

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240581

# 考虑风光荷时空互补的多能源绿色数据中心多目标配置方法

可思为, 董萍, 马铭宇, 王春玲, 刘明波

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 为解决数据中心高能耗、高碳排放的问题, 提出了一种考虑风光荷时空互补的绿色数据中心“风-光-储”多种能源多目标容量配置模型。首先, 根据数据中心的时空转移特性及储能设备的运行特性, 建立绿色数据中心多能架构中灵活性资源的数学模型。接着, 在数据中心与储能的灵活性运行基础上, 提出一种源荷互补性指标来描述源荷间的供需差异, 并以平均度电成本与供需差异最小作为优化目标建立容量优化配置模型。最后, 采用风电、光伏的全年出力预测数据进行模拟, 利用 Benders 算法对容量配置模型进行求解, 得到各数据中心的最优投资建设方案。算例分析验证了所提模型的有效性, 结果表明引入新能源-储能供电以及数据中心时空灵活性能够降低用电成本, 并提高了新能源的渗透率。

**关键词:** 绿色数据中心; 风光荷互补; 容量配置; Benders 分解

## A multi-objective allocation method for multi-energy green data centers considering wind, solar and load spatial-temporal complementarity

KE Siwei, DONG Ping, MA Mingyu, WANG Chunling, LIU Mingbo

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** To solve the problem of high energy consumption and high carbon emission in data centers, this paper proposes a multi-objective capacity configuration model for wind-photovoltaic-storage multi-energy sources in green data centers. It considers the spatio-temporal complementarity of wind, solar and load. First, a mathematical model of flexibility resources in the multi-energy architecture of green data centers is established based on the spatial-temporal transfer characteristics of data centers and the operational characteristics of energy storage devices. Then, based on the flexible operation of data centers and energy storage, a complementarity index is proposed to describe the supply-demand difference between sources and loads. A capacity optimization model is established with the average kilowatt-hour cost and the minimum supply-demand difference as the optimization objectives. Finally, the annual output forecast data of wind power and photovoltaic are used for simulation and the capacity allocation model is analyzed using the Benders algorithm to obtain the optimal investment and construction plan for each data center. Case study analysis verifies the validity of the proposed model, and the results show that the introduction of renewable energy-energy storage power supply and data center spatio-temporal flexibility can reduce electricity costs and increase the penetration rate of renewable energy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52077083).

**Key words:** green data center; wind-photovoltaic-load complementarity; capacity allocation; Benders decomposition

## 0 引言

随着中国信息化社会的快速发展, 数据中心作为终端海量数据的承载与传输实体, 投资增长逐年加快。中国 2021 年总机架数量达到 520 万架, 近 5

年年均复合增长率超过 30%<sup>[1]</sup>。预计到 2035 年全国数据中心能耗将达到 4505~4855 亿 kWh, 届时数据中心的碳排放总量将超过亿吨<sup>[2]</sup>。自我国提出“双碳”战略目标以来, 数据中心快速增长的电耗以及碳排放已成为制约产业发展的重要因素之一。对于高耗能行业的脱碳问题, 整合高渗透可再生能源发电一直是行之有效的解决方案<sup>[3]</sup>。《新型数据中心发展三年行动计划》<sup>[4]</sup>、《全国一体化大数据中心

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52077083); 广东省自然科学基金海上风电联合基金项目资助(2022A1515240076)

协同创新体系算力枢纽实施方案》<sup>[5]</sup>等政策文件鼓励新型数据中心配套可再生能源电站, 向新能源发电侧建设, 实现“东数西算”布局。

已有的研究表明光伏、风电与储能联合供电能够达到很好的经济性<sup>[6-9]</sup>, 但考虑到新能源的间歇性与波动性, 新能源的渗透率与消纳率很难同时保持在较高的水平。为削减间歇性与波动性的影响, 部分学者针对风光之间的时间互补特性进行了研究, 通过合理配置风光之间的比例起到平滑出力、降低峰谷差的作用<sup>[10-14]</sup>。但这些研究都注重在源侧进行配置, 使电源特性接近负荷的用电特性, 没有考虑负荷侧的灵活性资源。数据中心作为一种新型柔性负荷, 在工作负载调度、制冷系统、储能系统以及备用柴油发电机等调度方面蕴含巨大的灵活性运行潜力<sup>[15-17]</sup>。且相较于传统柔性负荷仅能在时间维度上转移或削减负荷, 数据中心具有时空双维度的调节能力<sup>[18-20]</sup>, 因此针对数据中心的配置问题不应忽视负荷侧的灵活性能力。

目前已有一些学者在容量配置问题中考虑数据中心工作负载与源侧联动。文献[21]将光储联合供电系统引入到数据中心供电系统中, 通过负荷转移提高了新能源的渗透率。文献[22]提出一种零碳数据中心的能源投资组合方案, 包含水风光互补发电系统、变速泵蓄能系统以及碳循环系统, 有效减少了数据中心的用电成本及碳排放总量。但上述研究局限于单个数据中心, 仅考虑了数据中心工作负载以及储能在时间上的灵活性, 没有考虑数据中心的时空灵活性。风能与太阳能资源具有良好的时空互补性, 且随着空间距离的增加, 风光之间的互补性越好<sup>[23-25]</sup>。一些学者已经尝试将不同地区的数据中心及附属新能源发电站结合, 通过空间转移数据中心工作负载, 控制负荷功率追踪本地新能源出力, 以达到降低数据中心用电成本及碳排放的目的<sup>[26-29]</sup>。然而这些文献均从优化运行的角度进行研究, 文献[30]提出一个数据中心统一能源投资组合框架, 并重点研究了一种能源选择如何影响其他能源选择。文献[31]则将数据中心与综合能源系统结合, 利用数据中心的时空灵活性提高设备利用率。这些研究虽然考虑了数据中心时空灵活性在容量配置中的作用, 但没有涉及到风光互补及源荷互补, 因此目前尚缺乏一种聚合地理分散新能源资源的多能源配置方法。

此外, 目前考虑数据中心多能源配置的研究中, 大部分仅以经济性作为唯一目标<sup>[21,30-31]</sup>, 文献[22]增加了零碳数据中心的需求, 其主要由碳循环设施实现。在多能源系统多目标配置的研究中通常采用

两种方式: 一是增加额外的经济性指标如碳排放成本<sup>[32-33]</sup>、绿证成本<sup>[34]</sup>、风险价值<sup>[35]</sup>作为目标函数; 二是采用评价指标如供电系统波动性<sup>[10,36]</sup>、缺电负荷率<sup>[37-38]</sup>和可靠性<sup>[39-40]</sup>作为目标函数。但以上文献都无法兼顾新能源的高渗透与高消纳, 亟需提出一种平衡经济性与新能源高渗透接入的多目标方法。

综上所述, 本文提出了一种考虑风光荷时空互补的多能源绿色数据中心多目标配置方法。针对位于不同地区的数据中心新能源-储能供电系统, 考虑数据中心与储能的时空灵活性能力, 建立以平均度电成本与供需差异最小为目标的风储、光储容量优化配置模型。输入风电、光伏全年预测出力数据进行模拟, 采用 Benders 分解算法获得帕累托最优解集, 并使用多维偏好分析线性规划决策法(the linear programming technique for multidimensional analysis of preference, LINMAP)和逼近于理想解的排序方法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)选取折中最优解作为各个地区的风储、光储最优建设容量。最后, 在含有 3 个数据中心的南方区域电网系统中进行仿真, 验证了本文配置方法的有效性和可行性。

