

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191308

# 基于经济性的互联网数据中心光-储协同优化配置

桑丙玉<sup>1,2</sup>, 王德顺<sup>1,2</sup>, 杨波<sup>1,2</sup>, 裴亮<sup>3</sup>, 孙伟卿<sup>3</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司(南京), 江苏 南京 210003; 2. 江苏省储能变流及应用工程技术研究中心, 江苏 南京 210003; 3. 上海理工大学电气工程系, 上海 200093)

**摘要:** 互联网数据中心体量大、能耗高, 近年来逐渐成为节能降耗的重点领域。基于对数据中心用电需求特征和电网电价机制的分析, 提出一种基于经济性的互联网数据中心光伏和储能电池协同优化配置模型。通过该模型求得光伏和储能电池的最优配置方案, 以降低数据中心的运行成本。该方案使得数据中心对当地电网电力具有较低的依赖性, 充分利用了光伏供应的电力。仿真实例表明, 在数据中心结构、负荷和运行环境相同的情况下, 该方案可以有效降低数据中心的运行成本, 具有较高的实用化价值。

**关键词:** 互联网数据中心; 储能; 光伏; 最优配置

## Collaborative optimization configuration of photovoltaic-energy storage based on economy in an internet data center

SANG Bingyu<sup>1,2</sup>, WANG Deshun<sup>1,2</sup>, YANG Bo<sup>1,2</sup>, PEI Liang<sup>3</sup>, SUN Weiqing<sup>3</sup>

(1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd. (Nanjing), Nanjing 210003, China; 2. Jiangsu Engineering Technology Research Center for Energy Storage Conversion and Application, Nanjing 210003, China; 3. Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In recent years, the large internet data center with high energy consumption has gradually become the key area of energy saving. Based on the analysis of electricity demand characteristics and the electricity price mechanism in a data center, a collaborative optimal configuration model of photovoltaic and energy storage battery based on economic dispatch is proposed. Through this model, the optimal configuration scheme of photovoltaic and energy storage battery is obtained to reduce the operational cost of a data center. The scheme ensures that the data center is less dependent on the local power grid and makes full use of the photovoltaic power supply. A simulation example reveals that, in the same data center structure, load and operating environment, the scheme has effectively reduced the operating cost of the system and has high practical value.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. NY71-16-045) and Open Fund of Jiangsu Engineering Technology Research Center for Energy Storage Conversion and Application (China Electric Power Research Institute Co., Ltd.) (No. NYN51201801326) and National Natural Science Foundation of China (No. 51777126).

**Key words:** internet data center; energy storage; photovoltaic; optimal configuration

## 0 引言

随着互联网的快速发展, 互联网数据中心(Internet Data Center, IDC)的电力消耗越来越大。据

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(NY71-16-045); 江苏省储能变流及应用工程技术研究中心实验室(中国电力科学研究院有限公司)开放基金项目资助(NYN51201801326); 国家自然科学基金项目资助(51777126)

ICTresearch 统计, 截至 2016 年底, 中国 IDC 现有数量约为 5.6 万个, 预计到 2020 年, 中国 IDC 的保有数量将超过 8 万个, 然而强大运算能力的背后是巨大的电力需求<sup>[1]</sup>, 2016 年中国 IDC 总耗电量超过 1 108 亿 kWh, 2017 年达到 1 200~1 300 亿 kWh, 这个数字超过了 2017 年三峡水电站的全年总发电量(976.05 亿 kWh)和葛洲坝电厂发电量(190.5 亿 kWh)之和, 已经占到了国民用电总量的 2% 左右, 未来更呈激增趋势<sup>[2-3]</sup>。

高能耗一直制约着 IDC 的发展, 如果将全球的 IDC 整体看成一个“国家”的话, 其总耗电量与世界排名第 15 位的国家耗电量相当<sup>[4]</sup>。日本 METI 机构预测, 全球 IT 能源消耗将于 2025 年翻 5 倍, 到 2050 年将增长 12 倍。如何降低 IDC 的运营成本已成为国内外研究的热点。文献[5]单纯考虑利用 IDC 不间断电源(Uninterruptible Power Supply, UPS), 提出 RE-UPS 控制策略以实现新能源利用率最大化。文献[6]提出利用虚拟机技术将 IDC 负荷转移到可再生能源附近, 最大限度地利用可再生能源。文献[7]提出一种规划 IDC 的运行方法, 根据负荷的特点, 利用诸如负荷时间转移、非电冷却设备的替代等解决 IDC 的能源效率问题。文献[8]提出在已知整个计费周期内 IDC 负荷情况下电池的最优能量存储控制方案, 并对谷歌某一个 IDC 的实际用电量进行对比性研究。文献[9]比较热能存储系统和电池存储系统在含分布式风电的智能电网中的应用, 并建立了两种储能形式下 IDC 长期运行的用电成本优化模型。文献[10]基于数据中心的负载预测, 通过储能设备进行能量缓冲, 使电力成本最小化。文献[11]通过最优控制方法使用储能来管理数据中心的电力成本。文献[12]利用 UPS 电池存储和热能存储系统调整 IDC 中的电费, 提出了一个可减少电费的储能配置框架。

