

# 促进可再生能源发电消纳和碳减排的 数据中心优化调度与需求响应策略

兰洲<sup>1</sup>, 蒋晨威<sup>2,3</sup>, 谷纪亭<sup>1</sup>, 文福拴<sup>2,3</sup>, 杨侃<sup>1</sup>, 王坤<sup>1</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院 杭州市 310016;

2. 浙江大学电气工程学院 杭州市 310027; 3. 杭州沃瑞电力科技有限公司 杭州市 310012)

**摘 要:** 数据中心是用户侧重要的灵活性资源, 通过对其合理调度与引导需求响应可有效提升数据中心对分布式可再生能源发电的就地消纳能力, 进而为实现中国的“双碳”目标提供支撑。在此背景下, 文章研究了促进可再生能源发电消纳的数据中心优化调度与需求响应策略。首先, 考虑数据中心用能特性, 建立包含**数据中心能耗与用户服务质量要求**的数据中心常规运行模型。接着, 基于延迟容忍型工作负荷的可调度特性, 提出数据中心面向用户侧的可再生能源补贴机制, 以**促进用户数据服务需求向可再生能源发电出力高峰时期转移**。然后, 引入绿色证书机制, 以**数据中心运行成本最小、环保效益最大**为目标, 建立数据中心日前最优的运行调度模型。最后, 以某典型数据中心为例, 对文章所提方法的可行性进行验证; 仿真结果表明, 所提出的数据中心优化调度与需求响应策略可以有效调动数据中心及其用户的需求响应潜力, 提升数据中心对可再生能源发电的消纳能力, 从而实现碳减排。

**关键词:** 数据中心; 优化调度; 需求响应; 可再生能源发电消纳

## Optimal Dispatch and Demand Response Strategies of Data Centers for Promoting Accommodation of Renewable Energy Generation and Reducing Carbon Emission

LAN Zhou<sup>1</sup>, JIANG Chenwei<sup>2,3</sup>, GU Jiting<sup>1</sup>, WEN Fushuan<sup>2,3</sup>, YANG Kan<sup>1</sup>, WANG Kun<sup>1</sup>

(1. Economic and Technical Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd.,

Hangzhou 310016, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Hangzhou Worui Electric Power Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

**ABSTRACT:** A data center represents an important flexible resource on the user side. Through reasonable scheduling and motivating demand response, the capability of the data center to accommodate the power generation from distributed renewable energy sources (RESs) can be effectively improved, which is conducive for achieving the specified “dual carbon” target in China. In this paper, the optimal dispatch and demand response strategies for a data center are addressed to promote the accommodation of the power generation from RESs. Firstly, considering the load characteristics of the data center, a conventional data center operation model including the power demand profile and quality of service (QoS) is established. Then, according to the schedulable characteristics of delay-tolerant workloads, a renewable energy subsidy mechanism is proposed for the data center to motivate the shift of the user data service demand to the peak power generation period of RESs. Then, on the basis of the green certificate (GC) mechanism, with the objective of minimizing the operating cost of the data center and maximizing environmental benefits, an optimal dispatch model of the data center is presented. Finally, a typical data center is employed to demonstrate the feasibility and efficiency of the presented method. Simulation results show that the presented method can effectively explore the demand response potential of the data center and its users, enhance the accommodation capability for power generation from RESs, and hence reduce carbon emission.

This work is jointly supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1910216), and Science and Technology Project from State Grid Zhejiang Electric Power Company (No. 5211JY19000T).

**KEYWORDS:** data center; optimal dispatch; demand response; accommodation of renewable energy generation

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2022)04-0001-09

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2022.04.001

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1910216); 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JY19000T)

<http://www.cepc.com.cn>

## 0 引言

随着我国低碳结构性变革的不断推进,电力行业作为国家实现“双碳”目标的关键行业,肩负着发展以新能源为主体的新型电力系统的时代使命<sup>[1]</sup>。考虑到高比例可再生能源接入带来的电源侧波动性加剧,亟需进一步挖掘灵活性需求侧响应(demand response, DR)资源以增加电力系统的调度能力<sup>[2-4]</sup>。

近年来,由于互联网产业的高速发展,数据中心作为提供数据存储与计算服务的重要平台,其规模与能耗水平也在不断增大<sup>[5-6]</sup>。据介绍,2017 年我国数据中心的能耗为 1 221.5 亿 kW·h,超过了当年三峡水电站的年发电量<sup>[7]</sup>。此外,据估计到 2025 年,数据中心将占据全球能源消耗的最大份额,高达 33%<sup>[8]</sup>。与此同时,考虑到数据中心对服务器的集群调度使其可以实现用电负荷的快速转移和削减,进而具备电力实时响应的能力<sup>[9]</sup>,因此成为了用户侧重要的 DR 资源。

在数据中心参与 DR 与优化调度领域,已有一些相关研究报道,总体上可以分为“服务器-多数据中心-负荷特性”这几个层次,包括:数据中心的内部管理和负荷分配策略<sup>[10-11]</sup>、地理分布式数据中心的负荷转移<sup>[12-13]</sup>、可延迟数据服务的优化调度<sup>[14-17]</sup>等。在数据中心服务器的内部调度管理方面,文献[10]中提出了一种用于虚拟云数据中心的有效资源管理策略,该策略通过虚拟机的动态重分配来调节工作负荷的分布情况,进而降低了数据中心的能源消耗;在多数据中心的优化调度方面,文献[13]考虑了不同地理位置数据中心能源价格的差异性,构建了两阶段 Stackelberg 博弈优化定价方案,通过在地理分布式数据中心之间转移负荷,以实现负荷在时空维度的均衡分布;在考虑数据负荷特性的数据中心调度方面,文献[14]将数据中心的工作负荷分为延时敏感型请求和延时容忍型请求,利用延时容忍型计算任务的可迁移特性,增强了数据中心平抑可再生能源出力波动的能力。

从总体上讲,现有的数据中心优化调度和需求响应策略方面的研究主要集中于对服务器或数据中心的直接调度,以及如何优化利用负荷本身的可转移特性等方面,但鲜有文献将传统电力需求响应的价格与激励机制<sup>[18]</sup>应用在数据中心及其用户侧,从而间接影响数据中心的可调度潜力,因此也无法将电价的波动通过合理的数据服务价格传递到下层用户。同时,与电力零售商相比<sup>[19]</sup>,数据中心根据电价动态制定数据服务价格存在成本较高、用户响应不及时等问

