

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230685

光储式 5G 通信基站集群灵活性聚合与协同调度策略

张禄澳¹, 范一芳^{1,2}, 王宇轩¹, 周斌¹, 窦青¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 山西省交通科技研发有限公司, 山西 太原 030032)

摘要: 5G 通信基站通常配备光储, 数量庞大、功耗可调, 是一种优质的电力灵活性调节资源。提出了多类型光储式 5G 基站集群灵活性资源聚合方法以及参与电网调峰的协同调度策略。首先, 分析休眠机制下多类型基站功耗可调特性与计及基站备用电量的储能调节能力。基于极限场景思想, 构建了光储式 5G 基站的灵活性空间量化模型。在此基础上, 利用闵可夫斯基和法刻画异构基站柔性资源的时空耦合能量轨迹, 得到海量基站集群的灵活性资源聚合可调域。其次, 建立了基站集群聚合资源参与电能量市场和辅助服务市场的协同调度优化模型, 提出了基于交替方向乘法(alternating direction method of multipliers, ADMM)的分层分布式基站集群协同优化调度策略, 将大规模基站集群调度问题降维分解为统一协同调峰功率响应、聚合功率自治调度和基站集群功率分配 3 个子问题进行求解。通过算例对比分析可知, 所提策略可降低通信基站 69.86%的用能成本, 为提升通信资源利用率和电力系统灵活调节能力提供了有效手段。

关键词: 5G 基站; 灵活性聚合; 闵可夫斯基和; 电网调峰; 分布式优化

Flexible aggregation and coordinated scheduling strategy for renewable powered 5G communication base station clusters

ZHANG Luao¹, FAN Yifang^{1,2}, WANG Yuxuan¹, ZHOU Bin¹, DOU Qing¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Shanxi Transportation Technology Research & Development Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract: 5G communication base stations are numerous and usually equipped with photovoltaic and energy storage and their power consumption is adjustable. It is a high-quality resource for flexible power regulation. This paper proposes a flexible resource aggregation method for multi-type renewable powered 5G communication base station clusters and a coordinated scheduling strategy for participating in power system peak shaving. First, the adjustable power consumption characteristics of multiple types of base stations under the sleep mechanism and the regulating capacity of energy storage considering the reserve power of the base station are analyzed. A flexibility space quantification model considering the impact of the uncertainty of solar power generation and base station communication load on the power feasible region of flexible resources for renewable powered 5G base stations is formulated based on the idea of limit scenarios. The flexible resource aggregation adjustable domain of a massive base station cluster is obtained using the Minkowski sum method to depict the spatio-temporal coupled energy trajectory of heterogeneous base station flexibility resources. Second, an optimal scheduling optimization model for base station flexibility resources participating in the electric energy market and auxiliary service market is established. Also a hierarchical distributed day-ahead peak shaving scheduling strategy based on the ADMM algorithm is proposed. The problem of large-scale base station cluster scheduling is decomposed into three sub-problems: unified collaborative peak shaving power response, aggregated power autonomous scheduling, and base station cluster power allocation for an iterative solution. Through the simulation test and comparative analysis, the proposed strategy can reduce the energy cost of communication base stations by 69.86%. This provides an effective means to improve the utilization of communication resources and the flexible regulation capability of the power system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277091 and No. 51877072).

Key words: 5G communication base station; flexibility aggregation; Minkowski sum; power system peak shaving; distributed optimization

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277091, 51877072); 湖南省杰出青年基金项目资助(2021JJ10019)

0 引言

2021 年国家工业和信息化部印发的《“十四五”信息通信行业发展规划》明确指出要全面部署通信网络基础设施,标志着我国 5G 通信基站进入了高速增长期^[1]。随着 5G 基站数量规模化的增长,通信基站运营商的用电成本和投资运营成本也成倍增加。据统计,2021 年 5G 网络耗电量大约 250 亿 kWh,碳排放量超过 1500 万吨^[2],预计到 2025 年 5G 基站全年能耗将达到 2000 亿 kWh^[3]。如何降低基站设备功耗,提高网络能效,降低碳排放,减少通信基站运营商的用电压力是 5G 网络发展和深入普及过程中需要不断探索和解决的关键问题^[4]。为解决基站能耗和运营商用电成本过高的问题,国内三大运营商已在西北、西南和沿海城市逐步开展了风光互补新能源基站的建设试点工作并取得了初步成效。大量具备新能源和闲置储能的基站结合其自身的功耗可调节性,可以作为特殊的分布式小型微网参与电网互动运行,通过参与电力需求响应、辅助服务市场等方式获取收益以抵消高昂的用电成本,提高 5G 网络资源和设施利用率^[5-7]。因此,研究光储式 5G 通信基站集群柔性资源分层分布式的协同调度策略对于实现电网和通信基站运营商双方互利共赢具有重要意义。

目前,国内外学者对通信基站优化运行策略展开了大量研究^[8-15]。在基站的功耗管理方面,文献[16]提出一种用于微基站网络的休眠策略,通过适当部署无人机辅助基站填补低能效基站休眠的覆盖漏洞,将无线网络二维拓扑扩展到三维,提升了休眠策略中用户连接切换的灵活性和微基站群的能效。文献[17]综合考虑能量唤醒水平和可用网络资源比,用基于模糊逻辑的唤醒策略避免了基站频繁切换的情况发生。文献[18]同时考虑用户平均接入率和下行传输信道容量来优化三维微基站通信网络的参数配置,该方案为微基站蜂窝网络节省了大约五分之一的能耗。在通信基站群参与电网互动运行方面,文献[19]分析了基站发射功率、系统带宽对系统性能指标的影响,评估无线网络的吞吐量、能量效率和频谱效率性能。文献[20]提出了基站的灵活性评估模型,建立了基站柔性资源与主动配电网联合调度模型。文献[21]针对可再生能源辅助供电的基站,提出基于深度强化学习的用户关联和功率控制联合优化方法。文献[22]根据不同区域基站的负载差异,分析了基站备用储能电池的可调度容量,基于此提出基站备用电池的调度策略,获取储能峰谷套利的收益。文献[23]将多个微电网和基站连接

在主动配电网中并提出考虑通信可靠性的微电网能量共享策略。但现有研究尚未从能源的角度去优化基站群体的供能方式,难以充分利用基站所具备的各类设施和资源,且大都忽略了新能源发电波动性、基站休眠机制和通信负载迁移协同作用下对基站用电负荷调节和储能调度的影响。

针对以上问题,本文提出了光储式基站集群柔性聚合模型与分层分布式协同调度策略,主要创新性工作如下。

1) 提出了多类型通信基站集群的柔性资源聚合与灵活性量化方法,建立了考虑光伏出力和基站通信负载随机性的光储式 5G 通信基站的灵活性量化模型,构建了基于闵可夫斯基和的大量异构基站柔性资源的时空耦合能量轨迹刻画方法。

