

计及参与调峰辅助服务的智慧基站光储系统优化运行策略研究

崔磊,朱静,唐锋来

(华能江苏综合能源服务有限公司,南京 210015)

摘要:随着5G基站建设不断推广,基站能耗大、成本高的问题备受关注。通过光储系统的配置和优化运行,并进一步参与调峰辅助服务,可有效提升5G基站用能的经济性,同时实现绿色能源在5G基站中的规模应用。因此,针对5G基站光储系统参与电网调峰辅助服务的经济性开展了研究。首先,根据基站负荷特性和不同调峰时段建立了考虑光储系统参与调峰辅助服务的优化目标模型;然后,采用CPLEX优化求解工具进行优化模型的求解,获取储能的最优容量和运行策略;最后,构建了储能单独参与调峰、光储联合参与调峰等场景,通过算例分析了不同调峰模式对储能的优化配置容量和5G基站用能成本有较大的影响,可为5G智慧基站光储系统参与调峰辅助服务的优化运行提供了参考。

关键词:5G基站;光储联合调峰;调峰时段;经济性

Study on the optimal operation strategy of PV and energy storage system for smart base stations considering participation in peak regulation auxiliary services

CUI Lei, ZHU Jing, TANG Fenglai

(Huaneng Jiangsu Comprehensive Energy Service Co., Ltd., Nanjing 210015, China)

Abstract: As the construction of 5G base stations continues to spread, the issue of high energy consumption and high cost of base stations is a major concern. Through the configuration and optimal operation of photovoltaic (PV) and energy storage, and further participation in peak regulation auxiliary services, the economy of 5G base station energy use can be effectively improved, and the scale application of green energy in 5G base stations can be realized. Therefore, the economics of 5G base station PV and energy storage systems participating in peak regulation auxiliary services are studied. Firstly, an optimization goal model considering the participation of PV and energy storage systems in peak regulation auxiliary services is established according to the load characteristics of base stations and different peak regulation periods; Then, CPLEX optimization solver is used to solve the optimization model and obtain the optimal capacity and operation strategy of energy storage. Finally, the scenarios of energy storage independently participating in peak regulation and PV and storage jointly participating in peak regulation are constructed with different peaking modes are built and cases show that greatly affect the optimal configuration capacity of energy storage and the energy cost of 5G base stations. A reference for the optimal operation of 5G smart base station optimal storage system participating in peak regulation auxiliary services can be provided.

Key words: 5G base station; peak regulation with PV and energy storage system; peak regulation period of load; economy

0 引言

至2022年底,我国5G基站数量已突破200万座^[1]。预计到2025年,5G基站年总用电量将达到2 000亿kWh。因此,高能耗问题给运营商5G基站的推广带来了巨大挑战,同时在“双碳”背景下也面临着能源和环境的双重压力。

针对上述问题,通过光储系统实现降耗提效、绿色用能和节约用电成本,已开展了诸多研究。目前,针对5G基站的光储供电系统应用研究^[2-6]主要集中在光储容量配置和降低基站用能成本两个方面。

本文针对5G基站中配置的光储系统,建立了不同调峰模式下的经济性优化目标,采用CPLEX进行优化求解;通过多场景的典型日算例仿真,验证了智慧基站光储系统参与电网调峰辅助服务的可行性,为5G智慧基站参与电网辅助服务提供了一定的参考。

1 智慧基站中的光储系统拓扑

智慧基站中的光储系统主要由光伏发电设备、控制开关、储能电池以及通信设备组成。如图1所示,光伏和储能直接与配电箱连接,外电通过电能表后进入,配电箱调配电能给用电设备,包括空调、照明、插座、基站通信设备和储能电池,其中开关 Q_1 控制是否通过电网给蓄电池充电, Q_2 控制光储是否

收稿日期:2023-08-21;修回日期:2023-10-24

基金项目:中国华能集团公司科技项目(HN-49A0-2022
00025-PWQT00021)

