

# 考虑综合需求响应的工业园区负荷管理方法

魏景东,张耀,王建学,雍维桢

(陕西省智能电网重点实验室,西安交通大学 电气工程学院,西安 710049)

## Industrial park load management method considering integrated demand response

WEI Jingdong, ZHANG Yao, WANG Jianxue, YONG Weizhen

(1. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**摘要:**为了降低工业园区的能源消耗费用、提升经济效益,提出了一种考虑热电联供机组和热储能装置综合需求响应的工业园区负荷管理方法。热电联供机组通过增加其在峰值负荷时段的电力输出,不仅可以减少两部制电价下工业园区的需量电费,还可以减少其电度电费。热储能装置可以有效地利用热电联供机组在实施综合需求响应时产生的余热,并进一步提升热电联供机组的运行灵活性。算例分析验证了所提工业园区负荷管理方法的有效性,证明了基于热电联供机组和热储能装置的综合需求响应可以显著降低工业园区两部制电价下的需量电费。

**关键词:**热电联供机组;负荷管理;工业园区;综合需求响应;热储能

**Abstract:** In order to reduce the energy bill of industrial park and improve its economic gains, an industrial park demand management approach considering the integrated demand response of combined heat and power units and thermal storage is proposed. Combined heat and power units can reduce not only the peak demand charge but also the energy charge under the two-part tariff policy by increasing their electricity outputs in peak-load periods. The thermal storage can efficiently utilize the waste heat provided by combined heat and power units and furtherly increase the flexibility of combined heat and power units. Numerical case studies validate the effectiveness of our proposed industrial park demand management method, demonstrating a significant reduction of the peak demand charge through the integrated demand response of combined heat and power units and thermal storage.

**Key words:** combined heat and power units; load management; industrial park; integrated demand response; thermal storage

## 0 引言

工业园区是政府为了经济发展,通过行政手段将各种生产要素进行科学整合,打造的现代化产业分工协作生产区。工业园区是典型的综合能源系统<sup>[1-2]</sup>,通常伴随着大量的能源需求,例如电力和天然气。在很多国家,例如中国和美国,工业园区的电费一般按两部制电价<sup>[3]</sup>计费。在两部制电价下,工业园区的电费账单包含需量电费和电度电费2个组成部分<sup>[4-6]</sup>。需量电费通常基于月度最大电力负荷进行收费,而电度电费则基于账单周期内的实际电能消耗量进行收费。电度电费电价在不同时段一般是不同的,通常采用分时电价。例如在中国,分时电价一般包含峰、平、谷3个收费标准<sup>[7]</sup>。

工业园区的需量电费一般在总电费中的占比很高,最高可达总电费的50%~70%<sup>[3]</sup>。因此,如何有效运用工业园区负荷管理方法来降低峰值负荷,成为研究热点。有效的负荷管理方法不仅可以提升经济性,还可以促进工业园区的持续健康发展。

基于电池储能系统的电力需求响应是实现工业园区负荷管理的常用方法,电池储能可以在电价谷时段充电存储电能,在电价峰时段放电供应用户的用能。基于电池储能系统的负荷管理技术已有一些文章进行研究<sup>[7-9]</sup>。文献[7]阐述了一种利用光伏和电池储能组合实现工商业楼宇负荷管理的方法。文献[8]研究了基于储能的电动汽车快速充电单元负荷管理方法,减轻电动汽车负载对配电网的影响。为了最小化用户两部制电价下的电费,文献[9]提出了一种考虑可再生能源和现货电价的电池储能优化管理方法。

另一方面,随着综合能源系统的发展,需求响应逐渐由电力需求响应扩展到综合需求响应<sup>[10]</sup>。与传统的电力需求响应相比,综合需求响应不依赖于灵活电力负荷,可以利用多能耦合设备来削减电力峰值负荷。到目前为止,综合需求响应已有一定的研究,涉及基本概念、负荷响应模型、电-气耦合优化运行和市场机制等<sup>[10-11]</sup>。然而,尚未有研究将综合需求响应应用于工业园区的负荷管理。同时,工业园区中的热电联供机组一般工作在以热定电模式,在实施综合需求响应时运行灵活性受限。