2) 提出了光储式基站集群参与电网调峰的分层分布式协同调度策略,构建了光储式基站集群参与电网互动的分层分布式协同运行架构,建立了基站集群聚合资源参与电能量市场和调峰辅助服务市场的协同优化调度模型,提出了基于交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)的基站集群分层分布式优化调度策略。

1 基站集群柔性资源的灵活性聚合建模

1.1 5G 通信基站柔性资源的可调特性分析

光储式 5G 基站的主要柔性资源有备用电池储能资源、基站可调用电负荷和光伏资源,下面将依次分析这 3 类主要资源的调节特性。基站备用电池的调节特性和普通的储能电池类似,但是基站备用电池需要预留一定的备用容量以防止在配电网故障时基站失电导致通信中断,其容量下限不仅由电池本身的放电容量下限决定,而且需要考虑当前基站通信负载和相应备电时间下的备电容量,因此基站备用电池的调节能力用式(1)~式(5)表示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ES,j,t}^{ch} \leq P_{ES,j}^{ch,max} \\ 0 \leq P_{ES,j,t}^{dis} \leq P_{ES,j}^{dis,max} \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{ES,j,t+1} = E_{ES,j,t} + \eta_{ES,j}^{ch} P_{ES,j,t}^{ch} \Delta t - P_{ES,j,t}^{dis} \Delta t / \eta_{ES,j}^{dis} \quad (2)$$

$$E_{ES,j,t}^{down} \leq E_{ES,j,t} \leq E_{ES,j}^{max} \quad (3)$$

$$E_{ES,j,t}^{res} = \int_t^{t+T^{res}} P_j^{bs} dt \quad (4)$$

$$E_{ES,j,t}^{down} = \max(E_{ES,j}^{min}, E_{ES,j,t}^{res}) \quad (5)$$

式中: $P_{ES,j,t}^{ch}$ 和 $P_{ES,j,t}^{dis}$ 分别表示基站 j 备用电池当前时刻的充电功率和放电功率; $P_{ES,j}^{ch,max}$ 和 $P_{ES,j}^{dis,max}$ 分别表示基站 j 备用电池的最大充电功率和最大放电功

率; $E_{ES,j,t}$ 表示 t 时刻基站 j 备用电池的剩余容量; $\eta_{ES,j}^{ch}$ 、 $\eta_{ES,j}^{dis}$ 分别表示基站 j 备用电池充电系数和放电系数; Δt 表示调度时间间隔; P_j^{bs} 表示基站电池的备用功率; T^{res} 表示基站电池的备用时间; $E_{ES,j}^{max}$ 和 $E_{ES,j}^{min}$ 分别表示基站 j 备用电池的自身容量上限和下限; $E_{ES,j,t}^{res}$ 表示考虑通信负载的基站 j 备用容量; $E_{ES,j,t}^{down}$ 表示基站 j 备用电池的可调容量下限。

基站需要满足不同通信业务负荷下的用户需求, 因此基站通信设备本身具有可调节性, 通信运营商可以根据基站的负载情况选择基站的运行模式, 轻载基站已有通道关断、载波关断以及深度休眠等方式来调节基站能耗, 对于可休眠的轻载基站来说, 其功率的灵活性调节下限可以低至休眠功耗, 其中宏基站每个时段的功率灵活性调节限值表示为

$$P_{BS,j,t}^{max} = P_{BS,j}^{max} \quad (6)$$

$$P_{BS,j,t}^{min} = \begin{cases} P_{BS,j,t}^L, q = 1 \\ P_{BS,j}^{sleep}, q = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{BS,j,t}^{max}$ 和 $P_{BS,j,t}^{min}$ 分别为宏基站 j 在 t 时刻的可调功率上限和下限; $P_{BS,j}^{max}$ 为宏基站 j 在 t 时刻的最大活动功耗; $P_{BS,j,t}^L$ 为宏基站 j 在 t 时刻的最低负载功耗; $P_{BS,j}^{sleep}$ 为宏基站 j 的休眠功耗, $q = 1$ 表示宏基站处于正常活动状态不可休眠, $q = 0$ 表示宏基站为轻载可休眠状态。微基站每个时段的功率 $P_{MBS,j,t}$ 灵活调节上下限分别为其最大活动功耗 $P_{MBS,j}^{max}$ 和休眠功耗 $P_{MBS,j}^{sleep}$, 如式(8)所示。

$$P_{MBS,j}^{sleep} \leq P_{MBS,j,t} \leq P_{MBS,j}^{max} \quad (8)$$

基站的光伏资源属于分布式小容量光伏, 不具备灵活调节能力。基站光伏首先满足基站的供电需求, 然后把多余的电能向电网输送或存储在基站备用电池中。本文把每个时段光伏出力视作恒定功率并采用虚拟电池模型(virtual battery, VB)来描述基站各类型柔性资源的可调特性。

$$P_{ES,j,t}^{min} + P_{BS,j,t}^{min} - P_{PV,j,t} \leq P_{j,t} \leq P_{ES,j,t}^{max} + P_{BS,j,t}^{max} - P_{PV,j,t} \quad (9)$$

$$E_{j,t} \leq E_{ES,j,t}^{max} + \sum_{\tau=1}^{\tau=t-1} (P_{BS,j,\tau}^{max} - P_{PV,j,\tau}) \Delta t \quad (10)$$

$$E_{ES,j,t}^{min} + \sum_{\tau=1}^{\tau=t-1} (P_{BS,j,\tau}^{min} - P_{PV,j,\tau}) \Delta t \leq E_{j,t} \quad (11)$$

$$E_{j,t+1} = E_{j,t} + P_{j,t} \Delta t \quad (12)$$

式中: $P_{PV,j,t}$ 为基站 j 在 t 时刻的光伏发电功率; $P_{j,t}$ 和 $E_{j,t}$ 分别为光储式基站 j 虚拟电池的整合功率和容量; $E_{ES,j,t}^{max}$ 、 $E_{ES,j,t}^{min}$ 分别为光储式基站 j 虚拟电池容量的上下限值。