目前针对降低 IDC 电费的研究, 大多都是利用储能降低 IDC 的运行成本并提出多种有效降低运营成本的策略<sup>[13-15]</sup>。文献[16]提出了一种基于设备负荷状态预测的 IDC 机房空调系统节能决策的新方法。文献[17]通过联合调度工作负荷和电池来最小化 IDC 用电成本, 从而充分利用电价的时间多样性。文献[18]分析了电价、负荷、可再生能源发电、停电状态等方面的不确定性对最小化 IDC 能源成本的影响。

以上文献通过利用 IDC 的 UPS 参与到能源管理等应用, 虽然可以降低 IDC 的能耗费用, 提升经济性, 但是未能考虑到对 IDC 供电可靠性的影响。2017 年 CBRE IDC 发生停电事故, 导致 British Airways 600 余个航班被取消, 75 000 余名乘客出行受阻。据调查此次事故正是由于承包商意外封锁 IDC 电源造成的。可见, IDC 的供电可靠性<sup>[19]</sup>不容忽视。

面对上述问题, 风电、光伏等可再生能源出力为 IDC 的节能降耗带来了契机。然而新能源出力具有不确定性<sup>[20-22]</sup>的特点, 需要通过储能技术提升其利用率<sup>[23-24]</sup>。为了满足 IDC 的电力需求, 最大限度地降低成本, 由于原 IDC 配备的 UPS 利用率不高, 本文提出利用 IDC 原储能变流器(Power Conversion

System, PCS)建设额外的储能电池, 通过利用储能电池的双向功率能力和灵活调节特性<sup>[25]</sup>提高 IDC 对新能源的消纳量, 最大限度地降低 IDC 从电网购买的电力和峰值负荷费用。在此基础上, 通过优化确定储能电池的建设容量和光伏装机容量, 降低 IDC 的运行成本。

## 1 IDC 用能特征与电费构成

### 1.1 IDC 用能特征

近年来, 体积小、处理能力快、功能强的高密度机架服务器和存储服务器大量投入使用, 机架功率由原来每机架 0.8 kW 逐步向每机架 3~20 kW 发展, 最新数据表明, 5 年内我国 IDC 平均能耗密度将达到 3 kW/m<sup>2</sup><sup>[26]</sup>。

IDC 机房的能耗主要包括 4 个部分: IT 设备、供电系统、空调系统以及照明设施。其中 IT 设备、供电系统和空调系统占到 IDC 机房能源消耗的 90% 以上。绿色网格(Green Grid)组织提出使用电能使用效率(Power Usage Effectiveness, PUE)来衡量 IDC 的能耗效率, 定义为 IDC 总耗电量与 IT 设备耗电量的比值, 越接近 1 表明能效水平越好。空调制冷系统耗电占总能耗的 37%, 现有 IDC 机房的 PUE 平均值在 2.0 左右, 由此可以确认空调系统的能源消耗过高是 IDC 机房 PUE 值偏大的主要原因。图 1 为 IDC 能耗构成图。

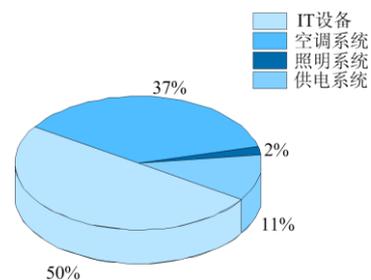


图 1 IDC 能耗构成图

Fig. 1 Diagram of IDC energy consumption composition

### 1.2 IDC 耗电费用构成

IDC 用电费用由两部分组成<sup>[27]</sup>: 1) 电量费用, 取决于某个计费周期内 IDC 消耗的电能多少, Gartner 研究机构指出, IDC 电费可达到 IDC 整体拥有成本的 12%~19%<sup>[28]</sup>。以江苏省某个拥有 2 000 个机柜的中型 IDC 为例, 机柜的平均功率为 5 kW, 则仅机柜一年的耗电量为 8 760 万 kWh, 江苏省的平均电价约为 0.68 元, 则仅机柜一项产生的电费就高达 5 957 万元, 这里尚未计空调、照明等其他电力设备设施所产生的电力消耗。2) 峰值负荷费用,

是一种与 IDC 在计费周期内最大负荷相关的费用。这类费用十分昂贵, 美国东南部的峰值负荷费用在 10~20 美元/kW 不等, 对于一个兆瓦级 IDC 而言, 其平均利用率仅 30% 左右, 运营商每年必须额外支付数十万美元。

