

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230060

## 考虑热惯性的广义储能共享交易机制研究

嵇文路<sup>1</sup>, 廖英祺<sup>1</sup>, 荆江平<sup>2</sup>, 李雪<sup>1</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210019; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 随着电力系统中新能源渗透率的不断提高, 储能被广泛应用于平抑新能源波动, 促进新能源消纳。但传统储能存在分布范围小、投资成本高等缺点, 广义储能将储热、储冷以及灵活性负荷视为储能资源, 具有灵活可靠、分布广等优点, 能够实现分布式资源的互补互济。基于此, 提出了一种考虑热惯性的广义储能共享交易模型, 计及了建筑物热惯性、柔性负荷、热水管道等广义储能, 并采用双边拍卖的交易机制来进行储能共享。所提储能共享机制中, 储能买家与卖家各自进行投标, 中间拍卖商根据投标价格决定最终中标情况。最后, 基于算例分析了广义储能的共享交易情况, 研究发现储能的时移特性能够提高社会效益, 交易参与者所含的市场力将会影响到最后共享的中标情况。

**关键词:** 广义储能; 储能共享; 热惯性; 双边拍卖

### A generalized energy storage sharing mechanism considering thermal inertia

Ji Wenlu<sup>1</sup>, Liao Yingqi<sup>1</sup>, Jing Jiangping<sup>2</sup>, Li Xue<sup>1</sup>

(1. Nanjing Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

**Abstract:** With the increasing penetration of renewable energy in the power system, energy storage is widely used to alleviate volatility. However, traditional energy storage has disadvantages of small distribution range and high cost. Generalized energy storage is different from traditional energy storage equipment. Heat storage, cold storage and flexible load are also regarded as energy storage resources, and their flexibility and wide distribution are used to realize the complementarity of distributed resources. In this paper, an energy storage sharing transaction model considering generalized energy storage is proposed. In the model, generalized energy storage such as building thermal inertia, ground source heat pumps and hot water pipelines are studied, and the transaction mode of bilateral auction is used for energy storage sharing. In this energy storage sharing mode, the buyer and seller of energy storage bid, and the intermediate auctioneer determines the final winning situation according to the bidding price. Finally, through an example, the shared transaction of generalized energy storage is analyzed, and it is found that the time-shift characteristics of energy storage can improve social benefits, and the market power of the transaction participants will affect the final shared bid winning situation.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFB2104505).

**Key words:** generalized energy storage; energy storage sharing; thermal inertia; double auction

## 0 引言

近年来, 化石燃料的大量使用造成了严重的环境问题, 世界多国已签署《京都议定书》、《巴黎协议》限制碳排放。因此新能源已成为目前国家发展

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2020YFB2104505);  
江苏省电力有限公司科技项目资助(J2022160)

的重点, 并且随着分布式发电技术的推广, 分布式电源、电动汽车、用户侧资源开始涌现, 电力市场乃至电力系统的设计和布局出现重大转变<sup>[1-2]</sup>。但由于分布式资源的波动性和随机性, 其规模化并网给电力系统安全高效运行带来了挑战, 而储能的时移特性可有效支撑间歇性新能源的消纳<sup>[3-4]</sup>。目前, 随着功能需求多元化以及负荷侧灵活资源呈现的“虚拟储能”效应, 储能的范畴逐步扩大, 包括储电、

储热、储冷、储气的广义储能概念应运而生<sup>[5]</sup>。

在分布式新能源并网渗透率逐步提升的趋势下, 广义储能有望发挥重要作用<sup>[6]</sup>。但现阶段广义储能存在成本高、商业模式不成熟等问题, 因此, 探索新的储能商业模式以提升储能的市场竞争力至关重要。共享储能机制是指利用不同储能用户储能需求的互补性提升储能利用率, 发现价值创造的行为<sup>[7]</sup>。共享储能可有效降低运行成本, 促进新能源就地消纳。然而广义储能存在多重异质物理特性、共享利润分配等难题, 因此构建考虑广义储能特性的新型共享交易机制具有重要价值。

当前已有学者对广义储能开展了研究<sup>[8-15]</sup>。文献[10]综合考虑电储能、储热系统和储气罐, 提出了一种电热气互联综合能源系统经济调度方法。文献[11]提出一种基于需求侧响应和阶梯式碳交易机制的综合能源系统优化调度模型。文献[12]以等效能折算为前提, 分析储能全寿命周期进程中建设与运行特性的差异, 构建基于等效能折算的储能全寿命周期成本模型与平准化电力成本模型。文献[13]提出了考虑广义电储能的综合能源系统多目标规划。文献[15]提出了一种电热氢多元广义储能优化调度方法, 研究了能量损耗和功率波动对广义储能经济效益的影响。

此外, 当前对储能的共享与交易机制也展开了研究, 储能的共享行为可以定义为将闲置的储能资源有偿让渡给有需要的用户使用, 挖掘“沉睡”灵活储能资源创造价值的运营模式<sup>[16]</sup>。文献[17]设计了一种基于区块链的储能共享机制。文献[18]基于合作博弈理论, 研究了用户单独拥有储能装置和用户共同拥有储能装置下的优化问题。文献[19]针对风电集群联合共享储能系统的协调控制和收益分配问题, 提出基于预测误差分配原则的运行控制策略。文献[20]构建了计及共享储能、热电联供以及光伏电源等设备的用户协同优化模型, 通过优化用户的合理用能安排降低用能费用。文献[21]考虑源网荷储聚合交易的区域电热综合能源系统优化调度。文献[22]以社会能源成本最小为目标, 构建了基于非合作博弈进行利润划分的存储共享机制。文献[23]提出了一种改进的基于拍卖机制的储能共享容量和定价机制。

虽然已对储能调度及商业模式开展了研究, 但仍存在以下不足: 1) 目前研究考虑的广义储能种类相对较少; 2) 现有关于储能共享机制的研究侧重于将其等效为电量交易, 忽略了储能的时移特性。