1.2 考虑不确定性资源的光储式基站可调节域刻画

光储式基站所涉及的不确定性来自于光伏受太阳辐照度和气象等因素影响的出力波动, 以及基站通信用户行为的随机性。本文采用极端场景的思想, 生成多个光伏出力场景和基站通信负载场景, 选取其灵活性最差的场景来确定光储式基站的 VB 模型参数, 以保证所得到的灵活性可调域在各种随机场景下都不会超出其最大调节能力。结合确定性模型式(9)~式(12)可以得到考虑光伏出力和基站通信业务负载不确定性的光储式基站 VB 模型。

$$P_{j,t}^{min} + \max_{b,s} (\xi_{BS,j,t}^b - \xi_{PV,j,t}^s) \leq P_{j,t} \leq P_{j,t}^{max} - \max_s \xi_{PV,j,t}^s \quad (13)$$

$$E_{j,t} \leq E_{j,t}^{max} - \sum_{\tau=1}^{\tau=t-1} (\max_s \xi_{PV,j,\tau}^s) \Delta t \quad (14)$$

$$E_{j,t} \geq E_{j,t}^{min} + \left(\max_b k \xi_{BS,j,t}^b + \sum_{\tau=1}^{\tau=t-1} \max_{b,s} (\xi_{BS,j,\tau}^b - \xi_{PV,j,\tau}^s) \right) \Delta t \quad (15)$$

$$E_{j,t+1} = E_{j,t} + P_{j,t} \Delta t \quad (16)$$

式中: s 为光伏出力场景; $\xi_{PV,j,t}^s$ 为 s 场景下 t 时刻基站 j 光伏功率的随机变量误差; b 表示基站通信负载场景; $\xi_{BS,j,t}^b$ 为 b 场景下 t 时刻基站 j 负载功耗的随机变量误差; k 为基站备用电量与基站最低负载功耗相关的比例系数。

1.3 基于闵可夫斯基和的基站集群灵活性聚合模型

对于海量异构且分布广泛的多类型通信基站, 需要一个统一的模型来描述基站集群各类型柔性资源的灵活性特征, 并将它们聚合等效为一个新的整体, 使其能够更高效地参与电力市场互动运行, 便于电网的统一管理和调度。本文基于闵可夫斯基和的方法在单个光储式基站 VB 模型的基础上对多个基站柔性资源进行聚合。通过 VB 模型整合海量异构光储式基站灵活性资源的可调范围, 得到基站集群灵活性资源的可调范围为

$$Z_{cluster,i} = Z_1 \oplus Z_2 \oplus \dots \oplus Z_j \quad (17)$$

式中: $Z_{cluster,i}$ 为基站集群 i 资源整合后的灵活性可调域集合; Z_1, Z_2, \dots, Z_j 为集群 i 内各个基站资源的灵活性可调域集合; \oplus 表示闵可夫斯基和运算。

基于闵可夫斯基和的光储式基站集群灵活性聚合具体步骤如图 1 所示。主要包括以下步骤: 1) 输

入所有站的备用电池参数、可调负荷参数等相关参数，采用蒙特卡洛方法生成光伏出力多场景随机误差和通信负载多场景随机误差。2) 根据基站通信负载量将基站分为可休眠基站和活跃状态基站，分别计算各基站资源的 VB 模型参数，建立单个基站资源的 VB 模型。3) 将各基站资源的 VB 模型转化为多边形可调域，在每个时段对所有基站资源该时段可调域进行闵可夫斯基求和。4) 输出调度时段 T 的基站集群聚合资源可调域。其中，闵可夫斯基求和采用三角剖分求和的方式，将多边形可调域划分为多个三角形，对各组三角形的顶点坐标集合分别求和，并用凸包包裹得到求和后的多边形可调域。5) 根据时间间隔 Δt 更新迭代基站集群灵活性资源的信息，重新执行步骤 2) 直至当天优化结束。

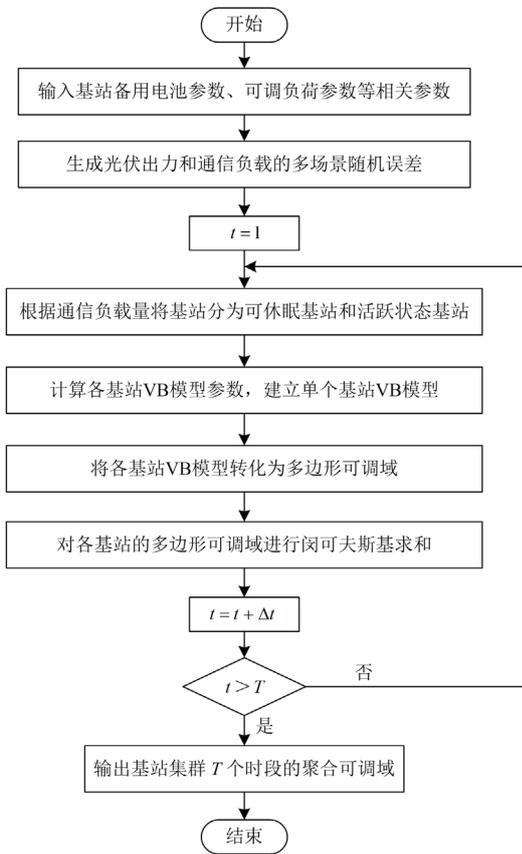


图 1 基站集群灵活性量化方法流程图

Fig. 1 Flow chart of base station cluster flexibility quantification method

2 光储式基站集群聚合功率参与电网调峰的协同调度策略

2.1 基站集群与电网互动的分层分布式协同架构

国内的 5G 基站主要由四大通信运营商进行建设和维护，基站的铁塔、机房等部分基础设施建设

则归属中国铁塔公司。总体来说 5G 基站的所有权相对集中，无需考虑单个基站的利益。在本文的研究中将具有基站建设、运营、维护的公司主体统称为通信基站运营商。考虑 5G 通信基站运营商的整体利益，对于通信基站运营商内部的利益划分暂不做详细研究。基于此，本文构建了光储式基站集群参与电网互动运行的分布式协同架构，如图 2 所示。

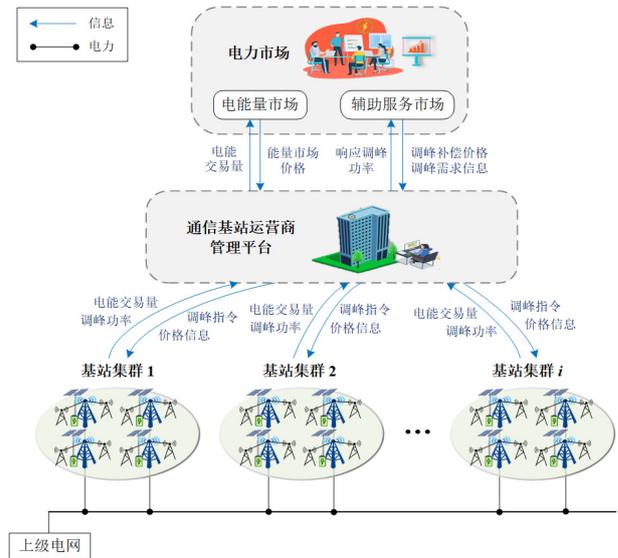


图 2 光储式基站集群参与电网互动的分布式协同架构

Fig. 2 Distributed coordinated framework of renewable powered base station clusters participating in grid interaction