为了解决这些挑战,本文基于热电联供机组和

收稿日期:2020-11-08;修回日期:2020-11-19

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2019ZDLGY18-01)

热储能装置,提出了实现工业园区负荷管理的新思路。首先,阐述了利用热电联供机组综合需求响应实现工业园区负荷管理的方法:引入热储能装置来实现工业园区中各工业用户的热力存储和共享,释放热电联供机组的运行灵活性;然后,建立工业园区负荷管理的优化模型;最后,对所提方法进行算例分析,算例结果表明,所提方法可以有效降低工业园区的需量电费,提升其经济效益。

## 1 工业园区负荷管理的总体架构

### 1.1 工业园区的基本结构

含  $N$  个工业用户的工业园区基本结构如图 1 所示,配电线路上经过变压器连接上级电网和各个用户。每个用户配置了热电联供机组和分布式光伏面板来供应电力负荷和热力负荷。由于工业用户一般有比较大的热力和电力需求,为了提升能源利用效率,这种设备配置模式是比较常见的。

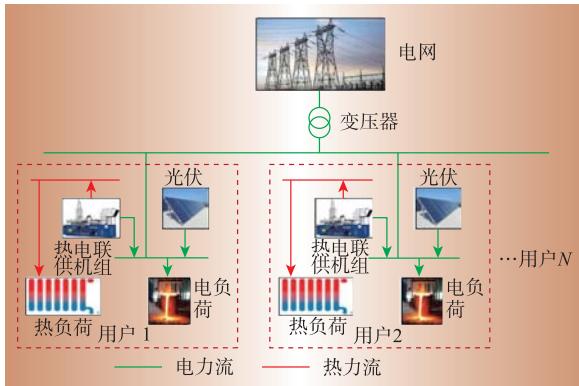


图 1 含热电联供机组的工业园区基本结构

Fig. 1 Basic structure of industrial park with combined heat and power units

工业园区依据电网的两部制电价机制支付总电费,然后将这笔电费重新分配给所有用户。这种模式具有激励相容性的优点,既可以减少每个用户的账单,又不会损害任何用户的利益。

### 1.2 考虑综合需求响应的工业园区负荷管理方法

热电联供机组作为常规配置,可满足各个工业用户自身的热力和电力需求。利用各用户热电联供机组的综合需求响应特性,可以实现整个工业园区的负荷管理。例如,热电联供机组可以响应上级电网发布的峰、平、谷分时电价,在电价高峰时段(通常也是电力峰值负荷时段)增加其电力输出以供应电力负荷,从而降低整个园区从上级电网的购电功率,进而降低工业园区的峰值负荷,实现节省需量电费的目的。

值得注意的是,虽然上述方法可以利用热电联供机组的综合需求响应特性实现工业园区的负荷管理,但是在峰值负荷时段,热电联供机组产生的大量热能将被废弃。这是由于为减少峰值负荷时段从上级电网购买的电能,热电联供机组在增加电力输出的同时也增加热力输出。这时热电联供机组增加的热量输出,可能会超出单个工业用户的实际热力需求。因此,热电联供机组产生的多余热量将被废弃,使得工业园区的能源利用效率降低。为解决这一问题,引入了集中式热储能来实现各工业用户间热力的存储和共享,如图 2 所示。热储能系统可以存储热电联供机组在峰值负荷时段产生的多余热量,在非峰荷时段再将这些热量释放出来向各个工业用户供热。