联合运行。

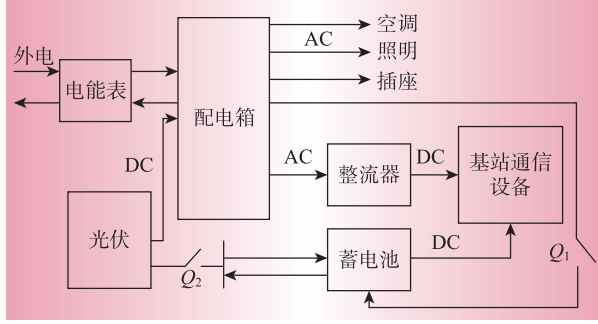


图1 光储系统典型拓扑

Fig. 1 Typical topologies of photovoltaic and energy storage systems

2 考虑5G基站参与电网调峰服务的优化模型

2.1 目标函数

本文从5G智慧基站日运行成本的角度出发,建立计及光储系统参与调峰辅助服务^[7]收益的优化模型,模型中重点考虑了基站日运行中的购电费用、储能额外放电补贴、储能损耗成本以及参与电网调峰辅助服务的收益,目标函数如式(1)所示

$$F = C_1 + C_2 + C_3 \quad (1)$$

式中: C_1 为基站日运行过程中的电网购电成本,具体如式(2)所示

$$C_1 = \sum_{t=1}^{24} P_g(t) C_{\text{buy}}(t) \Delta t \quad (2)$$

式中: $P_g(t)$ 为 t 时刻的购电功率; $C_{\text{buy}}(t)$ 为 t 时刻的电网购电电价; Δt 为采样时间间隔; C_2 为储能参与辅助服务的成本,主要包括损耗成本和补贴收益两部分

$$C_2 = (P_b C_{\text{PCS}} + E_{\text{bat}} C_{\text{bat}}) \frac{0.5}{L_f(R_1)} + \sum_{t=1}^{24} [0.5 - 0.5 \text{sgn}(P_b(t))] \rho_{\text{bat}}(t) \Delta t \quad (3)$$

式中: P_b 为储能额定运行功率; E_{bat} 为储能额定容量; C_{PCS} 和 C_{bat} 分别为储能单位功率成本和能量成本; $\frac{0.5}{L_f(R_1)}$ 为储能循环半个周期的寿命损耗,即额外放电寿命损耗; $L_f(R_1)$ 为储能在 R_1 的放电深度下的剩余循环寿命^[8]; R_1 为电池放电深度。

储能日运行一天内的总放电量

$$L_f(R_1) = 5112 - 14122R_1 + 12823R_1^2 - 5R_1^3 - 3278R_1^4 \quad (4)$$

式中: $P_b(t)$ 为 t 时刻的储能充放电功率; $\rho_{\text{bat}}(t)$ 为储能 t 时刻的额外放电补贴; $\text{sgn}(x)$ 为符号函数,用于提取计算储能日运行一天的总放电量,原理如式(5)所示

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (5)$$

C_3 为基站光储系统参与电网辅助服务的收益

$$C_3 = \sum_{t=1}^{24} \mu(t) P_{\text{p, sell}}(t) C_p(t) \Delta t \quad (6)$$

式中: $P_{\text{p, sell}}(t)$ 为 t 时刻的售电功率,为负值; $C_p(t)$ 为调峰价格; $\mu \in \{0, 1\}$, 当 $\mu = 0$, 表示为智慧基站光储系统不参与辅助服务,所采取的运行策略为光伏自发自用,用电短缺时从电网购电,当 $\mu = 1$, 表示为智慧基站光储系统参与辅助服务。

