

计及多种弹性资源储能潜力挖掘的居民台区优化调度策略

周志恒¹, 张琳娟¹, 王晓冬², 罗潘², 韩军伟¹, 刘锴泉^{3,4}

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 郑州 450000; 2. 国网河南省电力公司, 郑州 450000; 3. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 河北 保定 071003; 4. 保定市博宏高科控制技术有限公司, 河北 保定 071000)

摘要: 随着分布式光伏以及充电桩、5G基站等新建设施的广泛普及, 居民台区容易出现峰谷差大、反送电等问题。针对上述问题, 以充分挖掘多种弹性资源的储能潜力为手段, 提出一种计及多种弹性资源协同的居民台区优化调度策略。首先, 建立了居民台区内各单元的数学模型, 分析了电动汽车、5G基站、温控负荷三种弹性资源的用能规律以及储能潜力; 其次, 以三种弹性资源的功率作为决策变量, 考虑功率平衡、设备特性等约束条件, 建立了以削峰填谷和新能源消纳为目标的优化调度模型, 并采用多目标多元宇宙算法(multi-objective multi-verse optimizer, MOMVO)求解最优调度方案; 最后, 考虑短期、中期、长期三种场景下电动汽车渗透率的变化, 通过算例对所提优化调度策略进行了仿真验证。结果表明, 相比于原始台区, 在对多种弹性资源进行优化调度之后, 台区用电负荷峰谷差平均下降了58.9%, 消除了电压越限和光伏发电反送电现象。因此, 所提方法可以充分挖掘不同弹性资源的储能潜力, 有效减少配变过载运行并增强新能源消纳能力, 对提高居民台区安全可靠性和能源利用效率具有重要意义。

关键词: 储能潜力; 电动汽车; 5G基站; 削峰填谷; 新能源消纳

Optimal Scheduling Strategy of Residential Station Area Considering the Potential Mining of Energy Storage of Various Elastic Resources

ZHOU Zhiheng¹, ZHANG Linjuan¹, WANG Xiaodong², LUO Pan², HAN Junwei¹, LIU Kaiquan^{3,4}

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute of Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 3. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071003, China; 4. Baoding Bohong High-Tech Control Technology limited company, Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: With the widespread popularity of distributed photovoltaics, charging piles, 5G base stations and other new infrastructure, residential stations are prone to problems such as large peak-valley difference and reverse power transmission. In order to solve the above problems, by means of fully mining the energy storage potential of a variety of elastic resources, an optimal dispatching strategy is proposed, which takes into account the coordination of multiple elastic resources. Firstly, the mathematical model of each unit in the residential station area is established, and the energy consumption law and energy storage potential of the three elastic resources of electric vehicle, 5G base station and temperature control load are analyzed. Secondly, taking the power of the three elastic resources as the decision-making variable, considering the constraints such as power balance and equipment characteristics, an optimal scheduling model with peak shaving and valley filling and new energy consumption as the goals is established, and the MOMVO algorithm is used to solve the optimal scheduling scheme. Finally, considering the changes of electric vehicle penetration rate in the short-term, medium-term and long-term time scales, the proposed optimal scheduling strategy is simulated and verified by example. The results show that compared with the original station, after optimizing the scheduling of various elastic resources, the peak-valley difference of power load in the platform area decreases by 58.8% on average, eliminating the phenomenon of voltage exceeding the limit and photovoltaic power generation reverse transmission. Therefore, the proposed method can fully mine the energy storage potential of different elastic resources, effectively reduce the overload operation of distribution and enhance the absorption capacity of new energy, which is of great significance for improving the safety reliability and energy utilization efficiency of residential areas.

Key words: energy storage potential; electric vehicles; 5G base station; peak cutting and valley filling; renewable energy consumption

0 引言

构建以新能源为主体的新型电力系统是实现碳达峰、碳中和的重要途径^[1]。随着不同台区内的分布式能源接入日益增多,传统的中央化电网调度难以有效整合台区内过于分散的多种灵活性资源。相较之下,台区级的能量管理与调度变得日益重要。借助物联网技术,可以实现台区内不同设备数据间的采集、传输和反馈,并与上层电网形成连接,从而更好地整合和调度分布式能源,使其融入电网运行调度体系,为电力系统的稳定运行提供新的解决方案。目前,分布式光伏作为一种重要的新能源发电形式,近年来在用户侧的规模已经相当可观^[2]。同时,充电桩、5 G基站等“新基建”设施的广泛接入导致台区用电负荷激增。在用电高峰时,容易出现台区配变过载运行的情况,从而影响台区供电的可靠性与安全性。此外,由于分布式光伏的发电特性与负荷特性不匹配,台区向配电网“反送电”的问题也时常存在。因此,如何挖掘台区弹性资源的储能潜力,促进分布式发电的充分消纳,提高台区用电安全稳定性,是目前亟待解决的问题^[3]。

目前,针对各种弹性资源的储能潜力分析与优化调度,国内外学者已经开展了一定的研究工作。在电动汽车的调节潜力分析与优化调度方面,文献[4]将需求响应(demand request, DR)和电动汽车(electric vehicle, EV)作为用户侧的可调度资源,提出了一种考虑电动汽车及负荷聚合商参与的综合能源系统优化调度方法,并验证了所提模型的有效性和经济性。文献[5]针对电动汽车入网对电网造成负荷波动等问题,从用户侧和电网侧两方面考虑,提出双阶段电动汽车充放电优化调度策略,确认了电动汽车参与电网调度的可行性。文献[6]考虑用户参与电动汽车负荷优化调度意愿和可调节潜力,设计考虑多重用户特征的可调性识别模型,提供了新的建模思路。文献[7]提出了另一种基于虚拟聚合和交流最优潮流(AC optimal power flow, ACOPF)的电动汽车分散式调度策略,仿真结果表明所提出的策略能改善配电网的潮流分布并能够降

低成本。

在温控负荷的调节潜力分析与优化调度方面,文献[8]为解决分布式光伏带给配电网的电压抬升和线路过载问题,提出了一种基于调温启停混合控制方式的空调负荷双层优化调度策略,有效控制节点电压和线路功率在安全范围内。文献[9]考虑光照和围护结构传热过程,充分利用建筑蓄能特性,建立用户侧建筑蓄能模型参与优化调度,为建筑蓄能参与能源优化调度提供一定的参考。文献[10]考虑采暖建筑用户的热负荷弹性,提出了一种基于分时电价需求侧响应的电热联合系统优化调度方法,新能源消纳效果明显。文献[11]针对传统控制方式调节能力有限和温度变化较大的问题,提出了一种基于小脑模型神经网络的混合控制策略。仿真结果表明,所提策略不仅可以提高系统的跟踪精度,而且能够改善用户的满意度。

文献[12]介绍了构成5 G基站的基本设备,基于5 G基站的用电特点分析了其参与需求响应的潜力,为5 G基站参与优化调度提高理论依据。文献[13]提出计及通信负载的基站储能可调度潜力分析方法,建立了5 G基站储能参与电网协同调度模型,达到了辅助电网削峰填谷、降低运行成本的目标。

文献[14]分析了5 G基站的可调度潜力,建立了以电网负荷波动标准差与聚合商收益为目标的优化调度模型,结论表明在降低电网负荷峰谷差的同时也可通信运营商带来较大收益。文献[15]提出一种计及后备储能及空调负荷调度潜力的5 G基站多时间尺度滚动优化方法,结论表明在提升基站运行经济效益的同时又能有效降低源荷波动性对系统实际运行的影响。

在对多种可调资源进行协同优化方面,也取得了一定的进展。文献[16]以综合运行成本最小为目标,提出了一种含多种可控负荷的社区冷热电联供系统协同优化调度方法。但只考虑经济成本,未考虑新能源消纳问题。文献[17]提出了一种基于合作博弈的智慧能源社区协同运行策略,能够有效激励智慧能源社区内个体参与者与社区整体协同运行,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62203172);河南省电力公司科技项目(5217L0220001)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science

Foundation of China(62203172); the Science and Technology Project of Henan Electric Power Company(5217L0220001).