## 1 绿色数据中心多能架构及其数学模型

### 1.1 绿色数据中心多能架构

绿色数据中心多能架构如图 1 所示, 由单个数据中心、可再生能源场站与储能电站组成。

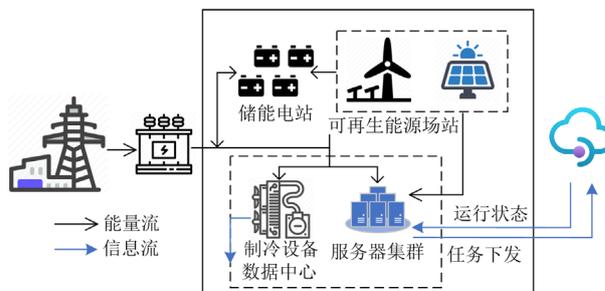


图 1 绿色数据中心多能架构

Fig. 1 Green data center multi-energy architecture

现有研究表明, 风能与太阳能资源具有良好的时空互补性, 然而考虑到远距离传输带来的电能损耗、输电成本、调度成本等因素, 多数研究仅局限于风光的时间互补<sup>[22]</sup>。数据中心的延迟敏感型工作负载具有空间灵活性能力, 能够在数据中心之间转移, 调整各个数据中心的能耗空间分布。因此, 数据中心运营商能够利用网络线路代替输电线路, 通过转移负荷实现本地发电与用电的平衡, 达成远距离风光空间互补的目的。此外, 数据中心的延迟容

忍型工作负载与储能提供了时间灵活性，能够在一定程度上改变负荷用电特性。配置过程中调节新能源配比与负荷侧灵活性资源，从而实现源荷互补。

## 1.2 绿色数据中心模型

本节建立绿色数据中心的数学模型，假定数据中心运营商共有  $N$  个位于不同地区的数据中心，采用  $\{1, 2, 3, \dots, n, \dots, N\}$  表示；每个数据中心有  $M_n$  个服务器，表示为  $\{1, 2, 3, \dots, m, \dots, M_n\}$ ；单个数据中心根据当地风光资源特性，建设风电场或光伏电站与电网协同供电。数据中心与风光电站均在离散时段中进行调度，表示为  $\{1, 2, 3, \dots, t, \dots, T\}$ 。

### 1.2.1 数据中心工作负载模型

数据中心接受的用户请求中，计算任务按照优先级和响应时间的快慢，可以将数据中心的工作负载分为在延迟敏感型负载和延迟容忍型负载。

$$L_{n,t} = L_{n,t}^{\text{dt}} + L_{n,t}^{\text{ds}} \quad (1)$$

式中： $L_{n,t}$  为数据中心  $n$  在  $t$  时刻的总工作负载计算需求； $L_{n,t}^{\text{dt}}$  为调整后  $t$  时刻的延迟容忍型负载计算需求； $L_{n,t}^{\text{ds}}$  为经过负载调度系统调整后的延迟敏感型任务数量。

延迟敏感型负载通常具有严格响应时间约束，需要立即处理，代表任务包括实时交易、网页内容同步和在线视频等。这些任务对响应时间要求很高，但能够在其他服务器上异地处理，具有一定的空间灵活性。各个数据中心在接收到用户提交的延迟敏感型负载后，能够接收负载调度系统的再调度，将部分工作负载转移至其他数据中心。

$$L_{n,t}^{\text{ds}} = L_{n,t}^{\text{ds}*} + \sum_w l_{wn,t}^{\text{ds}} \quad (2)$$

式中： $L_{n,t}^{\text{ds}*}$  为数据中心  $n$  在  $t$  时刻从用户处收到的延迟敏感型任务数量； $l_{wn,t}^{\text{ds}}$  为  $t$  时刻从数据中心  $w$  向  $n$  转移的延迟敏感型负载数量。

延迟容忍型负载则有较为宽松的延迟时间范围，在服务水平协议(service level agreement, SLA) 约束的最大延迟时间范围内能够任意调度，代表任务类型有数字图像处理、本地数据周期备份、非核心冷数据存储等。这些任务通常有计算量大、资源需求多、容许时间宽泛等特点，因此能够在给定的时间范围内向前或向后转移。数学模型为

$$L_{n,k}^{\text{dt}} = \sum_{t=k}^{T_k} l_{n,kt}^{\text{dt}} \quad (3)$$

$$L_{n,t}^{\text{dt}} = \sum_k^T l_{n,kt}^{\text{dt}} \quad (4)$$

式中： $L_{n,k}^{\text{dt}}$  为数据中心  $n$  在第  $k$  个时刻接收的延迟容忍型负载数量； $T_k$  为第  $k$  个延迟容忍型负载的容许时间范围， $T_k = \{k, k+1, \dots\}$ ； $l_{n,kt}^{\text{dt}}$  为任务  $k$  在  $t$  时刻的计算需求。

### 1.2.2 数据中心能耗模型

数据中心的能耗由以下几部分组成：服务器设备(IT 设备)、制冷系统设备、供配电系统设备以及其他设备，典型数据中心能耗构成如图 2 所示。自能源利用效率(power usage effectiveness, PUE)指标被提出后，得到了全世界数据中心行业的认可与采纳，该指标被定义为数据中心总用电量与 IT 设备用电量的比值<sup>[19]</sup>。

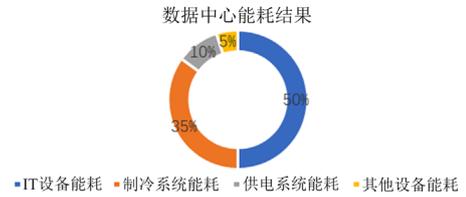


图 2 数据中心能耗结构

Fig. 2 Data center energy consumption structure

基于 CPU 利用率的线性模型被广泛应用在数据中心的能耗估计中，适用于 CPU 频率固定的情况。模型具体如式(5)所示。

$$P_{n,t}^{\text{IT}} = P_n^{\text{idle}} + (P_n^{\text{peak}} - P_n^{\text{idle}})U_{n,t} \quad (5)$$

式中： $P_{n,t}^{\text{IT}}$  为 IT 设备能耗； $P_n^{\text{idle}}$  与  $P_n^{\text{peak}}$  分别为服务器静态功率与峰值功率； $U_{n,t}$  为  $t$  时刻 CPU 的利用率。

服务器的占用率可以利用到达数据中心的总任务量与服务器的服务率计算得到。同时，为保证即时性负载的响应速度，数据中心会保留一定的冗余。

$$U_{n,t} = \frac{L_{n,t}}{m_{n,t}\mu_n} \leq 0.9 \quad (6)$$

式中： $m_{n,t}$  为数据中心  $n$  在  $t$  时刻所开启的服务器数量； $\mu_n$  为单个服务器的服务速率。

非 IT 负载功耗利用 PUE 指数估计，该指标与制冷设备效率以及环境温度相关，假设数据中心运行过程中 PUE 指数不变，非 IT 负载功耗  $P_{n,t}^{\text{ntIT}}$  为

$$P_{n,t}^{\text{ntIT}} = P_{n,t}^{\text{IT}}(\alpha_{\text{PUE}} - 1) \quad (7)$$

式中， $\alpha_{\text{PUE}}$  为 PUE 指数。

数据中心负载由 IT 负载与非 IT 负载组成，数据中心总功耗  $P_{n,t}^{\text{IDC}}$  为

$$P_{n,t}^{\text{IDC}} = m_{n,t}(P_{n,t}^{\text{ntIT}} + P_{n,t}^{\text{IT}}) \quad (8)$$

联合式(1)式(8)可得出总功耗与工作负载之间的函数关系，如式(9)所示。

$$P_{n,t}^{\text{IDC}} = \left[ m_{n,t} P_n^{\text{idle}} + \frac{L_{n,t}^{\text{dt}} + L_{n,t}^{\text{ds}}}{\mu_n} (P_n^{\text{peak}} - P_n^{\text{idle}}) \right] \cdot \alpha_{\text{PUE}} \quad (9)$$

### 1.2.3 储能设备模型

运行过程中储能电量  $E_{n,t}^{\text{ess}}$  需要保持在一定范围内, 如式(10)所示。

$$E_n^{\text{ess}} \leq E_{n,t}^{\text{ess}} \leq \bar{E}_n^{\text{ess}} \quad (10)$$