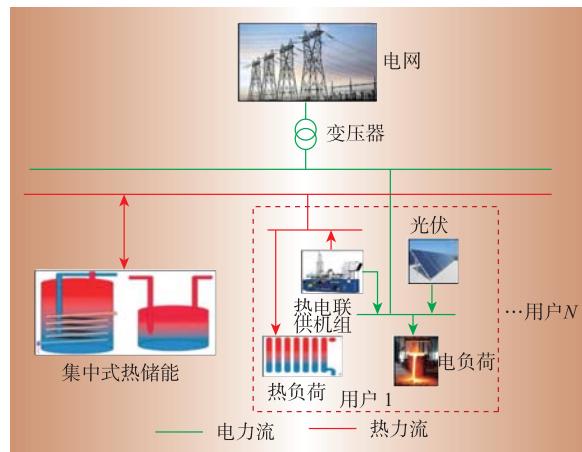


图 2 含热电联供机组和热储能系统的工业园区结构

Fig. 2 Structure of industrial park with combined heat and power units and thermal storage

## 2 工业园区负荷管理的优化模型

### 2.1 目标函数

在两部制电价机制下,用电成本包括 2 个部分:电度电费和需量电费。用气成本指的是所有用户热电联供机组消耗天然气的总费用。工业园区负荷管理以月度总用电成本和月度总用气成本最小为目标函数,如下所示

$$\min(\sum_{k,t} \lambda_t^{\text{grid}} P_{k,t}^{\text{grid}} + \lambda^m \bar{P}^m + \sum_{i,k,t} \lambda^{\text{gas}} F_{i,k,t}^{\text{CHP}}) \quad (1)$$

式中:  $i$ 、 $k$ 、 $t$  分别为工业用户、典型日、时段的序号;  $\lambda_t^{\text{grid}}$  为电度电费电价,元/kWh;  $\lambda^m$  为需量电费费率,元/kW;  $\lambda^{\text{gas}}$  为天然气价格,元/m<sup>3</sup>;  $P_{k,t}^{\text{grid}}$  为工业园区从上级电网的购电功率,kW;  $\bar{P}^m$  为整个工业园区月度最大需量;  $F_{i,k,t}^{\text{CHP}}$  为热电联供机组的天然气消耗量,m<sup>3</sup>/h。

## 2.2 约束条件

工业园区负荷管理的优化模型的约束条件包含如下4个部分。

### (1) 工业园区电热功率平衡约束

整个园区的电功率平衡如下

$$P_{k,t}^{\text{grid}} + \sum_i (P_{i,k,t}^{\text{CHP}} + P_{i,k,t}^{\text{PV}}) = \sum_i P_{i,k,t}^{\text{d}} \quad \forall k, \forall t \quad (2)$$

式中:  $P_{k,t}^{\text{grid}}$  为工业园区从上级电网的购电功率;  $P_{i,k,t}^{\text{CHP}}$  为各用户热电联供机组发电功率;  $P_{i,k,t}^{\text{PV}}$  为光伏出力;  $P_{i,k,t}^{\text{d}}$  为用户  $i$  在第  $k$  天的第  $t$  个时段的电力需求。

由于集中式热储能的参与,各个用户热电联供机组的热力输出  $H_{i,k,t}^{\text{CHP}}$  以及集中式热储能的充、放热功率  $H_{k,t}^{\text{ch}}, H_{k,t}^{\text{dis}}$  共同满足所有用户的热力需求。

$$\sum_i H_{i,k,t}^{\text{CHP}} + H_{k,t}^{\text{dis}} - H_{k,t}^{\text{ch}} = \sum_i H_{i,k,t}^{\text{d}} \quad \forall k, \forall t \quad (3)$$

式中:  $H_{i,k,t}^{\text{d}}$  为用户  $i$  在第  $k$  天的第  $t$  个时段的热力需求。

### (2) 工业园区最大需量约束

工业园区的最大需量是任意时段从上级电网购电功率的最大值,计算如下

$$P_{k,t}^{\text{grid}} \leq \bar{P}^{\text{m}} \quad \forall k, \forall t \quad (4)$$

