

# 考虑源荷不确定性的5G基站光储一体化低碳经济运行策略

王要强<sup>1,2</sup>, 袁嘉<sup>1,2</sup>, 鲍鹏<sup>1,2</sup>, 张琳娟<sup>3</sup>, 李文峰<sup>3</sup>, 梁军<sup>4</sup>

(1. 郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南省电力电子与电力系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450001;

3. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052;

4. 卡迪夫大学 工程学院, 英国 卡迪夫 CF24 3AA)

**摘要:**为解决现有不确定运行策略保守导致的5G基站光储一体化系统配建光伏利用率低以及配电系统碳排放量高的问题,提出一种考虑源荷不确定性的5G基站光储一体化低碳经济运行策略。分析不同类型区域5G基站通信负荷与光伏出力的时空差异,建立计及时空异构特性的5G基站源荷储模型;以最大化光伏消纳、最小化碳排放与基站运行成本为目标,构建基于三阶段碳交易方法的低碳经济调度优化模型;为解决传统固定隶属度参数模糊机会约束求解策略保守的问题,提出一种计及时空预测误差的动态隶属度参数模糊机会约束求解方法。算例分析表明,所提方法可有效整合5G基站源荷储资源,提升光伏消纳率,降低基站运行成本与碳排放量。

**关键词:**5G基站;碳交易;光伏消纳;区间预测;不确定优化;低碳经济调度;储能;光储一体化系统

**中图分类号:**TM73

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202603003

## 0 引言

据工信部统计,截至2025年3月,我国已部署439.5万个5G基站<sup>[1]</sup>,占全球总量的70%以上。随着5G基站的规模化建设,光储一体化趋势逐渐显现:为确保基站不间断供电,5G基站普遍配备储能电池,同时,由于5G基站功耗显著高于4G基站(5G基站单体功耗为4G基站的3~4倍),部分地区为5G基站配建了屋顶光伏以降低用电成本。然而,由于配电网的高可靠性和协同管理策略的缺失,海量5G基站在运行过程中面临配储闲置和弃光问题日益突出的矛盾。若能够通过需求响应技术实现5G基站与电网的协同调度,则不仅可提升光伏消纳能力,还可降低基站能耗以及优化运行成本<sup>[2-3]</sup>。

现有研究大多基于5G基站配储进行内部能量管理,未充分考虑屋顶光伏接入条件下5G基站光储一体化系统与外部电网的协同优化,也未充分挖掘系统碳减排潜力。文献[4-5]研究储能参与基站通信负载调控与备电管理,验证了储能在削峰填谷与降低运行成本方面的重要作用。同时,部分研究关

注5G基站与配电网的互动运行,如:文献[6]研究基于通信负荷迁移的日前协同调度方法;文献[7]提出含备用储能的配电网重构优化策略;文献[8]研究考虑负荷时空迁移的网-站协同运行;文献[9]通过建立5G基站备用电池的电压剖面优化模型协助配电网调压,揭示了基站储能资源具备支撑电网运行与需求响应的潜力。然而,这些研究尚未涉及基站配建屋顶光伏资源在外部能源市场或配电网的价值再分配问题。虽然现有研究对光储式通信基站的灵活调度潜力进行了探讨<sup>[10]</sup>,对光伏消纳拓展与通信负载迁移进行了分析<sup>[11]</sup>,但研究重点仍集中于站内自平衡控制,未深入考虑光储资源外送下的碳排放削减、经营收益提升与区域能源互补协同机制。同时,在虚拟电厂框架下的基站资源聚合调度研究虽然揭示了基站作为电力市场资源的重要性<sup>[12-14]</sup>,但并未考虑基站内光伏资源与储能联动参与市场竞价、辅助服务与区域消纳优化的策略体系。因此,现有研究难以满足未来5G基站光储一体化资源向外部电网提供功率支撑与低碳运行价值释放的应用需求<sup>[15]</sup>。

现有不确定性处理方法仍存在策略保守、求解困难等问题,难以充分适应源荷随机性较强的5G基站光储一体化系统运行需求。基于多场景采样的概率优化能反映随机波动,但其大规模采样需求使得系统维度显著膨胀,导致优化求解复杂度增加,难以应用于高频度运行决策场景<sup>[16-17]</sup>。鲁棒优化虽具有高可靠性,但决策对风险规避过度敏感,易导致需求响应弱化的保守问题,从而增加运行成本与弃光量<sup>[18-19]</sup>。相比之下,模糊机会约束方法可在缺乏完

收稿日期:2025-09-25;修回日期:2026-02-11

在线出版日期:2026-03-05

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52507156);中国博士后科学基金项目(GZC20250316);国网河南省电力公司科技项目(5217L024000U)

Project supported by the Youth Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(52507156), China Postdoctoral Science Foundation(GZC20250316) and the Science and Technology Project of State Grid Henan Electric Power Company(5217L024000U)

整概率分布信息的情况下处理不确定性,提升运行策略的适应性,已在可再生能源主导系统调度与分布式能源管理中得到应用<sup>[20-21]</sup>。然而,现有模糊优化研究基本采用固定隶属度参数,忽略了光伏预测误差随时间变化对隶属度函数灵敏特性的影响,导致优化模型存在过度保守的问题<sup>[22-23]</sup>。上述不足表明,传统不确定性模型无法满足5G基站光储一体化系统的实时动态运行需求。

综上所述,现有研究主要聚焦于5G基站配储系统的能量管理,较少涉及考虑5G基站源荷特性的光储一体化系统与外部电网的协同运行,未充分考虑光伏资源的外部价值和碳排放削减潜力,并且求解过程中的固定隶属度参数模糊机会约束在应对不确定性时过于保守,无法有效降低运行成本和弃光量。针对上述问题,本文进行如下工作。

1)提出一种考虑5G基站光储一体化系统区域异构性的低碳经济运行策略。构建5G基站光储一体化系统的差异化模型,结合分时电价进行需求响应。以最大化光伏消纳,最小化碳排放与基站运行成本为目标,制定基站系统的运行策略。

2)提出一种计及实时预测误差的动态隶属度参数模糊机会约束求解方法。针对传统模糊机会约束中固定隶属度参数忽略预测误差导致运行策略过于保守,进而增加弃光、碳排放与运行成本的问题,本文通过置信概率区间,动态调整模糊机会约束的隶属度参数,在满足配电系统鲁棒性要求的基础上降低弃光、碳排放与运行成本。

## 1 考虑源荷不确定性的5G基站光储一体化低碳经济运行架构

随着大量5G基站配建屋顶光伏,5G基站光储一体化系统调控策略不完善导致弃光严重,为保障配储的充分利用,在降低5G基站用电成本与碳排放的同时促进新能源消纳,本文对5G基站的光储一体化系统进行可调节能力分析,提出考虑源荷不确定性的5G基站光储一体化低碳经济运行策略,其运行架构如附录A图A1所示。各区域负荷由5G基站光储一体化集群负荷与一般负荷组成,该运行架构由各区域一般负荷、配电网、5G基站光储一体化聚合商(下文简称聚合商)与各区域5G基站光储一体化集群组成。

各区域5G基站光储一体化集群统一由聚合商管理。具体运行机制为:首先,各区域5G基站光储一体化集群上报配建屋顶光伏与通信负荷的预测区间及配储调度边界信息;然后,聚合商通过配电网获取各区域一般负荷大小及电价信息,制定各区域5G基站光储一体化集群的运行策略,出售5G基站光储一体化集群中的过剩电能,将其供给该区域一般负