式中,  $\bar{E}_n^{\text{ess}}$  与  $E_n^{\text{ess}}$  分别为储能设备  $n$  的电量上、下限。

储能设备各时段电量具有耦合关系, 同时为保证每个运行日初始条件一致, 需要增加始末状态约束, 如式(11)和式(12)所示。

$$E_{n,t}^{\text{ess}} = E_{n,t-1}^{\text{ess}} + \Delta t \cdot (P_{n,t}^{\text{ess,ch}} \eta_n^{\text{ch}} - P_{n,t}^{\text{ess,dch}} / \eta_n^{\text{dch}}) \quad (11)$$

$$E_{n,0}^{\text{ess}} = E_{n,24}^{\text{ess}} \quad (12)$$

式中:  $P_{n,t}^{\text{ess,ch}}$  与  $P_{n,t}^{\text{ess,dch}}$  分别为  $t$  时刻储能充、放电功率;  $\eta_n^{\text{ch}}$  与  $\eta_n^{\text{dch}}$  分别为储能的充、放电效率;  $\Delta t$  为充放电时间。

同一时刻, 储能设备仅能处于充电或放电一种状态。

$$0 \leq P_{n,t}^{\text{ess,ch}} \leq P_n^{\text{ess, rated}} \cdot I_{n,t}^{\text{ess,ch}} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{\text{ess,dch}} \leq P_n^{\text{ess, rated}} \cdot I_{n,t}^{\text{ess,dch}} \quad (14)$$

$$I_{n,t}^{\text{ess,ch}} + I_{n,t}^{\text{ess,dch}} \leq 1 \quad (15)$$

式中:  $P_n^{\text{ess, rated}}$  为储能的额定充放电功率;  $I_{n,t}^{\text{ess,ch}}$ 、 $I_{n,t}^{\text{ess,dch}}$  分别为储能充、放电控制变量。

### 1.2.4 风光电站出力模型

风光电站出力采用多种时间尺度下的预测数据, 实际风光功率小于理想功率出力上限

$$0 \leq P_{n,t}^{\text{renew}} \leq P_{n,t}^{\text{renew, th}} \quad (16)$$

$$P_{n,t}^{\text{renew}} + P_{n,t}^{\text{renew, aban}} = P_{n,t}^{\text{renew, th}} \quad (17)$$

式中:  $P_{n,t}^{\text{renew}}$  为新能源实际消纳电量;  $P_{n,t}^{\text{renew, th}}$  为理想功率出力上限;  $P_{n,t}^{\text{renew, aban}}$  为新能源弃置电量。

### 1.2.5 市电供电模型

数据中心正常运行过程中的市电电力需求应小于母线供电功率上限, 同时不向电网倒送电, 如式(18)所示。

$$0 \leq P_{n,t}^{\text{grid}} \leq \bar{P}_n^{\text{grid}} \quad (18)$$

式中:  $P_{n,t}^{\text{grid}}$  为数据中心  $n$  向电网购电功率;  $\bar{P}_n^{\text{grid}}$  为母线功率上限。

## 2 考虑风光荷时空互补的多能源绿色数据中心多目标配置模型

### 2.1 目标函数

为提高配置容量的经济性以及达到地理分散的

新能源资源的时空互补最优, 本模型以生命周期内的平均度电成本和源荷供需差异最小为目标。  $f_1$  为平均度电成本, 包含光伏、风电以及储能的建设成本、维护成本, 以及数据中心日常运行产生的购电成本, 具体如式(19)所示。供需差异则采用源荷互补性评价指标  $f_2$  描述, 如式(20)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f_1 = \frac{1}{\sum_s p_s \sum_n \sum_t P_{n,t}^{\text{IDC}}} \left( C_{\text{build}} + C_{\text{maintenance}} + \sum_s p_s C_s^{\text{run}} \right) \\ C_{\text{build}} = \frac{1}{365} \frac{i(1+i)^y}{(1+i)^y - 1} \sum_n \left( C_{\text{build}}^{\text{PV}} + C_{\text{build}}^{\text{wind}} + C_{\text{build}}^{\text{ess, power}} + C_{\text{build}}^{\text{ess, capacity}} \right) \\ C_{\text{maintance}} = \frac{1}{365} \sum_n \left( \eta^{\text{PV}} C_{\text{build}}^{\text{PV}} + \eta^{\text{wind}} C_{\text{build}}^{\text{wind}} + \eta^{\text{ess}} (C_{\text{build}}^{\text{ess, power}} + C_{\text{build}}^{\text{ess, capacity}}) \right) \\ C_s^{\text{run}} = \sum_n \sum_t P_{s,n,t}^{\text{grid}} r_t^{\text{grid}} \\ C_{\text{build}}^{\text{PV}} = c^{\text{PV}} P_n^{\text{PV, rated}} \\ C_{\text{build}}^{\text{wind}} = c^{\text{wind}} P_n^{\text{wind, rated}} \\ C_{\text{build}}^{\text{ess, power}} = c^{\text{ess, power}} P_n^{\text{ess, rated}} \\ C_{\text{build}}^{\text{ess, capacity}} = c^{\text{ess, capacity}} E_n^{\text{ess, rated}} \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \min f_2 = \sum_s \frac{p_s}{2} (M_{\text{renewable}} + M_{\text{grid}}) \\ M_{\text{renewable}} = \frac{\sum_n \sum_t P_{s,n,t}^{\text{PV, aban}} + P_{s,n,t}^{\text{wind, aban}}}{\sum_n \sum_t P_{s,n,t}^{\text{PV, th}} + P_{s,n,t}^{\text{wind, th}}} \\ M_{\text{grid}} = \frac{\sum_n \sum_t P_{s,n,t}^{\text{grid}}}{\sum_n \sum_t P_{s,n,t}^{\text{IDC}}} \end{array} \right. \quad (20)$$

式中:  $C_{\text{build}}$  为风电、光伏以及储能的总建设成本;  $C_{\text{build}}^{\text{PV}}$ 、 $C_{\text{build}}^{\text{wind}}$ 、 $C_{\text{build}}^{\text{ess, power}}$  和  $C_{\text{build}}^{\text{ess, capacity}}$  分别为光伏、风电、储能的功率与容量建设成本;  $C_{\text{maintance}}$  为总维护成本;  $S$  为场景集合,  $S = [1, 2, \dots, 365]$ ;  $C_s^{\text{run}}$  为单个场景下数据中心运营商总运行费用;  $p_s$  为场景出现的概率, 本文直接采用全年数据进行仿真, 因此各场景出现概率均等;  $y$  为设备运行年限;  $\eta^{\text{PV}}$ 、 $\eta^{\text{wind}}$  与  $\eta^{\text{ess}}$  为年维护成本系数;  $c^{\text{PV}}$  为光伏单位装机容量价格;  $P_{s,n,t}^{\text{grid}}$  为场景  $s$  第  $n$  个数据中心在  $t$  时刻的购电功率;  $r_t^{\text{grid}}$  为  $t$  时刻的购电电价;  $P_n^{\text{PV, rated}}$  为光伏额定装机容量;  $c^{\text{wind}}$  为风电单位装机容量价格;

$P_n^{\text{wind, rated}}$  为风电额定装机容量;  $c^{\text{ess, power}}$  为储能单位功率价格, 包含电池管理系统(battery management system, BMS)、储能变流器(power control system, PCS)以及辅助设施成本;  $P_n^{\text{ess, rated}}$  为储能额定功率;  $c^{\text{ess, capacity}}$  为储能单位容量价格;  $E_n^{\text{ess, rated}}$  为储能额定容量;  $M_{\text{renewable}}$  为新能源弃风弃光率;  $M_{\text{grid}}$  为电网供电占总用电比例。

然而由于单个场景中的理想出力  $P_{s,n,t}^{\text{PV, th}}$  与  $P_{s,n,t}^{\text{PV, th}}$  需要由决策变量风光装机容量乘以预测出力曲线得到, 使得指标  $M_{\text{renewable}}$  与决策变量  $P_n^{\text{PV, rated}}$ 、 $P_n^{\text{wind, rated}}$  呈非线性关系。而由式(9)可知, 数据中心的总能耗与接收的总工作任务呈线性关系, 因此确定工作负载总量后单日的多个数据中心总负荷一定。因此将  $M_{\text{renewable}}$  简化为式(21)所示的线性形式。

$$M_{\text{renewable}} \approx \frac{\sum_n^N \sum_t^T P_{s,n,t}^{\text{PV, aban}} + P_{s,n,t}^{\text{wind, aban}}}{\sum_n^N \sum_t^T P_{s,n,t}^{\text{IDC}}} \quad (21)$$