引文参考文献中大多数减少 IDC 能耗费用的方案仅关注减少 IDC 的能量费用而忽视了峰值负荷费用, 并且大多数方案使用 IDC 的 UPS 参与应用降低能耗费用, 大大降低了 IDC 的可靠性。

通过调峰技术可以减少 IDC 的电量费用和峰值负荷费用, 调峰技术<sup>[29]</sup>分为两种类型: 1) 负荷转移。将 IDC 的任务划分为实时工作负载和容许延时工作负载, 通过对 IDC 任务进行规划, 将容许延时的任务分配到负荷低谷进行处理, 达到负荷时间转移的目的, 从而降低 IDC 峰值负荷。2) 电能存储。在负荷低谷时向电网购买电量存储到电池中, 在负荷高峰时释放这部分能量以减少负荷高峰向电网购买的电量。

面对全球能源绿色发展和能源转型的迫切需求, “绿色 IDC” 作为一种新型的设计模式逐步受到关注, “绿色 IDC” 注重提升 IDC 基础设施利用率并强调 IDC 与新能源系统结合, 以达到最大化经济效益和绿色低碳的目的。在设计绿色 IDC 的过程中, 储能系统因其具有能够将电能的生产和消费从时间和空间上分隔开来的能力, 逐渐成为 IDC 的一种关键使能元件<sup>[30]</sup>。

## 2 新型 IDC 及其储能应用

### 2.1 新型 IDC

为了推动我国 IDC 产业持续健康发展, 2013 年 2 月, 工信部发布了相关指导意见, 对 IDC 提出了节能环保的要求。2015 年 3 月, 工信部制定的相关工作方案提出到 2017 年 IDC 能效平均提高 8% 以上。2017 年 8 月, 工信部在相关通知中指出, 规定大型规模以上 IDC 的年均 PUE $\leq 1.5$ , 中小型 IDC 的年均 PUE $\leq 1.7$ 。

2019 年 1 月, 《上海市经济信息化委、市发展改革委关于加强本市互联网数据中心统筹建设的指导意见》指出, 到 2020 年, 新建和改建 IDC 的 PUE 值要严格控制在 1.3 和 1.4 以下。同年 2 月, 工信部等联合印发《关于加强绿色数据中心建设的指导意见》指出, 到 2022 年, IDC 平均能耗基本达到国际先进水平, 新建大型、超大型 IDC 的 PUE 值达到 1.4 以下, 力争通过改造使既有大型、超大型 IDC 的 PUE 值不高于 1.8。明确提出要建立健全绿色 IDC 标准评价体系和能源资源监管体系, 并提高储能能

在 IDC 内的重要性。

### 2.2 新型 IDC 中储能的应用

在传统 IDC 中, 储能一般以 UPS 的形式存在, 仅在供电异常时作为应急电源使用, 在发电机预热过程中, UPS 放电为备用柴油发电机的预热提供缓冲时间。

据统计, 我国 2018 年上半年城市范围内平均供电可靠率为 99.971%, IDC 的 UPS 每年利用率极低, 由此造成了供电设备资源的浪费。考虑到建设储能电池需要匹配一定量的 PCS, 利用原 IDC 的 PCS 建设额外的储能电池减少初始投资费用, 充分发挥削峰填谷作用, 协助节省电费、降低峰值负荷。在 IDC 面临停电威胁时切换到原 IDC 的 UPS 进行供电, 保证 IDC 供电的可靠性。

储能在绿色 IDC 设计中发挥着以下三方面关键作用: 1) 与传统 IDC 类似, 储能用作应急电源 UPS 使用, 以保证安全、稳定的电力供应, 保护 IDC 不因供电不稳而停机; 2) 额外安装的储能电池可以用来管理 IDC 中偶尔发生的峰值负载<sup>[31]</sup>。面对峰值负载带来的功耗尖峰, 储能电池释放其储存的能量, 参与调峰, 降低 IDC 的峰值负荷费用<sup>[32]</sup>; 3) 额外安装的储能电池可以用来管理新能源波动<sup>[33]</sup>。由于以风电、光伏为代表的可再生能源出力具有随机性、间歇性和波动性的特点, 储能电池能够改善可再生能源输出的不稳定性, 从而加大 IDC 对可再生能源的消纳量<sup>[34]</sup>。在用电低谷时, 储能电池适时地吸收过剩的新能源发电, 并在新能源出力不足或用电高峰时放电以弥补供电缺口。

对 IDC 进行光伏发电出力和负荷曲线匹配分析, 示意图如图 2 所示<sup>[35]</sup>。曲线对时间的积分为电量, 主要分为以下 3 部分: 第①部分为光伏多发电量, 由储能电池吸收; 第②部分为 IDC 消耗的光伏