该架构主要包括各类型基站集群、通信基站运营商和电网公司三大主体，各主体信息传递和处理的媒介包括基站本地智能终端、基站集群控制器、通信基站运营商管理平台和电力市场信息交换接口，电能由基站直接通过配电网节点进行传输。云端管理平台不再直接与大量基站本地智能终端直接交互，而是增加了基站集群控制器这一中介。各基站集群控制器将本区域内相互独立分散的基站多类型资源进行聚合量化，然后根据通信基站运营商管理平台传递的电力市场价格信息，对本集群总体调度方案进行优化，确定各时段的电能交易量和调峰量并发送给运营商管理平台。运营商管理平台接收电力市场的价格信息并向下传递，并根据接收到的调峰需求量协调各基站集群的调峰功率。

2.2 基站集群聚合功率的电网调峰优化调度策略

在上文所述的框架中，5G 基站集群以多种角色参与电力市场交易，同时在电能量市场和辅助服务市场进行交易，而基站集群在电能量市场中的交易将影响其可用于辅助服务调峰的调节容量，因此需要综合考虑基站集群在两个市场中交易的能量，并

对参与两个市场获得的收益进行权衡, 共同制定基站集群的日前调度方案。基站集群聚合功率参与电网调峰的优化调度模型以通信基站运营商参与电能市场和辅助服务市场后的运营成本最小为优化目标, 目标函数由所有基站集群参与电能市场交易成本和收益、辅助服务市场的调峰收益和调峰成本构成, 如式(18)所示。

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (\lambda_{i,t}^c P_{i,t}^c - (\lambda_{i,t}^c + \lambda_{i,t}^{\text{up}}) P_{i,t}^{\text{up}} - \lambda_{i,t}^{\text{down}} P_{i,t}^{\text{down}} + c_{i,t}^{\text{up}} P_{i,t}^{\text{up}} + c_{i,t}^{\text{down}} P_{i,t}^{\text{down}}) \Delta t \quad (18)$$

式中: I 和 T 分别为所调度的基站集群数和调度时段; $\lambda_{i,t}^c$ 为基站集群 i 在 t 时刻参与日前电能市场交易的单位电价; $P_{i,t}^c$ 为 t 时刻基站集群 i 的日前电能市场交易功率, $P_{i,t}^c > 0$ 表示 t 时刻基站集群 i 向电网的购电功率, $P_{i,t}^c < 0$ 表示 t 时刻基站集群 i 向电网的传输电能; $\lambda_{i,t}^{\text{up}}$ 和 $\lambda_{i,t}^{\text{down}}$ 分别表示 t 时刻辅助服务市场中基站集群 i 向电网提供的向上、向下调峰补偿价格; $P_{i,t}^{\text{up}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{down}}$ 分别为 t 时刻基站集群 i 参与辅助服务市场提供的向上、向下调峰功率; $c_{i,t}^{\text{up}}$ 和 $c_{i,t}^{\text{down}}$ 分别为 t 时刻基站集群 i 的向上、向下调峰成本; Δt 为调度单位时间间隔。

约束条件包括移动用户动态接入约束、调峰需求平衡约束、上调峰和下调峰功率约束、计及调峰功率的能量变化约束、能量市场交易功率和能量约束, 具体表示如下所述。

1) 调峰需求平衡约束

基站集群参与调峰辅助服务应当尽量与电网的调峰需求相匹配, 定义基站集群的调峰总响应系数表示全部基站集群能够响应的调峰量, 约束表达式如式(19)所示。

$$w_t^{\text{ans}} P_t^{\text{req}} = \sum_{i=1}^I (P_{i,t}^{\text{up}} - P_{i,t}^{\text{down}}) \quad (19)$$

式中: w_t^{ans} 为 t 时刻全部基站集群的调峰总响应系数变量, 其范围为 $w_t^{\text{ans}} \in [0, 1]$; P_t^{req} 为 t 时刻的电网上下调峰需求量, $P_t^{\text{req}} > 0$ 表示 t 时刻为向上调峰需求, $P_t^{\text{req}} < 0$ 表示 t 时刻为向下调峰需求。

2) 移动用户动态接入

基站可以通过调整接入的移动用户来调整自身的通信负载率和功耗, 具体约束如式(20)一式(23)所示。

$$W_{j,t}^L = \sum_{u=1}^U W_{u,t} \gamma_{u,j,t} \quad (20)$$

$$P_{j,t}^b = P_{j,t}^S + \frac{P_{\text{active},j}^{\text{max}}}{\eta_j} (1/W_j^{\text{max}} \cdot \sum_{u=1}^U W_{u,t} \gamma_{u,j,t}) \quad (21)$$

$$d_{u,j,t} \gamma_{u,j,t} \leq d_j^{\text{max}} \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^J \gamma_{u,j,t} = 1 \quad (23)$$

式中: $P_{j,t}^S$ 表示基站 j 在 t 时刻的静态功率; $P_{\text{active},j}^{\text{max}}$ 表示基站 j 的最大动态功率; $d_{u,j,t}$ 为 t 时刻用户聚合点 u 与基站 j 的距离; $\gamma_{u,j,t}$ 表示基站 j 与用户聚合点 u 的连接关系, $\gamma_{u,j,t} = 1$ 表示基站 j 与用户聚合点 u 连接, $\gamma_{u,j,t} = 0$ 则表示与用户聚合点 u 未连接; $W_{u,t}$ 表示用户聚合点 u 在 t 时段所占用的带宽资源; $W_{j,t}^L$ 表示基站 j 在 t 时刻占用的带宽; d_j^{max} 为基站 j 的最大覆盖半径; J 表示基站集合; η_j 表示与基站功放相关的效率系数; $P_{j,t}^b$ 表示基站 j 在 t 时刻的通信负载; W_j^{max} 为基站提供的最大带宽。

3) 上调峰和下调峰功率约束

基站集群的上、下调峰功率应当在日前电能市场交易功率的基础上不超出各基站集群聚合资源的灵活性可调空间, 同时调峰功率不应当超出电网需求的最大限值, 并且上调峰和下调峰不允许同时进行, 约束表达如式(24)一式(28)所示。

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{up}} \leq P_{i,t}^c - P_{i,t}^{\text{min}} \quad (24)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{down}} \leq P_{i,t}^{\text{max}} - P_{i,t}^c \quad (25)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{up}} \leq \beta_{i,t}^{\text{up}} P_{i,t}^{\text{up,max}} \quad (26)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{down}} \leq \beta_{i,t}^{\text{down}} P_{i,t}^{\text{down,max}} \quad (27)$$

$$0 \leq \beta_{i,t}^{\text{up}} + \beta_{i,t}^{\text{down}} \leq 1 \quad (28)$$

式中: $\beta_{i,t}^{\text{up}}$ 和 $\beta_{i,t}^{\text{down}}$ 分别为基站集群 i 在 t 时刻的上调峰状态变量和下调峰状态变量, 均为二进制变量; $P_{i,t}^{\text{up,max}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{down,max}}$ 均设置为与电网的最大调峰需求量相等。