## 2.2 约束条件

约束条件除第1节中的模型约束外, 还需额外增加如下约束。

### 1) 功率平衡约束

$$P_{n,t}^{\text{grid}} + P_{n,t}^{\text{PV}} + P_{n,t}^{\text{wind}} + P_{n,t}^{\text{ess, dch}} = P_{n,t}^{\text{IDC}} + P_{n,t}^{\text{ess, ch}} \quad (22)$$

### 2) 延迟容忍型负载最大延迟时间 $T_{n,k}$ 约束

$$T_{n,k} \leq 3 \quad (23)$$

### 3) 储能站装设功率容量约束

$$P_n^{\text{ess, rated}} \leq E_n^{\text{ess, rated}} \quad (24)$$

## 2.3 多目标决策方法

上述模型为双目标优化, 求解结果为一个 Pareto 解集。本文采用加权的方式将两个目标函数标么化后合并为单个目标, 如式(25)所示。

$$\min f = \alpha \frac{f_1}{r_0^{\text{grid}}} + \beta f_2 \quad (25)$$

式中:  $\alpha$  与  $\beta$  均为权重系数, 一组  $[\alpha, \beta]$  对应 Pareto 解集中的一个最优解, 通过改变双目标的权重即可得到 Pareto 最优解集;  $r_0^{\text{grid}}$  为仅从电网购电时的平均度电成本。

为实现对最优容量配置方案的进一步优选, 本文采用 LINMAP 和 TOPSIS<sup>[41]</sup>两种决策方法确定一个相对较优的建设容量。具体如下所述。

### 1) 归一化处理

$$\mu_{ij} = \frac{f_{i, \max} - f_{ij}}{f_{i, \max} - f_{i, \min}} \quad (26)$$

式中:  $\mu_{ij}$  为对应的归一化值;  $f_{ij}$  为第  $j$  个帕累托解的第  $i$  个目标函数;  $f_{i, \max}$ 、 $f_{i, \min}$  分别为帕累托前沿上第  $i$  个目标函数的最大、最小值。

### 2) LINMAP

计算各最优解到理想解的欧几里得距离  $S_i^+$  为

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (\mu_{ij} - V_j^+)^2} \quad (27)$$

式中,  $V_j^+$  为理想解, 由两个目标函数的最小值组成,

$$V_j^+ = (f_{1, \min}, f_{2, \min})。$$

### 3) TOPSIS

计算各最优解到负理想解的欧几里得距离  $S_i^-$  为

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (\mu_{ij} - V_j^-)^2} \quad (28)$$

式中,  $V_j^-$  为负理想解, 由两个目标函数的最大值组成, 即  $V_j^- = (f_{1, \max}, f_{2, \max})。$

### 4) 计算相对接近度 $R_i$

$$R_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (29)$$

式中,  $R_i$  为最优解与理想解的相对接近度,  $R_i$  值最大的解即为双目标最优解。

## 3 求解方法

考虑风光荷时空互补的风光储容量配置模型求解思路如图3所示。在给定不同地区风/光全年出力预测数据的情况下, 以平均度电成本与供需差异最小为目标, 考虑数据中心工作负载在时间上的再调度和空间上的再分配、储能电站的充放电策略以及新能源发电限制等约束条件, 建立多能互补容量优化配置模型。并采用 Benders 分解算法求解该多目标混合整数非线性规划问题得到风光储最优建设容量。

### 3.1 Benders 分解算法

本文采用 Benders 分解算法来求解提出的多能源绿色数据中心多目标配置模型, 模型可以分解为容量配置主问题(master problem, MP)与多个场景下的运行优化子问题(sub problems, SPs)。MP 负责基础的光伏、风电与储能的容量优化配置, 在 MP 求解后, 可以并行求解 SPs。各 SP 则用于计算给定风光储容量下单日的最优运行策略。

为更好地展示 Benders 分解的计算过程, 可以将模型简写为紧凑形式, 如式(30)所示。

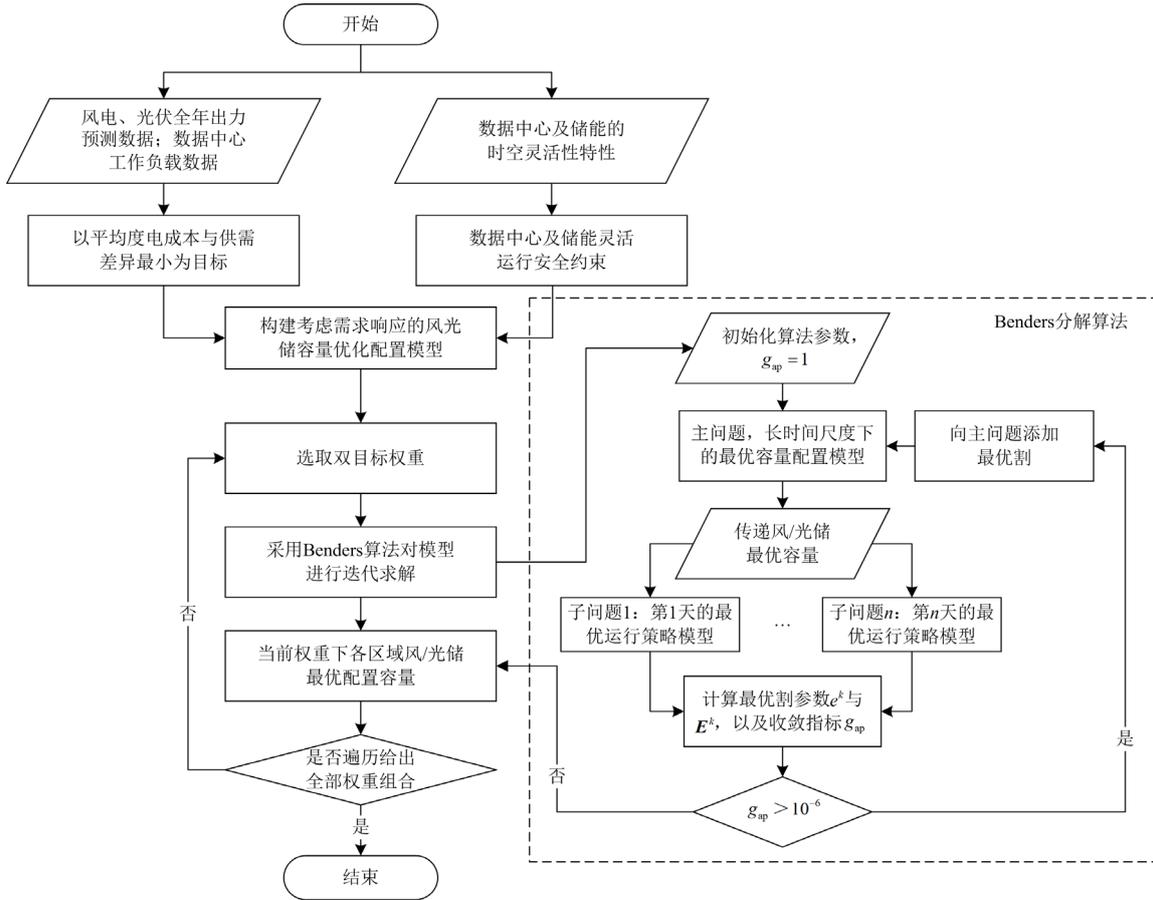


图3 风光储容量配置模型计算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart of wind-solar-storage capacity configuration model