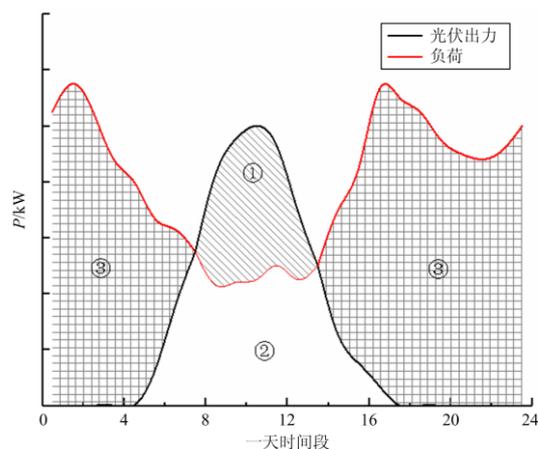


图 2 光伏发电出力和负荷之间的关系示意图

Fig. 2 Diagram of relation between PV output and load

发电量(光伏发电作为电源);第③部分为 IDC 消耗的电网电量(公共电网作为电源)。

### 3 IDC 储能的价值评估模型

#### 3.1 目标函数

本文考虑 IDC 额外新建储能电池参与削峰填谷和平滑光伏功率输出两种应用,旨在最大程度地降低 IDC 能耗费用,以 IDC 光-储建设费用和能耗费用最小为目标函数。

$$\min f = (C_{PV} + C_{ES}) \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + C_G + C_{Ca} \quad (1)$$

$$C_{PV} = C_{B,PV} \cdot E_{PV} \quad (2)$$

$$C_{ES} = C_{B,ES} \cdot E_{ES} \quad (3)$$

$$C_G = \sum_{t=1}^{8760} P_{grid}^t \cdot \pi^t \quad (4)$$

$$C_{Ca} = C_{B,Ca} \cdot P_{peak} \quad (5)$$

式中:  $C_{PV}$  表示光伏的建设成本;  $C_{ES}$  表示储能的建设成本;  $r$  表示贴现率;  $n$  表示储能电池的寿命周期;  $C_G$  表示绿色 IDC 的年耗电费用;  $C_{Ca}$  表示 IDC 的容量电费;  $C_{B,PV}$  表示单位光伏装机容量成本;  $E_{PV}$  表示光伏的装机容量;  $C_{B,ES}$  表示单位容量储能造价;  $E_{ES}$  表示储能的配置容量;  $P_{grid}^t$  表示第  $t$  时间段从电网吸收的功率;  $\pi^t$  表示第  $t$  时间段的电网电价;  $C_{B,Ca}$  表示容量电费;  $P_{peak}$  表示 IDC 用电设备容量。

#### 3.2 IDC 的收益

计算 IDC 的收益构成,主要包括储能电池参与削峰填谷的电价差值和光伏发自自用节省的电费部分。

储能电池削峰填谷的收益为

$$I_{ARV} = \sum_{t=1}^{24} (P_{ARV}^{t,+} - P_{ARV}^{t,-}) \cdot \pi^t \cdot \Delta t \quad (6)$$

式中:  $I_{ARV}$  表示储能参与削峰填谷的收入;  $P_{ARV}^{t,-}$  和  $P_{ARV}^{t,+}$  表示储能能在第  $t$  时间段参与削峰填谷的充电和放电功率;  $\Delta t$  表示一个时间段的时长。

节省的电费收益为

$$I_{PV} = \sum_{t=1}^{24} P_{PV,t}^t \cdot \pi^t \quad (7)$$

式中:  $I_{PV}$  表示光伏发自自用节省的电费;  $P_{PV,t}^t$  为光伏日发自自用的各时段功率。

#### 3.3 约束条件

1) 通过储能电池平滑光伏发电, IDC 最大化利用光伏发电,当光伏出力大于 IDC 的实时需求时,过剩的电力由储能电池吸收,但是不能向上级电网返送。在同一时间段储能电池只能存在一种状态。

光伏出力必须处于最大值、最小值区间内。

$$P_{Grid}^t + P_{PV}^t + P_{ES}^t = P_{load}^t \quad (8)$$

$$P_{ES}^t = u P_{out}^t - (1-u) P_{in}^t \quad (9)$$

$$P_{PV,min} \leq P_{PV} \leq P_{PV,max} \quad (10)$$

式中:  $P_{Grid}^t$  表示第  $t$  个时间段电网注入的有功功率;  $P_{PV}^t$  表示第  $t$  个时间段光伏注入的有功功率;  $P_{ES}^t$  表示第  $t$  个时间段储能的注入功率;  $P_{load}^t$  表示第  $t$  个时间段 IDC 的负荷功率;  $P_{in}^t$  和  $P_{out}^t$  分别表示节点  $i$  上储能第  $t$  个时间段的充电和放电功率;  $u$  取 0 或 1;  $P_{PV,min}$  表示光伏的最小发电出力功率;  $P_{PV,max}$  表示光伏的最大发电出力功率。