题。因此,在初期可以考虑采用激励补贴的形式,通过对特定时段的数据服务价格进行折扣补贴,以引导用户进行数据服务需求的转移,挖掘数据中心的优化调度空间与整体 DR 潜力,提升对可再生能源发电的消纳能力,进而实现碳减排。

在上述背景下,本文针对数据中心**优化调度与需求响应策略**进行研究,以提升其对可再生能源发电的消纳能力,实现碳减排。首先,考虑数据中心的常规运行特点提出相应的运行框架与模型;接着,基于延迟容忍型工作负荷的可调度特性,提出数据中心面向用户侧的可再生能源出力高峰补贴机制;之后,引入绿色证书机制,形成考虑经济和环保效益的数据中心日前最优运行调度与需求响应策略,并将其转化为混合整数线性规划问题;最后,通过算例对所提方法进行验证。

## 1 数据中心运行框架及其建模

### 1.1 数据中心常规运行框架

数据中心常规运行框架如图 1 所示。数据中心在运行过程中,一般需要考虑 3 个部分,包括外部能源输入、数据中心内部优化调度以及用户数据服务需求情况。

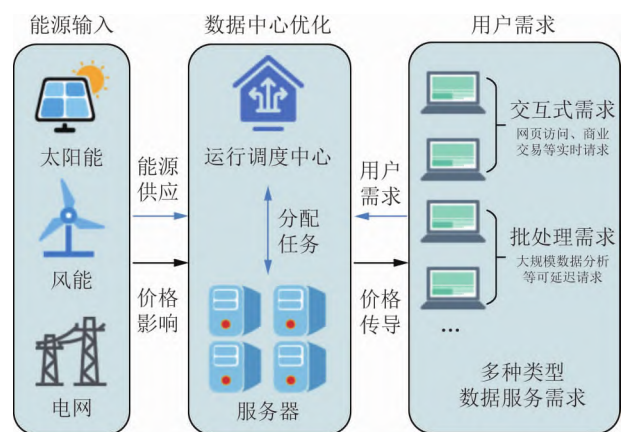


图 1 数据中心常规运行框架

Fig. 1 Framework of routine operation in a data center

其中,外部能源输入包含了低碳能源(太阳能、风能等)和高碳能源(煤电、柴油发电机),不同能源的出力特性与价格影响了数据中心的运行方式、经济性与环保性。在数据中心的内部优化中,本文主要关注了**服务器的优化调度问题**,即运行调度中心需要结合能源侧的出力情况与用户侧的需求情况,对服务器进行各类任务的动态分配。

与此同时,用户侧往往包含了多种类型的数据服务需求,包括需要实时响应的**交互式需求**、允许延时

的批处理需求等。用户需求的类型不仅影响了数据中心服务器优化调度的空间,同时也导致了差异化的需求响应潜力。因此,数据中心可以通过制定数据服务价格或补贴机制影响用户侧的需求特性,从而进一步提升数据中心运行的综合效益。

## 1.2 数据中心模型

### 1.2.1 数据中心能耗模型

数据中心的整体能耗水平主要受到服务器的工作状态影响,而数据中心的空调系统等其他设施的功率则可以通过电源使用效率(power usage effectiveness, PUE)进行计算。在大量服务器集群的情况下,可以假定服务器能耗与利用率呈线性关系,服务器根据用户需求大小处于空闲到满载之间的任意状态<sup>[20]</sup>,具体可以表示如下:

$$P_t^{DC} = P_t^{IT} + P_t^{other} \quad (1)$$

$$P_t^{IT} = [P^{idle} + (P^{peak} - P^{idle}) u_t] n_t \quad (2)$$

$$P_t^{other} = (\eta - 1) P^{peak} n_t \quad (3)$$

$$u_t = \frac{D_t^{total}}{\mu n_t} \quad (4)$$

式中:  $P_t^{DC}$  表示数据中心在时刻  $t$  的总用电功率;  $P_t^{IT}$  表示数据中心服务器在时刻  $t$  的用电功率;  $P_t^{other}$  表示数据中心的其他设备在时刻  $t$  的用电功率,例如供冷系统用电与基础用电等;  $P^{idle}$  和  $P^{peak}$  分别表示数据中心单个服务器空闲和峰值时的运行功率,为服务器运行参数;  $u_t$  表示数据中心在时刻  $t$  的服务器整体利用率;  $n_t$  表示数据中心在时刻  $t$  的服务器运行数量;  $\eta$  表示数据中心的 PUE 参数;  $D_t^{total}$  表示数据中心在时刻  $t$  接受的用户数据服务需求总量;  $\mu$  表示数据中心服务器的用户需求处理速率,为服务器的运行参数。

其中,  $P_t^{IT}$ 、 $n_t$  与  $D_t^{total}$  为数据中心能耗模型的主要决策变量,其余决策变量如  $P_t^{DC}$ 、 $P_t^{other}$  与  $u_t$  可以通过上述公式计算得到。

### 1.2.2 用户服务质量(QoS)要求

此外,在数据中心的运行过程中一般需要向用户提供服务质量(quality of service, QoS)保证,以明确服务器对用户请求的最迟响应时间,常见于在网页访问等交互式数据服务需求中。本文中采用了文献[21]中描述的 M/M/1 排队模型来计算数据中心交互工作负荷的平均响应时间,具体如下:

$$0 \leq \frac{1}{\mu - D_t/n_t} \leq d^{max} \quad (5)$$

$$0 \leq n_t \leq n^{max} \quad (6)$$

式中:  $D_t$  表示数据中心在时刻  $t$  接受的交互式数据服务需求;  $d^{max}$  表示用户数据服务请求可容忍的最大延

迟时间;  $n^{max}$  表示数据中心的服务器数量上限。

其中, QoS 模型在数据中心能耗模型的基础上进一步约束了数据中心在满足交互式数据服务需求(等同于下文所述延迟敏感型用户需求)所需服务器运行数量,是对能耗模型的进一步补充。

## 2 考虑可再生能源发电消纳的需求响应机制

### 2.1 可再生能源出力高峰补贴机制

为了进一步提升数据中心就地消纳可再生能源的能力,本文提出数据中心面向用户侧的可再生能源出力高峰补贴机制。通过对可再生能源出力高峰时段的数据服务价格进行折扣减免,促使部分用户向出力高峰时段转移。

$$C_t^{user} = \begin{cases} C^{initial}, & t \in [0, t^{begin}) \cup (t^{end}, T] \\ C^{initial} - C^{reduce}, & t \in [t^{begin}, t^{end}] \end{cases} \quad (7)$$

$$0 \leq t^{begin} \leq t^{end} \leq T \quad (8)$$

$$C^{reduce, min} \leq C^{reduce} \leq C^{reduce, max} \quad (9)$$

式中:  $C_t^{user}$  表示用户在时刻  $t$  的实际数据服务价格;  $C^{initial}$  表示用户的初始数据服务价格;  $C^{reduce}$  表示用户在可再生能源补贴时段内的价格削减量;  $t^{begin}$  和  $t^{end}$  分别表示可再生能源补贴的开始与结束时刻;  $T$  表示运行周期内的总时段数,在后续的算例仿真时取 24;  $C^{reduce, max}$  和  $C^{reduce, min}$  分别表示价格削减量的上下限。