但文中对于弹性负荷的建模不够细致。文献[18]提出了一种基于三层风险规避博弈论的智能建筑与电动汽车协调调度方法,结论表明该策略可以利用智能建筑与电动汽车的调解潜力来改善高负荷时段的电压特性。文献[19]提出了包含空调、地源热泵、电热水器等多种温控负荷的微电网频率调节控制策略,并通过算例研究验证了该策略的有效性。

从以上文献可知,目前已有较多学者研究弹性资源参与电力系统协调优化,但大多只包括单一弹性资源。对多种弹性资源进行协同优化能够更充分挖掘调节潜力,是未来的发展趋势。本文针对居民台区的用电安全性问题与新能源消纳问题,以充分挖掘多种弹性资源的储能潜力为手段,提出一种计及多种弹性资源协同的居民台区优化调度策略。首先,建立了居民台区各单元数学模型,分析了电动汽车、5G基站、温控负荷3种弹性资源的用能规律以及储能潜力;其次,以3种弹性资源的功率作为决策变量,考虑功率平衡、设备特性等约束条件,建立了以削峰填谷和新能源消纳为目标的优化调度模型,并采用多目标多元宇宙算法(multi objective multi-verse optimizer, MOMVO)算法求解最优调度方案;最后,考虑短期、中期、长期3种场景,通过算例对所提优化调度策略进行了验证,并分析了电动汽车渗透率对调度结果的影响。

1 典型台区能源系统构成

居民台区负荷以电负荷与温控负荷为主,供电系统通常包括分布式发电以及供冷/供热系统^[20-23]。本文研究的典型台区能源系统构成如图1所示。

其中,供电系统包括上级配电网、光伏发电系统,用于满足常规电负荷、电制热/制冷系统、电动汽车以及5G基站的用电需求;电制热/制冷系统作为温控负荷,用于满足居民建筑的冷、热需求。电动汽车和5G基站作为台区内的弹性资源,具有较好的储能潜力,可接受调度指令,协助改善台区供电系统的运行品质。

2 台区能源系统数学模型

2.1 分布式光伏发电模型

分布式光伏发电作为台区的电力来源之一,其发电功率主要由太阳辐射强度和温度决定^[24],模型如下:

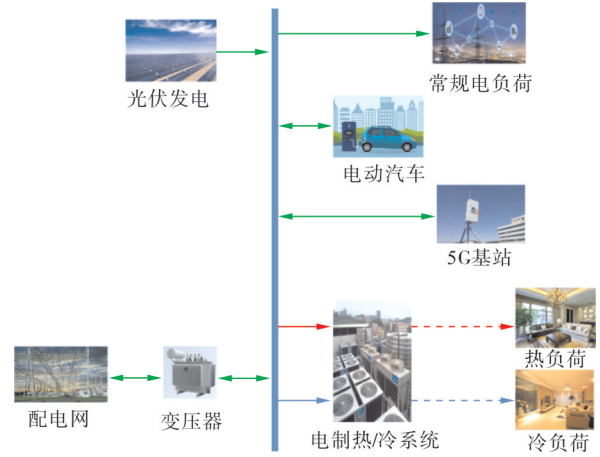


图1 台区能源结构图

Fig. 1 Energy structure diagram of station area

$$P_{PV} = P_0 \frac{E}{E_{ST}} [1 + K(T_s - T_c)] \quad (1)$$

式中: E 为光伏电池实际接收的太阳辐射强度; E_{ST} 为标准太阳辐射强度; P_{PV} 与 P_0 分别为光伏发电系统实际输出功率与额定输出功率; K 为温度相关系数; T_s 与 T_c 分别为光伏电池板实际温度和理想温度。

2.2 电动汽车模型

台区中电动汽车的数量正在快速增加,可视为移动储能单元。本文通过建立电动汽车充放电模型与电动汽车行为模型,分析其参与台区用能优化的可调度潜力。

2.2.1 电动汽车充放电模型

电动汽车充放电模型包括电动汽车电池荷电状态模型、电池充放电模型。电池荷电状态模型如式(2)所示。

$$E_{k,t}^{ev} = \frac{C_{k,t}^{ev}}{C_{k,0}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $C_{k,t}^{ev}$ 为 t 时刻第 k 辆电动汽车电池电量; $C_{k,0}$ 为第 k 辆电动汽车电池额定容量; $E_{k,t}^{ev}$ 为 t 时刻第 k 辆电动汽车电池荷电状态。

电池充放电模型分为静态充放电模型和行驶放电模型。静态充放电模型为:

$$E_{k,t}^{ev} = E_{k,t-1}^{ev} + \frac{\eta_{charge} P_{k,t-1}^{ev,charge}}{C_{k,0}} - \frac{P_{k,t-1}^{ev,disch}}{\eta_{disch} C_{k,0}} \quad (3)$$

式中: $P_{k,t-1}^{ev,charge}$ 、 $P_{k,t-1}^{ev,disch}$ 分别为电动汽车充、放电功率; η_{charge} 、 η_{disch} 分别为电动汽车充、放电效率。

行驶放电模型为:

$$E_{k, \text{init}} = E_{k, \text{exp}} - \frac{L_r}{L_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $E_{k, \text{init}}$ 为电动汽车入网初始荷电状态; $E_{k, \text{exp}}$ 为电动汽车离网荷电状态; L_r 为电动汽车日行驶里程数; L_0 为电动汽车额定里程数。

2.2.2 电动汽车行为模型

电动汽车行为模型通常包括电动汽车日行驶里程、起始充电时间、结束充电时间。2001年美国交通部对全美家用车辆的调查结果(national household travel survey, NHTS)表明,用户行为的概率分布可近似为正态分布,通过极大似然估计可得到相应的均值 μ 及方差 σ ^[25]。

电动汽车日行驶里程影响着电动汽车的入网时间、充电需求以及离网时间,其概率密度函数如下:

$$f(L) = \frac{1}{L\sigma_L\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln L - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2}\right] \quad (5)$$

式中: L 为行驶里程; μ_L 与 σ_L 分别为期望值与标准差,且 $\mu_L=3.2$, $\sigma_L=0.88$ ^[25]。

电动汽车入网时间的概率密度函数如下:

$$f_s(t_{\text{start}}) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{\text{start}} - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2}\right], & \mu_s - 12 < t_{\text{start}} < 24 \\ \frac{1}{\sigma_s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t_{\text{start}} - \mu_s + 24)^2}{2\sigma_s^2}\right], & 0 < t_{\text{start}} < \mu_s - 12 \end{cases} \quad (6)$$

式中: t_{start} 为入网时间; μ_s 与 σ_s 分别为期望值与标准差,且 $\mu_s=17.6$, $\sigma_s=3.4$ ^[25]。

电动汽车离网时间与电动汽车起始充电时间和停车时长有关,概率密度函数如下:

$$f_z(t_{\text{end}}) = \frac{1}{t_{\text{end}}\sigma_z\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln t_{\text{end}} - \mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \quad (7)$$

式中: t_{end} 为离网时间; μ_z 与 σ_z 分别为期望值与标准差,且 $\mu_z=2.74$, $\sigma_z=1.21$ ^[25]。

假设电动汽车接入电网时电量为 $E_{\text{start}}^{\text{ev}}$,用户期望离网时电动汽车电量为 $E_{\text{exp}}^{\text{ev}}$,则电动汽车充放电的可选电量轨迹如下图2所示。电量轨迹上界为:电动汽车在 t_{start} 时刻入网后立即以额定功率充电, t_2 时刻达到期望电量,然后保持不变直至 t_{end} 时刻离网;电量轨迹下界为电动汽车在 t_{start} 时刻入网后立即以额定功率放电, t_1 时刻达到最低电量,然后保持不变,最终在 t_3 时刻以额定功率充电,到 t_{end} 时刻离网时恰好达到期望电量。斜率 k 表示电动汽车充放电功率值,电动汽车充放电的电量轨迹可在上、