2) 根据上海市经信委相关文件规定,存量改造 IDC 能源使用效率值不得高于 1.4。考虑到 PUE 不适用于绿色 IDC,本文提出采用电网电能使用效率(Grid Power Usage Effectiveness, GPUE)对 IDC 进行评价,其表示为 IDC 使用的电网电量与 IT 设备能耗的比值。

$$\int P_{grid}^t dt / \text{IT设备能耗} \leq 1.4 \quad (11)$$

3) 储能充放电功率及荷电状态约束。

$$P_{ES}^t \leq P_{PCSmax} \quad (12)$$

$$E_{ES}^{t-1} + P_{in}^t \cdot \Delta t \cdot \eta_{ch} \leq E_{ESmax} \quad (13)$$

$$E_{ES,t-1} - \frac{P_{out}^t \cdot \Delta t}{\eta_{disch}} \geq E_{ESmin} \quad (14)$$

式中:  $P_{PCSmax}$  表示储能变流器额定值;  $E_{ES}^{t-1}$  表示储能第  $t-1$  个时间段的荷电状态;  $E_{ESmin}$  表示储能的最小荷电状态;  $E_{ESmax}$  表示储能的最高荷电状态;  $\eta_{ch}$  和  $\eta_{disch}$  分别表示储能的充电和放电效率。

#### 3.4 评价原则

绿色 IDC 提出后, PUE 作为衡量 IDC 电力使用效率的衡量指标就不再适合了,因为其未计算 IDC 使用可再生能源的电量。本文提出使用可再生能源利用率(Renewable Energy Usage Effectiveness, REUE)和电网电能使用效率(Grid Power Usage Effectiveness, GPUE)对 IDC 进行评价,定义式为

$$REUE = \frac{\text{IDC消耗的光伏电量}}{\text{IDC总耗电量}} \quad (15)$$

$$GPUE = \frac{\text{IDC消耗的电网电量}}{\text{IT设备耗电量}} \quad (16)$$

静态投资回收期<sup>[36]</sup>表示恢复初始投资所需的时间段。对储能全寿命周期最大时间进行评估以确定投资回收期,累积现金流等于零的年份( $y$ )即为投资回收期。如式(17)、式(18)所示。

$$CCF = \sum_{y=0}^{LC} V_y - C_{ES} - C_{PV} \quad (17)$$

$$SPBP = \{y, \text{where } CCF \geq 0\} \quad (18)$$

式中:  $CCF$  表示累积现金流;  $V_y$  表示第  $y$  年 IDC 节省的运行费用;  $SPBP$  表示静态投资回收期。

### 4 算例分析

根据某 IDC 的实际情况, 典型日 24 个时段负荷功率和电网电价如图 3 所示, IDC 的最大负荷为 1 592 kW。储能变流器 PCS 设备容量为 4 000 kW<sup>[37]</sup>。本文的储能电池选择磷酸铁锂电池, 其单位容量成本  $C_{B,ES} = 1500$  元/kWh, 储能电池的寿命周期  $LC = 10$  年, 一年以 365 天计, 储能电池的充电和放电深度分别为 90% 和 10%, 充放电效率  $\eta_{ch} = \eta_{disch} = 90\%$ 。光伏年发电利用小时数选取青海省 2018 年光伏平均利用小时数 1 460 h, 单位光伏装机容量成本取  $C_{B,PV} = 6000$  元/kW, IDC 容量电费  $C_{B,Ca}$  取 28 元/kVA/月。

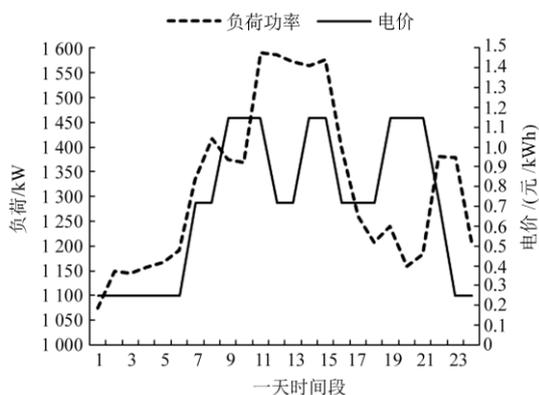


图 3 24 h 负荷功率和电价

Fig. 3 Load power and electricity price during 24 hours

通过设置三种不同的场景进行对比, 具体场景方案设计如下。

方案 1: IDC 内不存在额外的储能电池和光伏。

方案 2: IDC 内加入额外的储能电池。

方案 3: IDC 内加入额外的储能电池和光伏。

根据以上三种方案, 优化 IDC 内储能电池和光伏发电的最优配置容量。计算 IDC 总耗电成本、可再生能源利用率、电网电力利用率和静态投资回收期。优化分析数据如表 1 所示。