### 2.2 数据中心工作负荷需求响应模型

#### 2.2.1 工作负荷分类与特性

根据用户需求的服务器响应时间差异,可以将其分为延迟敏感型用户需求与延迟容忍型用户需求。一般来说,由于延迟敏感型用户的响应实时性较高,普遍将其作为不可调度的工作负荷进行处理;而延迟容忍型用户需求本身就存在可延迟处理的潜力,因此是数据中心工作负荷需求响应的主要对象。这两类工作负荷的特性可表示如下:

#### 1) 延迟敏感型工作负荷。

$$T_i^{sen, finish} = T_i^{sen, arrival} + \Delta T_i^{sen, base} \quad (10)$$

式中:  $T_i^{sen, finish}$  表示延迟敏感型用户  $i$  需求的完成时刻;  $T_i^{sen, arrival}$  表示延迟敏感型用户  $i$  需求的到达时刻;  $\Delta T_i^{sen, base}$  表示延迟敏感型用户  $i$  需求的基本处理时间。

#### 2) 延迟容忍型工作负荷。

$$T_j^{tol, min} \leq T_j^{tol, finish} \leq T_j^{tol, max} \quad (11)$$

$$T_j^{tol, min} = T_j^{tol, arrival} + \Delta T_j^{tol, base} \quad (12)$$

$$T_j^{tol, max} = T_j^{tol, arrival} + \Delta T_j^{tol, delay, max} + \Delta T_j^{tol, base} \quad (13)$$

式中:  $T_j^{tol, min}$  和  $T_j^{tol, max}$  分别表示延迟容忍型用户  $j$  需求的最早与最迟完成时刻;  $T_j^{tol, finish}$  表示延迟容忍型



用户  $j$  需求的完成时刻;  $T_j^{\text{tol}, \text{arrival}}$  表示延迟容忍型用户  $j$  需求的到达时刻;  $\Delta T_j^{\text{tol}, \text{base}}$  表示延迟容忍型用户  $j$  需求的基本处理时间;  $\Delta T_j^{\text{delay}, \text{max}}$  表示延迟容忍型用户  $j$  需求的最大可延迟处理时间。

同时,为了方便计算,假定工作负荷延迟后的处理过程仍连续不可中断,可通过下式进行约束:

$$\sum_{t=t_j}^{t_j+\Delta T_j^{\text{tol}, \text{base}}-1} Z_{jt}^{\text{tol}} \geq \Delta T_j^{\text{tol}, \text{base}} (Z_{jt}^{\text{tol}} - Z_{j,t-1}^{\text{tol}}), \quad t_j \in [T_j^{\text{tol}, \text{arrival}}, \Delta T_j^{\text{delay}, \text{max}}] \quad (14)$$

$$n_t^{\text{tol}, \text{actual}} = \sum_{j \in N^{\text{tol}}} Z_{jt}^{\text{tol}} \quad (15)$$

式中:  $Z_{jt}^{\text{tol}}$  表示延迟容忍型用户  $j$  需求在时刻  $t$  的处理状态,为 0 表示需求没有被处理,为 1 表示需求正在被处理;  $n_t^{\text{tol}, \text{actual}}$  表示数据中心在时刻  $t$  处理的延迟容忍型用户需求数量;  $N^{\text{tol}}$  表示延迟容忍型用户的集合。

### 2.2.2 可转移工作负荷需求响应模型

考虑到延迟容忍型用户对时间的敏感程度相对较低,因此本文假定在可再生能源出力高峰补贴机制的作用下,部分此类用户将进行数据服务时段的转移。转移数量可以通过用户各时段初始分布数量与转移概率进行计算,下面给出相关细节。

#### 1) 用户转移概率。

由于补贴区间内的用户不需要进行转移时段,因此其移出概率为 0;而补贴区域外的用户将根据价格削减量与需要转移的时段长度进行判断是否向补贴区间内转移数据服务需求。

一般认为当价格削减量越高时,在补贴时段内用户所需支付的实际价格就越低,用户向补贴时段转移的意愿将会增大。同时,当补贴区间外的用户越靠近补贴区间时,其数据服务需求所需要转移的时段就越短,对用户原有习惯造成的影响就越小,用户向补贴时段转移的意愿也将增大。

为了方便求解,本文采用线性关系式来计算补贴区间外用户的转移概率,具体表示如下:

$$P_j^{\text{tol}, \text{tran}} = k^{\text{time}} \Delta t_j^{\text{tran}} + k^{\text{price}} C^{\text{reduce}} \quad (16)$$

式中:  $P_j^{\text{tol}, \text{tran}}$  表示延迟容忍型用户  $j$  需求的转移概率;  $k^{\text{time}}$  和  $k^{\text{price}}$  分别表示转移时长和价格削减因素的影响系数;  $\Delta t_j^{\text{tran}}$  表示延迟容忍型用户  $j$  需求的转移时长。

其中,根据用户提出数据服务需求的时刻判断是否处于补贴区间,转移时长  $\Delta t_j^{\text{tran}}$  可表示如下:

$$\Delta t_j^{\text{tran}} = \begin{cases} t^{\text{begin}} - T_j^{\text{tol}, \text{arrival}}, & T_j^{\text{tol}, \text{arrival}} \in [0, t^{\text{begin}}) \\ T_j^{\text{tol}, \text{arrival}} - t^{\text{end}}, & T_j^{\text{tol}, \text{arrival}} \in (t^{\text{end}}, T] \end{cases} \quad (17)$$

此外,还需要对价格削减量  $C^{\text{reduce}}$  和转移时长  $\Delta t_j^{\text{tran}}$  进行模糊化和归一化处理。