荷,实现光伏的就地消纳(本文暂不考虑5G基站光储一体化集群跨区域响应);最后,配电网根据聚合商上报的购售电信息及一般负荷电能需求缺额制定购电计划。

在制定调度策略时,为兼顾经济性与低碳性,本文基于基线法,将配电网中各区域从电网中的购电量类比为各机组的碳排放配额。系统碳排放配额计算公式<sup>[24]</sup>为:

$$E_L = \sum_{t=1}^T \varepsilon P_t \quad (1)$$

$$P_t = \sum_{q=1}^N (P_{\text{grid},q,t} + P_{\text{pv},q,t}) \quad (2)$$

$$P_{\text{grid},q,t} = P_{\text{grid},q,t}^{5G} + P_{\text{grid},q,t}^{\text{base}} \quad (3)$$

式中: $E_L$ 为系统总的碳排放配额; $T$ 为一个运行周期时刻数; $\varepsilon$ 为单位电量碳排放配额; $P_t$ 为配电系统在 $t$ 时刻的光伏与电网供电总和; $N$ 为研究区域数量; $P_{\text{grid},q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域的计划总购电量; $P_{\text{pv},q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域的光伏预测发电功率; $P_{\text{grid},q,t}^{5G}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域5G基站从电网中的购电功率; $P_{\text{grid},q,t}^{\text{base}}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域中除基站负荷外的基础用电负荷所需购电功率。

本文配电网侧不考虑火电机组,同时光伏为清洁能源,因此系统中的碳排放主要来源于各区域从电网的购电。本文假设从电网的购电均为火力发电,各区域购电量、煤耗系数 $f_{\text{co}_2}$ 与单位煤的碳排放量 $\omega$ 三者的乘积即为各区域的碳排放量。一个调度周期内系统总的碳排放计算公式为:

$$E_p = \sum_{t=1}^T \sum_{q=1}^N \omega f_{\text{co}_2} P_{\text{grid},q,t} \quad (4)$$

## 2 计及时空差异的5G基站源荷储模型

5G基站源荷储系统包括基站负荷、配建光伏和配建储能。基站负荷的差异主要源于通信负荷,其变化受通信业务时空分布特征的影响。区域建筑类型制约使得各区域基站光伏的安装面积不同,从而导致光伏输出的时空差异。目前,基站储能系统大多采用铅酸蓄电池,因此本文假设各区域配储参数相同。

### 2.1 5G基站主设备模型

5G基站的负荷主要由空调设备、监控设备、控制终端等静态功耗部分和通信负载这一动态功耗部分组成,其表达式为:

$$P_{i,t}^{5G} = P_{i,t}^{5G,Ac} + \varepsilon_0 P_{i,t}^{\text{tr}} \quad (5)$$

式中: $P_{i,t}^{5G}$ 为 $t$ 时刻5G基站 $i$ 的功耗; $P_{i,t}^{5G,Ac}$ 为 $t$ 时刻基站 $i$ 的静态功耗; $\varepsilon_0$ 为能量效率系数,表示增加单位动态功耗时基站功耗的增量; $P_{i,t}^{\text{tr}}$ 为 $t$ 时刻基站 $i$ 的发射功耗,与移动用户的接入数量成正比例关系。

基站负荷与基站服务人数直接相关,受用户日常活动的影响,基站负荷呈现出时空差异性。将基

站某时刻接入用户与最大服务人数之比记作基站负载率。5G基站负载率时空变化情况如附录A图A2所示。不同区域5G基站的通信用户数量随着时间发生变化,这使得5G基站负载在时空上存在差异,具体数学模型为:

$$P_{i,j,t}^{\text{tr}} = N_0 \left( 2^{\frac{L_j}{B}} - 1 \right) 10^{\frac{P_{i,j,t}^{\text{loss}}}{10}} \quad (6)$$

$$P_{i,j,t}^{\text{loss}} = A_{\text{pl}} \lg d^{i,j} + B_{\text{pl}} \quad (7)$$

$$P_{i,t}^{\text{tr}} = \sum_{j=1}^{J_{i,t}} P_{i,j,t}^{\text{tr}} \quad (8)$$

式中: $P_{i,j,t}^{\text{tr}}$ 为 $t$ 时刻用户 $j$ 从基站 $i$ 获取通信服务所需的发射功率; $N_0$ 为用户所用信道产生的通信噪声功率; $B$ 和 $L_j$ 分别为信道带宽和用户 $j$ 的流量需求; $P_{i,j,t}^{\text{loss}}$ 为 $t$ 时刻用户 $j$ 从基站 $i$ 获取通信服务产生的路径损耗; $A_{\text{pl}}$ 和 $B_{\text{pl}}$ 为信道衰落系数; $d^{i,j}$ 为用户 $j$ 到基站 $i$ 的距离; $J_{i,t}$ 为 $t$ 时刻基站 $i$ 覆盖范围内的用户数量,由基站负载率乘以最大服务人数得到。

## 2.2 5G基站配套光伏模型

为体现不同区域5G基站配建屋顶光伏因建筑差异而产生的出力的不同,本文通过光伏板建模,设置各区域建筑参数,模拟各区域光伏出力,其表达式为:

$$P_i^{\text{pv}}(t) = \eta^{\text{pv}} S_i I(t) \quad (9)$$

式中: $P_i^{\text{pv}}(t)$ 为 $t$ 时刻基站 $i$ 配建光伏的有功输出; $\eta^{\text{pv}}$ 为光电转换效率; $S_i$ 为基站 $i$ 配建光伏阵列的面积; $I(t)$ 为 $t$ 时刻的单位面积辐照值。

不同区域可以利用的光伏安装面积为:

$$S_{w,i} = \frac{S_{b,i} r_i}{K_i} \mu_i \quad (10)$$

式中: $S_{w,i}$ 为基站 $i$ 可利用的光伏安装面积; $S_{b,i}$ 为基站 $i$ 所在房屋的占地面积; $r_i$ 为基站 $i$ 所在房屋的容积率; $K_i$ 为基站 $i$ 所在房屋的平均楼层; $\mu_i$ 为基站 $i$ 所在房屋的屋顶光伏可利用率。

基站配建光伏阵列面积 $S_i$ 的计算公式为:

$$S_i = 2 \left\lfloor \frac{S_{w,i}}{S_e} \right\rfloor S_0 \quad (11)$$

$$S_e = (L + 2l \cos \theta) w \quad (12)$$

$$L = l \sin \theta \cdot \frac{0.707 \tan \delta + 0.443}{0.707 - 0.443 \tan \delta} \quad (13)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整; $S_e$ 为倾斜光伏板的对地垂直投影面积; $S_0$ 为单块光伏板的面积; $L$ 为安装光伏板的最小间距; $l$ 和 $w$ 分别为光伏板的长度和宽度; $\theta$ 为光伏板的安装倾角; $\delta$ 为该区域的纬度。

## 2.3 5G基站配储模型

一般情况下,5G基站配储由24个2V-500A·h的阀控式铅酸蓄电池串联组成<sup>[25]</sup>,其功率值由电压、电流共同决定,其工作电压一般稳定在48V,其工作电流则受工作模式的影响。