场景 1, 作为基础对比场景, 主要计算 IDC 完全由电网供电所产生的能耗费用。

场景 2 内, IDC 配置额外的储能电池参与削峰填谷, 但没有接入可再生能源, 故降低的能耗成本

有限。全年某一天的储能电池的充放电功率如图 4 所示。在第 1~6、23、24 个时间段内, 电价处于低谷, 储能电池充电达到上限, 在第 11~15 个时间段, IDC 负荷处于高峰, 电价也处于峰时电价, 储能电池放电降低了 IDC 对电网电力的依赖, 峰值负荷降低至 1 418 kWh, 降低了 IDC 的运营成本。在这个运行周期中, 储能电池的充放电行为起到了削峰填谷的作用, 降低了电网供电压力。但在此场景内 IDC 的电网电能使用效率高于场景 1, 是由于储能电池在充电和放电时存在一定的损耗。储能电池的回收年限也在其寿命周期内。

表 1 经济运行分析

Table 1 Economic operation analysis

	最优配置		耗电成本/ (万元/年)	REUE	GPUE	SPBP
	储能电池/ kWh	光伏/ kW				
场景 1	0	0	885.52	0	2	—
场景 2	1 800	0	845.48	0	2.06	6.74
场景 3	1 500	2 400	519.11	0.298	1.4	4.6

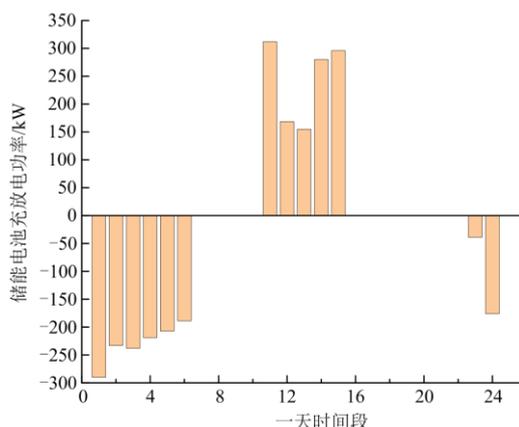


图 4 场景 2 储能电池充放电功率

Fig. 4 Charging and discharging power of energy storage battery in scene 2

场景 3 内, 在场景 2 的基础上将可再生能源光伏接入 IDC, 储能电池通过充放电降低光伏出力的波动性提高 IDC 的可再生能源适应能力, 达到减少 IDC 从电网购买电力的目的, 并吸收光伏超出负荷的部分电力, 在负荷高峰时段放电降低 IDC 的峰值负荷费用。全年某一天的储能电池的充放电功率如图 5 所示, 在第 1~6、10、24 个时间段内, 储能电池充电达到上限, 其中第 10 个时间段储能电池吸收过剩的光伏发电, 在第 15、16、20~22 个时间段内, 电价处于高峰, 储能电池进行放电, 在第 16、23、

24 个时间段，电价处于平段，储能电池放电降低峰值负荷，峰值负荷降低到 1 370 kWh。并且，储能电池和光伏的回收年限为 4.6 年，具有较好的经济性。

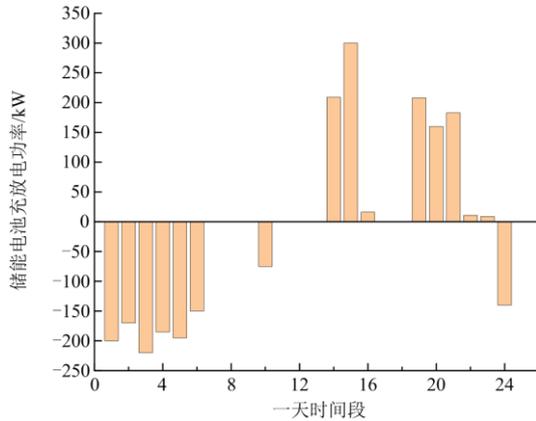


图 5 场景 3 储能电池充放电功率

Fig. 5 Charging and discharging power of energy storage battery in scene 3

上文所采用的磷酸铁锂电池属于锂电池，由于不同类型电池的性能参数不同，不同种类电池在优化配置中对 IDC 用电费用会产生不同的影响，因此需对其进行分析。表 2 给出了三种电池的性能参数。

表 2 三种电池性能参数

Table 2 Performance parameters for three kinds of batteries

项目	电池种类		
	磷酸铁锂电池	铅炭电池	液态金属电池
额定充放电倍率	0.3	0.2	0.4
允许的 SOC 范围	0.1~0.9	0.3~0.7	0.05~0.95
能量效率/%	90	80	75
容量成本/(元/kWh)	1 500	1 000	5 500
寿命/年	10	5	20

表 3 是在场景 2、3 下，IDC 中接入不同种类电池计算得到的 IDC 耗电成本。

表 3 不同种类电池耗电成本比较

Table 3 Power consumption cost comparison of different types of batteries

种类	耗电成本/(万元/年)	
	场景 2	场景 3
磷酸铁锂电池	845.48	519.11
铅炭电池	877.88	548.65
液态金属电池	891.28	598.60