补贴价格与转移概率呈正相关,对其建立“升半梯形”隶属度函数:

$$C^{\text{reduce}, \text{norm}} = \begin{cases} 0, & C^{\text{reduce}} \in [0, C^{\text{reduce}, \text{min}}) \\ \frac{C^{\text{reduce}} - C^{\text{reduce}, \text{min}}}{C^{\text{reduce}, \text{max}} - C^{\text{reduce}, \text{min}}}, & C^{\text{reduce}} \in [C^{\text{reduce}, \text{min}}, C^{\text{reduce}, \text{max}}] \\ 1, & C^{\text{reduce}} \in (C^{\text{reduce}, \text{max}}, C^{\text{initial}}] \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $C^{\text{reduce}, \text{norm}}$  表示价格削减量的归一化值。

转移时长与转移概率呈负相关,对其建立“降半梯形”隶属度函数:

$$\Delta t_j^{\text{tran}, \text{norm}} = \begin{cases} 0, & \Delta t_j^{\text{tran}} \in [0, \Delta t^{\text{tran}, \text{min}}) \\ \frac{\Delta t^{\text{tran}, \text{max}} - \Delta t_j^{\text{tran}}}{\Delta t^{\text{tran}, \text{max}} - \Delta t^{\text{tran}, \text{min}}}, & \Delta t_j^{\text{tran}} \in [\Delta t^{\text{tran}, \text{min}}, \Delta t^{\text{tran}, \text{max}}] \\ 1, & \Delta t_j^{\text{tran}} \in (\Delta t^{\text{tran}, \text{max}}, T] \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $\Delta t_j^{\text{tran}, \text{norm}}$  表示延迟容忍型用户  $j$  需求转移时长的归一化值;  $\Delta t^{\text{tran}, \text{max}}$  和  $\Delta t^{\text{tran}, \text{min}}$  分别表示用户需求转移时长的上下限。

最终得到归一化后的用户转移概率公式如下:

$$P_j^{\text{tol}, \text{tran}, \text{norm}} = k^{\text{time}, \text{norm}} \Delta t_j^{\text{tran}, \text{norm}} + k^{\text{price}, \text{norm}} C^{\text{reduce}, \text{norm}} \quad (20)$$

式中:  $P_j^{\text{tol}, \text{tran}, \text{norm}}$  表示延迟容忍型用户  $j$  需求转移概率的归一化值;  $k^{\text{time}, \text{norm}}$  和  $k^{\text{price}, \text{norm}}$  分别表示转移时长和价格削减因素的影响系数归一化值。

#### 2) 转移后各区间数据服务需求数量。

$$D_t^{\text{total}} = D_t^{\text{tol}} + D_t^{\text{sen}} \quad (21)$$

$$D_t^{\text{tol}} = n_t^{\text{tol}, \text{actual}} D^{\text{base}, \text{tol}} \quad (22)$$

$$D_t^{\text{sen}} = n_t^{\text{sen}} D^{\text{base}, \text{sen}} \quad (23)$$

式中:  $D_t^{\text{tol}}$  和  $D_t^{\text{sen}}$  分别表示数据中心在时刻  $t$  接受的延迟容忍型与敏感型用户数据服务需求量;  $D^{\text{base}, \text{tol}}$  和  $D^{\text{base}, \text{sen}}$  分别表示延迟容忍型与敏感型用户的单个数据服务需求量;  $n_t^{\text{sen}}$  表示数据中心在时刻  $t$  处理的延迟敏感型用户需求数量。

可再生能源出力高峰补贴时段外的用户数量如下:

$$n_t^{\text{tol}, \text{actual}} = (1 - P_t^{\text{tol}, \text{tran}, \text{norm}}) n_t^{\text{tol}, \text{initial}}, \quad t \in [0, t^{\text{begin}}) \cup (t^{\text{end}}, T] \quad (24)$$

式中:  $n_t^{\text{tol}, \text{initial}}$  表示不考虑可再生能源补贴机制时,数据中心在时刻  $t$  处理的延迟容忍型用户需求数量。

考虑用户转移到补贴时段内后任意选择数据服

务需求提出时刻而不影响数据服务价格,因此可以近似认为转移的用户在时段内均匀分布,具体如下式所示:

$$n_t^{\text{tol, actual}} = n_t^{\text{tol, initial}} + \frac{\sum_{t \in [t^{\text{begin}}, t^{\text{end}}]} P_t^{\text{tol, tran, norm}} n_t^{\text{tol, initial}}}{t^{\text{end}} - t^{\text{begin}}}, \quad t \in [t^{\text{begin}}, t^{\text{end}}] \quad (25)$$

### 3 含绿证成本的数据中心优化调度模型

为了提升数据中心消纳可再生能源的意愿与经济性,本文引入了绿色证书交易机制,利用绿色证书成本促使数据中心在一定范围内尽可能地鼓励用户转移进入可再生能源出力高峰时段,从而提升数据中心运行的环保性与低碳性。

#### 3.1 目标函数

本文以数据中心在典型日运行的净利润最大作为优化目标,具体可描述为:

$$\max f^{\text{profit}} = f^{\text{income}} - f^{\text{grid}} - f^{\text{RES}} - f^{\text{GC}} \quad (26)$$

其中各项收入支出情况如下所示:

$$f^{\text{income}} = \sum_{t=1}^T (C_t^{\text{user}} D_t^{\text{tol}} + C_t^{\text{sen}} D_t^{\text{sen}}) \quad (27)$$

$$f^{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T C_t^{\text{grid}} P_t^{\text{grid}} \quad (28)$$

$$f^{\text{RES}} = \sum_{t=1}^T C_t^{\text{RES}} P_t^{\text{RES}} \quad (29)$$

式中:  $f^{\text{profit}}$  表示数据中心的利润函数,是其典型日的运行净收益;  $f^{\text{income}}$  表示数据中心的数据服务收益;  $C_t^{\text{sen}}$  表示延迟敏感型用户单次需求的价格;  $f^{\text{grid}}$  表示数据中心的电网购电成本;  $C_t^{\text{grid}}$  表示时刻  $t$  的电价;  $P_t^{\text{grid}}$  表示数据中心时刻  $t$  的购电功率;  $f^{\text{RES}}$  表示数据中心的可再生能源购电成本;  $C_t^{\text{RES}}$  表示可再生能源价格;  $P_t^{\text{RES}}$  表示数据中心时刻  $t$  的可再生能源发电消纳功率;  $f^{\text{GC}}$  表示数据中心的绿证成本。

其中,式(27)中的  $D_t^{\text{tol}}$  和  $D_t^{\text{sen}}$  可通过可转移工作负荷需求响应模型中的式(22)和式(23)求取。