2.2 约束条件

(1) 光储系统供用电功率平衡约束

基站光储系统正常运行,必须保证各个装置用能和供能平衡,平衡关系如式(7)所示

$$P_{l,t} + P_{\text{cha},t} = P_{v,t} + P_{\text{dis},t} + P_g(t) \quad (7)$$

式中: $P_{l,t}$ 为 t 时刻基站的用能需求; $P_{\text{cha},t}$ 和 $P_{\text{dis},t}$ 分别为 t 时刻的储能充放电功率,由于本文研究对象是智慧基站场景,储能容量较小,故将储能充放电效率忽略不计; $P_{v,t}$ 为 t 时刻的光伏发电功率; $P_g(t)$ 为 t 时刻的购电功率。

(2) 储能状态约束

在系统运行过程中,考虑到电化学储能时刻工作在安全区域,起到一定的保护作用,对储能的充放电量的平衡、荷电状态、以及充放电功率等进行约束

$$\sum_{t=1}^{24} P_{\text{cha},t} + \sum_{t=1}^{24} P_{\text{dis},t} = 0 \quad (8)$$

$$\min S_{\text{OC}} \leq S_{\text{OC}}(t) \leq \max S_{\text{OC}} \quad (9)$$

$$S_{\text{OC}}(1) = S_{\text{OC}}(24) \quad (10)$$

$$S_{\text{OC}}(t+1) - S_{\text{OC}}(t) \leq 0.3 \quad (11)$$

$$-\lambda_1 P_{\text{cs}} \leq P_{\text{bat}}(t) \leq \lambda_2 P_{\text{cs}} \quad (12)$$

式中: $\lambda_1 + \lambda_2 \in [0, 1]$, $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 1$ 为储能充电, $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0$ 为储能放电; P_{cs} 为储能额定功率,使用0-1整数变量控制储能充放电状态不能同时进行。

(3) 购电功率约束

电网出力应在系统运行所允许的范围以内,即最大购电功率应小于基站接入变压器的最大需求,也就是基站负荷的最大功率,从而保证基站光储系统的稳定、安全和经济运行

$$-\beta_1 P_{\text{buy}} \leq P_g(t) \leq \beta_2 P_{\text{buy}} \quad \beta_1 + \beta_2 \in [0, 1] \quad (13)$$

式中: $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 1$, 为购电; $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = 0$, 为售电; P_{buy} 为电网出力所允许的最大值,其取值依据基站负荷最大需求功率而定。

2.3 模型求解

本文构建模型的约束条件中既含有0-1整数变量,又包含连续性变量,所建立的优化模型属于混合整数模型,通过结合 CPLEX 优化求解工具实现优化模型的求解。因此,将在 Matlab 2018 中使用求解器 CPLEX 和 Yalmip 工具箱结合算例求解,主要包括模型建立、场景构建、优化求解及结果分析。

3 算例分析

3.1 基础数据及参数设置

本文依据江苏省某一 5G 基站的典型日光伏发电曲线和日负荷曲线对建立的优化模型和方法进行可行性验证和分析,其中,基站典型日光伏发电和负荷曲线如图 2 所示,模型运行参数设置如表 1 所示,主要包括储能单位功率成本、单位能量成本、储能充放电状态值、购电功率值、购电电价以及调峰补贴电价。其中,电网购电电价依据江苏电费收费标准 2022 第二档的费用标准,调峰补贴电价参考《江苏省用户侧储能调峰辅助服务的标准》。