4) 计及调峰功率的能量变化约束

基站集群提供调峰功率会引起聚合资源等效剩余能量的变化, 在计及调峰功率引起的能量变化后等效剩余容量仍应不超出聚合资源可行域空间, 即 $E_{i,t}^{\text{reg}} \in Z_{\text{cluster},i}$, 其约束如式(29)和式(30)所示。

$$E_{i,t}^{\text{min}} \leq E_{i,t}^{\text{reg}} \leq E_{i,t}^{\text{max}} \quad (29)$$

$$E_{i,t+1}^{\text{reg}} = E_{i,t}^{\text{reg}} + P_{i,t}^c \Delta t - P_{i,t}^{\text{up}} \Delta t + P_{i,t}^{\text{down}} \Delta t \quad (30)$$

式中, $E_{i,t}^{\text{reg}}$ 为计及基站集群 i 在 t 时刻电能市场交易功率、向上调峰功率和向下调峰功率后的等效剩余

容量。此外,能量市场交易功率和能量约束见式(13)一式(16)。

在集中式模型中各基站集群需要向通信基站运营商管理平台传递各自的聚合资源可调域信息,由通信基站运营商管理平台集中优化各集群的调度方案,变量数量多且计算相对复杂。因此,本文提出基于 ADMM 的基站集群分层分布式协同调度优化方法,将集中式模型转化为上层协调调峰响应功率、下层各基站集群自治调度的分层分布式模型,上下层相互迭代求得调度优化结果。上下层的耦合约束主要体现在式(19),为了使基站集群之间完全解耦无信息交互,需要引入解耦辅助变量 $\hat{P}_{i,t}^{\text{up}} = P_{i,t}^{\text{up}}$ 、 $\hat{P}_{i,t}^{\text{down}} = P_{i,t}^{\text{down}}$,进一步根据 ADMM 的原理构造该问题的增广拉格朗日函数,如式(31)所示。

$$L = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (\lambda_{i,t}^c P_{i,t}^c - (\lambda_{i,t}^c + \lambda_{i,t}^{\text{up}}) P_{i,t}^{\text{up}} - \lambda_{i,t}^{\text{down}} P_{i,t}^{\text{down}} + c_{i,t}^{\text{up}} P_{i,t}^{\text{up}} + c_{i,t}^{\text{down}} P_{i,t}^{\text{down}}) \Delta t + \lambda_i^T (P_i^{\text{reg}} - \hat{P}_i^{\text{reg}}) + \frac{\rho}{2} \|P_i^{\text{reg}} - \hat{P}_i^{\text{reg}}\|_2^2 \quad (31)$$

式中: $P_i^{\text{reg}} = \{P_i^{\text{up}}, P_i^{\text{down}}\}$, $\hat{P}_i^{\text{reg}} = \{\hat{P}_i^{\text{up}}, \hat{P}_i^{\text{down}}\}$, 其中 P_i^{up} 、 P_i^{down} 、 \hat{P}_i^{up} 、 \hat{P}_i^{down} 分别为 $P_{i,t}^{\text{up}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{down}}$ 、 $\hat{P}_{i,t}^{\text{up}}$ 、 $\hat{P}_{i,t}^{\text{down}}$ 包含 T 个调度时段的优化向量; λ_i 为拉格朗日乘子向量; ρ 为耦合约束的惩罚系数。

采用 ADMM 的缩放形式将拉格朗日乘子进行缩放得到 $u_i = \lambda_i / \rho$,进一步将原来的集中式调度问题分解为下层各基站集群子问题和上层通信基站运营商管理平台子问题,下层第 i 个基站集群子问题的目标函数表示为

$$\min_{x_i} L_i(x_i, \hat{P}_i^{\text{reg}}, u_i) = \sum_{t=1}^T ((\lambda_{i,t}^c P_{i,t}^c - (\lambda_{i,t}^c + \lambda_{i,t}^{\text{up}}) P_{i,t}^{\text{up}} - \lambda_{i,t}^{\text{down}} P_{i,t}^{\text{down}} + c_{i,t}^{\text{up}} P_{i,t}^{\text{up}} + c_{i,t}^{\text{down}} P_{i,t}^{\text{down}}) \Delta t) + \frac{\rho}{2} \|P_i^{\text{reg}} - \hat{P}_i^{\text{reg}} + u_i\|_2^2 \quad (32)$$

式中: $x_i = \{P_i^c, P_i^{\text{up}}, P_i^{\text{down}}, E_i^c, E_i^{\text{up}}, E_i^{\text{down}}\}$; u_i 为进行缩放后的拉格朗日乘子向量; L_i 表示第 i 个基站的增广拉格朗日函数。

上层通信基站管理平台子问题的目标函数表示为式(33),约束条件为式(20)一式(30)。

$$\min_{w_i^{\text{ans}}, \hat{P}_i^{\text{reg}}} L_2(w_i^{\text{ans}}, \hat{P}_i^{\text{reg}}, P_i^{\text{reg}}, u_i) = \sum_{i=1}^I \frac{\rho}{2} \|P_i^{\text{reg}} - \hat{P}_i^{\text{reg}} + u_i\|_2^2 \quad (33)$$