#### 3.2 运行约束条件

##### 3.2.1 数据中心供能约束

数据中心供能约束主要用于保证数据中心的用电负荷完全由可再生能源发电与外部电网购电提供,同时约束了可再生能源实际发电功率与从电网购电功率的最大限值。

$$P_t^{\text{DC}} = P_t^{\text{RES}} + P_t^{\text{grid}} \quad (30)$$

$$0 \leq P_t^{\text{RES}} \leq P_t^{\text{RES, max}} \quad (31)$$

$$0 \leq P_t^{\text{grid}} \leq P_t^{\text{grid, max}} \quad (32)$$

式中:  $P_t^{\text{RES, max}}$  和  $P_t^{\text{grid, max}}$  分别是数据中心可再生能源发电功率与电网购电功率的上限。

##### 3.2.2 服务器运行约束

考虑到在数据中心运行中服务器的启停成本一般较高,因此在优化调度过程中应当避免服务器的频繁启停,式(33)限制了中心服务器在前后相邻时刻的数量变化范围。

$$\Delta n^{\min} \leq n_{t+1} - n_t \leq \Delta n^{\max}, \quad t \in [1, T-1] \quad (33)$$

式中:  $\Delta n^{\max}$  和  $\Delta n^{\min}$  分别为数据中心前后相邻时刻服务器数量变化量的上下限。

##### 3.2.3 绿证交易约束

本文引入了绿证交易机制,通过对数据中心实际消纳可再生能源发电量与给定值进行比较,确定数据中心的绿色证书购买成本。当可再生能源发电消纳量在容忍裕度内时,数据中心仅需通过购买绿色证书弥补消纳不足部分,或出售多余绿色证书即可;当可再生能源发电消纳量超出容忍裕度时,数据中心需要承受一定的惩罚。

$$f^{\text{GC}} = \begin{cases} C^{\text{GC}} \Delta W^{\text{RES}}, & \Delta W^{\text{RES}} \leq \Delta W^{\text{RES, fix}} \\ C^{\text{GC}} \Delta W^{\text{RES}} + C^{\text{punish}} (\Delta W^{\text{RES}} - \Delta W^{\text{RES, fix}}), & \Delta W^{\text{RES}} > \Delta W^{\text{RES, fix}} \end{cases} \quad (34)$$

$$\Delta W^{\text{RES}} = W^{\text{RES, fix}} - W^{\text{RES}} \quad (35)$$

$$0 \leq W^{\text{RES}} \leq W^{\text{RES, max}} \quad (36)$$

$$W^{\text{RES}} = \sum_{t=1}^T P_t^{\text{RES}} \Delta t \quad (37)$$

式中:  $C^{\text{GC}}$  表示绿证价格;  $\Delta W^{\text{RES}}$  表示数据中心在典型日的可再生能源发电消纳量与基准消纳量的差值;  $C^{\text{punish}}$  表示惩罚价格;  $\Delta W^{\text{RES, fix}}$  表示可再生能源发电消纳量不足的容忍裕度;  $W^{\text{RES, fix}}$  表示可再生能源基准消纳量;  $W^{\text{RES}}$  表示数据中心在典型日的可再生能源发电消纳量;  $W^{\text{RES, max}}$  表示可再生能源发电消纳量上限。

##### 3.2.4 数据中心的碳排放计算

数据中心的碳排放主要由服务器等IT设备和其他基础设施的电力消耗所引起,而其自备应急电源(如柴油发电机)一般仅在突发情况下使用。因此,这里主要考虑外部购电所导致的碳排放与少量的可再生能源消纳引起的碳排放。

$$E^{\text{CO}_2} = \alpha^{\text{RES}} W^{\text{RES}} + \alpha^{\text{grid}} \sum_{t=1}^T P_t^{\text{grid}} \Delta t \quad (38)$$

式中:  $E^{\text{CO}_2}$  表示数据中心从外部购电所导致的碳排放量;  $\alpha^{\text{RES}}$  和  $\alpha^{\text{grid}}$  分别表示可再生能源发电和来自电网的电折算系数。 $\alpha^{\text{RES}}$  按照光伏发电的平均二氧化碳排放水平计算,取  $\alpha^{\text{RES}} = 0.040 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ;  $\alpha^{\text{grid}}$  按浙江省2016年省级电网平均二氧化碳排放因子计

算,取  $\alpha^{\text{grid}} = 0.5246 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

### 3.3 问题求解

在所建立的目标函数中,数据中心收益  $f^{\text{income}}$  包含非线性项  $C_t^{\text{user}} D_t^{\text{tol}}$ ,不利于模型的求解,可通过以下公式进行转换:

$$C_t^{\text{user}} D_t^{\text{tol}} = \begin{cases} C_t^{\text{initial}} D_t^{\text{tol}}, & t \in [0, t^{\text{begin}}) \cup (t^{\text{end}}, T] \\ C_t^{\text{initial}} D_t^{\text{tol}} - C^{\text{reduce}} D_t^{\text{tol}}, & t \in [t^{\text{begin}}, t^{\text{end}}] \end{cases} \quad (39)$$

考虑到  $C_t^{\text{initial}}$  为设定参数,因此只需转化非线性项  $C^{\text{reduce}} D_t^{\text{tol}}$  即可,将决策变量  $C^{\text{reduce}}$  转化为如下所示:

$$C^{\text{reduce}} = C_n^{\text{reduce}} Z_{n,t}^{\text{reduce}} \quad (40)$$

式中:  $C_n^{\text{reduce}}$  表示设定好的价格参数矩阵,共有  $n$  个价格档位;  $Z_{n,t}^{\text{reduce}}$  为价格-时间选择状态矩阵,表示数据中心在时刻  $t$  选择第  $n$  档价格。

令  $G_t^{\text{reduce}, \text{tol}} = C^{\text{reduce}} D_t^{\text{tol}}$ ,可转化为如下线性表达式,其中  $M$  表示一个足够大的正数。

$$G_t^{\text{reduce}, \text{tol}} = C_n^{\text{reduce}} Z_{n,t}^{\text{reduce}} D_t^{\text{tol}} \quad (41)$$

$$C_n^{\text{reduce}} [D_t^{\text{tol}} - (1 - Z_{n,t}^{\text{reduce}}) M] \leq G_t^{\text{reduce}, \text{tol}} \quad (42)$$

$$C_n^{\text{reduce}} [D_t^{\text{tol}} + (1 - Z_{n,t}^{\text{reduce}}) M] \geq G_t^{\text{reduce}, \text{tol}} \quad (43)$$

$$-C_n^{\text{reduce}} Z_{n,t}^{\text{reduce}} M \leq G_t^{\text{reduce}, \text{tol}} \leq C_n^{\text{reduce}} Z_{n,t}^{\text{reduce}} M \quad (44)$$