当市电正常时,开关电源工作于整流状态,输出基站负载电流 $I_{\text{ld}}$ ,配储的充电电流为 $I_{\text{ch}}$ ,总注入电流为 $I_{\text{in}}$ ,此时满足:

$$I_{\text{in}} = I_{\text{ch}} + I_{\text{ld}} \quad (14)$$

当市电故障时,配储为负载供电,此时的配储放电电流为 $I_{\text{dch}}$ , $I_{\text{in}}$ 为0, $I_{\text{dch}}$ 与 $I_{\text{ld}}$ 相等。此外,本文考虑在必要时刻通过配储向电网反向输出功率,此时开关电源工作于逆变状态,蓄电池组除供给基站负载电流 $I_{\text{ld}}$ 外,还通过开关电源逆变为输出部分电流 $I_{\text{in}}$ ,并将其注入电网。此时满足:

$$I_{\text{dch}} = I_{\text{in}} + I_{\text{ld}} \quad (15)$$

## 3 融合置信概率区间与模糊机会的5G基站光储一体低碳经济优化调度模型

### 3.1 目标函数

本文综合考虑聚合商购电成本、光储套利收益、储能损耗成本、弃光惩罚成本及碳排放成本。目标函数为:

$$\min f = C_1 - C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (16)$$

式中: $f$ 为系统运行总成本; $C_1$ 为聚合商购电成本; $C_2$ 为聚合商光储套利收益; $C_3$ 为储能损耗成本; $C_4$ 为弃光惩罚成本; $C_5$ 为碳排放成本。

聚合商的购电费用由分时电价和各时刻购电量共同决定,具体表达式为:

$$C_1 = \sum_{q=1}^N \sum_{t=1}^T \pi_t P_{\text{grid},q,t}^{\text{SG}} \quad (17)$$

式中: $\pi_t$ 为 $t$ 时刻的电价。

聚合商收益主要由储能售电和配建光伏售电两部分组成,即:

$$C_2 = \sum_{q=1}^N \sum_{t=1}^T \pi_t (P_{\text{ess\_sell},q,t} + P_{\text{pv\_sell},q,t}) \quad (18)$$

式中: $P_{\text{ess\_sell},q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域基站配储的售电功率; $P_{\text{pv\_sell},q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域基站配建光伏的售电功率。

5G基站配储的损耗由储能的充、放电引起,放电主要分为放电自用和售电两部分,即:

$$C_3 = \sum_{q=1}^N \sum_{t=1}^T C_b \left[ P_{\text{ess\_ch},q,t} / \eta_{\text{ch}} + \eta_{\text{dis}} (P_{\text{ess\_use},q,t} + P_{\text{ess\_sell},q,t}) \right] \Delta t \quad (19)$$

式中: $C_b$ 为配储单位充、放电损耗成本; $P_{\text{ess\_ch},q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域配储的充电功率; $P_{\text{ess\_use},q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域配储通过放电供基站自用的功率; $\eta_{\text{ch}}$ 、 $\eta_{\text{dis}}$ 分别为配储充、放电效率; $\Delta t$ 为单位调度时长。

为减少弃光量,本文引入弃光惩罚,即:

$$C_4 = \sum_{q=1}^N \sum_{t=1}^T C_{\text{pv}} \left[ P_{\text{pv},q,t} - (P_{\text{pv\_use},q,t} + P_{\text{pv\_sell},q,t}) \right] \quad (20)$$

式中: $C_{\text{pv}}$ 为弃光惩罚系数,本文依据分时电价高价设置; $P_{\text{pv\_use},q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域光伏供基站自用的功率。

为了在考虑低碳的同时兼顾聚合商的经济性,

本文通过阶梯式碳交易模型,将碳排放量转化为经济成本,使其与聚合商经济性相结合以便于求解。碳排放成本计算公式为:

$$C_5 = \begin{cases} \mu(E_p - E_L) & E_p \leq E_L + d \\ (1 + \tau)\mu(E_p - E_L) - \tau\mu d & E_p \leq E_L + d \leq E_p \leq E_L + 2d \\ (1 + 2\tau)\mu(E_p - E_L) - 3\tau\mu d & E_p > E_L + 2d \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\mu$ 为碳排放惩罚价格; $d$ 为碳排放控制梯度; $\tau$ 为碳排放每上升一个梯度使惩罚价格产生的增长量。当 $E_p < E_L$ 时, $C_5$ 为负值,表示系统的碳排放量小于碳排放配额,可以将多余的碳排放配额以碳惩罚价格进行等额奖励,从而获得碳收益。

### 3.2 约束条件

#### 3.2.1 功率平衡约束

在配电网调度问题模型中,源荷的不确定性主要体现在功率平衡约束。本文考虑基站光伏和基站通信负荷的预测误差,功率平衡表达式为:

$$\tilde{P}_{L,q,t} - \tilde{P}_{pv,q,t} - P_{grid,q,t} - P_{q,t}^{dis} + P_{q,t}^{ch} + P_{bl,q,t} = 0 \quad (22)$$

式中: $\tilde{P}_{L,q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域基站负荷模糊参数; $\tilde{P}_{pv,q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域光伏模糊参数; $P_{q,t}^{ch}$ 、 $P_{q,t}^{dis}$ 分别为 $t$ 时刻 $q$ 区域配储的充、放电功率; $P_{bl,q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域除基站负荷外的基础用电负荷。

由于源荷值存在不确定性且光伏出力策略存在一定的弃光量,因此不确定变量 $\tilde{P}_{L,q,t}$ 、 $\tilde{P}_{pv,q,t}$ 可以表示为:

$$\tilde{P}_{L,q,t} = P_{L,q,t} + \varepsilon_{L,q,t} \quad (23)$$

$$\tilde{P}_{pv,q,t} = P_{pv,q,t} + \varepsilon_{pv,q,t} - \Delta P_{pv,q,t} \quad (24)$$

式中: $P_{L,q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域5G基站的负荷预测值,由式(5)求得; $\varepsilon_{L,q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域的负荷预测误差; $\varepsilon_{pv,q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域的光伏预测误差; $\Delta P_{pv,q,t}$ 为 $t$ 时刻 $q$ 区域光伏在日前调度策略中的弃光量。

#### 3.2.2 5G基站通信约束

5G基站通信约束为:

$$\begin{cases} L_{i,t} = J_{i,t} L_j \\ B_{i,t} = J_{i,t} B \\ 0 \leq L_{i,t} \leq L^{\max} \\ 0 \leq B_{i,t} \leq B^{\max} \\ 0 \leq P_{i,t}^w \leq P^{\max} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $L_{i,t}$ 为 $t$ 时刻基站 $i$ 的总通信流量; $J_{i,t}$ 为 $t$ 时刻基站 $i$ 覆盖范围内的用户数量; $B_{i,t}$ 为 $t$ 时刻基站 $i$ 的带宽; $B$ 为单个用户需求的带宽; $L^{\max}$ 为基站通信流量上限; $B^{\max}$ 为通信带宽上限; $P^{\max}$ 为基站通信发射功率上限。