至此,集中式调度模型已解耦为下层各基站集群子问题和上层通信基站运营商管理平台子问题。

上层和下层各子问题通过交互调峰功率变量不断迭代,最终达成一致得到各基站集群的日前电能交易、辅助服务调峰调度方案以及基站集群总体的调峰响应功率。

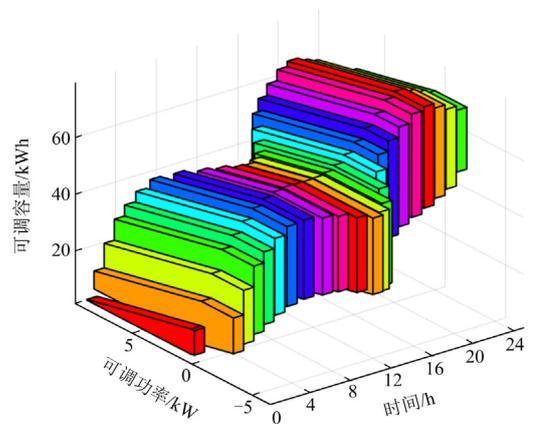
3 算例分析

3.1 仿真系统描述

本文以 $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ 区域内的光储 5G 基站群作为研究对象,在该区域内均匀分布有 100 个光储式 5G 宏基站,每个宏基站均配置一组 $48 \text{ V}/500 \text{ Ah}$ 的磷酸铁锂梯次电池作为基站备用电池储能。电池额定容量为 24 kWh ,最大充电功率均为 5 kW ,充电效率均为 0.95 ,SOC 上限为 0.95 ,SOC 下限为 0.1 。所有基站的站间距均为 600 m ,用户聚合点共 3600 个,区域内包含商业区、居民区和大学园区 3 种功能子区域,在本文看作 3 个集群,分别部署 5G 基站的数量为 175、175、450 个,用户聚合点的数量分别为 1260、1260、1080 个,每个功能子区域内用户聚合点的通信带宽需求变化参考文献[22, 24]进行设置。居民区和大学园区分别采用生活用电电价和市政优惠电价,商业区执行三档的峰谷平电价,宏基站休眠负载率阈值设为 0.3 ,微基站休眠负载率阈值设为 0.6 ,基站通信设备单位资源块功耗为 0.2 W 。算例仿真基于 Matlab 软件平台实现,采用 YALMIP 工具箱编程,通过 CPLEX 求解器进行求解。ADMM 的分层分布式算法中的惩罚系数取 10^{-5} ,收敛误差精度取 10^{-4} 。

3.2 基站集群灵活性量化与聚合分析

采用 VB 模型对分布式架构下各主动配电网中的光储式 5G 基站的可调节域进行刻画,单个光储式基站在活跃状态和可休眠状态下的灵活性资源聚合可调域三维图如图 3 所示。



(a) 活跃状态光储式宏基站

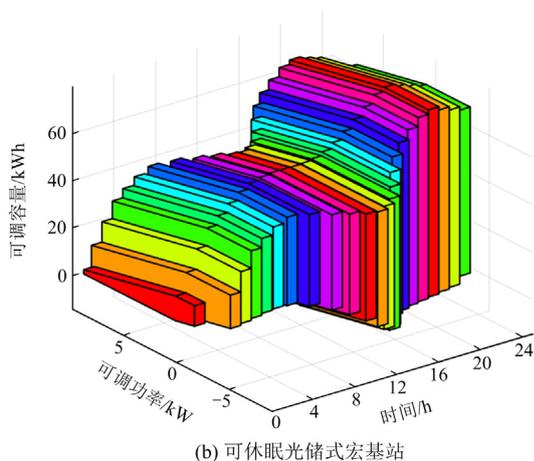


图 3 单个光储式 5G 宏基站可调域

Fig. 3 Adjustable domain of single renewable powered 5G macro base station

图 3 所示 5G 宏基站可调域的每个时间断面表示单个光储式基站每个时刻的功率与容量的可调节范围, 可以看出灵活性资源的可调功率和容量是相互制约的, 并且在不同时刻和不同状态下形态各异。由于基站可调用电负荷为了保证最小通信负载也具有一定的双峰特征, 可调功率和可调能量随时间变化都呈现出峰谷。储能可调容量和用电负荷调节光伏受光伏波动的影响, 午时可调功率和容量上下限整体降低。此外, 在调度开始和结束时段受初始容量和最大充放电功率的限制, 可调容量范围较小。

为了量化不同类型基站集群可调资源聚合后的灵活性, 采用闵可夫斯基和对 30 个活跃状态光储宏基站、5 个可休眠光储宏基站和 60 个可休眠微基站的可调资源进行聚合, 聚合后基站集群的功率与容量可调范围以及各类型基站所贡献可调范围如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 在所设定的基站集群中, 活跃状态光储基站由于数量多而单体可调能力较强,

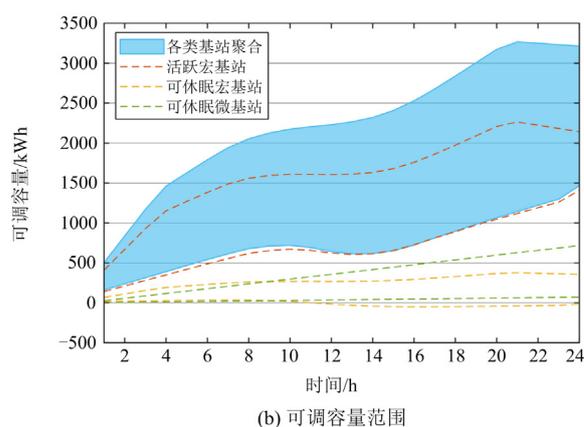
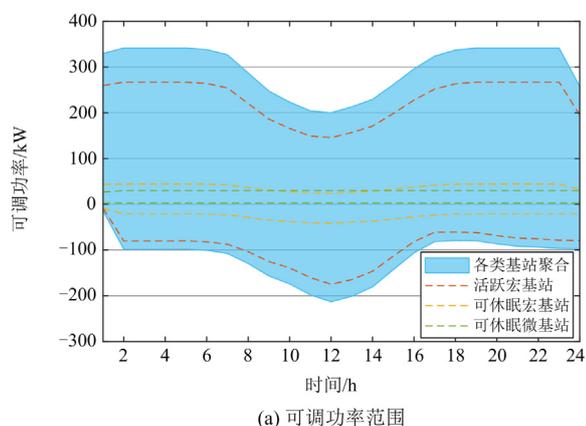


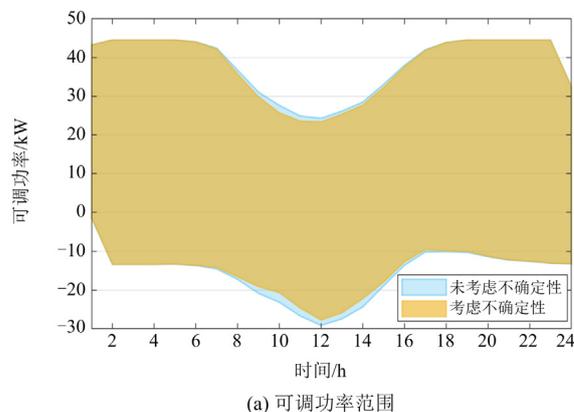
图 4 各类基站聚合可调范围对比

Fig. 4 Comparison of the adjustable range of each type of base station aggregation

其贡献的可调范围最大且与总体可调范围上下限趋势最为接近。可休眠光储宏基站虽然比活跃状态基站调节能力强, 但为保证通信需求, 可休眠宏基站数量很少, 总体可调能力相比活跃状态基站群仍较弱。而微基站虽然数量庞大, 但是其单体容量远小于宏基站, 所以可调能力在三类基站群中最弱, 并且其资源类型单一, 只有固定功率容量的可调负荷, 可调范围上下限为两条直线。

光储式基站的光伏系统受太阳辐照度和气象等因素影响会出现功率波动, 通信用户行为也具有较强不确定性。基站光伏功率与通信负载的不确定性会影响通信基站的功率和容量的可调域。本文以 5 个活跃状态光储式宏基站为例, 对比考虑光伏出力和基站通信负载不确定性前后的基站集群的功率与容量可调范围, 对比结果如图 5 所示。