由表 3 可知，三类电池接入 IDC 中均可以减少耗电成本，其中磷酸铁锂电池与光伏组合是减少

IDC 系统耗电成本的最优选择。铅炭电池虽然容量成本更低，但其寿命以及充放电倍率较低，导致其总体经济性不如磷酸铁锂电池。而液态金属电池与光伏组合得到的耗电成本最高，主要是因为液态金属电池的单位容量成本较高。

## 5 结论

本文提出了利用 IDC 原 PCS 设备额外配置储能电池和可再生能源的经济调度优化模型，以降低 IDC 的运行成本。

根据当地电网实时电价的波动，通过储能电池合理的充放电行为减少光伏发电的波动性，最大化利用光伏发电，减少消耗的电网电力。仿真计算表明，在相同的负荷数据和运行环境下，配置磷酸铁锂电池和可再生能源的 IDC 系统运行成本降低 40% 以上，回收年限为 4.6 年，具有较好的经济性，并且该方案具有较高的安全性和可靠性，不会降低 IDC 原有的运行可靠性，具有很高的实用价值。由于不同类型储能电池具有不同的特性，在 IDC 中可发挥不同的效益，今后可进一步考虑在 IDC 中构建混合储能系统，研究兼顾可靠性和经济性的 IDC 混合储能系统配置与调度方案。

## 参考文献

- [1] BILL K. The economic meltdown of Moore's law and the green data center[R]. Seattle, WA: The Uptime Institute, 2007.
- [2] HAMILTON J. Energy consumption and energy efficiency of data centers[EB/OL]. [2014-10]. <http://www.cloudgoing.com/>.
- [3] 袁景凌, 钟珞, 杨光, 等. 绿色数据中心不完备能耗大数据填补及分类算法研究[J]. 计算机学报, 2015, 38(12): 2499-2516.  
YUAN Jingling, ZHONG Luo, YANG Guang, et al. Towards filling and classification of incomplete energy big data for green data centers[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(12): 2499-2516.
- [4] COOK G. How dirty is your data: a look at the energy choices that power cloud computing[M]. Greenpeace, 2011.
- [5] LIU Longjun, SUN Hongbin, LI Chao, et al. RE-UPS: an adaptive distributed energy storage system for dynamically managing solar energy in green datacenters[J]. The Journal of Supercomputing, 2016, 72(1): 295-316.
- [6] KHOSRAVI A, NADJARANTOOSI A, BUYYA R. Online virtual machine migration for renewable energy usage maximization in geographically distributed cloud

- datacenters[J]. *Concurrency & Computation Practice & Experience*, 2017(4): 4125-4135.
- [7] CIOARA T, ANGHEL I, ANTAL M, et al. Data center optimization methodology to maximize the usage of locally produced renewable energy[C] // 2015 Sustainable Internet and ICT for Sustainability (SustainIT), April 14-15, 2015, Madrid, Spain: 1-8.
- [8] DABBAGH M, RAYES A, HAMDAOUI B, et al. Peak shaving through optimal energy storage control for data centers[C] // 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 22-27, 2016, Kuala Lumpur, Malaysia: 1-6.
- [9] ZHOU Haihang, YAO Jianguo, LIU Xue, et al. Comprehensive understanding of operation cost reduction using energy storage for IDCs[C] // 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), April 26 - May 1, 2015, Hong Kong, China: 2623-2631.
- [10] YAO Jianguo, LIU Xue, ZHANG Chen. Predictive electricity cost minimization through energy buffering in data centers[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(1): 230-238.
- [11] URGAONKAR R, URGAONKAR B, JACKSON M, et al. Optimal power cost management using stored energy in data centers[C] // Proceedings of the ACM SIGMETRICS Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. ACM, 2011: 221-232.
- [12] ZHENG Wenli, KAI Ma, WANG Xiaorui. Exploiting thermal energy storage to reduce data center capital and operating expenses[C] // 2014 IEEE 20th International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA), February 15-19, 2014, Orlando, FL, USA: 132-141.
- [13] WANG Di, REN Chuangang, SIVASUBRAMANIAM A, et al. Energy storage in datacenters: what, where, and how much?[C] // ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review. ACM, 2012: 187-198.
- [14] YAO Jianguo, GUAN Haibing, LUO Jianying, et al. Adaptive power management through thermal aware workload balancing in internet data centers[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 26(9): 2400-2409.
- [15] LI Zhongjin, GE Jidong, LI Chuanyi, et al. Energy cost minimization with job security guarantee in internet data center[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2017, 73: 63-78.
- [16] ZOU Yan, WU Fei, XING Jian. Research on energy saving method of IDC CRAC system based on prediction of working load[C] // IET Conference Proceedings. The Institution of Engineering & Technology, 2015.
- [17] YU Liang, JIANG Tao, YANG Cao, et al. Joint workload and battery scheduling with heterogeneous service delay guarantees for data center energy cost minimization[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 26(7): 1937-1947.
- [18] YU Liang, JIANG Tao, YANG Cao. Energy cost minimization for distributed internet data centers in smart microgrids considering power outages[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2015, 26(1): 120-130.
- [19] LIU Ju, YANG Dongjun, YAO Wei, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 429-437. DOI: 10.1186/s41601-017-0070-0.
- [20] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29): 5029-5040.
- XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [21] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(9): 2-11.
- KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(9): 2-11.
- [22] 赵娟, 王雷, 吴磊, 等. 基于年费用的电源结构评价[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(12): 7-14.
- ZHAO Juan, WANG Lei, WU Lei, et al. Power structure evaluation based on annual cost[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(12): 7-14.
- [23] 杨昌儒, 林仕立, 宋文吉, 等. 复合储能对提升太阳能利用率的仿真研究[J]. *电网与清洁能源*, 2018, 34(11): 52-58.
- YANG Changru, LIN Shili, SONG Wenji, et al. Simulation study in the promotion of solar energy utilization by multi-energy storage[J]. *Power System and Clean Energy*, 2018, 34(11): 52-58.
- [24] 高金辉, 朱迎正. 基于新电源模型的动力锂电池荷电状态估计研究[J]. *河南师范大学学报: 自然科学版*, 2019, 47(1): 58-61, 92.
- GAO Jinhui, ZHU Yingzheng. Study on state estimation of power lithium battery based on new power supply model[J]. *Journal of Henan Normal University: Natural*