#### 3.2.3 光伏运行约束

光伏运行约束为:

$$P_{pv\_use,q,t} + P_{pv\_sell,q,t} \leq P_{pv,q,t} \quad (26)$$

$$P_{pv\_use,q,t} \geq 0, P_{pv\_sell,q,t} \geq 0 \quad (27)$$

#### 3.2.4 5G基站配储运行约束

配储充、放电约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq \beta_{ch,i,t} + \beta_{dis,i,t} \leq 1 \\ 0 \leq P_{i,t}^{ch} \leq \beta_{ch,i,t} P_{max}^{ch}(t) \\ 0 \leq P_{i,t}^{dis} \leq \beta_{dis,i,t} P_{max}^{dis}(t) \\ P_{ess\_use,i,t} \geq 0, P_{ess\_sell,i,t} \geq 0 \\ P_{i,t}^{dis} = P_{ess\_use,i,t} + P_{ess\_sell,i,t} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $\beta_{ch,i,t}$ 、 $\beta_{dis,i,t}$ 为二进制变量,取值为0或1,这里将其作为配储充、放电控制变量,避免配储同时充、放电; $P_{max}^{ch}(t)$ 、 $P_{max}^{dis}(t)$ 分别为 $t$ 时刻配储的充、放电功率最高限制。

配储荷电状态(state of charge, SOC)约束为:

$$S_{soc,i,t} = S_{soc,i,t-\Delta t} + \frac{\eta_{ch} P_{i,t}^{ch} \Delta t}{E_{5G,N}} - \frac{P_{i,t}^{dis} \Delta t}{\eta_{dis} E_{5G,N}} \quad (29)$$

$$S_{soc,i,\min}^t \leq S_{soc,i,t} \leq S_{soc,i,\max} \quad (30)$$

式中: $S_{soc,i,t}$ 为 $t$ 时刻基站 $i$ 的储能SOC; $S_{soc,i,t-\Delta t}$ 为上一时刻基站配储的SOC; $E_{5G,N}$ 为基站的配储容量; $S_{soc,i,\min}^t$ 为 $t$ 时刻考虑配储动态备电的SOC下限; $S_{soc,i,\max}$ 为配储防过充的SOC上限。

#### 3.2.5 配储可调度潜力动态评估模型

本文根据通信负载强度与配电网供电可靠性双重约束,构建5G基站储能动态备电模型,如图1所示。利用 $S_{soc,i,\min}^t$ 与 $S_{soc,i,\max}$ 将储能容量分为3个部分:动态备电容量,是用于保证通信可靠性的不可调度部分;可调度容量,是可用于需求响应的可调度部分;防过充容量,是防止储能电池过充的不可调度部分。

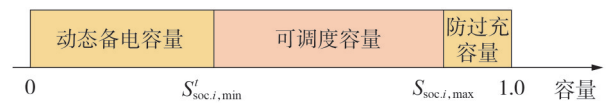


图1 5G基站配储容量分配示意图

Fig.1 Schematic diagram of equipped storage capacity allocation in 5G base station

本文采用考虑配电网供电可靠性参数与基站通信负荷波动的动态备电模型,实现储能资源的最大化利用。基站配储动态备电容量占比下限 $S_{soc,i,\min}^{\text{res}}$ 由基站所在区域配电网可靠性参数及实时通信负载水平共同决定,表达式为:

$$S_{soc,i,\min}^{\text{res}} = C_{i,\min}^{\text{res}}(t) / E_{soc} \quad (31)$$

$$C_{i,\min}^{\text{res}}(t) = \int_t^{t+T_q^{\text{res}}} P_{i,t}^{5G} dt \quad (32)$$

式中: $E_{soc}$ 为配储额定容量; $C_{i,\min}^{\text{res}}(t)$ 为 $t$ 时刻基站的最小备电容量需求; $T_q^{\text{res}}$ 为 $q$ 区域配储的最短备电时长,其取值因区域而异; $P_{i,t}^{5G}$ 为 $t$ 时刻基站的功率值,为动态变化量。

为确保动态备电的可靠性,储能系统需提高运行下限阈值,基站配储的下限约束值 $S_{\text{soc},i,\text{min}}^t$ 可表示为:

$$S_{\text{soc},i,\text{min}}^t = \max(S_{\text{soc},i,\text{min}}, S_{\text{soc},i,\text{min}}^{\text{res}}) \quad (33)$$

式中: $S_{\text{soc},i,\text{min}}$ 为配储防过放的SOC下限。由于通信优先级高于储能过放,求取 $S_{\text{soc},i,\text{min}}^{\text{res}}$ 时并不考虑储能过放,因此 $S_{\text{soc},i,\text{min}}^t$ 取 $S_{\text{soc},i,\text{min}}$ 与 $S_{\text{soc},i,\text{min}}^{\text{res}}$ 中的最大值。

通信负载水平与配电网供电可靠性是影响基站配储电容量的核心要素。在配电网可靠性方面,不同区域的供电保障能力存在显著差异:厂房区因电网稳定性强、故障率低,所需储能备电容量较低;住宅区由于电网结构限制使停电频率较高,需要更高的备电容量。本文采用厂房区、办公区、购物区、住宅区4类典型区域构建分析框架,以住宅区备电需求为基准,通过数学模型动态计算其他区域最短备电时长<sup>[11]</sup>,即:

$$T_q^{\text{res}} = \frac{\delta_q T_q}{\delta_0 T_0} T_0^{\text{res}} \quad (34)$$

式中: $\delta_q$ 为 $q$ 区域基站的年故障率; $T_q$ 为 $q$ 区域基站的年平均停电时间; $\delta_0$ 为区域年平均停电次数基准值; $T_0$ 为区域年平均停电时间基准值; $T_0^{\text{res}}$ 为配储备电时长基准值。

#### 4 融合置信概率区间与模糊机会的不确定问题求解方法

5G基站配建光伏与通信负荷的接入给配电系统的购电计划带来了不确定性。针对源荷不确定性问题,现有研究通常采取基于固定隶属度参数的模糊机会约束,这导致制定的日前调度计划过于保守,使得系统碳排放量与购电成本增加。为解决该问题,本文基于非参数核密度估计法构建模糊机会约束的动态隶属度参数,在保证系统鲁棒性的前提下降低碳排放与运行成本。

##### 4.1 5G基站源荷功率区间概率预测模型

受多种因素影响,光伏实际发电值和通信负荷实际需求与日前预测值间通常存在一定的偏差。本文基于非参数核密度法求取源荷两侧的概率预测区间,为不确定性调度策略提供数据基础。

在获取5G基站负荷和光伏的真实值与预测值后,基于非参数核密度估计方法构建5G基站负荷与光伏的预测误差密度函数,采用标准高斯核函数<sup>[26]</sup>,具体形式为:

$$\hat{f}_h(E) = \frac{1}{nh_w} \sum_{q=1}^n K\left(\frac{E-E_q}{h_w}\right) \quad (35)$$

$$K\left(\frac{E-E_q}{h_w}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(E-E_q)^2}{2h_w^2}\right] \quad (36)$$

$$h_w = 1.06\sigma n^{-1/5} \quad (37)$$

式中: $\hat{f}_h(\cdot)$ 为概率分布函数; $E$ 为预测误差; $n$ 为样本量; $h_w$ 为带宽; $K(\cdot)$ 为核函数; $E_q$ 为 $q$ 区域的预测误差数据; $\sigma$ 为样本标准差。

设 $F(\cdot)$ 为预测误差的概率分布函数,5G基站负荷与光伏功率概率区间的上、下波动域并非由唯一的置信度确定,为提供更确定的优化调控范围,求取各时刻的最小波动区间,即:

$$\min_t [F^{-1}(\beta_t) - F^{-1}(\alpha_t)] \quad (38)$$

$$\beta_t - \alpha_t = \mu_d \quad (39)$$

$$[\hat{P}_t + \hat{F}^{-1}(\alpha_t), \hat{P}_t + \hat{F}^{-1}(\beta_t)] \quad (40)$$