由此所建立的混合整数非线性优化问题就转化为便于求解的混合整数线性优化问题,可在 Matlab 环境中采用商业求解器 Yalmip/Gurobi 求解。

## 4 算例与结果

### 4.1 参数设置

本文选取了某区域中型集中式数据中心作为研究对象,区域内分布式光伏的总装机容量为 25 MW。光伏出力情况根据典型日数据进行分析,如附录 A 中的图 A1 所示。数据中心通过电网购电和消纳光伏出力满足自身用电需求,其中电网电价采用浙江省 2021 年大工业用电 (1~10 kV) 中 7、8 月份的分时销售电价,如附录 A 中的图 A2 所示。数据中心的用户需求包括延迟敏感型和延迟容忍型,每小时原始工作负荷数量分别如附录 A 中的图 A3、图 A4 所示。其中,延迟容忍型用户需求处理的基本时长均为 1 h,用户允许的需求处理总时长为 2 h。假定可再生能源出力高峰补贴时段为 6 h。其他参数如附录 A 中的表 A1 所示。算例中的碳排放量主要考虑由数据中心从外部购电和消纳可再生能源发电所引起。为了验证所提出的可再生能源出力高峰补贴机制的作用,本文设置了以下 3 个场景进行对比分析:

场景 1: 不含补贴机制,数据中心不考虑工作负荷的延迟特性进行服务器的优化调度;

场景 2: 不含补贴机制,数据中心利用工作负荷的延迟特性进行服务器的优化调度;

场景 3: 含补贴机制,数据中心利用工作负荷的延迟特性进行服务器的优化调度。

### 4.2 结果与分析

#### 4.2.1 总体优化结果对比

3 个场景中数据中心的整体收益与支出情况如表 1 所示。其中,场景 3 相比于场景 1 和 2,其净收益更高,而数据服务收益有所下降。这是由于场景 3 应用了可再生能源出力高峰补贴机制,降低了补贴时段的数据服务价格,但与此同时也减少了购电成本与绿证成本,因此整体净收益反而更高。除此以外,场景 2 相比于场景 1 可再生能源发电消纳率略有提升,典型日碳排放减少了 4.25%,这是由于延迟容忍型工作负荷本身就存在一定的可调度空间;与场景 2 相比,场景 3 的可再生能源发电消纳率进一步提升,典型日碳排放比场景 1 减少了 7.38%。这表明所提出的补贴机制可以有效地调动其他时段的延迟容忍型用户向可再生能源发电出力高峰时段转移,从而提升了数据中心对可再生能源发电的消纳能力,实现了数据中心的碳减排。

表 1 三个场景中的数据中心优化结果对比  
Table 1 Comparison of optimization results of the data center among three scenarios

场景	净收益/元	数据服务收益/元	电网购电成本/元
1	34 695	143 186	73 994
2	37 765	143 186	70 236
3	40 668	142 915	65 830
场景	可再生能源 购电成本/元	绿证成本/元	碳排放量/kg
1	32 493	2 002	67 888
2	33 642	1 543	65 006
3	35 694	722	62 875
场景	可再生能源发 电消纳率/%	价格削减量/(元·个 <sup>-1</sup> )	
1	74.98		
2	77.64		
3	82.38	0.01	

#### 4.2.2 可再生能源发电消纳分析

3 个场景下数据中心的延迟敏感型和容忍型工作负荷的用电功率如图 2 所示。图 2 中正值表示用电功率,负值表示发电功率。



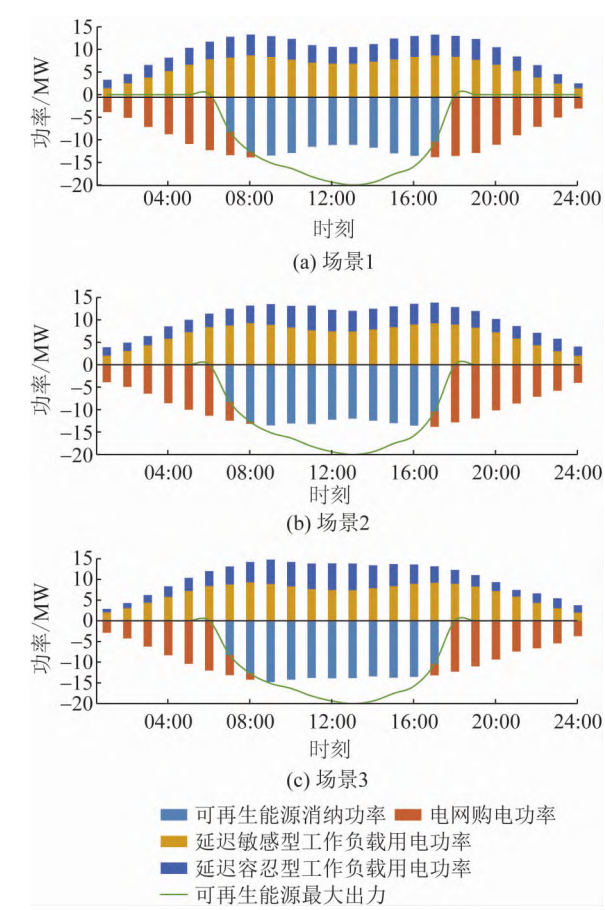


图 2 三个场景中各类工作负荷能耗情况  
Fig. 2 Energy consumption of various workloads in three scenarios

对比图 2 ( a ) 和( b ) 可知 ,当不采用可再生能源出力高峰补贴机制时 ,数据中心主要依靠工作负荷本身的延迟特性进行优化调度 ,优化空间受限于工作负荷的可延迟时间长短 ,一般只适用于局部或相邻时段的用能优化 ,对提升数据中心接纳可再生能源发电能力的作用不大 ,碳减排量也相对有限。对比图 2 ( b ) 和( c ) 可知 ,当采用可再生能源出力高峰补贴机制时 ,数据中心可以通过制定补贴时段和价格削减量 ,引导其他时段的用户向补贴时段内转移 ,并在此基础上进一步利用工作负荷的延迟特性进行局部的优化调度 ,使得数据中心的可再生能源发电消纳率和碳减排量都得到明显提升。

数据中心在 3 个场景中的延迟容忍型工作负荷的优化调度情况如图 3 所示。图 3 中灰色区域为可再生能源出力高峰补贴时段。在补贴时段内 ,场景 1、2 和 3 的工作负荷数量依次升高 ,场景 2 主要依靠工作负荷的可延迟交付特性进行有限时段内的优化调度; 场景 3 则主要依靠补贴机制引导补贴时段外的用户向时段内转移 ,影响范围更广 ,可再生能源发电消纳效果也更加明显。