基于此, 本文研究了计及热水管网、热负荷惯

性及电化学储能的广义储能, 构建了广义储能的同质化模型, 提出了一种基于双边拍卖模式的储能共享交易模型, 所提共享模型可预防单边垄断并减少交易共享的次数。最后通过算例分析了储能时移特性、储能卖家市场力对交易价格、储能共享结果以及社会效益的影响。

## 1 广义储能模型

首先介绍了本文所涉及的广义储能模型, 包括类比于储热罐的热水管网模型、建筑物热惯性模型和柔性负荷模型, 并基于电化学储能模型归纳了广义储能的同质化模型。

### 1.1 热水管网模型

热水管网的管道内部以热量形式储存能量, 其储热量正比于热水温度<sup>[24]</sup>。因而热水管网内部水温上升时相当于管网储热, 温度下降时相当于管网放热, 且释放热量可通过调节管网出水流量进行控制。热水管网储能模型<sup>[25]</sup>为

$$E_i(S_{\text{Oci}}(t+1) - S_{\text{Oci}}(t)) = -P_i(t)/\eta_i \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$E_i = c_p m_i \cdot (T_i(0) - T_c) \quad (2)$$

$$0 \leq S_{\text{Oci}}(t) \leq 1 \quad (3)$$

式中:  $E_i$ 为管网*i*中的储能能量;  $S_{\text{Oci}}$ 为*t*时刻管网*i*的荷电状态;  $P_i(t)$ 为*t*时刻管网*i*的放热功率;  $\eta_i$ 为管网*i*的等效储能排放效率;  $\Delta t$ 为时间间隔;  $c_p$ 为水比热容;  $m_i$ 为管网*i*中水的质量;  $T_i(0)$ 为初始时刻管网*i*中热水的平均温度;  $T_c$ 为环境温度。

### 1.2 热负荷惯性模型

相对于电负荷, 建筑物的供热具有一定的热惯性, 即建筑物热负荷在热源停止供给后仍能继续工作一段时间。建筑物的热惯性如图1所示, 在 $t_0$ 时刻热源停止供热之后, 此时室内温度还在舒适区间之内, 热负荷能够维持供应一段时间; 而在 $t_2$ 时刻热源恢复之后, 热负荷供应并非立即恢复, 直至 $t_3$ 时刻室内温度上升到舒适温度下限时恢复供应。

建筑物热惯性建模为

$$Q(t+1) - Q(t) = C_j \cdot (T_j(t+1) - T_j(t)) = (P_{\text{in}}(t) - P_{\text{out}}(t)) \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中:  $Q(t)$ 为*t*时刻建筑物内部热量;  $C_j$ 为建筑物*j*热容;  $T_j$ 为建筑物*j*内部温度;  $P_{\text{in}}(t)$ 为*t*时刻热源供给建筑物的热能;  $P_{\text{out}}(t)$ 为*t*时刻建筑物的热负荷。在正常工作状态下  $P_{\text{in}}(t) = P_{\text{out}}(t)$ , 而在热源停止供热后, 建筑供热模型变为

$$-P_j(t) \cdot \Delta t = Q(t+1) - Q(t) = C_j \cdot (T_j(t+1) - T_j(t)) \quad (5)$$

$$E_j \cdot (S_{OCj}(t+1) - S_{OCj}(t)) = -P_j(t) \cdot \Delta t \quad (6)$$

式中:  $P_j(t)$  为建筑物热惯性在  $t$  时刻的功率;  $E_j$  为建筑物  $j$  储能容量;  $S_{OCj}$  为建筑物  $j$  的等价荷电状态。

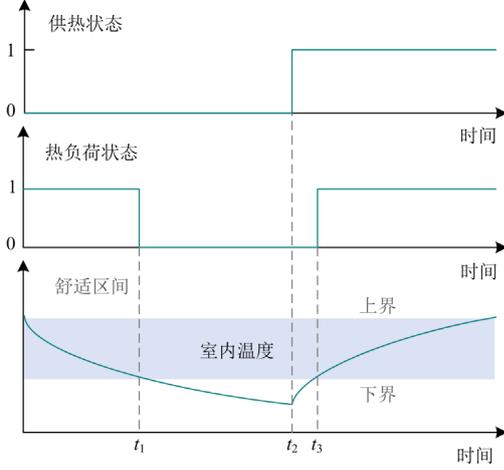


图 1 建筑热惯性示意图

Fig. 1 Schematic diagram of building thermal inertia

式(6)表示释放功率取决于建筑物的热容与温度变化。不同于热水管网的储能特性,建筑物供热是为了保证温度在用户的舒适度范围之内,所以当室内温度超出舒适区间时,热负荷不再工作。类似于式(2),因此  $E_j$  可表示为

$$E_j = C_j \cdot |T_j(0) - T_{limit}| \quad (7)$$

式中:  $T_j(0)$  为初始时刻建筑物内部温度;  $T_{limit}$  为舒适温度区边界。

### 1.3 柔性负荷模型

本文将可转移负荷中激励响应型柔性负荷也视为广义储能。可转移负荷是将负荷的使用时间从一个区间转移到另一个区间,转移负荷不能超过最大允许转移量。在负荷曲线上则体现为负荷曲线向前时段平移或向后时段平移。向前时段平移可等效为常规储能装置的先充电再放电操作,即将不太重要的负荷改变工作时间,而改变之后完全不影响用户舒适度。负荷曲线向后时段平移的工作原理类似常规储能的先放电再充电。可转移负荷的模型为

$$0 \leq P_{TL}^{in}(t) \leq u_{TL}^{in}(t) \cdot (P_{TL}^{in-max}(t-1) - P_{TL}^{in}(t-1)) \quad (8)$$

$$0 \leq P_{TL}^{out}(t) \leq u_{TL}^{out}(t) \cdot (P_{TL}^{out-max}(t-1) - P_{TL}^{out}(t-1)) \quad (9)$$

$$u_{TL}^{out}(t) + u_{TL}^{in}(t) \leq 1 \quad (10)$$

$$\sum_{t \in T} (u_{TL}^{out}(t) + u_{TL}^{in}(t)) = 0 \quad (11)$$

$$T = [t_{start}^{TL}, t_{end}^{TL}] \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^T (u_{TL}^{in}(t) \cdot P_{TL}^{in}(t) - u_{TL}^{out}(t) \cdot P_{TL}^{out}(t)) = 0 \quad (13)$$