下界之间变化,为开展优化调度提供了依据。

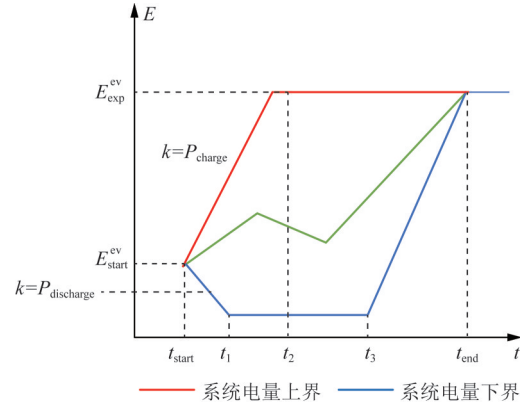


图2 电动汽车储能系统的电量轨迹

Fig. 2 Power trajectory of the electric vehicle energy storage system

根据可调度的电动汽车实际数据对电动汽车储能系统的可调度电量上下限进行预测,电动汽车集群的调度潜力为台区内参与调度的电动汽车可调度潜力总和。根据 t 时刻电动汽车储能系统的实际负荷,可以预测 $t+1$ 时刻可调度充放电负荷的最大值和最小值。

$$P_{t+1, \text{max}}^{\text{ev}} = P_t^{\text{ev}} + \Delta P_{t+1}^{\text{ev, charge}} + \Delta P_{t+1}^{\text{ev, exc}} \quad (8)$$

$$P_{t+1, \text{min}}^{\text{ev}} = P_t^{\text{ev}} + \Delta P_{t+1}^{\text{ev, charge}} + \Delta P_{t+1}^{\text{ev, excd}} \quad (9)$$

$$\Delta P_{t+1}^{\text{ev, charge}} = \Delta P_{t+1}^{\text{c}} + \Delta P_{t+1}^{\text{d}} \quad (10)$$

式中: P_t^{ev} 为 t 时刻电动汽车储能系统总功率; $P_{t+1, \text{max}}^{\text{ev}}$ 、 $P_{t+1, \text{min}}^{\text{ev}}$ 为 $t+1$ 时刻电动汽车储能系统可调度充放电功率的最大值和最小值; $\Delta P_{t+1}^{\text{ev, charge}}$ 为 $t+1$ 时刻必须增加的电动汽车负荷; $\Delta P_{t+1}^{\text{ev, exc}}$ 、 $\Delta P_{t+1}^{\text{ev, excd}}$ 分别表示在调度时段内只进行充电调度增加的电动汽车负荷与只进行放电调度减少的电动汽车负荷; $\Delta P_{t+1}^{\text{c}}$ 、 $\Delta P_{t+1}^{\text{d}}$ 分别为 $t+1$ 时刻增加的电动汽车负荷与减少的电动汽车负荷。

抽取100台电动汽车作为样本进行可调度潜力分析,如图3所示,设置单台电动汽车的电池容量为30 kWh,最大充放电功率为8 kW。首先运用蒙特卡洛法模拟不同电动汽车的出行规律,然后结合上文得到单台电动汽车储能的可调节潜力,最后采用闵可夫斯基和^[26]对100台电动汽车储能的可调节潜力域进行聚合,得到电动汽车储能系统可调度潜力。

通过上述仿真过程可知,可将电动汽车视作储能系统,其蕴含着一定的可调节潜力。受用户行为

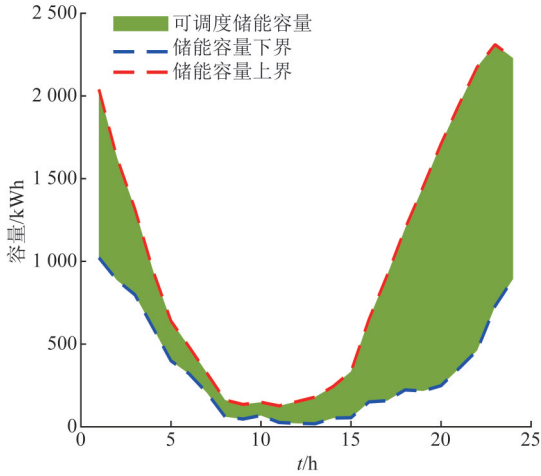


图3 电动汽车储能系统可调度潜力

Fig. 3 Scheduler potentialities of the electric vehicle energy storage system

规律影响,不同时段电动汽车储能系统的可调节潜力不同,意味着可以将电动汽车视作移动储能设备集成到台区用能优化模型中,从而有效缓解台区用能压力。

2.3 5 G基站模型

5 G基站相比于之前的通信网络技术,需要更多的电力来支持其通信数据的高速传输与多频段覆盖。随着台区周围5 G基站部署数量日益增多,带来的台区用电负载激增与能源供应不足等问题不容忽视。对此,本文通过建立5 G基站的能耗模型与电池储能系统模型,预测5 G基站存在的可调度潜力,为其进一步参与优化调度提供理论依据。

2.3.1 基站能耗模型

5 G基站的日常能量消耗分为静态能耗与动态能耗两部分,静态能耗通常与维持基站正常运行需要有关,不会随着基站负载的变化而改变,不具备时变性。动态能耗则与基站负载有关^[27],呈线性关系,可以充分反映基站使用用户数量的变化,具体表达式如下:

$$\begin{cases} P_{G,t} = P_{j,t} + \gamma P_{d,t} \\ P_{d,t} = \lambda_t P_{d,\max} \\ 0 \leq \lambda_t \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{G,t}$ 为 t 时刻基站总体能耗; $P_{j,t}$ 为 t 时刻基站静态能耗; $P_{d,t}$ 为 t 时刻基站动态能耗; $P_{d,\max}$ 为基站最大动态能耗; γ 为基站动态能耗效率; λ_t 为反映 t 时刻基站负载通信量的系数。

2.3.2 基站储能模型

基站储能系统的主要作用是在市电停供时能够提供连续、不间断的电力供应,确保基站正常运行,从而保障用户的使用需求。所以在不同时刻,基站储能备电量一定要大于对应时刻的基站负载量,确保基站的可靠性。而基站的负载通信量会因基站的时空分布特性而发生变化,导致基站电池储能系统的配置通常存在冗余,所以可以在保证基站最低备电状态的前提下,对冗余的电池容量进行合理调度。

基站电池储能系统充放电模型:

$$S_{G,t+1} = S_{G,t} + \frac{P_{G,t}^{\text{charge}} \times \eta_G^{\text{charge}}}{C_G} - \frac{P_{G,t}^{\text{disch}} \times \eta_G^{\text{disch}}}{C_G} \quad (12)$$

式中: $S_{G,t}$ 、 $S_{G,t+1}$ 分别为基站电池储能系统 t 时刻、 $t+1$ 时刻的荷电状态; $P_{G,t}^{\text{charge}}$ 、 $P_{G,t}^{\text{disch}}$ 分别为基站电池储能系统充、放电功率; η_G^{charge} 、 η_G^{disch} 分别为基站电池储能系统充、放电效率; C_G 为基站电池储能系统额定容量。

取某一调度时段的基站电池储能系统进行分析,其可调度容量分布图如图4所示。

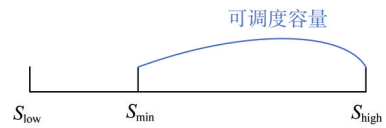


图4 5G基站电池储能系统调度容量图

Fig. 4 Scheduling capacity map of 5G base station battery energy storage system

可知,已知 t 时刻5 G基站电池储能系统的荷电状态, $t+1$ 时刻的储能系统容量存在如下约束,在此约束下,结合式12根据实际调度需求调整电池储能系统的充放电功率。

$$\max(S_{\text{low}}, S_{\text{min}}) \leq S_{G,t} \leq S_{\text{high}} \quad (13)$$

式中: $S_{G,t}$ 为5 G基站电池储能系统荷电状态; S_{high} 、 S_{low} 分别为5 G基站电池储能系统为避免过充过放设置的荷电状态上、下限; S_{min} 为5 G基站储能保证基站负载正常运行的最低荷电状态。