此外 ,场景 3 中的工作负荷优化调度同样受到了分时电价的影响 ,例如通过工作负荷的延迟交付特性 ,降低了在 20: 00—21: 00 高电价时段内的工作负荷数量。

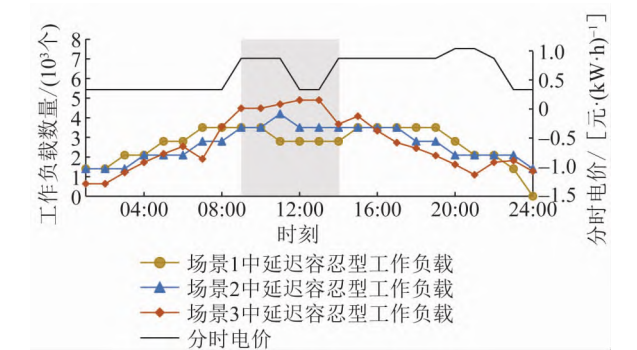


图 3 三个场景的负荷曲线对比  
Fig. 3 Comparison of load curves among three scenarios

4. 3 敏感性分析

现在对所构建模型的敏感性进行分析。逐次降低可再生能源出力高峰补贴时段长度 ,分析时段长度变化对价格削减量、可再生能源发电消纳率、碳排放量等优化结果的影响 ,具体如表 2 所示。

表 2 不同补贴时段长度的优化结果对比  
Table 2 Comparison of optimization results among different subsidy period lengths

补贴时段长度/h	价格削减量/(元·个 <sup>-1</sup> )	消纳率/%	碳排放量/kg	数据中心净收益/元
6	0.010	82.38	62 875	40 668
5	0.010	83.23	61 764	40 377
4	0.010	84.25	60 909	38 761
3	0.015	81.39	63 312	39 611
2	0.025	80.65	63 934	39 783

由表 2 可知 ,随着补贴时段长度的缩短 ,数据中心最优的价格削减量不断增加。这主要是由于补贴时长的缩短一方面增大了补贴区间外用户转移到区间内的平均距离 ,另一方面原本在时段内享受补贴的用户数量减少 ,因此数据中心倾向于在较短的补贴区间内设置更高的价格削减量 ,以吸引用户帮助消纳可再生能源 ,同时由于补贴所减少的数据服务收入相比于较长的补贴区间也更少。

除此以外 ,随着补贴时段长度的缩减 ,数据中心的可再生能源发电消纳率也经历了先增加后减少的过程 ,而碳排放量则与之相对。这是由于当补贴时段过长时 ,部分时段内的可再生能源出力已经被完全消纳 ,导致部分转移到时段内的用户并没有对消纳可再生能源起到作用 ,进而影响碳排放量。而当补贴时段

过短时,转移的用户只能集中在有限的补贴时段内进行优化调度,同样也不利于其他时段对可再生能源发电的消纳和碳减排。

综合来看,补贴时段长度变化对价格削减量、可再生能源发电消纳率、碳排放量以及数据中心净收益都会产生影响。因此数据中心需要根据可再生能源的实际出力情况,结合用户需求的分布特点,制定合理的可再生能源出力高峰补贴时段,以实现数据中心的经济和低碳运行。

## 5 结 语

本文针对“双碳”背景下数据中心消纳分布式可再生能源的问题,提出了一种基于可再生能源出力高峰补贴机制的数据中心优化调度与需求响应策略。构建了考虑数据中心常规运行特点、工作负荷特性,以及绿证交易机制的综合优化调度模型,并将模型中的非线性项进行转化,形成便于求解的混合整数线性规划问题,最终采用 Yalmip/Gurobi 求解器进行求解。

算例仿真结果表明,所提出的补贴机制可以克服延迟容忍型工作负荷可延迟时长有限的问题,有效引导补贴时段外的用户进行负荷转移,并在此基础上进一步优化负荷的实际被处理时间,提升了数据中心对于可再生能源发电的就地消纳能力,从而降低了碳排放量。

本文从可再生能源出力高峰时段补贴的角度探究了数据中心的优化调度与需求响应策略,在后续研究中将考虑数据中心面向用户制定全时段分时数据服务价格以实现整体的经济和低碳运行。

## 6 参考文献

- [1] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.  
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [2] 曾博,徐富强,刘裕,等. 考虑可再生能源与需求响应协同增效的能量枢纽多目标区间优化规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7212-7225.  
ZENG Bo, XU Fuqiang, LIU Yu, et al. Multi-objective interval optimization approach for energy hub planning with consideration of renewable energy and demand response synergies [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7212-7225.
- [3] 唐程辉,张凡,张宁,等. 考虑可再生能源随机性和需求响应的电力系统日前经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 18-25, 63.  
TANG Chenghui, ZHANG Fan, ZHANG Ning, et al. Day-ahead economic dispatch of power system considering renewable power uncertainty and demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 18-25, 63.
- [4] 杨谦,刘继春,蒋万泉. 光伏不同渗透率下考虑源网荷储深度互动的电力系统调峰策略[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 74-84.  
YANG Qian, LIU Jichun, JIANG Wanxiao. Peak regulation strategy of power system considering the interaction of source-network-load-storage under different penetration rate of PV [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 74-84.
- [5] WANG H, HUANG J W, LIN X J, et al. Proactive demand response for data centers: A win-win solution [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1584-1596.
- [6] 桑丙玉,王德顺,杨波,等. 基于经济性的互联网数据中心光-储协同优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 131-138.  
SANG Bingyu, WANG Deshun, YANG Bo, et al. Collaborative optimization configuration of photovoltaic-energy storage based on economy in an Internet data center [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 131-138.
- [7] CIE. Green data center white paper[R]. Beijing: CIE, 2019.
- [8] China Industry and Information Technology. Research report on the development of China's new infrastructure [R]. Beijing: CCID Academy for Industry and Information Technology, 2020.
- [9] 吴刚,高赐威,陈宋宋,等. 考虑需求响应的数据中心用电负荷优化研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3782-3788.  
WU Gang, GAO Ciwei, CHEN Songsong, et al. A survey on data center power load optimization considering demand response [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3782-3788.
- [10] BELOGLAZOV A, BUYYA R. Energy efficient allocation of virtual machines in cloud data centers[C]//2010 10th IEEE/ACM International Conference on Cluster, Cloud and Grid Computing. May 17-20, 2010, Melbourne, VIC, Australia. IEEE, 2010: 577-578.
- [11] XIAO Z, SONG W J, CHEN Q. Dynamic resource allocation using virtual machines for cloud computing environment [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2013, 24(6): 1107-1117.
- [12] LI J, BAO Z, LI Z Y. Modeling demand response capability by Internet data centers processing batch computing jobs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 737-747.
- [13] TRAN N H, TRAN D H, REN S L, et al. How geo-distributed data centers do demand response: A game-theoretic approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 937-947.
- [14] 杨挺,李洋,盆海波,等. 基于需求侧响应的数据中心联络线功率控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5529-5540.  
YANG Ting, LI Yang, PEN Haibo, et al. Tie-line power fluctuation smoothing algorithm based on data center demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5529-5540.
- [15] 郭嘉,杨洪明,张鹏兴,等. 面向需求响应的数据中心供能系统优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 43-49.  
GUO Jia, YANG Hongming, ZHANG Pengxing, et al. Optimal dispatching of data center energy-supplying system with demand response [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 43-49.
- [16] PAUL D, ZHONG W D, BOSE S K. Demand response in data centers through energy-efficient scheduling and simple