式中: $F^{-1}(\cdot)$ 为 $F(\cdot)$ 的反函数; $\alpha_t, \beta_t$ 为 $t$ 时刻功率概率区间的上、下不对称边界置信度; $\mu_d$ 为功率概率区间的置信度; $\hat{P}_t$ 为 $t$ 时刻的功率预测值。

##### 4.2 不确定性调度模型与融合预测概率区间的模糊机会求解方法

3.2.1节的功率平衡表达式中存在不确定变量,本文通过模糊处理的方式构建包含光伏和5G负荷功率模糊参数的功率平衡表达式<sup>[24]</sup>,即:

$$\min P_r \{ \tilde{P}_{L,q,t} - \tilde{P}_{pv,q,t} - P_{\text{grid},q,t} - P_{q,t}^{\text{dis}} + P_{q,t}^{\text{ch}} + P_{\text{bl},q,t} = 0 \} \geq \alpha \quad (41)$$

式中: $P_r\{\cdot\}$ 为事件在置信水平 $\alpha$ 下发生的概率。

本文采用文献[27]中的模糊机会约束优化确定性等价理论,构建约束条件的数学等价形式。鉴于系统运行对安全稳定性的严格要求,置信水平 $\alpha$ 需维持在较高阈值。当置信水平 $\alpha \geq 1/2$ 时,模糊机会约束条件可转化为如下确定性等价形式:

$$(2-2\alpha) \sum_{k=1}^{K_r} [r_{k3} h_k^+(x) - r_{k2} h_k^-(x)] + (2\alpha-1) \sum_{k=1}^{K_r} [r_{k4} h_k^+(x) - r_{k1} h_k^-(x)] + h_0(x) \leq 0 \quad (42)$$

式中: $h_k^+(x), h_k^-(x)$ 为模糊机会约束函数 $g(x, \xi)$ 的2个假设函数, $x$ 为决策量, $\xi$ 为参数量; $h_0(x)$ 为 $g(x, \xi)$ 假设函数中的一部分; $r_{k1} - r_{k4} (k=1, 2, \dots, K_r, K_r \in \mathbf{R})$ 为隶属度参数。

现有机会约束模型依据经验设置固定隶属度模糊参数,忽略了不同时刻预测误差的差异性。针对以上问题,本文提出基于置信区间预测的隶属度模糊参数动态设置方法。将乐观上、下界映射至置信度较低的预测概率区间的上、下界,将悲观上、下界映射至置信度较高的预测概率区间的上、下界。具体表达式为:

$$\tilde{P}_{L,q,t} = (P_{L1,q,t}, P_{L2,q,t}, P_{L3,q,t}, P_{L4,q,t}) = \hat{P}_{L,q,t}(w_{L1,q,t}, w_{L2,q,t}, w_{L3,q,t}, w_{L4,q,t}) \quad (43)$$

$$w_{Li,q,t} = \begin{cases} 1 - \frac{\hat{P}_{L,q,t} - P_{Lc,q,t}^{ai,down}}{\hat{P}_{L,q,t}} & i=1, 2 \\ 1 + \frac{\hat{P}_{L,q,t} - P_{Lc,q,t}^{ai,up}}{\hat{P}_{L,q,t}} & i=3, 4 \end{cases} \quad (44)$$

$$\tilde{P}_{pv,q,t} = (P_{pv1,q,t}, P_{pv2,q,t}, P_{pv3,q,t}, P_{pv4,q,t}) = \hat{P}_{pv,q,t} (w_{pv1,q,t}, w_{pv2,q,t}, w_{pv3,q,t}, w_{pv4,q,t}) \quad (45)$$

$$w_{pvi,q,t} = \begin{cases} 1 - \frac{\hat{P}_{pv,q,t} - P_{pvc,q,t}^{ai,down}}{\hat{P}_{pv,q,t}} & i=1, 2 \\ 1 + \frac{\hat{P}_{pv,q,t} - P_{pvc,q,t}^{ai,up}}{\hat{P}_{pv,q,t}} & i=3, 4 \end{cases} \quad (46)$$

式中： $P_{Li,q,t}$ 、 $P_{pvi,q,t}$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 分别为负荷、光伏的隶属度参数； $\hat{P}_{L,q,t}$ 、 $\hat{P}_{pv,q,t}$  分别为负荷、光伏的预测值； $w_{Li,q,t}$ 、 $w_{pvi,q,t}$  分别为负荷、光伏的比例系数， $i$  取值 1、4 时为悲观参数， $i$  取值 2、3 时为乐观参数； $P_{Lc,q,t}^{ai,up}$ 、 $P_{Lc,q,t}^{ai,down}$  和  $P_{pvc,q,t}^{ai,up}$ 、 $P_{pvc,q,t}^{ai,down}$  分别为负荷和光伏预测置信概率区间的上、下界。

将式(21)按照梯形参数的转化方法转化为相应的清晰等价类，功率平衡清晰等价类为：

$$(2-2\alpha)(P_{L3,q,t} - P_{pv2,q,t}) + (2\alpha-1)(P_{L4,q,t} - P_{pv1,q,t}) - P_{grid,q,t} - P_{q,t}^{dis} + P_{q,t}^{ch} + P_{hl,q,t} = 0 \quad (47)$$

确定化后的模型属于混合整数线性规划问题，本文采用 MATLAB 联合 Yalmip 工具箱，调用 Gurobi 求解器对其进行求解，具体流程如附录 A 图 A3 所示。

## 5 算例分析

### 5.1 系统设置及基础数据

本文考虑厂房区、办公区、购物区和住宅区 4 个类型区域。每个区域设置 50 座均匀分布的 5G 基站，基站的通信覆盖半径为 356 m，5G 基站配储充、放电电流值为 166.667 A。假设 4 个研究区域所处纬度为  $40^\circ$ ，占地面积均为  $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ ，各区域光伏板的安装倾角为  $35^\circ$ ，光电转换效率为 16%，单块光伏板大小取  $1.64 \text{ m} \times 0.99 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ 。基站的负载参数、配储参数、各区域房屋参数及其他相关参数如附录 B 表 B1—B6 及图 B1 所示。

基于上述参数，结合第 2 章的模型，得到源荷的预测值，本文通过给光伏预测值加入 10% 的高斯噪声以及给通信负荷预测值加入 5% 的泊松噪声，模拟各区域的源荷真实值。最后通过核密度法得到各区域 5G 基站负荷需求值与屋顶光伏出力值的置信区间预测结果，如附录 B 图 B1、B2 所示。

本文以住宅区 2 h 备电时长为基准，根据式(34)求得各区域最短备电时长，其中厂房区为 0.60 h，办

公区为 1.05 h，购物区为 0.94 h<sup>[11]</sup>。

### 5.2 不同场景下的对比分析

为验证本文提出的考虑源荷不确定性的 5G 基站光储一体化低碳经济运行策略的有效性，采用如下 5 种调度场景进行对比。

场景 1：采用功率平衡的确定性模型<sup>[11]</sup>，为应对光伏出力和基站负荷的预测偏差可能导致的日内供电缺口，在日前计划购电量的基础上，额外增购光伏预测出力的 30% 与基站负荷预测值的 10%，并将三阶梯型碳交易成本计入目标函数。

场景 2：采用基于盒式不确定集的鲁棒优化模型<sup>[28]</sup>，在盒式不确定集中设置 5G 基站负荷预测最大偏差为 10%，光伏预测最大偏差为 20%，并将三阶梯型碳交易成本计入目标函数。