此外,应保证在调度周期始末,电池储能系统的荷电状态前后相等,即:

$$S_G^N = S_G^E \quad (14)$$

式中: S_G^N 为调度开始时的电池储能系统荷电状态; S_G^E 为调度结束时的电池储能系统荷电状态。

选取10座5 G基站进行可调度储能潜力分析,

依据文献[12]和[27], 设置单个5G基站的最高运行功耗为4.25 kW, 每台基站的电池储能系统在断电时可供基站运行4 h, 电池最大充放电功率为10 kW, 充放电效率为0.9, 基站一天内的负载通信量与储能容量如图5—6所示。

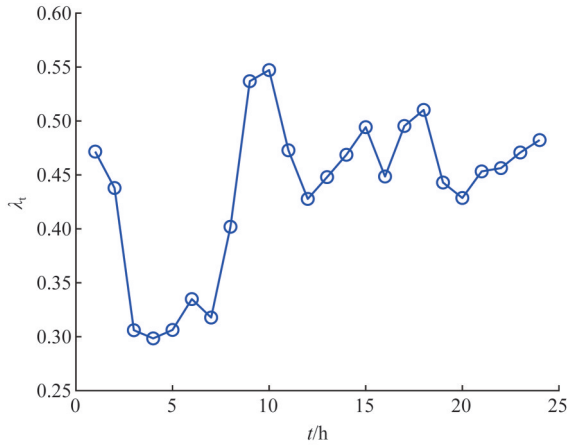


图5 5G基站负载通信量

Fig. 5 5G base station load traffic

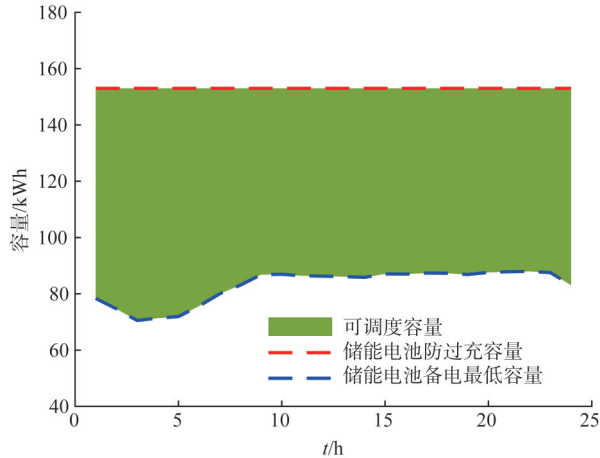


图6 5G基站电池储能系统储能容量

Fig. 6 5G base station battery energy storage system energy storage capacity

通过上述仿真过程可知, 5G基站电池储能系统的可调度容量受基站运行负载影响, 在各时段均蕴含着一定的调节潜力, 可以将其引入台区用能优化中, 提高台区的运行品质。

2.4 温控负荷模型

电制冷/电制热系统通过消耗电能来为台区建筑提供制冷/制热功率, 如式(15)所示。

$$\begin{cases} H_{ER} = P_{ER} \times \eta_{ER} \\ H_{EC} = P_{EC} \times \eta_{EC} \end{cases} \quad (15)$$

式中: H_{ER} 为电制热系统输出热功率; H_{EC} 为电制冷系统输出热功率; P_{ER} 为电制热系统消耗电功率; P_{EC} 为电制冷系统消耗电功率; η_{ER} 为电制热系统能量转化效率; η_{EC} 为电制冷系统能量转化效率。

空调供暖/供冷系统作为典型的电制冷/电制热系统, 在住宅建筑中获得了广泛采用, 其传热方式以对流为主, 室内作用温度可近似为室内空气温度。影响室内作用温度的因素包括供暖/供冷负荷、太阳辐射热负荷以及建筑室内外温差造成的冷/热传递等多个因素, 本文采用等值热力学参数模型 (equivalent thermal parameter, ETP) 描述空调供暖/供冷系统的热力学动态过程^[28], 如图7所示。

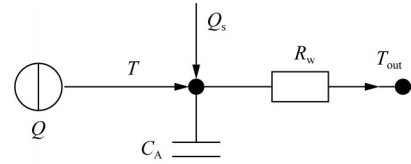


图7 空调供暖/供冷系统ETP模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of ETP model for air conditioning

heating / cooling system

图7中: C_A 为室内空气等值热容(J/℃), Q 为供暖/供冷负荷(W), Q_s 为太阳辐射热负荷(W), R_w 为住宅建筑围护结构的等值热阻(℃/W), T_z 为室内作用温度(℃), T_{out} 为室外温度(℃)。

由上述ETP模型, 可得出其对应的热平衡微分方程为:

$$C_A \frac{dT_z}{dt} = Q + Q_s - \frac{T_z - T_{out}}{R_w} \quad (16)$$

引入住宅建筑结构参数以及材料热物性参数, 公式(16)可以表示为

$$\rho CV \frac{dT_z}{dt} = Q + A_{wi} \alpha I - (A_{wi} k_{wi} + A_{wa} k_{wa})(T_z - T_{out}) \quad (17)$$

式中: A_{wa} 、 A_{wi} 分别为住宅建筑外墙及外窗的总面积(m²); C 为室内空气的热容; I 为水平面太阳辐射强度; k_{wi} 、 k_{wa} 分别为住宅建筑外墙和外窗的传热系数(W/m²·℃); V 为室内空气的总体积; α 为住宅建筑遮阳系数; ρ 为室内空气的密度。

为了分析空调供暖/供冷系统的储能特性, 采用所建立的ETP模型, 以供暖场景为例, 仿真供暖负荷扰动对室内作用温度的影响。算例选取具有100户居民的一幢住宅建筑进行分析, 其长为30 m, 宽为20 m, 高为70 m, 共25层。其中, 围护

结构的总面积为 0.71 万 m^2 ，窗墙比为 0.3 。围护结构的热物性参数如表 1 所示^[29-30]。

表 1 住宅建筑围护结构热物性参数
Fig. 1 Thermal physical parameters of envelope

类型	材料	传热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)	等效热容/ ($\text{kJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$)
外窗	普通中空玻璃+PV 材质塑料窗	2.80	6
外墙	25 mm 水泥砂浆+190 mm 单排孔砌块+25 mm 绝热砂浆	1.09	62

1) 仿真过程一。

假定太阳辐射热负荷 $Q_s=0$ ，室外温度 $T_{\text{out}} = -8^\circ\text{C}$ 。 $t=0 \text{ h}$ 时刻，空调供暖系统处于稳态，此时有 $T_z=22^\circ\text{C}$ ， $Q=379 \text{ kW}$ ；在 $t=200 \text{ min}$ 时，分别对 Q 施加 $\Delta Q=-100 \text{ kW}$ 、 -200 kW 、 -379 kW 的扰动， T_z 的变化过程如图 8 所示。可知，由于室内空气具有一定的蓄热作用，对应 $\Delta Q=-100 \text{ kW}$ 、 -200 kW 、 -379 kW ， T_z 由 22°C 降低 5°C 至 17°C 这一过程分别需要经过 73 min 、 29 min 、 14 min 。

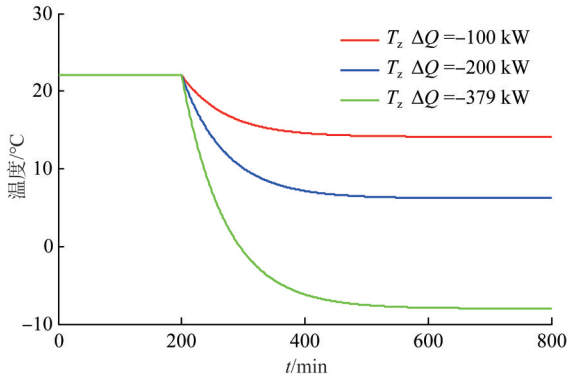


图 8 空调供暖仿真过程一

Fig. 8 Simulation process 1 of air conditioning heating

2) 仿真过程二。

仿真过程二与仿真过程一具有相同的初始条件，在 $t=200 \text{ min}$ 时分别对 Q 施加 $\Delta Q=100 \text{ kW}$ 、 200 kW 、 379 kW 的扰动， T_z 的变化过程如图 9 所示。可知，对应 $\Delta Q=100 \text{ kW}$ 、 200 kW 、 379 kW ， T_z 由 22°C 升高 5°C 至 27°C 这一过程分别需要经过 71 min 、 27 min 、 13 min 。