### (3) 各工业用户自有设备约束

用户自有设备约束包括热电联供机组运行约束:

热电联供机组的电力输出范围如下

$$P_i^{\text{CHP}} \leq P_{i,k,t}^{\text{CHP}} \leq \bar{P}_i^{\text{CHP}} \quad \forall i, \forall k, \forall t \quad (5)$$

式中:  $\bar{P}_i^{\text{CHP}}$ 、 $P_i^{\text{CHP}}$  分别为用户  $i$  热电联供机组的电功率出力上、下限。

热电联供机组电力输出与天然气消耗量的关系如下

$$P_{i,k,t}^{\text{CHP}} = F_{i,k,t}^{\text{CHP}} \rho^{\text{LHV}} \eta_i^{\text{CHP}} \quad \forall i, \forall k, \forall t \quad (6)$$

式中:  $\rho^{\text{LHV}}$  为天然气的低热值;  $\eta_i^{\text{CHP}}$  为热电联供机组的发电效率系数。

热电联供机组的热功率输出如下

$$H_{i,k,t}^{\text{CHP}} = P_{i,k,t}^{\text{CHP}} (1 - \eta_i^{\text{CHP}} - \eta_i^{\text{loss}}) \quad \forall i, \forall k, \forall t \quad (7)$$

式中:  $\eta_i^{\text{loss}}$  为热电联供机组的热损耗系数。

分布式光伏的电力输出范围如下

$$0 \leq P_{i,k,t}^{\text{PV}} \leq P_{i,k,t}^{\text{PV,fest}} \quad \forall i, \forall k, \forall t \quad (8)$$

式中:  $P_{i,k,t}^{\text{PV,fest}}$  为用户  $i$  的分布式光伏在第  $k$  天的第  $t$  个时段的预测出力。

### (4) 工业园区集中式热储能约束

集中式热储能约束包含:

充放热功率的上、下限约束如下

$$0 \leq H_{k,t}^{\text{ch}} \leq \bar{H}_{k,t}^{\text{TS}} \quad \forall k, \forall t \quad (9)$$

$$0 \leq H_{k,t}^{\text{dis}} \leq \bar{H}_{k,t}^{\text{TS}} \quad \forall k, \forall t \quad (10)$$

式中:  $\bar{H}_{k,t}^{\text{TS}}$  为集中式热储能的热功率上限。

充、放热功率与热储能存储热量的时段耦合约

束如下

$$E_{k,t}^{\text{TS}} = E_{k,t-1}^{\text{TS}} + H_{k,t}^{\text{ch}} \eta^{\text{ch}} - H_{k,t}^{\text{dis}} / \eta^{\text{dis}} \quad \forall k, \forall t \quad (11)$$

式中:  $E_{k,t}^{\text{TS}}$  为热储能系统在第  $k$  天的第  $t$  个时段所存储的热量;  $\eta^{\text{ch}}$ 、 $\eta^{\text{dis}}$  分别为热储能系统的充、放热效率。

热储能存储热量的上、下限约束如下

$$\underline{E}_{k,t}^{\text{TS}} \leq E_{k,t}^{\text{TS}} \leq \bar{E}_{k,t}^{\text{TS}} \quad \forall k, \forall t \quad (12)$$

式中:  $\underline{E}_{k,t}^{\text{TS}}$ 、 $\bar{E}_{k,t}^{\text{TS}}$  分别为热储能所能存储热量的上、下限值。

每天热储能系统的初值约束如下

$$E_{k,t=1}^{\text{TS}} = E^{\text{TS,init}} \quad \forall k \quad (13)$$

式中:  $E^{\text{TS,init}}$  为热储能系统的热量存储初值。

值得注意的是,式(1)中的第三项自然保证了集中式热储能不会同时充、放热。这是因为热储能同时充、放热会造成更高的热力损耗,进而造成更多的天然气消耗,这与目标函数中最小化天然气消耗成本相矛盾。