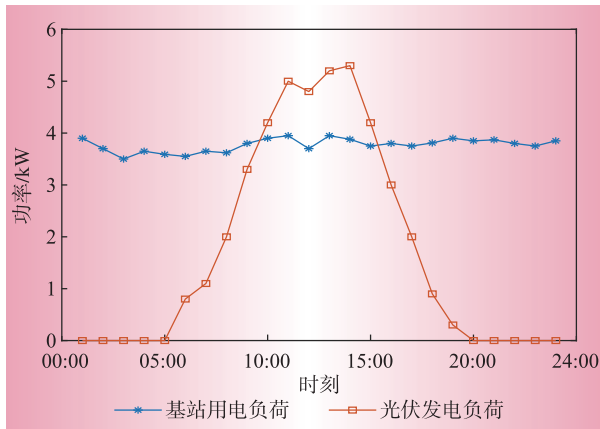


图2 某5G基站典型日光伏发电及负荷曲线

Fig. 2 PV power and load curves on a typical day in a 5G base station

表1 参数设置

Table 1 Parameter Settings

参数	设置	参数	设置
$C_{PCS}/(\text{元} \cdot \text{W}^{-1})$	0.08	$\Delta T/h$	1
$C_{bat}/(\text{元} \cdot \text{Wh}^{-1})$	1.30	R_i	0.8
$\min S_{OC}$	0.1	P_{buy}/kW	4
$\max S_{OC}$	0.9	$C_p/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.80
$S_{OC}(1) = S_{OC}(24)$	0.3	$C_{buy}/(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	0.58
P_{CS}/kW	4	用电峰时 $t \in [08:00, 21:00]$	

3.2 场景构建

为验证所提方案和模型的有效性,在算例仿真之前,通过建立不同时长的调峰响应场景,验证智

慧基站光储系统在不同时间段参与电网调峰辅助服务的经济性和可行性。

首先,规定调峰的需求响应时间均在江苏省电网的峰时阶段内,结合基站源荷运行数据和优化模型,构建了智慧基站光储系统不参与调峰、不同时间尺度参与调峰等 5 种场景,具体描述如表 2 所示。

表2 场景构建

Table 2 Scenario construction

场景构建	名称	调峰响应时段	调峰阶段出力特征
不参与调峰	场景 1		
储能单独参与调峰	场景 2	20:00—21:00	光伏不再出力
光储联合调峰	场景 3	10:00—15:00	光伏出力充足,不需从电网购电
	场景 4	09:00—18:00	一天内的光伏出力阶段
	场景 5	11:00—15:00	光伏出力峰值阶段

3.3 结果分析

将智慧基站光伏发电和负荷基础数据带入到本文的模型中求解,计及电网功率、储能状态等约束条件。

首先对光储系统不参与调峰服务的场景进行仿真分析,通过优化得到基站不参与电网辅助服务的源储优化运行曲线,如图 3 所示。

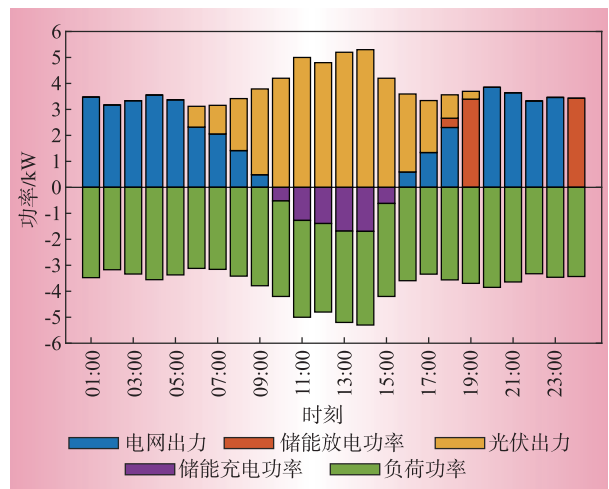


图3 光储系统不参与电网辅助服务的源储优化运行曲线
Fig. 3 Power supply and storage optimal operation curves of PV and energy storage system without participating in grid auxiliary services

从图 3 可以看出,智慧基站不参与辅助服务,光伏发自自用,光伏出力过剩时通过储能对未消纳的光伏进行吸收,晚间光伏出力不足时储能放电。在此场景中储能发挥的主要作用是消纳多余光伏,晚间放电,降低电网购电功率。基于上述方法,分别对基站光储系统参与调峰辅助服务的 4 个场景进