通过上述仿真过程可知，当供暖负荷变化时，室内作用温度 T_z 的变化具有明显的惯性，说明室内空气具有一定的蓄热能力。因此，可以考虑将空调供暖/供冷系统视做虚拟储能系统，集成到台区用

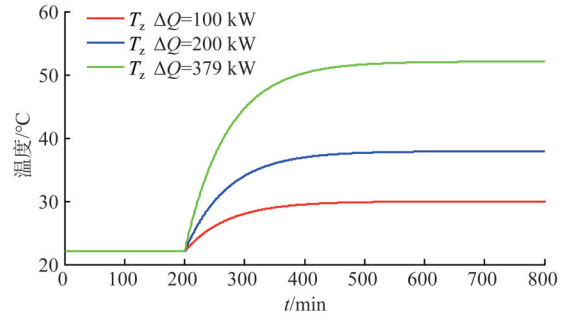


图 9 空调供暖仿真过程二

Fig. 9 Simulation process 2 of air conditioning heating

能的优化调度模型中，从而在保证用户热舒适性的前提下提高台区优化的调节能力。

3 台区多目标优化调度策略

随着大规模分布式电源、电动汽车和 5G 基站等设备分散接入台区，极大地增加了台区用能压力和资源管控难度，台区内逐渐出现台变负载波动性大、台变容量不足、台区电能倒送等问题^[31]，给配电网的运行稳定性和供电可靠性造成影响。针对以上问题，本文建立了“削峰填谷”和新能源消纳的多目标优化调度模型，在保证台区用电安全性的同时提高台区内的可再生能源利用率。

3.1 目标函数

3.1.1 削峰填谷目标函数

“削峰填谷”的本质是通过调度策略，在台区用电高峰时减少用电负荷的叠加，在台区用电低谷时适当的增加用电负荷，从而达到降低负荷峰谷差的效果^[32-33]，本文通过最小化用电负荷曲线方差建立目标函数：

$$\begin{cases} \min R_{\text{load}}(t) = \min \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{\text{load}}(t) - P_{\text{av}})^2 \\ \begin{cases} P_{\text{load}}(t) = P_1(t) - P_{\text{PV}}(t) \\ P_1(t) = P_{\text{mess}}(t) + P_{\text{EV}}(t) + P_{\text{temp}}(t) + P_{\text{Imp}}(t) \\ P_{\text{mess}}(t) = U_{\text{mess}}^+ P_{\text{mess}}^+(t) - U_{\text{mess}}^- P_{\text{mess}}^-(t) \\ P_{\text{EV}}(t) = U_{\text{EV}}^+ P_{\text{EV}}^+(t) - U_{\text{EV}}^- P_{\text{EV}}^-(t) \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

式中： $P_{\text{load}}(t)$ 为台区用电净负荷； $P_1(t)$ 为台区用电负荷； P_{av} 为台区用电净负荷平均值； $P_{\text{mess}}(t)$ 为 5G 基站电池储能系统消耗电功率； $P_{\text{EV}}(t)$ 为电动汽车储能系统功率； $P_{\text{temp}}(t)$ 为空调储能系统功率； $P_{\text{Imp}}(t)$ 为台区固定电负荷； $P_{\text{mess}}^+(t)$ 、 $P_{\text{mess}}^-(t)$ 分别为 5G 基站电池储能系统充放电功率； $P_{\text{PV}}(t)$ 为分布式光伏发电功率； $P_{\text{EV}}^+(t)$ 、 $P_{\text{EV}}^-(t)$ 分别为电动汽车储能

系统充放电功率; $R_{\text{load}}(t)$ 为用电负荷曲线方差; T 为仿真时间; U_{mess}^+ 为电池储能系统充电标志, 1 为充电, 0 为不充电; U_{mess}^- 为电池储能系统放电标志, 1 为放电, 0 为不放电; U_{EV}^+ 为电动汽车充电标志, 1 为充电, 0 为不充电; U_{EV}^- 为电动汽车放电标志, 1 为放电, 0 为不放电。

3.1.2 新能源消纳目标函数

台区新能源消纳目标要求分布式光伏发电量与台区用电负荷相平衡^[34], 尽量减少因新能源发电供需偏差而与电网进行电能交互, 即最小化台区向上级电网的反送电量:

$$\begin{cases} \min Q_{\text{loss}}(t) = \min \sum_{t=1}^{24} P_{\text{loss}}(t) \cdot \Delta t \\ P_{\text{loss}}(t) = \begin{cases} P_{\text{PV}}(t) - P_1(t), P_{\text{PV}}(t) > P_1(t) \\ 0, P_{\text{PV}}(t) \leq P_1(t) \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{\text{loss}}(t)$ 为台区 t 时段的内部电能供需差; $Q_{\text{loss}}(t)$ 为台区一天内向电网反送电的总电量。

3.2 约束条件

3.2.1 电功率平衡约束

$$P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{mess}}(t) + P_{\text{EV}}(t) + P_{\text{temp}}(t) + P_{\text{Imp}}(t) \quad (20)$$

式中 $P_{\text{grid}}(t)$ 为电网交互功率。

3.2.2 热功率平衡约束

$$Q = U_{\text{ER}} \cdot H_{\text{ER}} + U_{\text{EC}} \cdot H_{\text{EC}} \quad (21)$$

式中: U_{ER} 为供暖标志, 冬季供暖为 1, 不供暖时为 0; U_{EC} 为供冷标志, 夏季供冷为 1, 不供冷时为 0。

3.2.3 各能源功率约束

$$\begin{cases} 0 < P_{\text{PV}}(t) < \overline{P_{\text{PV}}(t)} \\ \underline{P_{\text{mess}}^+}(t) < P_{\text{mess}}^+(t) < \overline{P_{\text{mess}}^+}(t) \\ \underline{P_{\text{mess}}^-}(t) < P_{\text{mess}}^-(t) < \overline{P_{\text{mess}}^-}(t) \\ \underline{P_{\text{EV}}^+}(t) < P_{\text{EV}}^+(t) < \overline{P_{\text{EV}}^+}(t) \\ \underline{P_{\text{EV}}^-}(t) < P_{\text{EV}}^-(t) < \overline{P_{\text{EV}}^-}(t) \\ \underline{P_{\text{temp}}}(t) < P_{\text{temp}}(t) < \overline{P_{\text{temp}}}(t) \\ \underline{P_{\text{grid}}}(t) < P_{\text{grid}}(t) < \overline{P_{\text{grid}}}(t) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\overline{P_{\text{PV}}(t)}$ 为光伏发电功率上限; $\overline{P_{\text{mess}}^+}(t)$ 、 $\underline{P_{\text{mess}}^+}(t)$ 、 $\overline{P_{\text{mess}}^-}(t)$ 、 $\underline{P_{\text{mess}}^-}(t)$ 分别为 5G 基站储能充电功率上、下限和放电功率上、下限; $\overline{P_{\text{EV}}^+}(t)$ 、 $\underline{P_{\text{EV}}^+}(t)$ 、 $\overline{P_{\text{EV}}^-}(t)$ 、 $\underline{P_{\text{EV}}^-}(t)$ 分别为电动汽车储能系统充电功率上、下限和放电功率上、下限; $\overline{P_{\text{temp}}}(t)$ 、

$\underline{P_{\text{temp}}}(t)$ 分别为空调储能系统功率上、下限; $\overline{P_{\text{grid}}}(t)$ 、 $\underline{P_{\text{grid}}}(t)$ 分别为电网交互功率上下限。

3.2.4 电动汽车功率调度约束

$$P_{\text{evexc}, \min}(t) \leq P_{\text{evexc}}(t) \leq P_{\text{evexc}, \max}(t) \quad (23)$$