式中:  $u_{TL}^{in}(t)$ 、 $u_{TL}^{out}(t)$  分别表示可转移负荷在  $t$  时刻的充、放能状态,均为 0-1 变量;  $P_{TL}^{in-max}(t)$ 、 $P_{TL}^{out-max}(t)$  分别表示可转移负荷等效最大充、放能功率;  $P_{TL}^{in}(t)$ 、 $P_{TL}^{out}(t)$  分别表示可转移负荷等效充、放能功率;  $t_{start}^{TL}$ 、 $t_{end}^{TL}$  分别表示开始运行时间和结束运行时间。

式(8)与式(9)表示可转移负荷等效储能的充、放能功率上限;式(10)限制了可转移负荷无法同时充能与放能;式(13)表示充、放能在一个周期内守恒。由此可得到可转移负荷等效储能的储能量,如式(14)所示。

$$E_{TL}(t+1) = E_{TL}(t) + (\eta^{in} P_{TL}^{in}(t) - \eta^{out} P_{TL}^{out}(t)) \cdot \Delta t \quad (14)$$

式中:  $E_{TL}(t)$  为  $t$  时刻可转移负荷等效储能的储能量;  $\eta^{in}$ 、 $\eta^{out}$  分别为等效充、放能效率。

### 1.4 广义储能的同质化模型

虽然 1.1 节中的热水管网模型与 1.2 节中的建筑物热惯性数学模型存在差异,但本质上均描述了虚拟热储能特性,因此本文定义了广义储能的同质化模型。需要说明的是,虽然本质上建筑热负荷在电网中属于灵活电负荷,但其可通过调整室内舒适温度实现“负荷低谷时段增加用电功率(储热)、峰值时段降低用电功率(放热)”灵活调节,因而建筑热负荷能够向电网提供类似于电储能的调峰功能标准的电化学储能模型,可表示为

$$E_b(t+1) = E_b(t) + (\eta^{ch} P^{ch}(t) - P^{dis}(t) / \eta^{dis}) \cdot \Delta t \quad (15)$$

$$0 \leq P^{ch}(t) \leq U^{ch}(t) \cdot \bar{P}^{ch} \quad (16)$$

$$0 \leq P^{dis}(t) \leq U^{dis}(t) \cdot \bar{P}^{dis} \quad (17)$$

$$U^{ch}(t) + U^{dis}(t) \leq 1 \quad (18)$$

式中:  $E_b(t)$  为储能装置的储能电量;  $P^{ch}(t)$ 、 $P^{dis}(t)$  分别为储能充放电功率;  $\eta^{ch}$ 、 $\eta^{dis}$  分别为充放电效率;  $\bar{P}^{ch}(t)$ 、 $\bar{P}^{dis}(t)$  分别为充放电功率上限;  $U^{ch}(t)$ 、 $U^{dis}(t)$  分别为充放电状态变量。式(15)表示电化学储能电量在相邻时间断面间的变化。式(16)、式(17)分别描述了电池充放电上限。式(18)表示电池不能同时处于充电与放电状态。

以式(15)为参考可得到类似式(1)的热储能容量与热功率之间的关系。

$$E_b(S_{Ocb}(t+1) - S_{Ocb}(t)) = -P_b / \eta_b \cdot \Delta t \quad (19)$$

式中:  $P_b$  为电池的充放电功率;  $\eta_b$  为电池的充放电

效率;  $S_{ocb}(t)$  为储电状态。

由此, 通过式(1)、式(6)、式(14)和式(15)可以总结出广义储能的综合公式, 如式(20)所示。

$$E \cdot (S_{oc}(t+1) - S_{oc}(t)) = -P / \eta \cdot \Delta t \quad (20)$$

式中,  $E$  为各类广义储能的储能能量。

表 1 归纳了广义储能同质化模型。热水管网储能能量由初始时刻温度与环境温度的温差来决定, 功率为管网中储存热量的减少率, 效率是管网等效的放热效率。热负荷惯性的储能能量由初始时刻室内温度与舒适温度上下限之间的温差来决定, 释放功率等于负荷内部储能热量的减少率。

表 1 广义储能同质化模型概述表

Table 1 Summary of generalized energy storage

种类	公式	$E$ (能量)	$P$ (功率)	$\eta$ (效率)
电化学储能		$E_b$	$P_b$	$\eta_b$
热水管网	$E \cdot (S_{oc}(t+1) - S_{oc}(t)) = -P / \eta \cdot \Delta t$	$c_p m_i \cdot (T_i(0) - T_c)$	$P_i$	$\eta_i$
热负荷惯性		$C_j \cdot  T_j(0) - T_{limit} $	$P_j$	1
柔性负荷		$E_{TL}$	$P_{TL}$	$\eta_{TL}$

## 2 广义储能共享模型

广义储能的共享方式采用双边拍卖交易的形式, 双边拍卖除了可防止单边拍卖所造成的垄断情况, 还能降低交易成本与交易次数。该共享模型中, 市场主体主要为储能卖家、储能买家和中间拍卖商。前两者在一天 12 时段之内提供储能投标量与投标价格, 由中间拍卖商告知两者中标结果<sup>[7]</sup>。