## 3 算例分析

我们将通过一个含3个用户的示例性工业园区来验证提出的考虑综合需求响应的工业园区负荷管理方法。我们选取了4个典型日来代表一个月,其中每个典型日代表一周。一周中的典型日选择出现峰值电力负荷的一天,同时我们将4个典型日中具有最大峰值负荷的典型日选为月度峰值负荷典型日。分时电价采用西安市大工业用户的峰、平、谷电价,高峰电价0.8769元/kWh(7:30—11:30, 19:30—23:30)、平段电价0.5502元/kWh(11:30—19:30)、低谷电价0.2235元/kWh(23:30—次日7:30)。需量电费电价为31元/kVA。集中式热储能采用4 MW/8 h 储热罐,所提优化模型在基于MATLAB的YALMIP工具箱中进行编程实现,并采用IBM公司的Cplex求解器在i7-8700处理器,16 GB内存的台式机上进行求解。

为了证明所提负荷管理方法的有效性,我们设计了3个场景进行对比:

**场景1:** 工业园区没有负荷管理。园区中的热电联供机组工作在以热定电的模式下,不能实现基于上级电网分时电价的综合需求响应。工业园区从上级电网购电满足电力负荷需求。

**场景2:** 基于热电联供机组的工业园区负荷管理。园区中的热电联供机组不受以热定电的模式限制,在峰值负荷时段增加电力输出来满足园区中的电力负荷需求。

**场景3:** 基于热电联供机组和集中式热储能的工业园区负荷管理。在场景2的基础上引入集中式热储能实现整个园区热力的存储和共享,提升能源

利用效率。场景1和场景2的对比结果如表1和图3所示。

表1 场景1和场景2的能源消耗费用对比

Table 1 Comparison of energy bill between scenario 1 and scenario 2

	场景1	场景2
最大需量/MW	25.718	20.155
从上级电网的购电量/MWh	6 054	5 250
工业园区天然气消耗量/ $10^6 \text{ m}^3$	0.354	0.617
热电联供机组供电量/MWh	1 086	1 890
热电联供机组供热量/MWh	1 545	2 697
弃热量/MWh	0	1 152
需量电费/ $10^6 \text{ 元}$	0.797	0.625
电度电费/ $10^6 \text{ 元}$	4.095	3.390
总电费/ $10^6 \text{ 元}$	4.892	4.015
天然气消耗成本/ $10^6 \text{ 元}$	0.790	1.377
总能源消耗成本/ $10^6 \text{ 元}$	5.682	5.392

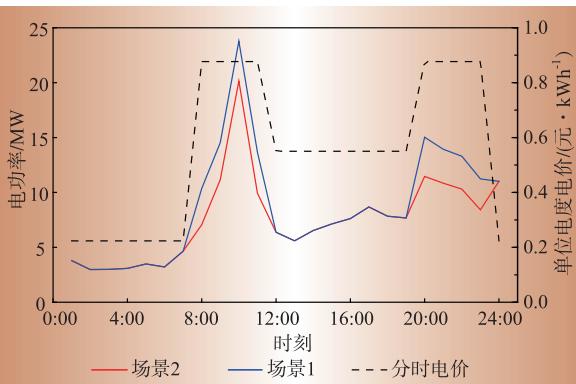
图3 场景1和场景2下工业园区从上级电网购电量对比  
(月度峰值负荷典型日)

Fig. 3 Comparison of electricity power purchased from utilities between scenario 1 and scenario 2 (monthly peak-load typical day)

由表1可以看出,从场景1到场景2,工业园区的最大需量减少了21.63%。同时,工业园区从上级电网的购电量和电度电费也分别减少了13.29%和17.23%。充分展现了本文所提出的基于热电联供机组综合需求响应实现工业园区负荷管理方法的有效性。主要原因是当热电联供机组不运行在以热定电模式时,可以在峰值负荷时段增加电功率出力,满足园区电力负荷需求。因此,正如表1和图3所示,工业园区最大需量以及从上级电网的购电量都显著降低,使得在考虑综合需求响应后,工业园区的需量电费和电度电费均大幅度减少。虽然整个园区的天然气消耗成本增加了74.30%,但是总能源消耗成本降低了5.12%,这表明我们提出的方法比没有考虑综合需求响应的传统方法有更好的经济性。