- Science Edition, 2019, 47(1): 58-61, 92.
- [25] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1-10.  
LI Jianlin, MA Huimeng, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10.
- [26] 王丽欣, 常琳. 高密度数据中心制冷空调系统设计[J]. 制冷技术, 2015, 35(1): 48-53.  
WANG Lixin, CHANG Lin. Design of refrigeration and air conditioning system for high density data center[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2015, 35(1): 48-53.
- [27] WANG C, URGAKAR B, KESIDIS G, et al. A case for virtualizing the electric utility in cloud data centers[C] // Proceedings of the 6th USENIX conference on Hot Topics in Cloud Computing. USENIX Association, 2014: 22-22.
- [28] CHRISTY P. Gartner says energy-related costs account for approximately 12 percent of overall data center expenditures[R]. Tech. Rep. 2010.
- [29] 林俐, 田欣雨. 基于火电机组分级深度调峰的电力系统经济调度及效益分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2255-2263.  
LIN Li, TIAN Xinyu. Analysis of deep peak regulation and its benefit of thermal units in power system with large scale wind power integrated[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2255-2263.
- [30] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.  
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158.
- [31] LI Jianlin, XUE Yushi, TIAN Liting, et al. Research on optimal configuration strategy of energy storage capacity in grid-connected microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 389-396. DOI: 10.1186/s41601-017-0067-8.
- [32] 李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 等. 考虑实际运行的配电网电池储能系统的优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 88-94.  
LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Study on optimal allocation of battery energy storage in distribution network considering the actual operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 88-94.
- [33] LI Jinghua, WANG Sai, YE Liu, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 21-34. DOI: 10.1186/s41601-017-0074-9.
- [34] 李姚旺, 苗世洪, 刘君瑶, 等. 考虑需求响应不确定性的光伏微电网储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 69-77.  
LI Yaowang, MIAO Shihong, LIU Junyao, et al. Optimal allocation of energy storage system in PV micro grid considering uncertainty of demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 69-77.
- [35] 葛维春, 滕健伊, 潘超, 等. 含风光储能源-储-荷规划与运行调控策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 46-53.  
GE Weichun, TENG Jianyi, PAN Chao, et al. Operation regulation strategy of source-storage load with wind energy storage energy[J]. Power System Protecting and Control, 2019, 47(13): 46-53.
- [36] 孙伟卿, 裴亮, 向威, 等. 电力系统中储能的系统价值评估方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 47-58.  
SUN Weiqing, PEI Liang, XIANG Wei, et al. Evaluation method of system value for energy storage in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 47-58.
- [37] MA Hengrui, GAO Wenzhong, WANG Bo, et al. Control strategy of UPS for data center based on economic dispatch[C] // 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). IEEE, 2018: 1-6.

收稿日期: 2019-10-23; 修回日期: 2020-01-30

作者简介:

桑丙玉(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为分布式发电与微网、储能优化配置与控制; E-mail: sbyu5920@163.com

王德顺(1982—), 男, 在职博士研究生, 高级工程师, 研究方向为大功率电力电子技术、新能源发电、储能应用技术; E-mail: wangdeshun@epri.sgcc.com.cn

杨波(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力储能、电力电子控制技术. E-mail: yangbo@epri.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)