$$\begin{cases} \min f = \mathbf{c}\mathbf{x} + \sum_s p_s \mathbf{d}_s \mathbf{y}_s \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{x} \geq \mathbf{b} \\ \mathbf{T}_s \mathbf{x} + \mathbf{W}_s \mathbf{y}_s \geq \mathbf{h}_s \\ \mathbf{x} \geq 0, \mathbf{y}_s \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $\mathbf{x}$  为主问题的决策变量,  $\mathbf{x} = [P_n^{\text{PV,rated}}, P_n^{\text{wind,rated}}, P_n^{\text{ess,reated}}, E_n^{\text{ess,reated}}]$ ;  $\mathbf{y}_s$  为子问题中的优化变量,  $\mathbf{y}_s = [L_{s,n,t}^{\text{ds}}, I_{s,wn,t}^{\text{ds}}, L_{s,n,t}^{\text{dt}}, I_{s,n,kt}^{\text{dt}}, U_{s,n,t}, P_{s,n,t}^{\text{IDC}}, E_{s,n,t}^{\text{ess}}, P_{s,n,t}^{\text{ess,ch}}, P_{s,n,t}^{\text{ess,dch}}, P_{s,n,t}^{\text{renew}}, P_{s,n,t}^{\text{grid}}]$ ;  $\mathbf{c}$ 、 $\mathbf{d}_s$  分别为目标函数中  $\mathbf{x}$  和  $\mathbf{y}_s$  的系数向量;  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{b}$  分别为仅含  $\mathbf{x}$  的不等式约束中的系数矩阵和常数向量; 在同时含  $\mathbf{x}$  与  $\mathbf{y}_s$  的不等式约束中,  $\mathbf{T}_s$  为  $\mathbf{x}$  的系数矩阵,  $\mathbf{W}_s$  为  $\mathbf{y}_s$  的系数矩阵;  $\mathbf{h}_s$  为常数向量。

目标函数具体如下:

$$\min f = \alpha \frac{C_{\text{build}} + C_{\text{maintenance}}}{r_0^{\text{grid}} \cdot \sum_s p_s \sum_n \sum_t P_{s,n,t}^{\text{IDC}}} +$$

$$\sum_s p_s \left\{ \begin{aligned} & \alpha \frac{C_s^{\text{run}}}{r_0^{\text{grid}} \cdot \sum_s p_s \sum_n \sum_t P_{s,n,t}^{\text{IDC}}} + \\ & \beta \left( \frac{\sum_n \sum_t P_{s,n,t}^{\text{PV,aban}} + P_{s,n,t}^{\text{wind,aban}}}{\sum_n \sum_t P_{s,n,t}^{\text{IDC}}} + \frac{\sum_n \sum_t P_{s,n,t}^{\text{grid}}}{\sum_n \sum_t P_{s,n,t}^{\text{IDC}}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

将式(30)模型拆分为一个 MP 与多个 SPs, 其中 MP 的紧凑形式如式(32)所示。

$$\begin{cases} \min f_{\text{MP}} = \mathbf{c}\mathbf{x} + \theta \\ \text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{x} \geq \mathbf{b} \\ \mathbf{x} \geq 0 \\ \theta \geq e^k - \mathbf{E}^k \mathbf{x} \\ e^k = \sum_s p_s (\boldsymbol{\pi}_s^k)^T \mathbf{h}_s \\ \mathbf{E}^k = \sum_s p_s (\boldsymbol{\pi}_s^k)^T \mathbf{T}_s \\ k = 1, 2, \dots, N_k \end{cases} \end{cases} \quad (32)$$

式中： $k$ 为MP与SPs的迭代次数； $\pi_s^k$ 为SPs最优解的单纯形乘子；约束中第三项为每次迭代增加的最优割， $e^k$ 与 $E^k$ 均为利用 $\pi_s^k$ 解得的最优割系数； $\theta$ 为表征SPs最优解的状态变量。由于MP仅向SPs传递风光储建设容量，且均在一定范围内，因此SPs不存在无解情况，在迭代过程中无需加入可行割。

在MP求解后，SPs可以并行求解，第 $s$ 个SP的紧凑形式如式(33)所示。

$$\begin{cases} \min f_{SP} = d_s y_s \\ \text{s.t.} \begin{cases} W_s y_s \geq h_s - T_s x^k \\ y \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (33)$$

式中： $f_{SP}$ 为 $s$ 个SP的最优运行成本； $x^k$ 为第 $k$ 次计算MP问题的最优解。

### 3.2 Benders 分解算法计算步骤

1) 初始化算法参数：设置收敛性公差 $\varepsilon = 10^{-6}$ ，迭代计数器 $k$ 与场景计数器 $s$ 均为1， $g_{ap} =$

$$\left| \frac{\theta_k^* - \sum_s p_s f_{SP,s}^k}{\theta_k^* + \sum_s p_s f_{SP,s}^k} \right|$$

其中 $\theta_k^*$ 为第 $k$ 次迭代时，主问题

求解得到的状态变量， $f_{SP,s}^k$ 为第 $k$ 次迭代时，场景 $s$ 的子问题最优解。

2) 计算MP：初次计算忽略 $\theta$ ，解得最优解 $f_{MP}^k$ ，将第 $k$ 次迭代最优容量传递给SPs，令 $s=1$ 。

3) 对第 $s$ 个SP进行求解：解得最优解 $f_{SP,s}^k$ 以及最优单纯形乘子 $\pi_s^k$ 。

4) 若 $s < N_s$ ， $s = s + 1$ ，返回步骤2)，否则进入步骤4)。

5) 判断 $g_{ap} < \varepsilon$ ，若成立跳转掉步骤6)，否则进入步骤5)。

6) 由式(32)计算最优割系数 $e^k$ 与 $E^k$ ，并添加新最优割加入MP中，跳转步骤1)进入下一次迭代。

7) 输出该次迭代中MP计算得到的最优容量，程序结束。

## 4 算例分析

### 4.1 参数设置

#### 1) 新能源参数

模型采用的广东、贵州和云南的风光全年预测数据，采样间隔为1h，见附录A图A1—图A3，新能源及数据中心互联框架如图4所示。

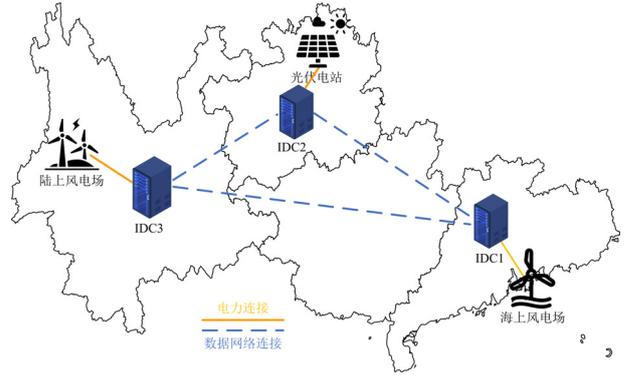


图4 新能源及数据中心互联框架

Fig. 4 Renewable energy and data center interconnection framework

光伏建设成本 $c^{PV} = 3500$ 元/kWp；风电建设成本 $c^{wind} = 6500$ 元/kW；年维护成本系数 $\eta^{PV} = \eta^{wind} = 0.05$ 。

#### 2) 数据中心参数

各区域数据中心参数相同，最大可用服务器数为10000台；单个服务器的服务率 $\mu_n = 10$ ；单个服务器峰值功耗 $P_n^{peak} = 0.5$  kW，基础功耗 $P_n^{idle} = 0.2$  kW；PUE指数 $\alpha_{PUE} = 1.5$ 。

#### 3) 储能参数

储能充放电效率 $\eta_n^{ch} = \eta_n^{dch} = 0.96$ ；功率成本 $c^{ess,power} = 300$ 元/kW；容量成本 $c^{ess,capacity} = 800$ 元/kWh；年维护成本 $\eta^{ess} = 0.05$ 。