行了仿真分析,通过在优化模型中加入不同时长的调峰时间响应,即 $\mu=1$,且调峰时段不同,从而得到不同调峰响应下的源荷优化运行曲线,如图4所示。

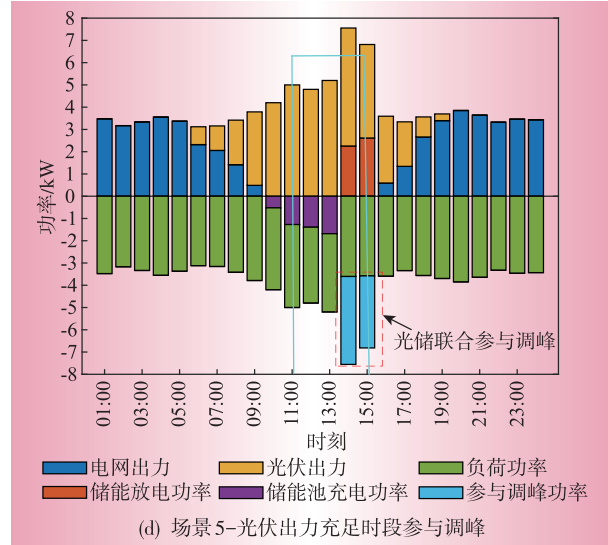
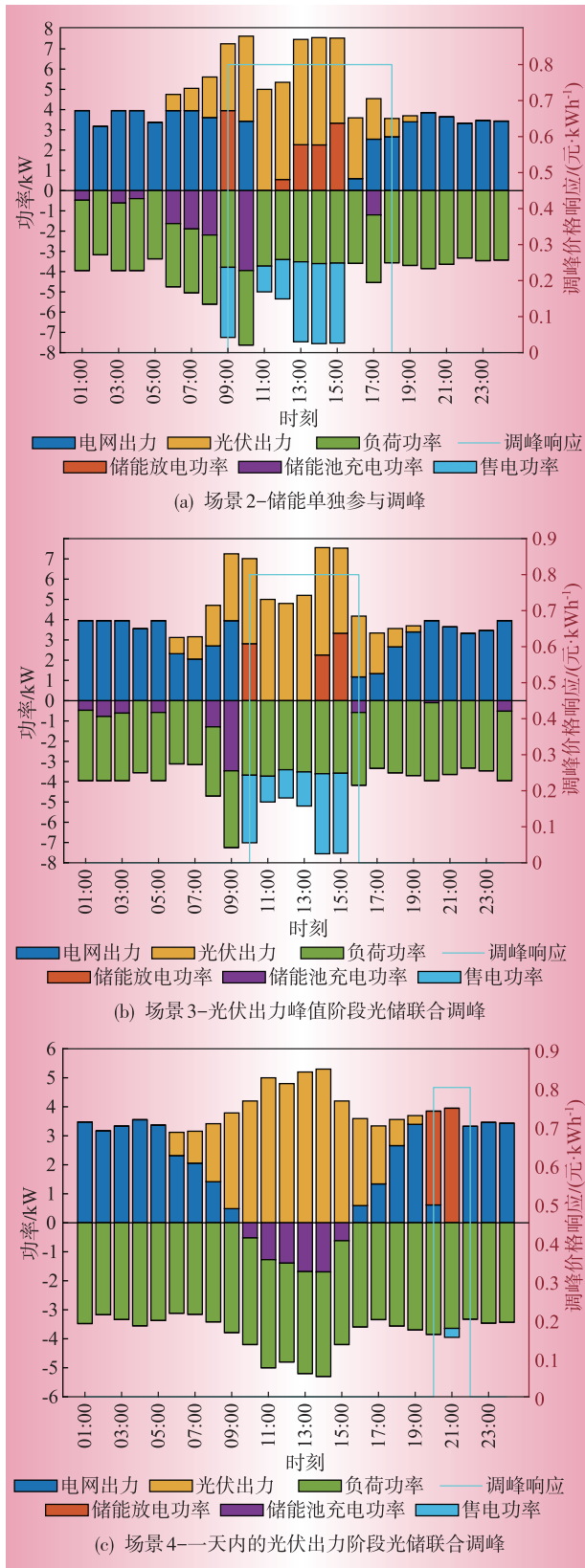