天然气消耗成本的显著增加主要是由于实施

负荷管理时热电联供机组的电力输出增加,使得在峰值负荷时段消耗了更多的天然气。事实上,在此过程中,热电联供机组同时增加了热力输出,如图4所示。增加的热力输出超出了园区的热负荷需求,导致热电联供机组发出的多余热量被弃掉。由表1可以看出,被弃掉的热量将近1 200 MWh,导致整个园区能源利用效率低下。

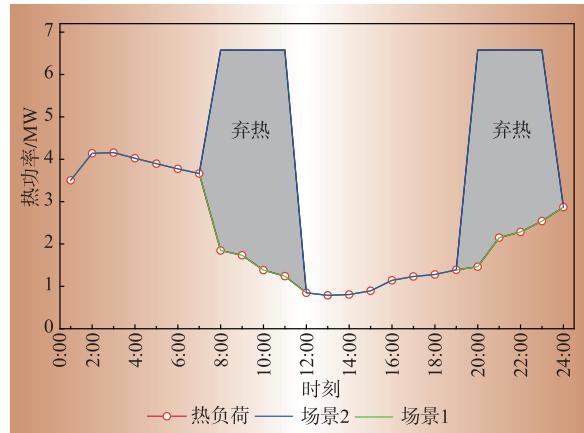
图4 场景1和场景2下热电联供机组供热量对比  
(月度峰值负荷典型日)

Fig. 4 Comparison of heat power provided by combined heat and power units between scenario 1 and scenario 2 (monthly peak-load typical day)

为充分利用热电联供机组的弃热、提升能源利用效率,引入了集中式热储能,在各个用户间实现热力共享和存储。对比结果如表2和图5所示。

表2 场景2和场景3的能源消耗费用对比

Table 2 Comparison of energy consumption cost between scenario 2 and scenario 3

	场景2	场景3
最大需量/MW	20.155	20.934
从上级电网的购电量/MWh	5 250	5 924
工业园区天然气消耗量/ $10^6 \text{ m}^3$	0.617	0.395
热电联供机组供电量/MWh	1 890	1 216
热电联供机组供热量/MWh	2 697	1 727
废热量/MWh	1 152	0
需量电费/ $10^6 \text{ 元}$	0.625	0.649
电度电费/ $10^6 \text{ 元}$	3.390	3.642
总电费/ $10^6 \text{ 元}$	4.015	4.291
天然气消耗成本/ $10^6 \text{ 元}$	1.377	0.881
总能源消耗成本/ $10^6 \text{ 元}$	5.392	5.172

由表2可以看出,场景2和场景3的工业园区最大需量非常接近,偏差仅为3.87%。另一方面,虽然由场景2到场景3总电费增加了6.87%,但热电联供机组的天然气消耗成本降低了将近36%。此外,由于集中式热储能的存在,场景3的弃热量为0。

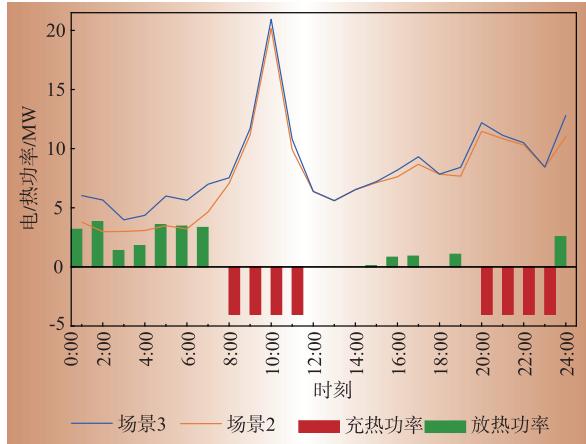


图5 场景2和场景3下工业园区从上级电网购电量对比以及集中式热储能的充、放热功率(月度峰值负荷典型日)