式中: $P_{\text{evexc}}(t)$ 为电动汽车储能系统在 t 时段的充放电调度功率; $P_{\text{evexc}, \min}(t)$ 、 $P_{\text{evexc}, \max}(t)$ 分别为电动汽车储能系统在 t 时段的充放电调度功率下限与上限。

3.2.5 5G 基站电池储能系统调度潜力约束

$$\max[S_{\text{low}}(t), S_{\min}(t)] \leq S_{\text{G}}(t) \leq S_{\text{high}}(t) \quad (24)$$

式中: $S_{\text{G}}(t)$ 为 5G 基站 t 时段的电池储能系统荷电状态; $S_{\text{high}}(t)$ 、 $S_{\text{low}}(t)$ 分别为 5G 基站 t 时段的电池储能系统为避免过充过放设置的荷电状态上、下限; $S_{\min}(t)$ 为 5G 基站 t 时段的储能保证基站负载正常运行的最低荷电状态。

$$S_{\text{G}}^{\text{N}} = S_{\text{G}}^{\text{E}} \quad (25)$$

3.2.6 设备唯一性约束

$$\begin{cases} U_{\text{mess}}^+ + U_{\text{mess}}^- \leq 1 \\ U_{\text{EV}}^+ + U_{\text{EV}}^- \leq 1 \end{cases} \quad (26)$$

式中: U_{mess}^+ 、 U_{EV}^+ 分别为 5G 基站电池储能系统与电动汽车充电标志, 充电为 1, 不充电为 0; U_{mess}^- 、 U_{EV}^- 分别为 5G 基站电池储能系统与电动汽车放电标志, 放电为 1, 不放电为 0。

3.2.7 建筑温度舒适性约束

在调度过程中, 为了保证建筑内的热舒适性, 室内温度应维持在人体舒适区间内, 满足以下约束:

$$\underline{T_z}(t) \leq T_z(t) \leq \overline{T_z}(t) \quad (27)$$

式中 $\overline{T_z}(t)$ 、 $\underline{T_z}(t)$ 分别为室内作用温度上下限。

4 算例模拟

参考文献[27,30], 模拟某光伏台区, 共 100 户家庭, 台区内包含分布式光伏额定容量 600 kW; 空调储能系统的额定功率为 450 kW; 单台电动汽车电池容量 30 kWh, 最大充放电功率为 8 kW; 台区周围有 10 座 5G 基站, 单个 5G 基站的最高运行功耗为 4.25 kW, 每台基站的电池储能系统按断电时可供基站最高功耗情况下运行 4 h, 因此 5G 基站群电池储能系统容量总计为 170 kWh, 电池最大充放电功率为 100 kW, 充放电效率为 0.9; 与上级电网连接的台区变压器容量为 800 kW。

选取冬季典型日进行数据模拟, 将一天分为 24

个时段, 仿真周期为 1 h, 台区光伏发电与居民生活固定用电负荷(除空调外)功率曲线和室外温度曲线如图 10 所示。

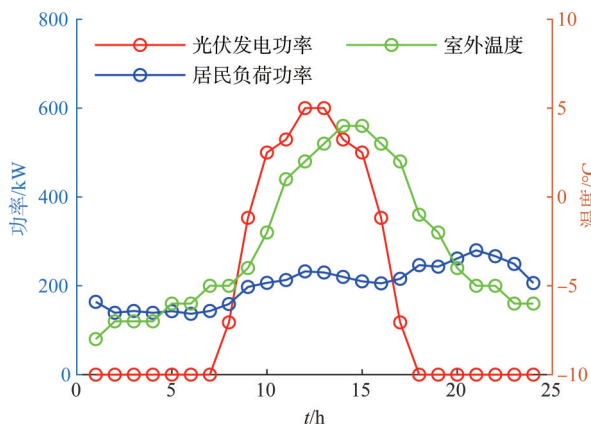


图 10 台区光伏发电、居民负荷功率和室外温度曲线

Fig. 10 Photovoltaic power generation, residential load power and outdoor temperature curve in station area

结合近些年实际台区的发展情况, 电动车数量逐年递增。为增加结论的可靠性, 故本文选择以电动车渗透率作为实验变量, 设置台区电动汽车数量上限为 100 台, 分为短期、中期、长期 3 种不同的应用场景对调度方案进行求解, 验证不同优化调度方案对台区整体用能优化的影响, 具体场景如下。

- 1) 短期: 台区电动汽车渗透率为 40%。
- 2) 中期: 台区电动汽车渗透率为 60%。
- 3) 长期: 台区电动汽车渗透率为 80%。

为了体现优化后台区能量指标的变化, 针对短期、中期、长期 3 种不同场景, 分别按照考虑/不考虑各种资源储能潜力两种情况进行模型求解, 观察对比优化调度策略对台区的影响。

选择多目标多元宇宙算法 MOMVO 作为调度方案寻优算法^[35-36]。算法的原理为: 多元宇宙起源于宇宙大爆炸, 每个宇宙都被分配一个初始膨胀率, 膨胀率高的宇宙被认为形成白洞的可能性高, 并倾向于使物质通过白洞; 膨胀率低的宇宙被认为形成黑洞的可能性高, 倾向于通过黑洞吸收物质, 而多元宇宙的创建过程总是根据高膨胀率宇宙向低膨胀率宇宙靠近的原则进行, 通过黑洞和白洞去探索空间, 虫洞去开发探索空间, 以形成最优宇宙, 即使优化目标逐渐在探索空间中趋于最优位置。

以中期场景为例, 设置宇宙数量(即种群规模)为 100, 最大迭代次数为 10 000 次, 经过一系列迭代运算得到的 Pareto 前沿如图 11 所示。位于 Pareto 前沿中边缘的解分别代表了削峰填谷最优解和新能源消纳最优解, 由于削峰填谷目标和新能源消纳目标在寻优过程中均是要不断寻找最小值, 两者存在此消彼长的互斥关系, 对 Pareto 前沿中的解集通过 TOPSIS 评价方法进行评价, 得到最优解。

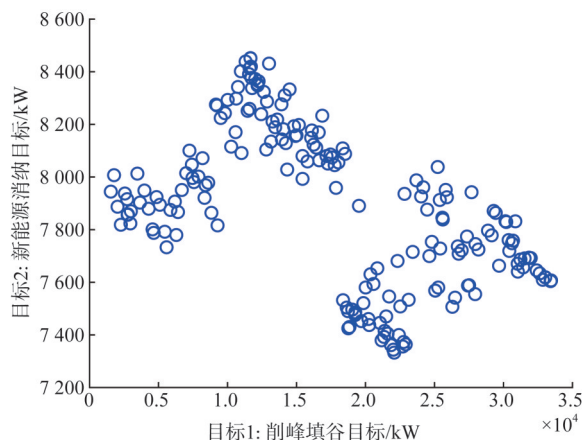


图 11 中期目标函数值分布图

Fig. 11 Distribution plot of objective function values over the medium term

图 12、图 13 给出了评价后的中期调度方案的最优解, 以及最优解下的台区用电负荷对比。可以发现, 台区在没有考虑各种资源的储能潜力前, 用电负荷呈现白天低、夜晚高的特点, 9—16 时用电负荷低谷, 19—24 时、0—4 时用电负荷高峰, 峰谷差较大。由于台区电能供需不均衡, 10—15 时台区用电负荷存在负值, 即出现了台区向电网反送电的情况, 19—23 时中, 台区用电负荷超过了 800 kW, 出现了电压越限情况, 这是因为大部分台区电动汽车白天需离开台区充电桩外出, 夜晚归来充电, 同时冬季夜晚温度较白天低, 夜晚使用空调数量增多, 负荷相互叠加造成了夜晚用电负荷过高、白天用电负荷较低的现象, 不利于台区用电稳定。充分挖掘各种资源的储能潜力后, 夜晚的用电高峰得到削减, 转移至负荷压力相对不大的午时, 降低了用电负荷峰谷差, 台区新能源发电得到有效利用, 无发电量不均衡情况, 消除台区反送电和电压越限问题, 新能源消纳效果明显, 缓解台区用电压力, 提高台区用能效率。