图4 光储系统参与调峰辅助服务的源储优化运行曲线

Fig. 4 Power supply and storage optimal operation curves of PV and energy storage system participating in auxiliary peak regulation auxiliary services

从图4可以看出,光储系统在不同时间尺度下参与调峰,基站源荷优化运行曲线特性不同,光储系统参与调峰辅助服务的调峰量、储能容量配置、电网购电量等指标都有差异,然而,从图4(a)很明显的可以看出储能单独参与调峰辅助服务的效果并不突出。为了更加清晰地对比各场景的优化结果,在不同场景下的模型优化求解过程中,对一些重要评价指标进一步计算,统计结果如表3所示。

表3 仿真结果

Table 3 Simulation results

场景	电网总出力/kWh	电网出力占总负荷的百分比/%	储能容量/kWh	储能功率/kW	调峰收益/元	基站净支出/元
场景1	41.71	49.60	8.0	3.40		25.60
场景2	42.01	50.01	8.0	3.95	0.25	26.20
场景3	48.20	58.20	5.3	2.60	4.31	24.50
场景4	60.23	71.70	13.7	3.95	18.52	19.98
场景5	57.20	68.00	9.3	3.30	12.46	23.15

从表3可以看出,智慧基站光储系统参与调峰辅助服务时段不同,产生不同的经济效益,各场景下的基站净支出相差不大,场景4的优化结果最小,场景2的净支出最大,但仅相差6.22元。从电网总出力的角度分析,光储系统不参与电网辅助服务的情况下,电网购电量仅为41.71 kWh,而场景4高达60.23 kWh,这是因为基站光储系统联合参与辅助服务时,基站的负荷需求中包括了储能的充电需求,导致了电网的购电量相比于不调峰的场景较大,如图4所示。虽然调峰场景下购电量更大,但光储联合参与调峰的效果明显,可以得到调峰辅助服务补贴较多;从储能

配置的角度来看,不同场景的储能容量配置相差较大;从参与电网调峰的角度来看,不同调峰场景的收益不同,其中场景4调峰作用最明显,调峰收益高达18.52元,场景5(光储联合运行在光伏出力充足的阶段参与电网调峰)次之。综上,为更明显地对比不同场景下优化目标参数,不同场景的电网购电量、储能容量、调峰收益和净支出对比如图5所示。

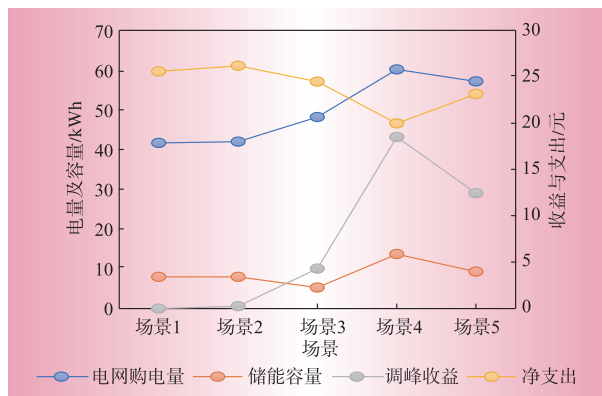


图5 不同场景下的各类指标对比

Fig. 5 Each indicator comparison under different scenarios

可以看出,从智慧基站光储系统运行角度出发,若以基站日运行电费净支出最小为目标,建议选择场景4(光储联合在光伏出力整个阶段参与调峰)的运行模式,场景4日运行的净支出相比于不参与调峰降低了22%;若以降低电网购电量为目标,提高智慧基站的绿色用能,建议选择场景1的运营模式,但场景1不参与电网调峰辅助服务,调峰收益为0;若以智慧基站储能的初始投资成本最小为目标,建议选择场景3(光储联合运行在光伏出力充足的整个过程中参与电网调峰)的运营模式,此时储能配置容量仅为5.3 kWh,相比于不参与调峰辅助服务的场景仍低2.7 kWh,大大降低了储能的初始投资成本;若以智慧基站光储系统参与电网辅助服务收益最大为目标,建议选择场景4的运营模式,其调峰效果最佳,调峰收益高达18.52元,从而降低了基站光储系统的日运行净支出,提升了基站用能经济性。