Fig. 5 Comparison of electricity power purchased from utilities between scenario 2 and scenario 3 as well as charging and discharging heat power of centralized thermal storage (monthly peak-load typical day)

由图5可知,热储能能在峰荷时段(8:00—11:00, 20:00—23:00)存储热电联供机组产生的多余热量,在非峰荷时段释放存储的热量以满足用户热力需求。因此,弃热量被充分利用,使得非峰荷时段的燃气消耗量显著降低。

#### 4 结束语

本文提出了一种考虑热电联供机组和热储能装置综合需求响应的工业园区负荷管理方法。算例分析结果验证了所提方法的有效性。通过实施热电联供机组综合需求响应,电力峰值负荷以及从上级电网购买的电能都显著降低,从而降低了工业园区的需量电费和电度电费;在引入集中式热储能之后,由于热储能有效地利用了余热、提升了工业园区总体的能源利用效率,使得工业园区的总能源消耗费用进一步降低。 □

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 徐成司,董树锋,张舒鹏,等.面向工业园区的集中-分布式综合需求响应方法[J/OL].[2020-11-06].电网技术,<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0945>.  
XU Chengsi, DONG Shufeng, ZHANG Shupeng, et al.

Centralized-distributed integrated demand response method for industrial park[J/OL].[2020-11-06]. Power System Technology, <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0945>.

- [3] ZHANG Y, AUGENBROE G. Optimal demand charge reduction for commercial buildings through a combination of efficiency and flexibility measures[J]. Applied Energy, 2018, 221:180—194.
- [4] 张继元,陈皓勇,王卫宏.考虑需量管理的用户侧储能优化配置策略研究[J].电力需求侧管理,2020,22(5):19—24.  
ZHANG Jiyuan, CHEN Haoyong, WANG Weihong. Research on optimal configuration strategy of user-side energy storage considering demand management[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(5):19—24.
- [5] 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):1179—1186.  
DING Yixing, XU Qingshan, LÜ Yajuan, et al. Optimal configuration of user-side energy storage considering power demand management[J]. Power System Technology, 2019, 43(4):1179—1186.
- [6] 陈丽娟,吴甜恬,柳惠波,等.基于需量管理的两阶段大用户储能优化模型[J].电力系统自动化,2019,43(1):194—200.  
CHEN Lijuan, WU Tiantian, LIU Huibo, et al. Demand management based two-stage optimal storage model for large users[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1):194—200.
- [7] HANNA R, KLEISSL J, NOTTROTT A, et al. Energy dispatch schedule optimization for demand charge reduction using a photovoltaic-battery storage system with solar forecasting[J]. Solar Energy, 2014, 103:269—287.
- [8] MCPHAIL D. Evaluation of ground energy storage assisted electric vehicle DC fast charger for demand charge reduction and providing demand response[J]. Renewable Energy, 2014, 67:103—108.
- [9] JIN J, XU Y. Optimal storage operation under demand charge[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1):795—808.
- [10] 徐筝,孙宏斌,郭庆来.综合需求响应研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2018,38(24):7194—7205.  
XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinghai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24):7194—7205.
- [11] BAHRAMI S, SHEIKHI A. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2):650—658.

#### 作者简介:

魏景东(1989),男,辽宁葫芦岛人,博士研究生,研究方向为综合能源系统和综合需求响应;

张耀(1988),男,江苏镇江人,副教授,研究方向为新能源预测和电力系统优化;

王建学(1976),男,重庆人,教授,研究方向为电力市场、电力系统规划与运行;

雍维横(1996),男,重庆人,博士研究生,研究方向为需求响应和微电网能量管理。

(责任编辑 水 鹤)