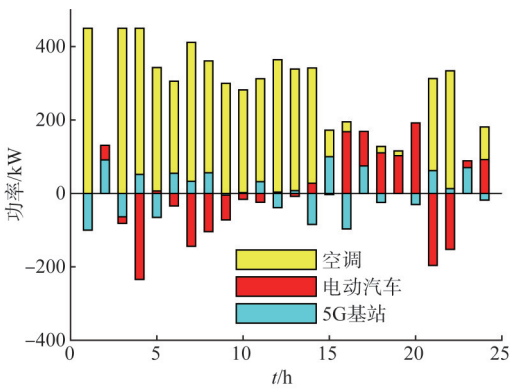


图 12 中期优化调度方案

Fig. 12 Medium-term optimal scheduling scheme

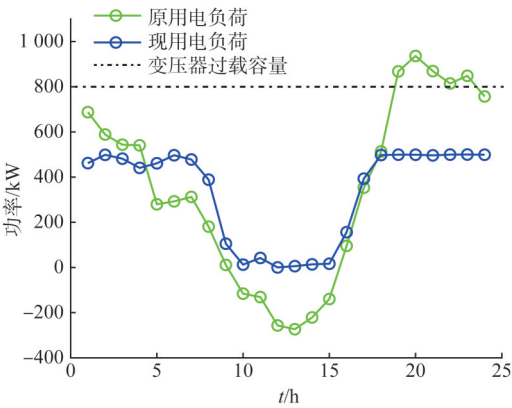


图 13 中期用电负荷对比

Fig. 13 Medium-term electricity load comparison

分析中期最优调度方案发现,电动汽车储能系统充电时间集中在15—20时,放电时间集中在21—22时与3—9时,充电时间较调度之前的充电时段提前,错开用电高峰时段。放电时间均对应电网用电高峰时期,与此同时在电动汽车集中充电的时段以及原电网用电高峰时期,台区内空调储能系统用电功率为一天内最低;除此之外,经过调控,空调储能系统用电功率高峰主要集中在21—22时与0—14时,夜晚温度较低,热负荷需求较大,空调使用量大幅上升,但由于此时电动汽车储能系统接受调度放电,极大的降低用电负荷,维持着用电负荷的稳定。中午温度逐渐上升,此时台区内电动汽车数量较少,用电压力较小,空调储能系统的大功率使用既可以帮助消纳新能源,也可以提前借助建筑蓄热将热能储存起来,从而避免用电高峰的叠加;5G基站储能发挥了其用电灵活性,针对台区用电负荷及时进行充放电响应,在其中起着存储多余电能与补充电能空缺的作用,从而平抑用电负荷曲

线,使台区用电更加平稳可靠。

为了研究短中长期多场景下台区优化调度策略对台区用电负荷的影响,表2和图14分别为台区短中长期优化数据对照表和台区短期与长期优化调度方案对比。

表 2 台区短中长期优化数据对照表

Fig. 2 Comparison table of short-term, medium-term and long-term optimization data in in station area

调度方案	原峰谷差/kW	现峰谷差/kW	原反送电量/kWh	现反送电量/kWh	原电压越限次数/次	现电压越限次数/次
短期	1 151.3	497.4	1 218.1	0	2	0
中期	1 209.8	498.3	1 138.5	0	5	0
长期	1 279.1	497.9	1 101.5	0	5	0

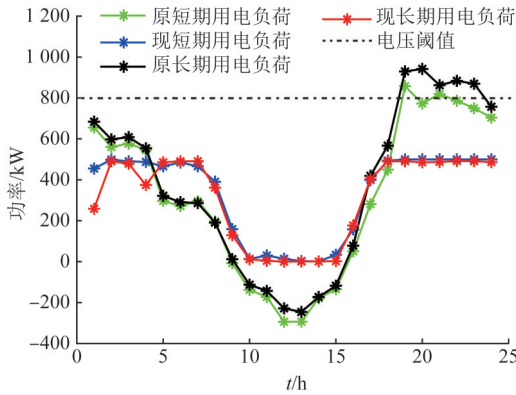


图 14 短期、长期台区用电负荷对比

Fig. 14 Comparison of short-term and long-term electricity loads in station area

由优化结果表2可知,无论是短期、中期还是长期,在不同的最优调度方案下,台区的用电负荷峰谷差、反送电量、电压越限次数均有一定程度的下降。对比不接受优化调度之前的台区用电负荷,短期用电负荷峰谷差下降653.9 kW,下降率56.8%,中期用电负荷峰谷差下降711.5 kW,下降率58.8%,长期用电负荷峰谷差下降781.2 kW,下降率61.1%;观察不接受优化调度之前的台区反送电量和电压越限次数发现,随着台区短中长期变化,台区反送电量逐渐减少,但是电压越限次数增多,这是因为伴随时间增长,电动汽车的数量日渐增多,台区用电负荷随之上升,负荷低谷期中的光伏发电量得到更多利用,但也意味着负荷高峰期的用电负荷会多次越限,不利于台区的稳定运行。在经过优化调度之后,

无论是短、中、长期下的3种场景,台区的反送电和电压越限现象均不再出现,新能源消纳不均衡情况得到很好的改善,优化调度策略表现出了良好的适应性。

对比短期与长期台区用电负荷,由图14可知,现经过优化调度之后,中、长期场景下台区用电负荷曲线均在安全范围内波动,且波动幅度较小,长期用电负荷曲线较中期用电负荷曲线在光伏发电高峰期更加贴近0 kW,结合表2可以得出结论,对比中期场景,长期场景下的台区经过优化调度之后,在抑制负荷波动效果和提高新能源消纳效果表现更好。

5 结论

本文为缓解因台区电能供需不平衡和用电负荷叠加导致的台区光伏发电冗余和变压器电压越限问题,提出了以削峰填谷和新能源消纳为目标,基于多种资源储能潜力挖掘的台区用能多目标优化调度模型,得到以下结论。

1) 台区内的5 G基站、电动汽车、温控负荷3种弹性资源均具有良好的储能潜力,可以视作一种特殊的“储能”设备,参与台区用能的优化调度。

2) 引入弹性资源优化调度后,可有效的实现削峰填谷和新能源消纳目标,消除台区电压越限和光伏发电反送电现象。短、中、长期用电负荷峰谷差平均下降0区稳定性与可靠性得到提高。

3) 随着电动汽车数量的增多,可供台区调度的储能容量增多,对台区削峰填谷和新能源消纳具有更好的促进作用。

参考文献

- [1] 鞠平,姜婷玉,黄桦. 浅论新型电力系统的“三自”性质[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2598–2608.
- [2] 韩冬,李孟瞳,严正. 用户侧分布式光伏技术扩散能力评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 985–994.
- [3] 徐旖旎,刘海涛,熊雄,等. 低压配电网台区柔性互联关键技术与发展模式[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 3986–4001.
- [4] 王精,邢海军,王华昕,等. 考虑电动汽车及负荷聚合商参与的综合能源系统优化调度[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(7): 814–823.
- [5] 罗维祥,常喜强,伏睿,等. 考虑供需需求的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7): 106–112.
- [6] 刘敦楠,王玲湘,汪伟业,等. 基于深度强化学习的大规模电动汽车充换电负荷优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 36–46.
- [7] 武光华,李宏胜,汪洋,等. 基于虚拟聚合和ACOPF的电动汽车优化调度策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 133–142.
- [8] 朱兰,杨鑫宇,唐陇军,等. 分布式光伏并网下基于调温启停混合控制方式的空调负荷双层优化调度策略[J]. 现代电力, 2023, 40(2): 219–229.
- [9] 和学豪,顾煜炯,赵梓良,等. 计及建筑蓄能的综合能源系统优化调度[J]. 电测与仪表, 2023, 58(10): 1–8.
- [10] 朱伟业,罗毅,胡博,等. 考虑采暖建筑用户热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同的电热联合系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 124–135.
- [11] 杨婕,李泽辉,马锴,等. 基于小脑模型神经网络的温控负荷优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 199–208.