### 2.1 目标函数

储能共享模型的目标是社会效益最大化, 社会效益由生产者利润与消费者利润构成, 在本模型中分别为储能卖家剩余与储能买家剩余, 通过图 2 可以看出, 社会效益为投标供应曲线与投标需求曲线之间的面积, 则目标函数公式为

$$\max_{r_{m,t}^{a1}, r_{n,t}^{b1}} O_{bj} = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{m=1}^M p_{m,t}^{a1} q_{m,t}^{a1} r_{m,t}^{a1} - \sum_{n=1}^N p_{n,t}^{b1} q_{n,t}^{b1} r_{n,t}^{b1} \right) \quad (21)$$

式中:  $O_{bj}$  为社会效益;  $M$ 、 $N$  分别为买家和卖家数量;  $p_{m,t}^{a1}$ 、 $p_{n,t}^{b1}$  分别为买家和卖家的投标价格;  $q_{m,t}^{a1}$ 、 $q_{n,t}^{b1}$  分别为买家和卖家的投标数量;  $r_{m,t}^{a1}$ 、 $r_{n,t}^{b1}$  分别为买家和卖家的中标情况。

### 2.2 共享储能约束条件

共享储能的约束条件为储能买家与卖家的投标限制, 包括在相同时间断面下卖家的中标量总和应

该大于等于储能买家的中标量总和, 即

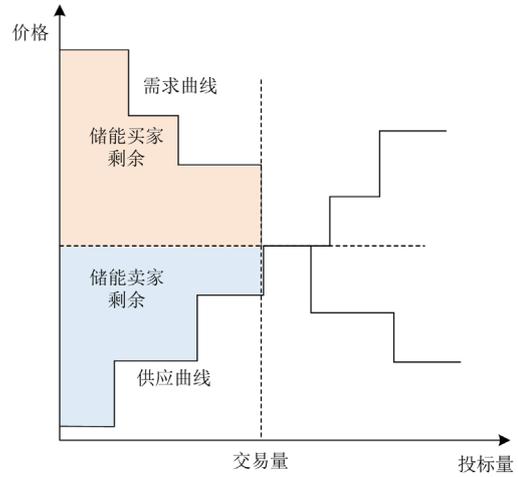


图 2 储能共享出清示意图

Fig. 2 Schematic diagram of energy storage sharing clearing

$$\sum_{m=1}^M (q_{m,t}^{a1} \cdot r_{m,t}^{a1}) \leq \sum_{n=1}^N (q_{n,t}^{b1} \cdot r_{n,t}^{b1}) \quad (22)$$

$$\sum_{t=1}^T q_{m,t}^{a1} \leq E \quad (23)$$

$$\sum_{t=1}^T q_{n,t}^{b1} \leq E \quad (24)$$

$$q_{m,t}^{a1} = P \cdot \Delta t \quad (25)$$

$$q_{n,t}^{b1} = P \cdot \Delta t \quad (26)$$

$$r_{m,t}^{a1} \in \{0, 1\} \quad (27)$$

$$0 \leq r_{n,t}^{b1} \leq 1 \quad (28)$$

式中,  $P$  为各类广义储能的功率。

式(23)、式(24)限制了储能买家与卖家在一个充放电周期内的投标数量必须小于储能容量; 式(25)、式(26)描述了投标量大小; 式(27)表示储能买家的中标情况, 0 代表未中标, 1 代表中标; 式(28)表示储能卖家的中标情况, 1 代表储能投标量全部售出。

### 2.3 收益分配

为公平分配储能收益, 本文中储能中标量的定价机制根据交易双方投标价格取均值。并且储能买卖双方中标顺序按照投标价格最高的储能买家与投标价格最低的储能卖家优先进行交易, 以此类推, 直至卖家投标价格高于买家时, 停止交易, 得到买家  $m$  与卖家  $n$  在  $t$  时刻的交易量  $R_{m,n,t}$ 。

买家  $m$  与卖家  $n$  在  $t$  时刻交易量的价格  $P_{m,n,t}^s$  为

$$P_{m,n,t}^s = \frac{p_{m,t}^{a1} + p_{n,t}^{b1}}{2} \quad (29)$$

储能卖家的利润  $W_n$  为

$$W_n = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N r_{n,t}^{bl} P_{m,n,t}^s R_{m,n,t} \quad (30)$$

储能买家的效益  $W_m$  为

$$W_m = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M r_{m,t}^{al} P_{m,n,t}^s R_{m,n,t} \quad (31)$$

### 2.4 储能共享参与电网调峰服务

储能共享还可以参与辅助服务，实现电网调峰的功能，因为储能具有双向调节的功能，在用电高峰时可以释放存储的电量；在用电低谷时可以帮助消纳弃风，存储多余电量。因此，可以通过调峰补偿来反映储能共享的调峰能力，则目标函数变为

$$\max_{r_{m,t}^{al}, r_{n,t}^{bl}} O_{bj} = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{m=1}^M p_{m,t}^{al} q_{m,t}^{al} r_{m,t}^{al} - \sum_{n=1}^N p_{n,t}^{bl} q_{n,t}^{bl} r_{n,t}^{bl} \right) + W_c \quad (32)$$

$$W_c = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N [P_c(r_{n,t}^{bl} q_{n,t}^{bl})] \quad (33)$$

式中： $W_c$  为调峰补偿收益； $P_c$  为共享交易补偿电价。

### 2.5 储能共享对风电消纳影响

储能共享可以帮助风电消纳，在原有模型的基础上考虑加入弃风惩罚成本来描述储能共享对风电消纳的影响。

$$\max_{r_{m,t}^{al}, r_{n,t}^{bl}} O_{bj} = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{m=1}^M p_{m,t}^{al} q_{m,t}^{al} r_{m,t}^{al} - \sum_{n=1}^N p_{n,t}^{bl} q_{n,t}^{bl} r_{n,t}^{bl} \right) - C_w \quad (34)$$

$$C_w = \sum_{t=1}^T [\theta_{aw} (P_{w,t} - P'_{w,t}) \Delta t] \quad (35)$$

式中： $C_w$  为弃风惩罚成本； $P_{w,t}$  为风电出力； $P'_{w,t}$  为风电消纳量； $\theta_{aw}$  为弃风惩罚系数。

