and energy storage model analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19):5 727-5 737.
- [7] 崔明勇,王楚通,王玉翠,等. 独立模式下微网多能存储系统优化配置[J]. 电力系统自动化,2018,42(4): 30-38,54.
CUI Mingyong, WANG Chutong, WANG Yucui, et al. Optimal configuration of multi-energy storage system in standalone microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4):30-38, 54.

- [8] 王诚良,刘洪,宫建锋,等. 面向风电消纳的综合能源系统多类型储能联合调度[J]. 电力建设,2018,39(4):35-44.
WANG Chengliang, LIU Hong, GONG Jianfeng, et al. Joint scheduling of different energy storage for improving wind power accommodation ability in integrated community energy system[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(4):35-44.
- [9] 施金晓,黄文焘,邵能灵,等. 电-热联合微网中分布式可再生能源功率波动平抑策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(2):537-546.
SHI Jinxiao, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. A strategy to suppress fluctuation of distributed renewable energy in microgrids with combined heat and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2):537-546.
- [10] 丁逸行,徐青山,吕亚娟,等. 考虑需量管理的用户侧储能优化配置[J]. 电网技术,2019,43(4):1 179-1 186.
DING Yixing, XU Qingshan, LV Yajuan, et al. Optimal configuration of user-side energy storage considering power demand management[J]. Power System Technology, 2019, 43(4):1 179-1 186.
- [11] 李军徽. 抑制风电对电网影响的储能系统优化配置及控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
LI Junhui. Research on the optimal plan and control of energy storage system to reduce the effect of wind power on the grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [12] 张晴. 平抑风电波动的混合储能容量配置和经济性评估[D]. 湖南:湖南大学,2017.
ZHANG Qing. Capacity determination and economic evaluation of hybrid energy storage system for smoothing wind power fluctuations[D]. Hunan: Hunan University, 2017.
- [13] 赵达维,张文涛,刘旭娜,等. 光伏与混合储能配合的园区综合能源系统规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(10):88-95.
ZHAO Dawei, ZHANG Wentao, LIU Xuna, et al. Park-level integrated energy system planning based on the cooperation of PV and hybrid energy storage[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(10):88-95.
- [14] ZHOU N, LIU N, ZHANG J, et al. Multi-objective optimal sizing for battery storage of PV-based microgrid with demand response[J]. Energies, 2016, 9(8):591.
- [15] 郑国太,李昊,赵宝国,等. 基于供需能量平衡的用户侧综合能源系统电/热储能设备综合优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(16):8-18.
ZHENG Guotai, LI Hao, ZHAO Baoguo, et al. Comprehensive optimization of electrical/thermal energy storage equipments for integrated energy system near user side based on energy supply and demand balance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16):8-18.
- [16] 朱倩雯. 多能互补建筑能源系统电热储能容量优化配置[D]. 山东:山东大学,2018.
ZHU Qianwen. Capacity optimization for electrical and thermal energy storage in multi-energy building energy system[D]. Shandong: Shandong University, 2018.
- [17] 熊文,刘育权,苏万煌,等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):118-126.
XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanhuan, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):118-126.
- [18] 刘维康,王丹,余晓丹,等. 考虑电气转换储能和可再生能源集成的微能源网多目标规划[J]. 电力系统自动化,2018,42(16):11-20,72.
LIU Weikang, WANG Dan, YU Xiaodan, et al. Multi-objective planning of micro energy network considering P2G-based storage system and renewable energy integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16):11-20, 72.
- [19] 赵冬梅,夏轩,陶然. 含电转气的热电联产微网电/热综合储能优化配置[J]. 电力系统自动化,2019,43(17):46-54.
ZHAO Dongmei, XIA Xuan, TAO Ran. Optimal configuration of electric/thermal integrated energy storage for combined heat and power microgrid with power to gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17):46-54.
- [20] 曾鸣,刘英新,周鹏程,等. 综合能源系统建模及效益评价体系综述与展望[J]. 电网技术,2018,42(6):1 697-1 708.
ZENG Ming, LIU Yingxin, ZHOU Pengcheng, et al. Review and prospects of integrated energy system modeling and benefit evaluation[J]. Power System Technology, 2018, 42(6):1 697-1 708.

作者简介:

徐海华(1987),男,江苏如东人,硕士,工程师,研究方向为综合能源服务;

朱星阳(1985),男,江西九江人,博士,高级工程师,研究方向为综合能源技术、综合能源服务解决方案;

赵杨阳(1990),男,江苏镇江人,博士,工程师,研究方向为新能源发电系统运行控制与储能系统能量管理。

(责任编辑 陈 可)