- [12] 雍培, 张宁, 慈松, 等. 5 G通信基站参与需求响应: 关键技术与前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5540 – 5552.
YONG Pei, ZHANG Ning, CI Song, et al. 5 G communication base station participation demand response: key technologies and prospects [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5540 – 5552.
- [13] 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. 5G base station energy storage regulation strategy considering communication load [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2878 – 2887.
- [14] 毛安家, 张丽婧, 盛倩倩. 考虑通信可靠性的5G基站储能聚合商优化调度研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2364 – 2374.
MAO Anjia, ZHANG Lijing, SHENG Qianqian. Research on optimal scheduling of 5G base station energy storage aggregators considering communication reliability [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2364 – 2374.
- [15] 乔锐勋, 王军华, 韦道明, 等. 计及后备储能及空调调度潜力的5G基站多时间尺度优化方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 111 – 120.
QIAO Ruixun, WANG Junhua, WEI Daoming, et al. Multi-time-scale optimization method for 5G base station considering backup energy storage and air-conditioning scheduling potential [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 111 – 120.
- [16] 刘蓉晖, 李阳, 孙改平, 等. 考虑含多种可控负荷的社区冷热电联供系统协同优化调度[J]. 可再生能源, 2019, 37(9): 1317 – 1324.
LIU Ronghui, LI Yang, SUN Gaiping, et al. Considering the collaborative optimal dispatch of community combined cooling, heating and power system with multiple controllable loads [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(9): 1317 – 1324.
- [17] 冯昌森, 沈佳静, 赵崇娟, 等. 基于合作博弈的智慧能源社区协同运行策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 85 – 93.
FENG Changsen, SHEN Jiajing, ZHAO Chongjuan, et al. Collaborative operation strategy of smart energy community based on cooperative game [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 85 – 93.
- [18] AMIR S M, ÁNGEL P, MANUEL J G, et al. A three-layer game theoretic-based strategy for optimal scheduling of microgrids by leveraging a dynamic demand response program designer to unlock the potential of smart buildings and electric vehicle fleets [J]. Applied Energy, 2023(347): 31 – 39.
- [19] MENDIETA W, CANIZARES A C. Primary frequency control in isolated microgrids using thermostatically controllable loads [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, PP(99): 1 – 1.
- [20] ZHOU Lei, MA JIAN, HUANG Hao, et al. Automatic identification method of topology structure of low-voltage distribution station area based on multi-point measurement data [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2355(1): 1 – 10.
- [21] HUANG Jian, HOU Jiansheng, WANG Yingcong, et al. Energy management optimization of integrated energy system with electric hydrogen hybrid energy storage [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2260(1): 1 – 10.
- [22] 臧海祥, 耿明昊, 黄蔓云, 等. 电-热-气混联综合能源系统状态估计研究综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 187 – 199.
ZANG Haixiang, GENG Minghao, HUANG Manyun, et al. Review and prospect of state estimation of electric-heat-gas hybrid integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 187 – 199.
- [23] 李欣, 刘立, 黄婧琪, 等. 含耦合P2G和CCS的园区级综合能源系统优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(4): 18 – 25.
LI Xin, LIU Li, HUANG Jingqi, et al. Optimal dispatch of park-level integrated energy system with coupling P2G and CCS [J]. Transactions of Electric Power System and Automation, 2023, 35(4): 18 – 25.
- [24] ZHANG Jing, WANG Lingxiang, LIU Dunnann, et al. Optimal scheduling and control techniques of electric vehicle considering flexible grid resources [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1549(5): 1 – 10.
- [25] 赵冬梅, 马泰屹. 基于动态分时电价含电动汽车电网无功优化策略[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(1): 1 – 11.
ZHAO Dongmei, MA Taiyi. Reactive power optimization strategy of electric vehicle power grid based on dynamic time-of-use electricity price [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 49(1): 1 – 11.
- [26] 边晓燕, 孙明琦, 董璐, 等. 计及灵活性聚合功率的源-荷分布式协调调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 89 – 98.
BIAN Xiaoyan, SUN Mingqi, DONG Lu, et al. Source-load distributed coordinated dispatch considering flexible aggregate power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 89 – 98.
- [27] 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 – 5404.
LI Kun, FANG Jiakun, AI Xiaomeng, et al. Large-scale 5G macro base station network energy management model considering the coordination and optimization of communication and supporting equipment [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5391 – 5404.
- [28] 王成山, 刘梦璇, 陆宁. 采用居民温控负荷控制的微网网络功率波动平滑方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 36 – 43.
WANG Chengshan, LIU Mengxuan, LU Ning. A tie-line power smoothing method for microgrid using residential thermostatically-controlled loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 36 – 43.
- [29] YU J, TIAN L, XU X, et al. Evaluation on energy and thermal performance for office building envelope in different climate zones of China [J]. Energy & Buildings, 2015(86): 626 – 639.
- [30] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 581 – 590.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581 – 590.
- [31] 张勇军, 羿应棋, 李立涅, 等. 双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 1 – 12.

- ZHANG Yongjun, YI Yingqi, LI Licheng, et al. Technical prospect of new low-voltage distribution system driven by double carbon target [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1 – 12.
- [32] XIONG Junjie, SUN Yonghui, WANG Jianxi, et al. Multi-stage equipment optimal configuration of park-level integrated energy system considering flexible loads [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2022(140): 1 – 10.
- [33] 孙国强, 徐广开, 沈培峰, 等. 规模化电动汽车负荷的柔性台区协同经济调度[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4395 – 4404. SUN Guoqiang, XU Guangkai, SHEN Peifeng, et al. Flexible coordinated economic dispatch of large-scale electric vehicle load [J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4395 – 4404.
- [34] 涂春鸣, 王鑫, 杨万里, 等. 考虑台区变压器经济运行区间的智能软开关控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 848 – 858. TU Chunming, WANG Xin, YANG Wanli, et al. Intelligent soft-switching control strategy considering the economic operation interval of transformers in Taiwan [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 848 – 858.
- [35] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, HATAMLOU A. Multi-verse optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization [J]. Neural Computing & Applications, 2016, 27(2): 495 – 513.
- [36] MIRJALILI S, JANGIR P, MIRJALILI S Z, et al. Optimization of problems with multiple objectives using the multi-verse optimization algorithm [J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 134(15): 50 – 71.

收稿日期: 2023-06-27; 网络首发日期: 2024-07-24

作者简介:

周志恒(1996), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力通信及智能化, 1015661878@qq.com;

张琳娟(1985), 女, 通信作者, 高级工程师(教授级), 博士, 研究方向为电力通信及智能化, zlinj@163.com;

王晓冬(1977), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化, 2282249289@qq.com。

(上接第 56 页 Continued from Page 56)

- [24] BALI K K, ONG Y S, GUPTA A, et al. Multifactorial evolutionary algorithm with online transfer parameter estimation: MFEA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2020, 24(1): 69 – 83.
- [25] 田佳鹭, 邓立国. 基于改进 VGG-16 神经网络的图像分类方法[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(2): 131 – 135. TIAN Jialu, DENG Ligu. Image classification method based on improved VGG-16 neural network [J]. Computing Technology and Automation, 2021, 40(2): 131 – 135.
- [26] SITAULA C, HOSSAIN M B. Attention-based VGG-16 model for COVID-19 chest X-ray image classification [J]. Applied Intelligence, 2021(51): 2850 – 2863.
- [27] 李文璞, 谢可, 廖逍, 等. 基于 Faster RCNN 变电设备红外图

像缺陷识别方法[J]. 南方电网技术, 2019, 13(12): 79 – 84.

LI Wenpu, XIE Ke, LIAO Xiao, et al. Intelligent diagnosis method of infrared image for transformer equipment based on improved faster RCNN [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(12): 79 – 84.

收稿日期: 2023-08-25; 网络首发日期: 2024-05-20

作者简介:

王继东(1977), 男, 教授, 博士, 研究方向为电能质量、分布式发电和微电网、智能配用电, jidongwang@tju.edu.cn;

王泽平(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量、深度学习, 2021234385@tju.edu.cn;

张迪(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量, zhangdihhh@tju.edu.cn。