为了评估风电消纳情况，本文还引入风电消纳指标来反映储能对风电的消纳效果。

$$Q_w = \sum_{t=1}^T [(P_{w,t} - P'_{w,t}) \Delta t] \quad (36)$$

式中， $Q_w$  为风电消纳指标。

## 3 算例分析

### 3.1 算例描述

本文以 6 个储能买家与 6 个储能卖家为例，将一天分为 12 个时段进行计算。储能买家与卖家的投标量分别如表 2、表 3 所示，其中(0.8,0.5)代表投标量为 0.8 MWh，投标价格为 0.5 元/kWh。买家 1、2 为柔性负荷，其在低谷时段购电并在高峰时段出售。买家 6 为热负荷惯性，其投标购买量与舒适区间有关，当白天室内温度高于舒适区间上限后，热源停止工作，投标购买量降低。储能卖家 1、2 为柔性负荷，在用电高峰时段售电。卖家 5 为热水管网储能，卖家 6 为风电厂，其余市场参与者为普通用电用户。储能双方投标量参考文献[7]。

表 2 储能买家投标数据

Table 2 Bidding data of energy storage buyers

买家	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{11}$	$t_{12}$
$n_1$	(1,0.5)	(1,0.5)	(1,0.5)	(1,0.5)	(0,0)	(1,0.5)	(1,0.5)	(1,0.5)	(1,0.5)	(0,0)	(1,0.5)	(1,0.5)
$n_2$	(0.5,0.4)	(0.5,0.4)	(0.5,0.4)	(0,0)	(0.5,0.4)	(0.5,0.4)	(0.5,0.4)	(0.5,0.4)	(0,0)	(0.5,0.4)	(0.5,0.4)	(0.5,0.4)
$n_3$	(0,0)	(0,0)	(4,0.6)	(4,0.8)	(6,0.8)	(6,0.8)	(4,0.8)	(4,0.8)	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)
$n_4$	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(5,0.8)	(0,0)	(2,1)	(0,0)	(0,0)	(3,0.9)	(2,0.8)	(0,0)	(0,0)
$n_5$	(0,0)	(0,0)	(2,0.7)	(0,0)	(0,0)	(5,0.8)	(0,0)	(0,0)	(2,0.8)	(0,0)	(2,0.8)	(2,0.7)
$n_6$	(1.2,0.5)	(1.2,0.5)	(1.2,0.5)	(0.8,0.6)	(0.8,0.6)	(0.8,0.6)	(0.64,0.6)	(0.8,0.6)	(0.8,0.6)	(0.8,0.5)	(0.64,0.5)	(1.2,0.5)

表 3 储能卖家投标数据

Table 3 Bidding data of energy storage sellers

卖家	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{11}$	$t_{12}$
$m_1$	0	0	0	0	(6,0.6)	0	0	0	0	(4,0.6)	0	0
$m_2$	0	0	0	(3,0.6)	0	0	0	0	(2,0.6)	0	0	0
$m_3$	(2,0.4)	(2,0.4)	(2,0.4)	(2,0.4)	0	0	0	0	0	(2,0.4)	(2,0.4)	(2,0.4)
$m_4$	0	0	0	0	(8,0.4)	(8,0.4)	(6,0.4)	(6,0.4)	0	0	0	0
$m_5$	0	0	0	0	(4,0.5)	(4,0.5)	(3,0.5)	(3,0.5)	(3,0.5)	0	0	0
$m_6$	(2,0.3)	(2,0.3)	(1.8,0.3)	(1.7,0.3)	(1.6,0.3)	(1.6,0.3)	(1.6,0.3)	(1.7,0.3)	(1.8,0.3)	(2,0.3)	(2,0.3)	(2,0.3)

### 3.2 储能共享双方中标情况

储能共享交易的中标结果如表 4 与表 5 所示, 从表中可知储能卖家中标比例的变化, 例如表 5 中卖家 3 在  $t_1$ 、 $t_2$  时段只中标 35%, 而在  $t_4$  时段中标比例为 100%。由图 3—图 5 可知: 图 3 中投标价格最低的储能买家 2 未中标, 投标价格最高的储能买家 4 则全部中标; 图 5 中投标价格最高的储能卖家 2 仅中标了一半投标量, 其余卖家投标量均中标。因此可得储能买家在相同时间内报价越高越能达成交易, 而储能卖家则是投标价格低者优先达成交易。观察图 4、图 5 的交易结果可知, 图 4 中储能买家 4 的交易对象仅为卖家 6, 而图 5 中储能买家 4 的交易对象变为卖家 5 与卖家 6, 因此可知储能买家的投标量既可由单个卖家提供也可由多个卖家提供。

表 4 储能买家中标情况

Table 4 Winning bid of energy storage buyers

买家	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{11}$	$t_{12}$
$n_1$	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0
$n_2$	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
$n_3$	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0
$n_4$	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0
$n_5$	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
$n_6$	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1

表 5 储能卖家中标情况

Table 5 Winning bid of energy storage sellers

卖家	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$	$t_9$	$t_{10}$	$t_{11}$	$t_{12}$
$m_1$	0	0	0	0	0.375	0	0	0	0	0	0	0
$m_2$	0	0	0	0.6	0	0	0	0	0.5	0	0	0
$m_3$	0.35	0.35	1	1	0	0	0	0	0	0.65	0.82	0.85
$m_4$	0	0	0	0	0.91	1	0.69	0.97	0	0	0	0
$m_5$	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
$m_6$	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1