由功率可调范围的变化可以看出, 在有光伏出力的时段可调范围缩小比较明显, 说明光伏出力不确定性对可调范围的影响比基站通信负载不确定性对可调范围的影响更大。虽然在考虑了不确定性之



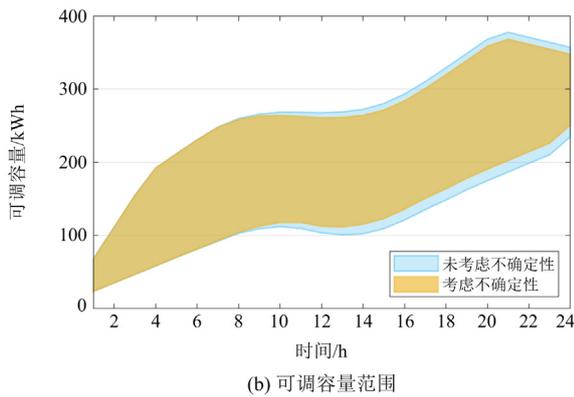


图5 考虑不确定性的基站可调范围对比

Fig. 5 Comparison of the adjustable range of base station clusters considering uncertainties

后基站群功率和容量的可调范围均有所减小，但是考虑不确定性后所得到的灵活性范围是在极限场景都能够达到的，能够保证灵活性资源为电网提供备用或调峰调频的计划功率和容量。

3.3 基站集群聚合功率的电网调峰协同调度对比

在本文提出的光储式基站集群聚合功率参与电网调峰的协同调度策略下，各基站集群的调峰功率响应量和电网调峰需求量对比如图6所示。

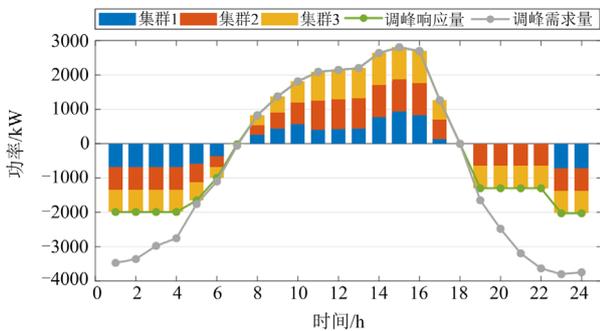


图6 各基站集群调峰功率响应量和调峰需求量

Fig. 6 Peak shaving power response and demand of each base station cluster

由图6可知，在电网有向上调峰需求的时段，各基站集群能够在保证自己运营成本最低的同时完全响应电网调峰需求，而在向下调峰需求的时段各基站集群调峰响应程度较低，各时段平均调峰响应系数为0.74，能够在一定程度上缓解电网调峰压力。

为了进一步验证考虑移动通信用户动态接入和基站休眠对基站集群聚合资源灵活性和参与电力市场效果的影响，设计了4种方案分别对各基站集群交易功率和运营成本等指标进行对比分析。方案1：本文所提方案；方案2：考虑基站休眠但不考虑用户动态接入；方案3：不考虑基站休眠但考虑用

户动态接入；方案4：基站休眠与用户动态接入均不考虑。不同方案下基站集群运营成本等指标对比结果如表1所示。表1中各方案的节约成本是该方案相比基站集群不参与电网互动节约的成本。

表1 不同方案下基站集群优化结果对比

Table 1 Comparison of base station cluster optimization results under different schemes

方案	方案1	方案2	方案3	方案4
总运营成本/元	6043.04	6310.95	8801.04	8926.76
能量市场费用/元	8013.40	8248.86	10 771.40	10 864.67
辅助调峰市场利润/元	1970.36	1937.91	1970.36	1937.91
节约成本/元	14 008.41	13 740.50	11 250.41	11 124.69
节约成本百分比/%	69.86	68.53	56.11	55.48

对比表1中方案1和方案2可知，考虑移动用户动态接入后各基站集群成本有不同程度的减少，全部基站总运营成本降低了267.91元。方案1与方案3相比，在考虑休眠之后运营成本均有不同程度的降低，全部基站总运营成本降低了2758.00元，说明考虑休眠机制相比考虑移动用户动态接入更有利于基站集群参与电力市场获取较高收益，同时对能量市场费用和辅助调峰市场利润，可以看出在本文算例的调峰需求场景下休眠机制使基站集群在能量市场中的获利更多。方案3与方案4相比，集群1成本明显降低，而集群2和集群3成本均略有升高，全部基站总运营成本仅降低了125.72元。由此可见，移动用户动态接入和基站休眠相互影响，对基站集群参与市场的能力具有一定的叠加效果，同时考虑这两种方式能够更进一步地增加基站集群聚合资源的调节能力，使其能够更灵活地参与电力市场交易进而获得更高收益，帮助通信基站运营商换取更低的用电成本，证实了本文所提方法的有效性。

为验证本文所提分层分布式算法的收敛性，将ADMM迭代过程中的原始残差和对偶残差变化过程以及本文设置的收敛阈值进行对比，结果如图7所示。为了更直观地呈现残差的大范围变化，图中数据均为对数形式，图中数据均为对数形式， $\log(r)$ 为原始残差， $\log(s)$ 为对偶残差， $\log(\epsilon_r)$ 为原始残差的收敛阈值， $\log(\epsilon_s)$ 为对偶参数的收敛阈值。原始残差阈值与对偶残差阈值取值相等，残差低于阈值则代表迭代收敛。由图7可知，随着迭代次数增加，原始残差和对偶残差在轻微震荡后均逐渐减小，在第43次迭代后两个残差均达到了收敛阈值要求并持续下降，在第85次迭代后趋于稳定，分层分布式方法与集中式方法的总目标偏差均小于 10^{-5} 。此外，对比了不同基站数量下集中式与分层分布式方

法的求解时间, 基站集群数量分别为 1000、3000、5000 时, 本文所提的分层分布式协同调度方法计算时间分别为 10.65 s、10.89 s、10.37 s, 计算时间不会随基站集群的规模增大而明显增加, 表明本文所提方法适用于大规模基站集群的协同调度, 减轻了海量数据集中处理计算的负担, 具有良好的可扩展性。

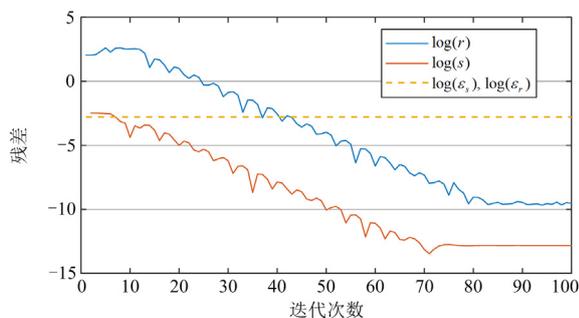


图 7 ADMM 迭代过程原始残差与对偶残差收敛曲线

Fig. 7 Convergence curves of original residuals and pairwise residuals during ADMM iteration