#### 4) 分时电价

各数据中心所处地区的分时电价如图5所示。

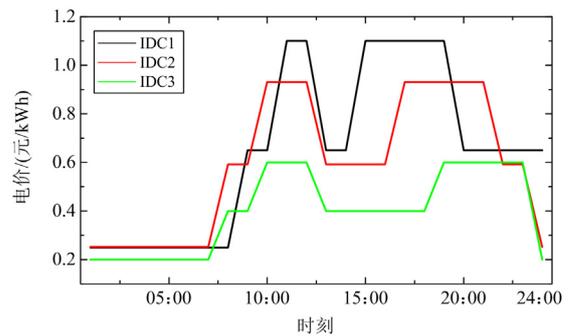


图5 各数据中心分时电价

Fig. 5 Time-of-use price for each data center

### 4.2 容量配置结果及运行情况分析

基于4.1节的参数设置，本文所提出的多目标容量配置模型解得的帕累托前沿以及折中最优解如图6所示。

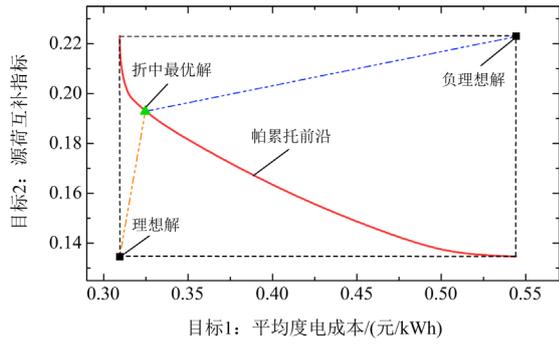


图 6 双目标帕累托前沿

Fig. 6 Double target Pareto front

根据 3.3 节中的多目标决策方法, 目标 1 与目标 2 的比重分别选取 0.25 和 0.75, 最优配置容量如表 1 所示。

表 1 最优配置容量

Table 1 Optimal configuration capacity

	光伏建设	风电建设	储能装设	储能装设
	容量/kW	容量/kW	功率/kW	容量/kWh
IDC1	—	5758.0	384.3	384.3
IDC2	7282.7	—	948.8	2781.2
IDC3	—	7339.9	1124.3	1124.3

该折中最优解的平均度电成本为 0.3022 元/kWh, 源荷互补性指标为 0.1951, 新能源消纳率为 90.21%, 新能源渗透率为 68.8%。其中, 仅考虑电网购电时平均度电成本  $r_0^{\text{grid}}$  为 0.5896 元/kWh。源荷互补性指标分布频率区间如图 7 所示。

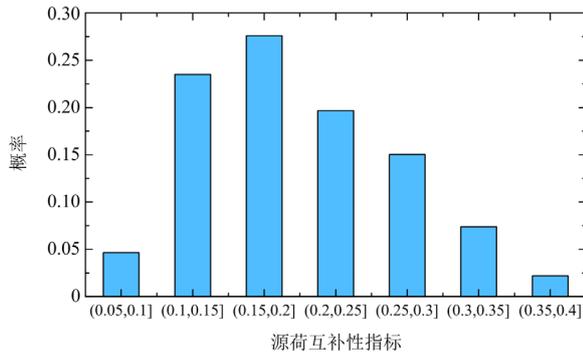


图 7 源荷互补性指标分布区间

Fig. 7 Distribution interval of source and load complementarity index

以最佳场景为例, IDC3 数据中心用电情况如图 8 所示。新能源理想总出力与总负荷差异较小, 能够通过调度数据中心工作负载最大程度地消纳新能源以及减少电网购电。

该场景对应的数据中心工作负载转移情况如图 9

所示。其中黑色折线图为原始工作负载曲线, 经过再调度后各区域的工作负载曲线整体趋势接近本地的新能源发电出力, 实现了荷随源动。相较于数据中心工作负载的大幅调整, 储能设备的功率与容量均较小, 仅在部分时刻弥补新能源发电总量与负荷总需求的差异。

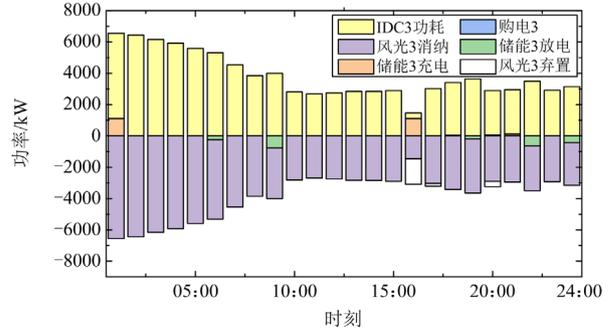


图 8 IDC3 能耗情况

Fig. 8 IDC3 energy consumption

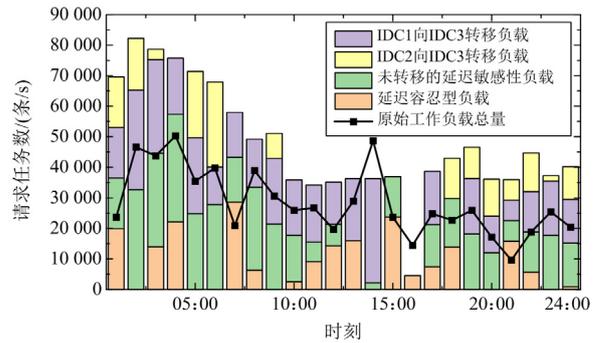


图 9 IDC3 工作负载转移情况

Fig. 9 IDC3 workload migration status

#### 4.3 风光荷时空互补效果分析

为验证“新能源+储能”供电以及数据中心时空灵活性效益, 设置以下场景对比分析。

场景 1: 不考虑风光互补及源荷互补时, 即不考虑数据中心的时空灵活性, 以平均度电成本为目标时风储、光储系统最优配置容量。

场景 2: 仅考虑源荷互补时, 即仅考虑数据中心的时间灵活性, 以平均度电成本为目标时风储、光储系统最优配置容量。

场景 3: 本文方法, 即考虑风光荷时空互补。

场景 1、2 的详细配置结果如表 2 所示, 各种场景计算结果指标如表 3 所示。

对比场景 2 与场景 3 可知, 不考虑数据中心空间灵活性能力, 即忽视风光之间的空间互补性时, 数据中心运营商的平均用电成本提高了 21%, 新能源装机容量降低了 34%, 储能的建设容量则增加了

表 2 场景 1、2 配置结果

Table 2 Configuration results of scenario 1 and 2

		光伏建设	风电建设	储能装设	储能装设
		容量/kW	容量/kW	功率/kW	容量/kWh
不考虑风光荷互补	IDC1	—	3146.9	2079.4	15 000
	IDC2	5826.1	—	2048.2	8961.1
	IDC3	—	3912.5	1931	8620.4
仅考虑源荷互补	IDC1	—	3586.9	1380	9665.9
	IDC2	5954	—	1463.8	7571.1
	IDC3	—	3914.4	1251.1	6511.7

表 3 各场景指标分析

Table 3 Analysis of indicators in each scenario

场景	平均度电	源荷互补性	新能源	新能源	新能源	储能总建设容量/kWh
	成本/(元/kWh)		消纳率/%	渗透率/%	总装机容量/kW	
1	0.3783	0.3156	91.87	41.54	12 885.5	32 581.5
2	0.3642	0.2980	93.31	44.21	13 455.3	23 748.7
3	0.3022	0.1951	90.21	68.8	20 380.6	4289.8

453%的建设容量。由于源侧缺乏互补机制来抵消风光出力波动，数据中心运营商需要减少新能源的建设以及大幅提高储能的配比以维持经济性。

在此基础上对比场景 1、2 的结果可知，数据中心运营商的平均用电成本提高 0.0141 元/kWh，新能源的装机容量减少 4%，储能建设容量提高 37%。在运行调度中，数据中心的延迟容忍型负荷与储能设备作用一致，通过调度负荷侧灵活性资源，使用电特性接近新能源发电特性，因此不考虑数据中心灵活性能力时，需要增加成本更高的储能完成相同的工作，因此储能容量与成本均有所上升。

#### 4.4 多目标效果分析

仅以平均度电成本为单一目标时的容量优化配置结果如表 4 所示。

此时平均度电成本为 0.2830 元/kWh，新能源消

表 4 单目标优化结果

Table 4 Single objective optimization results

	光伏建设	风电建设	储能装设	储能装设
	容量/kW	容量/kW	功率/kW	容量/kWh
IDC1	—	2393.6	102.9	537.8
IDC2	8812.1	—	926.5	2597.5
IDC3	—	5664.9	62.9	130.8