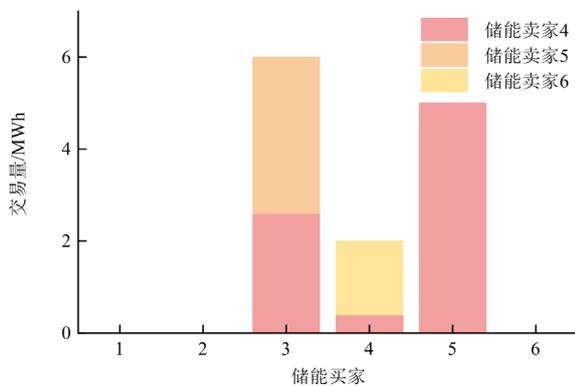


图 3 一天中第 6 时段下储能买家与卖家对应关系  
Fig. 3 Relationship between buyer and seller in the 6th period in a day

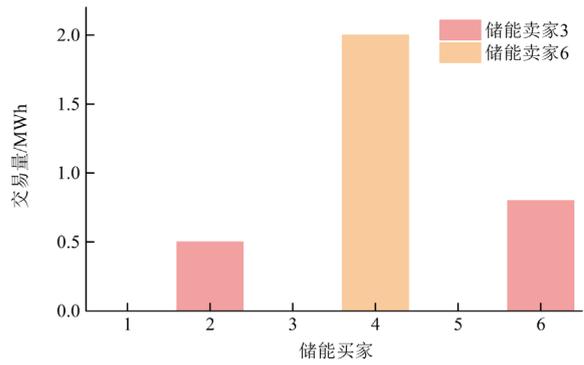


图 4 一天中第 10 时段下储能买家与卖家对应关系  
Fig. 4 Relationship between buyer and seller in 10th period in a day

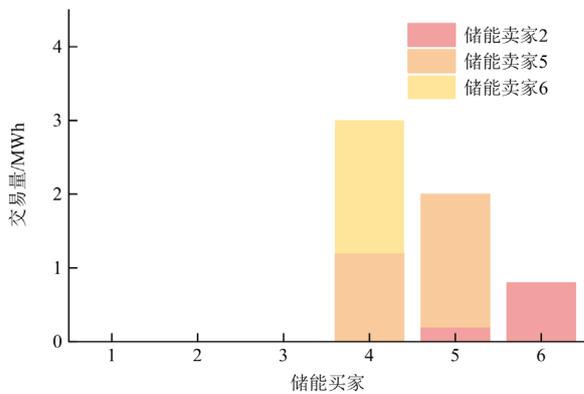


图 5 一天中第 9 时段下储能买家与卖家对应关系  
Fig. 5 Relationship between buyer and seller in the 9th period in a day

### 3.3 储能时移特性对盈利的影响

储能具有良好的运行灵活性, 对于由热源供暖的用户来说, 只需要保证室内温度在一定舒适区间内, 而不需要在全天保持室内温度为固定值; 同理对于建筑楼宇在保持室内温度在舒适范围内的情况下, 可在负荷峰值时段停止供暖, 从而节省购电成本, 同时减少峰时储能购买量, 增加谷时购买量能够降低用户的购电成本。

设置热负荷用户的舒适度区间为 19~23 °C。由图 6 可知, 当室内温度超过 23 °C 时, 热源机组停止工作, 这一时段用户储能购买量降低, 室内温度开始下降, 而在下一时段低于 19 °C 以后开始继续工作。固定温度与可调温度下购电成本对比见图 7。由图 7 可知, 在舒适度区间的购电成本为 3.79 万元, 而在固定温度的购电成本为 4.7 万元, 因此挖掘用户的广义储能特性并参与储能共享交易有效降低了用户的用能成本。

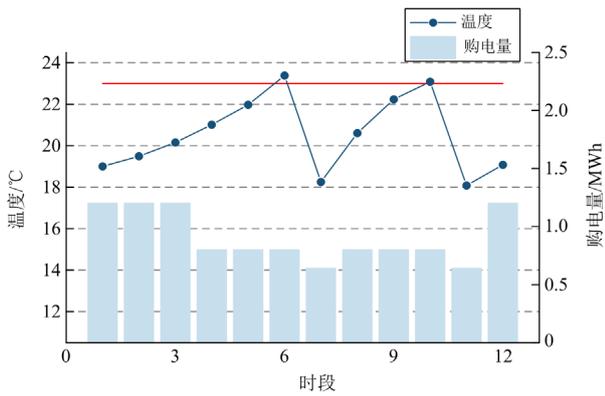


图 6 温度与购电量之间的关系

Fig. 6 Relationship between temperature and electricity purchase

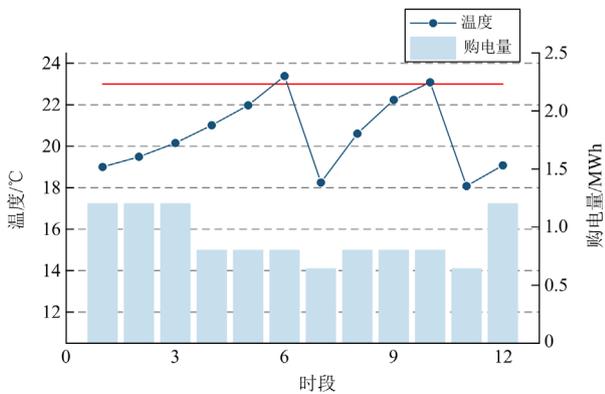


图 7 储能时移特性对购电成本的影响

Fig. 7 Impact of energy storage flexibility on power purchase cost

### 3.4 个体市场力行为对储能共享结果的影响

现货市场集中式交易的市场力指市场主体为了自身盈利最大化，通过改变竞标价格从而达到抬高电价的目的。本节分析了分散式储能共享机制下个体的市场力行为。以储能卖家 5 为例，当不考虑其所含市场力时，各储能卖家正常投标；在考虑储能卖家 5 的市场力行为后，储能卖家 5 为增加交易量，降低了其投标价格，最后在目标函数式(34)的基础上扣除储能卖家 5 交易扩大的惩罚项<sup>[26]</sup>。设定以下两种场景：Case1 为储能卖家 5 不含市场力的情况；Case2 为储能卖家 5 含市场力的情况。