incentivization [J]. IEEE Systems Journal, 2017, 11 (2): 613-624.

[17] LIU N, DONG Z Q, ROJAS-CESSA R. Task scheduling and server provisioning for energy-efficient cloud-computing data centers [C]//2013 IEEE 33rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops. July 8-11, 2013, Philadelphia, PA, USA. IEEE, 2013: 226-231.

[18] 王彩霞, 时智勇, 梁志峰, 等. 新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (16): 37-48.

WANG Caixia, SHI Zhiyong, LIANG Zhifeng, et al. Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power systems dominated by renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 37-48.

[19] WEI W, LIU F, MEI S W. Energy pricing and dispatch for smart grid retailers under demand response and market price uncertainty [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1364-1374.

[20] 冯成, 王毅, 陈启鑫, 等. 能源互联网下的数据中心能量管理综述[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 1-9.

FENG Cheng, WANG Yi, CHEN Qixin, et al. Review of energy management for data centers in energy Internet [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 1-9.

[21] LIU Z H, LIN M H, WIERNAN A, et al. Greening geographical load balancing [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2015, 23(2): 657-671.

收稿日期: 2021-08-09

作者简介:

兰洲 (1980) 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电网发展战略与规划等方面的工作, E-mail: lanzhou\_zju@163.com;

蒋晨威 (1997) 男, 硕士研究生, 主要从事电力需求响应、综合能源系统规划等方面的工作, E-mail: chenweijiang@zju.edu.cn;

谷纪亭 (1989) 男, 硕士, 工程师, 主要从事电网规划与电力市场等方面的工作, E-mail: gu\_jiting@zj.sgcc.com.cn;

文福拴 (1965) 男, 博士, 教授, 博士生导师, 通信作者, 主要从事电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车等方面的工作, E-mail: fushuan.wen@gmail.com;

杨侃 (1983) 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力市场与电价方面的研究工作, E-mail: yang\_kan@zj.sgcc.com.cn;

王坤 (1988) 男, 硕士, 工程师, 主要从事配电网规划方面的研究工作, E-mail: wang\_kun@zj.sgcc.com.cn.

(编辑 魏希辉)

# 附录 A

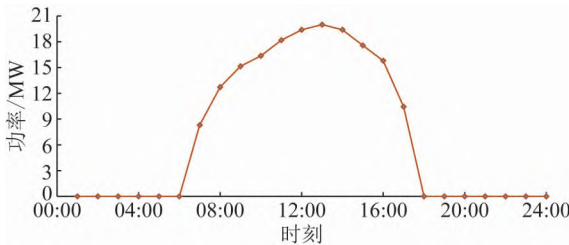


图 A1 光伏电站最大有功出力  
Fig. A1 Maximum active power output of the photovoltaic station

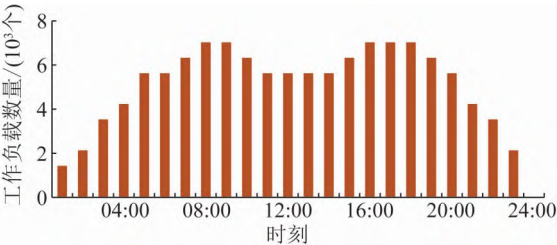


图 A4 延迟容忍型工作负荷  
Fig. A4 Delay-tolerant workloads

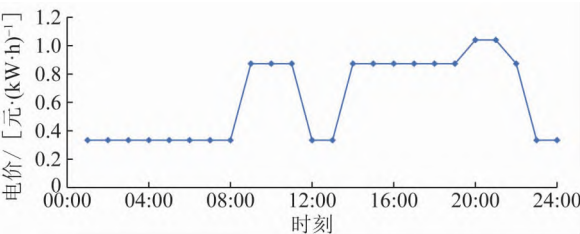


图 A2 分时电价  
Fig. A2 Time-of-use electricity price

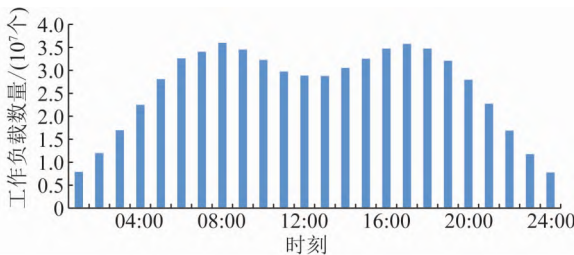


图 A3 延迟敏感型工作负荷  
Fig. A3 Delay-sensitive workloads

表 A1 仿真案例参数

Table A1 Parameters of simulation cases			
参数	数值	参数	数值
$P_{idle}/kW$	0.75	$C_{reduce,max}/(元 \cdot 个^{-1})$	1
$P_{peak}/kW$	0.4	$C_{reduce,min}/(元 \cdot 个^{-1})$	0
$\eta$	1.75	$C_{initial}/(元 \cdot 个^{-1})$	2
$\mu^{sen}/(个 \cdot s^{-1})$	4	$C^{sen}/(10^{-5} 元 \cdot 个^{-1})$	2.5
$\mu^{tol}/(个 \cdot h^{-1})$	1	$k_{time,norm}$	0.5
$d_{max}/s$	0.35	$k_{price,norm}$	0.5
$n_{max}$	30 000	$C^{RES}/[元 \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	250
$T$	24	$C^{GC}/(元 \cdot 个^{-1})$	100
$\Delta W^{RES,fix}/(MW \cdot h)$	30	$W^{RES,fix}/(MW \cdot h)$	150
$M$	10 万	$W^{RES,max}/(MW \cdot h)$	173