纳率为 93.9%，新能源渗透率为 55.6%。与所选择的折中最优解相比，光伏建设容量增大，风电的总建设容量大幅减少，同时储能的总功率容量均有下降，其主要原因为光伏的出力高峰与电价高峰时段重合度更高，低谷时段数据中心可以以较低的电价购电，因此对夜间风电需求下降。相较于所选的折中解，新能源的消纳率提升了 3.73%，但渗透率下降了 13.21%。因此，本模型所采用的多目标方法能够减少源荷的供需差异，提高新能源在数据中心供电中的占比，解决了新能源高渗透及高消纳问题。

## 5 结论

本文针对不同地区绿色数据中心的新能源-储能供电系统，提出一种考虑风光荷时空互补的风光储多目标容量配置方法。该方法基于数据中心时空转移特性以及源荷匹配思想，以数据中心平均度电成本与源荷供需差异最小为目标，综合考虑长尺度下全年的风光预测出力、短时间尺度下数据中心及储能设备的灵活性运行约束，求解得到兼顾经济性与新能源渗透率、消纳率的最优风光储建设容量。本文最后采用广东、贵州、云南的新能源预测数据进行了仿真测试，算例分析表明：相较于直接电网购电，自建“新能源+储能”联合供电最大能够降低 44.55%的平均度电成本。考虑数据中心与储能时空需求响应能够有效提高 58.6%的新能源装机容量，减少 86.9%的储能建设容量。

## 附录 A

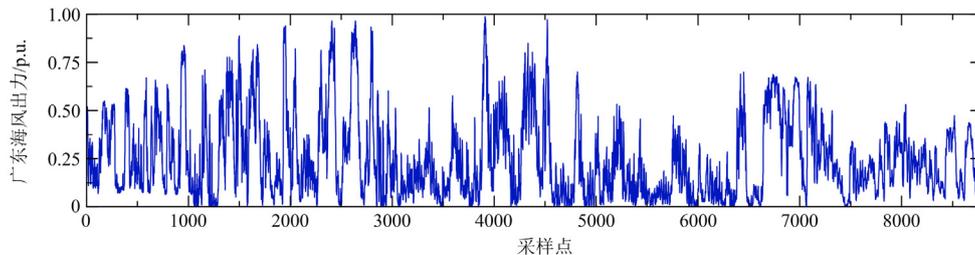


图 A1 广东风电预测数据

Fig. A1 Guangdong wind power forecast data

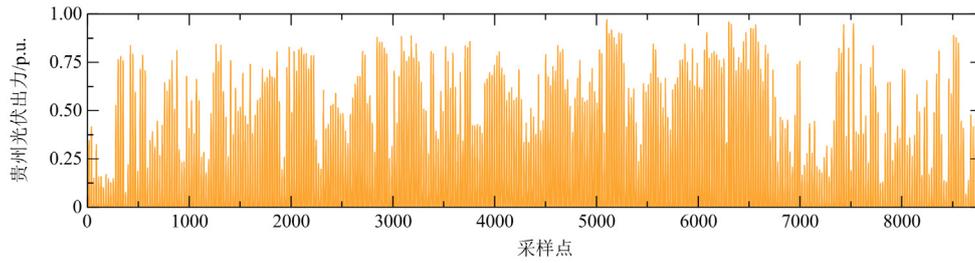


图 A2 贵州光伏预测数据

Fig. A2 Guizhou photovoltaic forecast data

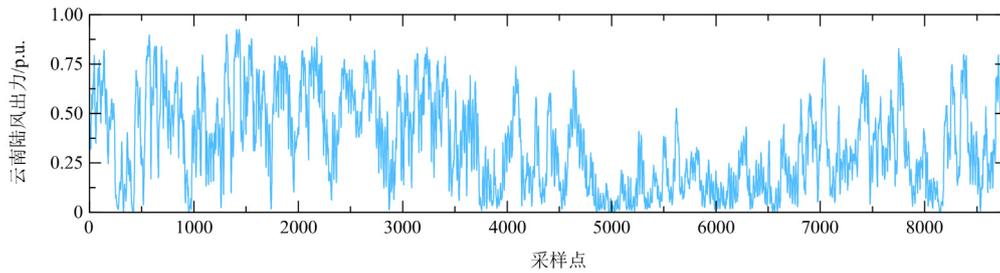


图 A3 云南风电预测数据

Fig. A3 Yunnan wind power forecast data

## 参考文献

- [1] 中国信通院. 数据中心白皮书(2022)[R/OL]. [2022-04-22]. [http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202204/t20220422\\_400391.htm](http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202204/t20220422_400391.htm).
- [2] 绿色和平. 科技企业绿电消费新浪潮(案例、挑战与建议)[R/OL]. [2022-08-24]. <https://www.greenpeace.org.cn/2022/08/24/tech-re-consumption-2022/>.
- [3] XIAO Yue, GUO Yongtao, WU Gang, et al. Low-carbon economic planning of integrated electricity-gas energy systems[J]. *Energy*, 2022, 249: 123755.
- [4] 工业和信息化部. 新型数据中心发展三年行动计划(2021-2023年).[EB/OL]. [2021-07-14]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/14/content\\_5624964.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/14/content_5624964.htm).
- [5] 发展改革委网站. 全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案[EB/OL]. [2021-05-26]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-05/26/content\\_5612405.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-05/26/content_5612405.htm).
- [6] 李湃, 黄越辉, 张金平, 等. 多能互补发电系统电/热/氢储能容量协调优化配置[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(13): 5158-5169.  
LI Pai, HUANG Yuehui, ZHANG Jinping, et al. Capacity coordinated optimization of battery, thermal and hydrogen storage system for multi-energy complementary power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(13): 5158-5169.
- [7] 吴雄, 贺明康, 何雯雯, 等. 考虑储能寿命的风-光-火储打捆外送系统容量优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(15): 66-75.  
WU Xiong, HE Mingkang, HE Wenwen, et al. Optimal capacity of a wind-solar-thermo-storage-bundled power transmission system considering battery life[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(15): 66-75.
- [8] 南斌, 董树锋, 唐坤杰, 等. 考虑需求响应和源荷不确定性的光储微电网储能优化配置[J]. *电网技术*, 2023, 47(4): 1340-1352.  
NAN Bin, DONG Shufeng, TANG Kunjie, et al. Optimal configuration of energy storage in PV-storage microgrid considering demand response and uncertainties in source and load[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(4): 1340-1352.
- [9] 孙浩男, 杜鹏, 刘念, 等. 大规模风光储场站群功率跟踪优化控制实时仿真[J]. *电力建设*, 2024, 45(8): 62-74.  
SUN Haonan, DU Peng, LIU Nian, et al. Real-time simulation of optimal power tracking control for large-scale wind-photovoltaic-storage power station clusters[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(8): 62-74.
- [10] 赵振宇, 解冰清. 计及风光互补特性的风光容量优化配置模型[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(8): 149-156.  
ZHAO Zhenyu, XIE Bingqing. Optimal allocation model of wind-solar capacity considering wind-solar complementary characteristics[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(8): 149-156.
- [11] 徐林, 阮新波, 张步涵, 等. 风光蓄互补发电系统容量的改进优化配置方法[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(25): 88-98, 14.  
XU Lin, RUAN Xinbo, ZHANG Buhan, et al. An improved optimal sizing method for wind-solar-battery hybrid