由图 8 可知，在第 7 时段，依据“卖家投标价格最低者先中标”的原则下无法中标的储能卖家 5 通过降低报价获得了中标量，导致了卖家 4 与卖家 6 中标量减少。

图 9 展示了两种情况下各市场主体的盈利对比，仅储能卖家 5 收益增加，与储能卖家 5 直接竞

争的储能卖家 4 与 6 收益明显降低。

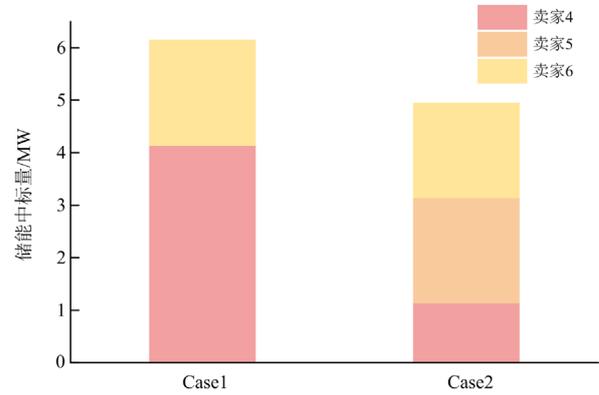


图 8 市场力对第 7 时段中标结果的影响

Fig. 8 Influence of market power on bid winning results in the 7th period

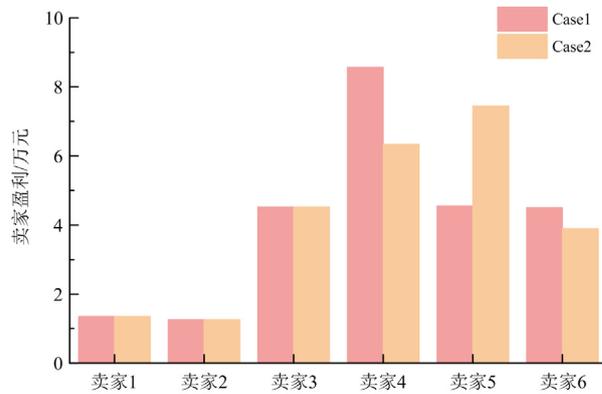


图 9 市场力对个体盈利的影响

Fig. 9 Impact of market power on individual profit

### 3.5 储能共享参与电网调峰效果分析

本节为分析对新能源消纳和电网调峰能力的影响，将在原有模型的基础上对以下几种场景进行对比分析：Case(1) 未加入电网调峰补偿与弃风惩罚项；Case(2) 加入电网调峰补偿，但未考虑弃风惩罚项；Case(3) 加入电网调峰补偿与弃风惩罚项，得到的结果如表 6 所示。

表 6 储能共享对新能源消纳和电网调峰能力的影响

Table 6 Impact of energy storage sharing on new energy consumption and grid peak shaving capacity

	峰谷差/MW	弃风指标/MWh	社会效益/万元
Case(1)	5.15	3.3	18.65
Case(2)	4.68	3.3	19.29
Case(3)	4.5	0	20.85

从表 6 中可以明显看出，随着电网调峰补偿的加入，降低了系统峰谷差，并且风电的消纳也将有

助于降低峰谷差, 而弃风惩罚的加入将帮助风电进行消纳, 降低弃风, 增加社会效益。

## 4 结论

本文构建了考虑热惯性的广义储能模型, 提出了基于双边拍卖的广义储能共享交易模型。通过算例仿真得到以下结论:

1) 验证了建筑物热惯性模型可降低负荷作为储能买方时的需求, 在负荷低谷时段能够降低19.3%的储能电量需求。

2) 储能具有双重身份(即产消者), 既可以作为买家购买储能, 又可以作为卖家出售储能, 以此达到利益最大化。通过广义储能共享交易有效挖掘了其运行灵活性, 增加了其市场化收益。

3) 在储能共享交易中, 个体改变投标价格能够增加个体利益, 但不利于整体社会效益, 因而储能共享机制下的市场监管值得关注。

未来研究将考虑广义储能与间歇性新能源互补协同, 在分散式交易模式下挖掘储能运行灵活性, 平抑新能源波动。

## 参考文献

- [1] 臧海祥, 马铭欣, 周亦洲, 等. 电力市场环境风电-光热-生物质混合电站鲁棒优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 1-11.  
ZANG Haixiang, MA Mingxin, ZHOU Yizhou, et al. Robust optimal scheduling model for a 'wind power-concentrating solar power-biomass' hybrid power plant in the electricity market[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 1-11.
- [2] 乔志杰, 马临超. 适用于电力系统稳定性提升的大规模储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2022, 58(12): 75-84.  
QIAO Zhijie, MA Linchao. Research on large-scale energy storage control strategy for power system stability improvement[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12): 75-84.
- [3] 李国庆, 闫克非, 范高锋, 等. 储能参与现货电能量-调频辅助服务市场的交易决策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 45-54.  
LI Guoqing, YAN Kefei, FAN Gaofeng, et al. Transaction decision-making of energy storage stations participating in the spot energy and frequency modulation ancillary service market[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 45-54.
- [4] 罗金满, 刘丽媛, 刘飘, 等. 考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 167-173.  
LUO Jinman, LIU Liyuan, LIU Piao, et al. An optimal scheduling method for active distribution network considering source network load storage coordination[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 167-173.
- [5] 李宏仲, 房宇娇, 肖宝辉. 考虑广义储能的区域综合能源系统优化运行研究[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3130-3138.  
LI Hongzhong, FANG Yujiao, XIAO Baohui. Research on optimized operation of regional integrated energy system considering generalized energy storage[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3130-3138.
- [6] 刘洋, 李立生, 刘志伟, 等. 考虑广义储能集群参与的配电网协同控制策略[J]. 电力建设, 2021, 42(8): 89-98.  
LIU Yang, LI Lisheng, LIU Zhiwei, et al. Cooperative control strategy of distribution network considering generalized energy storage cluster participation[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(8): 89-98.
- [7] 孙偲, 郑天文, 陈来军, 等. 基于组合双向拍卖的共享储能机制研究[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1732-1739.  
SUN Cai, ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, et al. Energy storage sharing mechanism based on combinatorial double auction[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1732-1739.
- [8] 黄雨佳, 孙秋野, 王睿, 等. 计及气体成分变化的电气-热综合能源系统能量流计算方法[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(6): 563-573.  
HUANG Yujia, SUN Qiuye, WANG Rui, et al. Combined energy flow calculation method for electric-gas-heat integrated energy system considering gas composition changes[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(6): 563-573.
- [9] 杨秀, 柴梓轩, 刘方, 等. 考虑热动态和碳交易的电气-热综合能源系统协调调度[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 49-58.  
YANG Xiu, CHAI Zixuan, LIU Fang, et al. Coordinated scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system considering thermal dynamics and carbon trading[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11): 49-58.
- [10] 张大海, 负韞韵, 王小君, 等. 考虑广义储能及光热电站的电热气互联综合能源系统经济调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 33-42.  
ZHANG Dahai, YUN Yunyun, WANG Xiaojun, et al. Economic dispatch of integrated electricity-heat-gas energy system considering generalized energy storage and concentrating solar power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 33-42.