场景 3：采用固定隶属度参数机会约束的不确定性模型<sup>[24]</sup>，并将三阶梯型碳交易成本计入目标函数，在其隶属度参数设置中，光伏出力乐观上、下界分别取 1.1 和 0.9，悲观上、下界分别取 1.2 和 0.8。基站负荷乐观上、下界分别取 1.05 和 0.95，悲观上、下界分别取 1.1 和 0.9。

场景 4：采用动态隶属度参数机会约束的不确定模型，目标函数仅包含系统运行成本。

场景 5：采用动态隶属度参数机会约束的不确定模型，并将三阶梯型碳交易成本计入目标函数。

设定场景 3—5 中的置信水平  $\alpha=0.95$ ，在不同研究区域基础参数相同的前提下进行对比验证。为了验证调度策略在实际应用中的情况，本文将日前购电及运行方案与日内实际负荷和光伏可出力值进行比较，将实际光伏可出力值取日内实际值与日前计划值中的最小值。在日内实际运行策略中优先使用从电网购买的电能，其次使用光伏发电，最后使用储能电能。5 种场景下厂房区的光伏消纳结果对比如图 2 所示，其余区域结果如附录 C 图 C3—C5 所示。

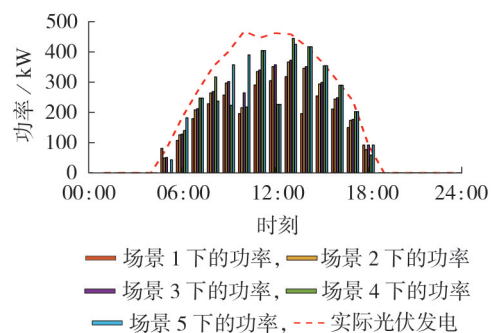


图2 厂房区光伏消纳结果对比

Fig.2 Comparison of photovoltaic consumption results in factory area

由图 2 可知：从场景 1 至场景 5，整体消纳量呈递增趋势；场景 2 与场景 3 下的整体消纳情况相近，

场景4与场景5下的整体消纳情况相近;场景5下的消纳量在光伏发电高峰期多于其他场景,整体消纳最佳。

厂房区配储充、放电情况对比如图3所示。各场景的储能运行均集中于08:00—12:00、17:00—21:00,储能在电价高峰时段通过放电套利,在高峰期为消纳光伏充电。其余区域的配储充、放电情况如附录C图C6—C8所示。

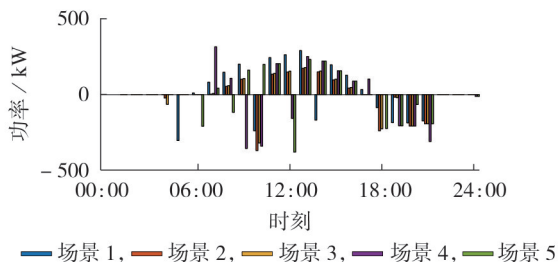


图3 厂房区配储充、放电情况对比

Fig.3 Comparison of charging and discharging condition in factory area

基于本文提出的适用于配电网日前购电计划的三阶段碳交易模型,根据本文所提策略,5种场景下厂房区的碳排放对比如图4所示,其余区域的碳排放对比如附录C图C9—C11所示。

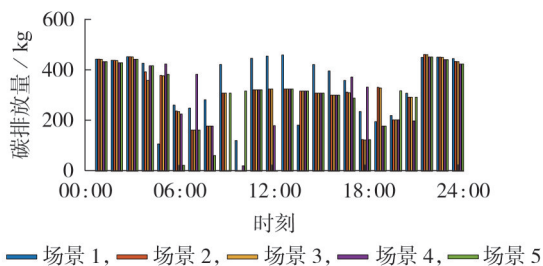


图4 厂房区的碳排放量对比

Fig.4 Comparison of carbon emission in factory area

不同场景下的调度结果对比如表1所示。由表可知:场景5下的光伏消纳率最高,碳排放量与基站运行成本均最小,综合运行效果最优;与采用确定性模型的场景1相比,在采用鲁棒优化的场景2下,一个调度周期内的基站运行成本降低10.94%,碳排放量减少990.58 kg,光伏消纳率提高10.03个百分点;比较场景2与场景3可知,固定隶属度机会约束模型在基站运行成本、碳排放及光伏消纳方面均有所改善;场景4与场景5均采用动态隶属度机会约束模型,与场景4相比,场景5在计入三阶梯型碳交易成本后,一个调度周期内的基站运行成本降低3.23%,碳排放量减少271.29 kg,光伏消纳率提高4.56个百分点。综上,场景5能够降低系统运行成本,提高光伏消纳量,减少碳排放量,实现经济性与低碳性的协同优化。

表1 不同场景下的调度结果对比

Table 1 Comparison of dispatching results under different scenarios

场景	光伏消纳率 / %	碳排放量 / kg	基站运行成本 / 元
1	60.02	27997.14	8821.08
2	70.05	27006.56	7856.44
3	74.59	26873.88	7764.22
4	81.36	25777.53	7304.97
5	85.92	25506.24	7069.26

### 5.3 合理性验证

本文在95%的可信度水平下制定考虑源荷不确定性的5G基站光储一体化低碳经济运行策略。为了验证本文制定的日前购电方案及5G基站光储一体化聚合商日前运行策略在日内执行中不会出现供电缺口,将日前购电及运行方案与日内实际负荷和光伏出力值进行比较。

光伏出力与日内实际负荷如图5所示。由图可知,本文制定的考虑源荷不确定性的日前购电方案在结合日内实际光伏出力值后的日内各时刻可供电功率满足各区域日内实际负荷需求,且略有盈余。

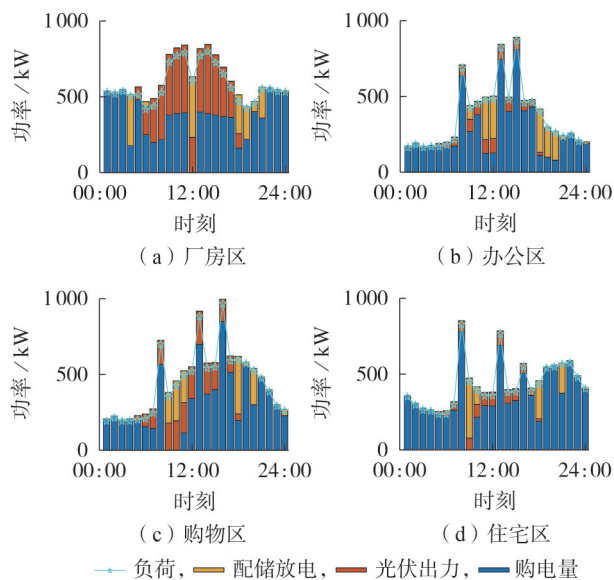


图5 光伏出力与日内实际负荷

Fig.5 Photovoltaic output and actual intraday load

根据本文的配储可调度潜力动态评估模型得到受限于上、下限的各区域基站配储的SOC实际运行情况,具体结果如图6所示。本文策略下配储的实时SOC运行状态满足其动态约束。

为验证本文所提模型的有效性与可行性,选取IEEE 33节点系统进行算例分析。设置系统基准容量为10 MV·A,分别将厂房区、办公区、购物区、住宅区接入节点3、23、19、26。经计算,各节点电压变化情况如图7所示(图中电压为标么值)。可知,本文所提策略下配电网各节点电压均运行在安全范围内。