4 结论

本文构建了光储式基站集群灵活性资源的聚合量化模型, 提出了基站集群聚合资源参与电网调峰的协同调度策略, 通过算例仿真可得到以下结论。

1) 所提方法能够有效刻画单个基站和多类型基站集群聚合资源的功率-能量可调域, 为基站灵活性资源聚合参与电网互动提供基础。考虑光伏出力 and 通信负载不确定性虽然缩小了聚合资源的可调域范围, 但是能够让基站资源参与电网互动的调度计划得以保证, 减少违约情况发生。考虑休眠机制能够扩大基站聚合资源的可调域范围, 使基站集群的可调功率平均提升 22.50%。

2) 基站集群资源聚合后能够响应调峰需求, 同时考虑移动用户动态接入和基站休眠机制可以进一步提升基站集群聚合资源的调节能力, 有助于基站集群参与电网互动获取更高收益, 使基站集群节省成本百分比从 55.48%提升到 69.86%, 所提分层分布式协同调度方法能够实现调峰功率的统一协调和各基站集群独立自治调度, 对大规模基站集群进行调度时总目标求解偏差均小于 10^{-5} , 具有良好的收敛性和可扩展性。

参考文献

- [1] 工业和信息化部. 《“十四五”信息通信行业发展规划》[EB/OL]. (2021-11-01)[2023-04-10]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/16/content_5651262.htm.
- [2] 中国联通研究院. 中国联通 5G 智能节能技术白皮书 V3.0[EB/OL]. (2022-06-24). [2023-04-10]. <https://www.digitalelite.cn/h-nd-4632.html>.
- [3] 周宸宇, 冯成, 王毅. 基于移动用户接入控制的 5G 通信基站需求响应[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5452-5462.
ZHOU Chenyu, FENG Cheng, WANG Yi. Demand response of 5G communication base stations based on admission control of mobile users[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5452-5462.
- [4] LENG B, GUO X, ZHENG X, et al. A wait-and-see two-threshold optimal sleeping policy for a single server with bursty traffic[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2017, 1(4): 528-540.
- [5] JIANG Z, KRISHNAMACHARI B, ZHOU S, et al. Optimal sleeping mechanism for multiple servers with MMPP-based bursty traffic arrival[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 7(3): 436-439.
- [6] 邹晓峰, 沈冰, 蒋献伟. 5G 通信条件下配网差动保护快速动作方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 163-169.
ZOU Xiaofeng, SHEN Bing, JIANG Xianwei. A quick action scheme of differential protection for a distribution network with 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 163-169.
- [7] 尚立, 李毅超, 蔡硕, 等. 基于 IRS 辅助的北斗+5G 融合定位[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 137-143.
SHANG Li, LI Yichao, CAI Shuo, et al. Beidou + 5G fusion positioning based on IRS assistance[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 137-143.
- [8] 张丽婧. 考虑 5G 运营商备用储能参与的电力系统优化调度[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
ZHANG Lijing. Research on optimal scheduling of 5G base station energy storage aggregators considering communication reliability[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [9] 岑海凤, 许苑, 王军伟, 等. 通信基站备用电池的云端储能系统设计与应用[J]. 电源技术, 2020, 44(6): 902-904.
CEN Haifeng, XU Yuan, WANG Junwei, et al. Design and application of cloud energy storage system for backup battery in communication base station[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(6): 902-904.
- [10] 梁子龙, 李晓悦, 邹荣庆, 等. 基于 5G 通信智能分布式馈线自动化应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 24-30.
LIANG Zilong, LI Xiaoyue, ZOU Rongqing, et al. Intelligent distributed feeder automation application based on 5G communication[J]. Power System Protection

- and Control, 2021, 49(7): 24-30.
- [11] LAHIRY A, LE K N, BAO V N Q, et al. Analytical evaluation of power-amplifier-based charging methodology and energy efficiency optimization framework for aerial base stations[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(5): 4451-4472.
- [12] HU X, LIU Z, YU X, et al. Convolutional neural network for behavioral modeling and predistortion of wideband power amplifiers[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022, 33(8): 3923-3937.
- [13] ZHAO L, WAN S, KANG K, et al. A general digital predistortion linearization scheme for hybrid beamforming system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(1): 654-663.
- [14] PAPAFAEIROPOULOS A, BJÖRNSON E, KOURTESSIS P, et al. Scalable cell-free massive mimo systems: impact of hardware impairments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(10): 9701-9715.
- [15] WU Q, LI G Y, CHEN W, et al. An overview of sustainable green 5G networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(4): 72-80.
- [16] CHANG W, MENG Z T, LIU K C, et al. Energy-efficient sleep strategy for the UBS-assisted small-cell network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(5): 5178-5183.
- [17] WANG H, HUANG M, ZHAO Z, et al. Base station wake-up strategy in cellular networks with hybrid energy supplies for 6G networks in an IOT environment[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(7): 5230-5239.
- [18] 潘子宇, 胡晗, 杨洁. 基于休眠机理的三维小基站蜂窝网络能效优化[J]. 物理学报, 2017, 66(23): 7-14.
PAN Ziyu, HU Han, YANG Jie. Energy efficiency optimization in three-dimensional small cell networks based on dormant strategy[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(23): 7-14.
- [19] 向征, 李自强. 基于并网太阳能光伏/电池系统的无线网络低功耗供电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 152-162.
- XIANG Zheng, LI Ziqiang. Low power strategy of a wireless network based on a grid-connected solar photovoltaic/cell system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 152-162.
- [20] PIOVESAN N, LÓPEZ-PÉREZ D, MIOZZO M, et al. Joint load control and energy sharing for renewable powered small base stations: a machine learning approach[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2021, 5(1): 512-525.
- [21] JANG J, YANG H J. Deep learning-aided user association and power control with renewable energy sources[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(4): 2387-2403.
- [22] 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.
- [23] CHEN L, WANG J, WU Z, et al. Communication reliability-restricted energy sharing strategy in active distribution networks[J]. Applied Energy, 2021, 282.
- [24] 从子奇. 基于数据挖掘的 TD-LTE 基站负载研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
CONG Ziqi. Research on TD-LTE base station load based on data mining[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.

收稿日期: 2023-06-06; 修回日期: 2023-07-25

作者简介:

张禄澳(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网灵活性规划与经济性分析; E-mail: zhangluao1001@hnu.edu.cn

范一芳(1998—), 女, 硕士, 研究方向为配电网规划与调度; E-mail: 506607415@qq.com

周斌(1984—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为智能电网分析与规划。E-mail: binzhou@hnu.edu.cn

(编辑 魏小丽)