- power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 88-98, 14.
- [12] 万家豪, 苏浩, 冯冬涵, 等. 计及源荷匹配的风光互补特性分析与评价[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3219-3226. WAN Jiahao, SU Hao, FENG Donghan, et al. Analysis and evaluation of the complementarity characteristics of wind and photovoltaic considering source-load matching[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3219-3226.
- [13] 王子琳, 鲁玺, 庄明浩, 等. 中国三北地区风—光互补发电系统空间优化研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 97-104. WANG Zilin, LU Xi, ZHUANG Minghao, et al. Spatial optimization of wind-PV hybrid energy systems for the three-north region in China[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 97-104.
- [14] 安源, 郑申印, 苏瑞, 等. 风光水储多能互补发电系统双层优化研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 510-517. AN Yuan, ZHENG Shen Yin, SU Rui, et al. Research on two-layer optimization of wind-solar-water-storage multi energy complementary power generation system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(12): 510-517.
- [15] 曹雨洁, 丁肇豪, 王鹏, 等. 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(二): 机遇与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(10): 3512-3527. CAO Yujie, DING Zhaohao, WANG Peng, et al. Coordinated operation for data center and power system in the context of energy internet (II): opportunities and challenges[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(10): 3512-3527.
- [16] 王辉东, 高晋坤, 黄佳斌, 等. 考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 96-105. WANG Huidong, GAO Jinkun, HUANG Jiabin, et al. Power system operational reliability evaluation method considering data center load flexibility[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 96-105.
- [17] 易文飞, 朱卫平, 郑明忠. 计及数据中心和风电不确定性的微电网经济调度[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 19-26. YI Wenfei, ZHU Weiping, ZHENG Mingzhong. Economic dispatch of microgrid considering data center and wind power uncertainty[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 19-26.
- [18] 高赐威, 吴刚, 陈宋宋. 考虑地理分散的数据中心服务器频率调节的电网降损模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1673-1681, 1863. GAO Ciwei, WU Gang, CHEN Songsong. A model aimed at reducing power net loss considering frequency scaling of servers in geo-distributed data centers[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1673-1681, 1863.
- [19] 丁肇豪, 曹雨洁, 张素芳, 等. 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(一): 数据中心能耗模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3161-3177. DING Zhaohao, CAO Yujie, ZHANG Sufang, et al. Coordinated operation for data center and power system in the context of energy internet (I): energy demand management model of data center[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3161-3177.
- [20] 陈德扬, 樊玮, 钟康骅, 等. 柔性输配电技术在互联网数据中心的应用和展望[J]. 南方能源建设, 2023, 10(5): 94-105. CHEN Deyang, FAN Wei, ZHONG Kanghua, et al. Application and prospect of flexible transmission and distribution technology in internet data center[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(5): 94-105.
- [21] 刘祎泽, 向月. 计及负荷转移需求响应的低碳数据中心光储容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 149-155. LIU Yize, XIANG Yue. Optimal allocation of photovoltaic and storage capacity in low carbon data center considering load transfer demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 149-155.
- [22] XU Da, XIANG Shizhe, BAI Ziyi, et al. Optimal multi-energy portfolio towards zero carbon data center buildings in the presence of proactive demand response programs[J]. Applied Energy, 2023, 350: 121806.
- [23] 荆涛, 陈庚, 王子豪, 等. 风光互补发电耦合氢储能系统研究综述[J]. 中国电力, 2022, 55(1): 75-83. JING Tao, CHEN Geng, WANG Zihao, et al. Research overview on the integrated system of wind-solar hybrid power generation coupled with hydrogen-based energy storage[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 75-83.
- [24] 刘怡, 肖立业, WANG Haifeng, 等. 中国广域范围内大规模太阳能和风能各时间尺度下的时空互补特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 20-26, 6. LIU Yi, XIAO Liye, WANG Haifeng, et al. Temporospatial complementarities between China's wide-area wind and solar energy at different time scales[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 20-26, 6.
- [25] REN Guorui, WAN Jie, LIU Jinfu, et al. Spatial and temporal assessments of complementarity for renewable energy resources in China[J]. Energy, 2019, 177: 262-275.
- [26] WANG Peng, CAO Yujie, DING Zhaohao, et al. Stochastic programming for cost optimization in geographically distributed internet data centers[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(4): 1215-1232.
- [27] NIU Tao, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Spatial coordination between data centers and power system considering uncertainties of both source and load sides[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 124: 106358.
- [28] 杨挺, 姜含, 侯昱丞, 等. 基于计算负荷时-空双维迁移的互联多数据中心碳中和调控方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 164-177.

- YANG Ting, JIANG Han, HOU Yucheng, et al. Study on carbon neutrality regulation method of interconnected multi-data center based on spatio-temporal dual-dimensional computing load migration[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 164-177.
- [29] HU Xiaoxuan, LI Peng, SUN Yanfei, et al. Minimizing energy cost for green data center by exploring heterogeneous energy resource[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(1): 148-159.
- [30] GHAMKHARI M, WIERMAN A, MOHSENIAN-RAD H. Energy portfolio optimization of data centers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1898-1910.
- [31] 王丹阳, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑数据中心用能时空可调的多区域能源站协同规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 77-85.
- WANG Danyang, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Coordinated planning of multi-regional energy stations considering spatio-temporal adjustment of energy consumption in data centers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 77-85.
- [32] QIN Minglei, YANG Yongbiao, ZHAO Xianqiu, et al. Low-carbon economic multi-objective dispatch of integrated energy system considering the price fluctuation of natural gas and carbon emission accounting[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1-18.
- [33] 朱文广, 王伟, 欧阳斌, 等. 面向节能降碳的冶炼企业风光储多目标协同定容方法[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 86-94.
- ZHU Wenguang, WANG Wei, OUYANG Bin, et al. Multi-objective cooperative capacity determination method for integrated system of wind, photovoltaic and storage of smelting enterprises requiring energy saving and carbon reduction[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 86-94.
- [34] 兰州, 蒋晨威, 谷纪亭, 等. 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[J]. 电力建设, 2022, 43(4): 1-9.
- LAN Zhou, JIANG Chenwei, GU Jiting, et al. Optimal dispatch and demand response strategies of data centers for promoting accommodation of renewable energy generation and reducing carbon emission[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(4): 1-9.
- [35] 文旭, 陈鑫, 张爱枫, 等. 含可调节负荷的风光互补微电网随机调度市场风险管控方法[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4309-4318.
- WEN Xu, CHEN Xin, ZHANG Aifeng, et al. Stochastic dispatching market risk control for wind and photovoltaic microgrid integrated with adjustable load[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4309-4318.
- [36] 成驰, 陈正洪, 孙朋杰, 等. 基于典型气象条件的风光互补系统容量优化互补系统发电功率与负荷偏差最小[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 110-114.
- CHENG Chi, CHEN Zhenghong, SUN Pengjie, et al. Capacity configuration optimization for wind solar hybrid power system based on typical meteorological conditions[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(2): 110-114.
- [37] 陈天, 蔡泽祥, 谢鹏, 等. 基于改进微分进化算法的风光互补系统发电容量优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 22-28.
- CHEN Tian, CAI Zexiang, XIE Peng, et al. Capacity optimization of wind/solar hybrid power generation system based on improved differential evolution algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 22-28.
- [38] 路小娟, 郭琦, 董海鹰. 基于 CMOPSO 的混合储能微电网多目标优化研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(1): 279-286.
- LU Xiaojuan, GUO Qi, DONG Haiying. Multi objective optimization of hybrid energy storage micro grid based on CMOPSO algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(1): 279-286.
- [39] 刘志刚, 伍也凡, 肖振锋, 等. 基于重力储能的风光储能系统多目标容量优化规划[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(5): 464-475.
- LIU Zhigang, WU Yefan, XIAO Zhenfeng, et al. Multi-objective optimal capacity planning of the wind-photovoltaic-storage system based on gravity energy storage[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(5): 464-475.
- [40] 白雪岩, 樊艳芳, 刘雨佳, 等. 考虑可靠性及灵活性的风光储虚拟电厂分层容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 11-24.
- BAI Xueyan, FAN Yanfang, LIU Yujia, et al. Wind power storage virtual power plant considering reliability and flexibility tiered capacity configuration[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 11-24.
- [41] SAYYAADI H, MEHRABIPOUR R. Efficiency enhancement of a gas turbine cycle using an optimized tubular recuperative heat exchanger[J]. Energy, 2012, 38(1): 362-375.

收稿日期: 2024-05-11; 修回日期: 2024-07-24

作者简介:

可思为(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化与运行、需求响应; E-mail: 202221015015@mail.scut.edu.cn

董萍(1978—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力市场需求响应、柔性交流输电系统技术及电力系统控制等。E-mail: epdping@scut.edu.cn

(编辑 张颖)