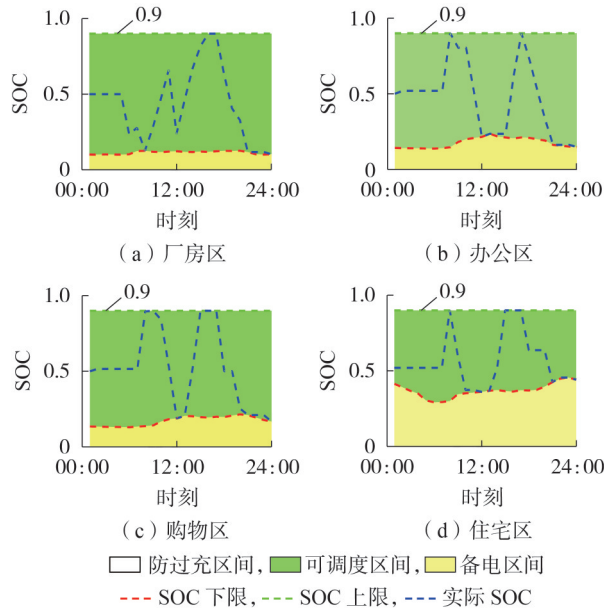


图6 5G基站配储可调度容量及实际SOC变化

Fig.6 Dispatchable capacity and actual SOC variation of equipped storage in 5G base station

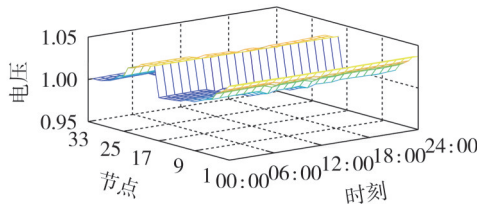


图7 各节点在调度周期内的电压变化情况

Fig.7 Voltage variation condition of each node in dispatching period

## 6 结论

本文综合考虑源荷两侧不确定性以及碳交易机制的影响,基于动态隶属度参数机会约束模型,提出考虑源荷不确定性的5G基站光储一体化低碳经济运行策略,得出如下结论。

1)本文提出一种考虑5G基站光储一体化系统区域异构性的低碳经济运行策略,以最大化光伏消纳、最小化碳排放与基站运行成本为目标,将碳排放变量纳入经济性调度决策,在0.95的置信水平下保障系统安全运行的同时,提升了光伏消纳能力,降低了碳排放与5G基站聚合商的运行成本。

2)算例结果表明:与确定性调度模型相比,本文所提策略在一个调度周期内的基站运行成本降低19.86%,光伏消纳率提高43.15%,碳排放量减少2490.90 kg;与固定隶属度参数机会约束的不确定模型相比,本文所提策略的基站运行成本降低8.95%,光伏消纳率提高15.19%,碳排放量减少1367.64 kg。结果验证了所提策略在经济性与低碳性方面的综合优势。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 工信部. 2025年一季度通信业经济运行情况[EB/OL]. (2025-04-22)[2025-12-19]. [https://www.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/txy/art/2025/art\\_eb6f118eaffc4295a6aae640075897f4.html](https://www.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/txy/art/2025/art_eb6f118eaffc4295a6aae640075897f4.html).
- [2] WU S T, WANG Q, MIAO C R. Distribution network resilience enhancement strategy considering spatial-temporal migration of flexible resources on supply and demand sides[J]. IET Renewable Power Generation, 2024, 18(7): 1177-1192.
- [3] WU S T, WANG Q, CHEN B. Collaborative planning of cyber physical distribution system considering the flexibility of data centers[J]. Energy Reports, 2023, 9: 656-664.
- [4] 麻秀范, 孟祥玉, 朱秋萍, 等. 计及通信负载的5G基站储能调控策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2878-2887. MA Xiufan, MENG Xiangyu, ZHU Qiuping, et al. Control strategy of 5G base station energy storage considering communication load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2878-2887.
- [5] 李昆, 方家琨, 艾小猛, 等. 考虑通信与配套设备协调优化的大规模5G宏基站网络能量管理模型[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5391-5403. LI Kun, FANG Jiakun, AI Xiaomeng, et al. Energy management model of large-scale 5G macro base station network considering the coordinated optimization of communication equipment and standard equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5391-5403.
- [6] 刘洪, 王志杰, 徐正阳, 等. 基于通信负载站间迁移的配电网与5G基站日前互动运行方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(21): 82-91. LIU Hong, WANG Zhijie, XU Zhengyang, et al. Day-ahead interactive operation method for distribution network and 5G base stations based on inter-station migration of communication load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(21): 82-91.
- [7] 麻秀范, 张乐萱, 于琨澎, 等. 考虑5G基站备用储能优化调控的配电网重构双层优化方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5028-5041. MA Xiufan, ZHANG Lexuan, YU Kunpeng, et al. A two-layer optimization approach for distribution network reconfiguration considering optimal regulation of 5G base station backup energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5028-5041.
- [8] 于昌平, 王琦, 吴舒坦, 等. 考虑负荷时空迁移的5G基站与配电网协同优化运行[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(12): 195-203. YU Changping, WANG Qi, WU Shutan, et al. Collaborative optimal operation of 5G base station and distribution network based on load spatial and temporal migration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(12): 195-203.
- [9] ZHOU Y Y, WANG Q G, ZOU Y, et al. Voltage profile optimization of active distribution networks considering dispatchable capacity of 5G base station backup batteries[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(4): 1842-1856.
- [10] 张禄澳, 范一芳, 王宇轩, 等. 光储式5G通信基站集群灵活性聚合与协同调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 101-110. ZHANG Luao, FAN Yifang, WANG Yuxuan, et al. Flexible ag-