4 结束语

本文探讨了5G智慧基站光储系统参与调峰辅助服务的经济性和优化运行策略,建立了考虑光储系统参与电网调峰辅助服务的优化目标,计及功率、能量等约束条件,并基于某5G基站的典型日运行数据进行了算例仿真,根据光储系统在不同调峰场景下的仿真结果得到,光储联合系统在光伏出力全天参与调峰辅助服务的日运行净成本最小,但该场景下的储能配置容量较大,初始投资成本较大;光储系统不参与调

峰时日运行净成本较大,但可降低电网购电量,提升基站的绿色用能。因此,根据基站光储系统不同规划目标,可采用本文提出的对应的优化运行策略,为5G智慧基站光储系统优化运行提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 侯程诚,陈众,王力.考虑通信负载的光储系统与5G基站协调优化模型[J].电工电能新技术,2023,42(6):34-43.
HOU Chengcheng, CHEN Zhong, WANG Li. Optimization model of coordination between optical storage system and 5G base station considering communication load[J]. New Technology of Electrical Energy, 2023, 42(6): 34-43.
- [2] 钱康,苗安康,周江山,等.“双碳”背景下多站融合方案及关键技术研究[J].供用电,2022,39(9):11-17,34.
QIAN Kang, MIAO Ankang, ZHOU Jiangshan, et al. Research on multi-station fusion scheme and key technologies under the background of “dual carbon”[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(9): 11-17, 34.
- [3] 李金雨,宋福龙,马俊杰,等.基于5G基站可调度潜力与配电网集群划分的储能选址定容方法[J].电力系统自动化,2023,47(18):151-160.
LI Jinyu, SONG Fulong, MA Junjie, et al. Energy storage location and capacity determination method based on the dispatching potential of 5G base station and distribution network cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 151-160.
- [4] GUO Y, XU J, DUAN L, et al. Joint energy and spectrum cooperation for cellular communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 62(10): 3 678-3 691.
- [5] 王湘艳,陈宁,王维洲,等.计及置信容量的光热电站储热容量优化配置[J].电力工程技术,2022,41(5):103-109,115.
WANG Xiangyan, CHEN Ning, WANG Weizhou, et al. Thermal storage capacity optimization of a solar thermal power station with confidence capacity[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 103-109, 115.
- [6] 刘雨佳,樊艳芳.计及5G基站储能和技术节能措施的虚拟电厂调度优化策略[J].电力系统自动化,2022,34(1):8-15.
LIU Yujia, FAN Yanfang. Virtual power plant scheduling optimization strategy considering 5G base station energy storage and technical energy-saving measures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 34(1): 8-15.
- [7] 袁金斗,李德智,周颖,等.5G通信网络环境下可调节负荷应用分析[J].电力需求侧管理,2020,22(3):75-79.
YUAN Jindou, LI Dezhi, ZHOU Ying, et al. Application analysis of adjustable load in 5G communication network [J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(3): 75-79.
- [8] 张海涛,秦文萍,韩肖清,等.多时间尺度微电网能量管理优化调度方案[J].电网技术,2017,41(5):1 533-1 542.
ZHANG Haitao, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Optimal scheduling scheme for multi-timescale microgrid energy management [J]. Power Grid Technology, 2017, 41(5): 1 533-1 542.

作者简介:

崔磊(1980),男,通信作者,江苏南京人,硕士,研究方向为综合能源管理、绿色低碳标准体系、电力信息。

(责任编辑 王蕊)