- [11] 王凌云, 徐健哲, 李世春, 等. 考虑电-气-热需求响应和阶梯式碳交易的综合能源系统低碳经济调度[J]. 智慧电力, 2022, 50(9): 45-52.  
WANG Lingyun, XU Jianzhe, LI Shichun, et al. Low carbon economic dispatch of integrated energy system considering electricity-gas-heat demand response and tiered carbon trading[J]. Smart Power, 2022, 50(9): 45-52.
- [12] 修晓青, 李相俊, 王佳蕊, 等. 基于等效能折算的储能电站广义成本研究[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 192-202.  
XIU Xiaoqing, LI Xiangjun, WANG Jiarui, et al. Generalized cost study of energy storage power station based on equivalent efficiency conversion[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 192-202.
- [13] 古哲源, 苏小林, 秦宏, 等. 考虑广义电储能的综合能源系统多目标规划[J]. 供用电, 2020, 37(7):73-80, 87.  
GU Zheyuan, SU Xiaolin, QIN Hong, et al. Multi-objective planning of integrated energy system considering generalized energy storage[J]. Distribution and Utilization, 2020, 37(7): 73-80, 87.
- [14] 张治, 董润楠, 魏振华, 等. 考虑风电不确定性和旋转备用容量配置的综合能源系统鲁棒机会约束优化[J]. 热力发电, 2022, 51(6): 25-33.  
ZHANG Zhi, DONG Runnan, WEI Zhenhua, et al. Robust chance-constrained optimization of integrated energy system considering wind power uncertainty and spinning reserve capacity allocation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(6): 25-33.
- [15] 侯慧, 刘鹏, 刘志刚, 等. 电热氢多元储能系统优化调度方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 536-545.  
HOU Hui, LIU Peng, LIU Zhigang, et al. Optimal dispatch method for multi-energy storage system of electricity heat hydrogen[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 536-545.
- [16] 陈玥, 刘锋, 魏韡, 等. 需求侧能量共享: 概念、机制与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 1-11.  
CHEN Yue, LIU Feng, WEI Wei, et al. Energy sharing at demand side: concept, mechanism and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 1-11.
- [17] 罗博航, 沈翔宇. 基于区块链的共享储能联合市场竞争模型与交易机制[J]. 电测与仪表, 2022, 59(8): 30-38.  
LUO Bohang, SHEN Xiangyu. Energy storage sharing method based on blockchain: model, mechanism and Implementation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(8): 30-38.
- [18] CHAKRABORTY P, BAEYENS E, POOLLAA K, et al. Sharing storage in a smart grid: a coalitional game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4379-4390.
- [19] 杨帆, 王维庆, 程静, 等. 基于误差分配原则的发电侧共享储能容量规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 91-102.  
YANG Fan, WANG Weiqing, CHEN Jing, et al. Capacity planning of shared energy storage on the generation side based on the error distribution principle[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 91-102.
- [20] 王仕俊, 平常, 薛国斌. 考虑共享储能的社区综合能源系统协同优化研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 77-84.  
WANG Shijun, PING Chang, XUE Guobin. Synergic optimization of community energy internet considering the shared energy storage[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 77-84.
- [21] 杨冬梅, 王俊, 杜炜. 考虑源网荷储聚合交易的区域电热综合能源系统优化调度[J]. 电力建设, 2021, 42(10): 28-39.  
YANG Dongmei, WANG Jun, DU Wei. Optimal dispatching for regional integrated electric and heating systems considering aggregation and transaction of generation-grid-load-storage[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(10): 28-39.
- [22] CUI S, WANG Y W, LIU X K, et al. Economic storage sharing framework: asymmetric bargaining-based energy cooperation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(11): 7489-7500.
- [23] TUSHAT W, CHAI B, YUEN C, et al. Energy storage sharing in smart grid: a modified auction-based approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1462-1475.
- [24] YANG J, ZHANG N, BOTTERUD A, et al. On an equivalent representation of the dynamics in district heating networks for combined electricity-heat operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(1): 560-570.
- [25] HHUANG Wujing, ZHANG Xi, LI Kangping, et al. Resilience oriented planning of urban multi-energy systems with generalized energy storage sources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 2906-2918.
- [26] HOBBS B F. Linear complementarity models of Nash-Cournot competition in bilateral and POOLCO power markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(2): 194-202.

收稿日期: 2023-01-13; 修回日期: 2023-05-21

作者简介:

嵇文路(1974—), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为智能配电网、调度自动化; E-mail: 845923286@qq.com

廖英祺(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网优化调度、智能配网。

(编辑 姜新丽)