- regation and coordinated scheduling strategy for renewable powered 5G communication base station clusters[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(2):101-110.
- [11] 麻秀范,刘子豪,王颖,等. 考虑通信负载迁移及储能动态备电的5G基站光伏消纳能力研究[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(21):5832-5845,5922.  
MA Xiufan, LIU Zihao, WANG Ying, et al. Research on photovoltaic absorption capacity of 5G base station considering communication load migration and energy storage dynamic backup [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(21):5832-5845,5922.
- [12] BAO P, WANG Y Q, JIANG X, et al. A statistical-based approach for decentralized demand response toward primary frequency support: a case study of large-scale 5G base stations with adaptive droop control [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2025, 16(3):2208-2221.
- [13] 高洪超,李楚一,王冠雄,等. 聚合规模化5G基站的虚拟电厂动态构建与响应实证[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(18):47-55.  
GAO Hongchao, LI Chuyi, WANG Guanxiang, et al. Dynamic construction and response demonstration of virtual power plant with aggregated large-scale 5G base stations [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(18):47-55.
- [14] 王志维,王秀丽,雍维桢,等. 含备用储能的5G基站虚拟电厂参与电力市场的交易策略研究[J]. *电网技术*, 2024, 48(3):968-978.  
WANG Zhiwei, WANG Xiuli, YONG Weizhen, et al. Research on the trading strategy of 5G base station virtual power plant with reserve energy storage in the electricity market [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(3):968-978.
- [15] 王均,黄柯然,许潇,等. 基于阶梯碳价和自适应分时电价的电动汽车有序充电[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(2):64-71.  
WANG Jun, HUANG Keran, XU Xiao, et al. Ordered charging of electric vehicles based on ladder-type carbon price and adaptive time-of-use electricity price [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(2):64-71.
- [16] 马明,刘涌. 计及住宅混合能源需求响应的含风电系统随机优化调度[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(1):11-20.  
MA Ming, LIU Yong. Stochastic optimal dispatch of power system with wind power considering demand response of residential a hybrid energy system [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2022, 43(1):11-20.
- [17] 赵书强,赵蓬飞,韦子瑜,等. 数据驱动下考虑多预测误差带信息的多场景随机优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(11):52-59.  
ZHAO Shuqiang, ZHAO Pengfei, WEI Ziyu, et al. Multi-scenario stochastic optimal scheduling considering multi-prediction error band information under data-driven [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(11):52-59.
- [18] 王秉鑫,黎静华. 基于动态模糊集的含源荷不确定性电力系统多时段分布鲁棒优化调度方法[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(11):115-122.  
WANG Bingxin, LI Jinghua. Dynamic fuzzy set based multi-period distributional robust optimal scheduling method for power system with source and load uncertainty [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(11):115-122.
- [19] 陈曦,付文龙,张海荣,等. 考虑新能源发电不确定性的含微电网群共享储能优化调度[J]. *电网技术*, 2024, 48(1):219-228.  
CHEN Xi, FU Wenlong, ZHANG Hairong, et al. Optimal dispatching strategy of shared energy storage with multi-microgrid considering uncertainty of new energy generation [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(1):219-228.
- [20] 胡银龙,叶梓松,解振霖,等. 基于机会约束的售电公司共享储能经济运行优化[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(5):44-50.  
HU Yinlong, YE Zisong, XIE Zhenlin, et al. Economic operation optimization of shared energy storage for electricity retailer based on chance constraint [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(5):44-50.
- [21] 邱革非,何超,骆钊,等. 考虑源、荷不确定性的工业园区电气互联综合能源系统模糊优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(5):8-14.  
QIU Gefei, HE Chao, LUO Zhao, et al. Fuzzy optimal scheduling of integrated electricity and natural gas system in industrial park considering source-load uncertainty [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(5):8-14.
- [22] 骆晨,蔡梦怡,王书宏,等. 计及模糊机会约束的含高比例光伏配电网检修重构协同优化方法[J]. *智慧电力*, 2025, 53(2):111-118.  
LUO Chen, CAI Mengyi, WANG Shuhong, et al. A collaborative optimization method for distribution network maintenance and reconstruction with high penetration of photovoltaic generation considering fuzzy chance constraints [J]. *Smart Power*, 2025, 53(2):111-118.
- [23] 宋梦,林固静,高赐威,等. 考虑多重不确定性的广义共享储能优化配置方法[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(5):1521-1539.  
SONG Meng, LIN Gujing, GAO Ciwei, et al. A generalized shared energy storage optimization configuration method considering multiple uncertainties [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(5):1521-1539.
- [24] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(11):85-91.  
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon scheduling of power system with wind power considering uncertainty of both source and load sides [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(11):85-91.
- [25] WANG F X, FAN X Y, WANG F, et al. Backup battery analysis and allocation against power outage for cellular base stations [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2019, 18(3):520-533.
- [26] SUN Y H, ZHOU Y, WANG S, et al. Nonparametric probabilistic prediction of regional PV outputs based on granule-based clustering and direct optimization programming [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2023, 11(5):1450-1461.
- [27] 刘宝锭,赵瑞清,王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2003:178-198.
- [28] 陈锋,刘丽军,连祥龙,等. 面向不确定场景的微电网与共享储能协同鲁棒优化[J/OL]. *电网技术*. [2025-09-26]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0941>.

#### 作者简介:

王要强(1982—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为新能源与电力储能、电力变换与系统控制、电力系统运行与规划等(E-mail: WangyqEE@163.com);

袁嘉(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为新型电力系统负荷预测及优化调度(E-mail: yuanjia9811@163.com);

鲍鹏(1996—),男,讲师,博士,通信作者,研究方向为电力系统运行优化、需求响应与虚拟电厂、信息物理系统建模等(E-mail: baopeng@zzu.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

## Integrated photovoltaic-storage low-carbon economic operation strategy of 5G base station considering uncertainty of source and load

WANG Yaoqiang<sup>1,2</sup>, YUAN Jia<sup>1,2</sup>, BAO Peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Linjuan<sup>3</sup>, LI Wenfeng<sup>3</sup>, LIANG Jun<sup>4</sup>

- (1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;  
2. Henan Engineering Research Center of Power Electronics and Energy Systems, Zhengzhou 450001, China;  
3. Economic and Technological Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 4. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, UK)

**Abstract:** In order to solve the problems of low utilization rate of the equipped photovoltaic in 5G base station integrated photovoltaic-storage system due to the conservatism of existing uncertain operation strategy and high carbon emission of distribution system, a low-carbon economic operation strategy of 5G base station integrated photovoltaic-storage system is proposed considering the uncertainty of source and load. The spatiotemporal differences of communication load and photovoltaic output among 5G base stations in different types of regions are analyzed, and a source-load-storage model of 5G base station is built considering the spatiotemporal heterogeneity characteristic. A low-carbon economic dispatch optimization model based on a three-stage carbon trading method is developed with the goal of maximizing photovoltaic consumption and minimizing carbon emission and operation cost of base station. In order to solve the conservatism problem of traditional fuzzy chance-constrained solution strategy with fixed membership parameter, a fuzzy chance-constrained solution method with dynamic membership parameter is proposed considering the real-time prediction error. The example analysis shows that the proposed method can effectively integrate the source-load-storage resources of 5G base station, enhance the photovoltaic utilization rate, and reduce the operation cost and carbon emission of base station.

**Key words:** 5G base station; carbon trading; photovoltaic consumption; interval prediction; uncertainty optimization; low-carbon economic dispatch; energy storage; integrated photovoltaic-storage system

(上接第164页 continued from page 164)

## Wind-photovoltaic-gas-energy storage-hydrogen coupled low-carbon optimal operation of offshore oil and gas platform cluster

LI Qian<sup>1,2</sup>, XU Yufeng<sup>2</sup>, YAN Xiaobin<sup>3</sup>, XU Tong<sup>3</sup>, YANG Wei<sup>2</sup>, ZHANG Anan<sup>2</sup>

- (1. SILKROAD Research Center of Sustainable Energy Conversion and Utilization, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** In order to reduce environmental pollution caused by the operation of oil platforms, an offshore oil and gas platform cluster integrated energy system considering the integration of new energy is proposed, which can decrease the carbon emissions of the system while improving operational economy. Considering the stability of energy supply during the joint operation of multiple platforms after the integration of new energy, a selective consumption strategy of new energy is adopted to deal with the fluctuation and uncertainty of new energy output, and an offshore oil and gas platform cluster integrated energy system with land energy terminal and hybrid energy storage system is established. The internal heterogeneous flow coupling model of the system is constructed, and the material energy flow conversion and the coupling relationship of each module in the system are analyzed. A wind-photovoltaic-gas-energy storage-hydrogen coupled low-carbon optimal scheduling model of offshore oil and gas platform cluster is established, and the feasibility and effectiveness of the proposed model are verified by numerical simulation.

**Key words:** offshore oil and gas platform cluster; integrated energy system; wind-photovoltaic-gas-energy storage-hydrogen coupling; hydrogen fuel cell; heterogeneous flow coupling; energy flow analysis; low-carbon optimal operation