

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.247013

考虑辅助服务奖励机制的电动公交车优化调度策略

戚佳金¹, 黄久鸿², 张良², 龙彦良², 王殿彬², 尹淑淙²

(1. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 浙江 杭州 310016; 2. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

摘要: 为激励电动公交车更为有效地参与车网互动, 提出一种考虑辅助服务奖励机制的电动公交车多时间尺度优化调度策略。首先, 以配电网为研究背景, 以日前工作日、休息日基础负荷与风光发电预测数据为依据, 以风电、光伏发电净收益最大化与电动公交车调度成本最小化为目标, 制定配电网日前风光发电与电动公交车协同调度计划。然后, 在此协同调度计划的基础上, 通过日内滚动的方式对预测数据进行修正, 以配电网新能源消纳量最大化与配电网净负荷标准差最小化为目标, 制定电动公交车日内调度策略。最后, 将电动公交车辅助服务奖励机制引入到电动公交车多时间尺度优化调度策略中, 通过算例分析验证了所提策略的优越性。

关键词: 配电网; 电动公交车; 多时间尺度; 辅助服务奖励机制

Optimal scheduling strategy for electric buses considering auxiliary service incentive mechanism

QI Jiajin¹, HUANG Jiuhong², ZHANG Liang², LONG Yanliang², WANG Dianbin², YIN Shucong²

(1. Hangzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310016, China;

2. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

Abstract: To encourage electric buses to participate more effectively in vehicle-to-grid interactions, a multi-timescale optimal scheduling strategy for electric buses considering auxiliary service incentive mechanism is proposed. First, taking the distribution network as the research background, and based on the forecast data of workday and weekend base loads as well as wind and solar power generation, a day-ahead coordinated scheduling plan for wind and solar power generation and electric buses is formulated, with the objectives of maximizing the net revenue of wind and solar generation and minimizing the dispatch cost of electric buses. Second, based on the day-ahead coordinated scheduling plan, the forecast data are corrected through intra-day rolling updates. An intra-day scheduling strategy for electric buses is developed with the goals of maximizing new energy consumption and minimizing the standard deviation of the net load in the distribution network. Finally, the auxiliary service incentive mechanism for electric buses is introduced into the multi-timescale optimal scheduling strategy, while the superiority of the proposed strategy is verified through case analyses.

This work is supported by the Key Research and Development Program of Jilin Science and Technology Department (No. 20220203052SF).

Key words: distribution network; electric bus; multi-timescale; auxiliary service incentive mechanism

0 引言

工业革命以来, 化石能源的大量开采以及二氧化碳的过度排放, 导致全球气候变暖, 给人类的生产生活造成了多方面的影响^[1-4]。在此背景下, 我国

提出“双碳”目标。实现“双碳”目标需要投资和发展清洁能源技术, 我国是一个风、光资源丰富的国家, 对新能源的利用已遍布众多领域, 但由于天气的不确定性, 风力发电和光伏发电出力的周期性、间歇性和随机性都很强, 导致风、光发电量波动性较大, 并网将对电网稳定运行造成严重影响^[5-8]。如何提高电网对新能源的消纳能力是当前研究的热点问题。

基金项目: 吉林省科技厅重点研发项目资助(20220203052SF); 吉林省科技厅国际科技合作项目资助(20210402080GH)

近年来,中国新能源开发步入了高速发展的快车道,随着“双碳”及新型电力系统目标的提出,以风、光为主的新能源电源建设得到大力发展,装机容量日益增加^[9-11]。新能源发电的快速发展使得电网的调峰压力不断增加,而电动汽车(electric vehicle, EV)数量的迅速增加也使得电网调峰压力进一步加大^[12-14]。电动汽车规模不断扩大,但大规模的电动汽车随机充电行为会对电网的规划与运行产生一定程度的不利影响^[15]。电动公交车作为大型电动汽车,其容量较大、充电功率较高,大规模电动公交车的无序充电会导致电网的峰谷差变大、网损变大、电压过低。因此,对电动公交车进行合理调度具有重要意义。

文献[16]通过建立电动公交车在不同站点间移动的时-空网络模型,研究城市电动公交车在非运行时段作为移动储能优化配电网运行效益的方法。文献[17]研究不同的速度、负载等客观因素对电动公交车运行能耗产生的影响。上述文献虽然均根据电动公交车的排班模型确定调控时段,但未考虑道路拥堵对电动公交车运行产生的影响,未对电动公交车进站时间进行修正。

目前,对辅助服务奖励机制的研究中,文献[18]从净负荷波动的角度出发,完善调峰辅助服务成本分摊机制,建立了含深度调峰和抽水蓄能的调度优化模型;文献[19]分析光热电站运行成本,建立其深度调峰成本模型,得到光热电站参与调峰辅助服务的补偿;文献[20]考虑用户侧、储能侧多主体同时参与调峰,提出考虑用户分摊调峰辅助服务费用的微网梯次电池储能优化配置方法。上述文献均对辅助服务奖励机制进行了研究,但未将其运用于电动汽车的优化调度中。

针对上述不足,本文提出一种考虑辅助服务奖励机制的电动公交车多时间尺度优化调度策略。计及工作日与休息日交通指数,充分考虑道路状况对电动公交车运行时间产生的影响,对电动公交车每次运行进站时间进行修正,基于电动公交车的发车时间与实际进站时间建立电动公交车工作日与休息日充电负荷模型。在日前优化调度模型中,以风电、光伏发电净收益最大化与电动公交车调度成本最小化为目标函数,将辅助服务奖励机制运用于日前优化调度模型中,对电动公交车进行优化调度;在日内优化调度模型中,以电动公交车日前、日内计划充电量偏差最小、降低电动公交车调度成本、配电网新能源消纳量最大化与配电网净负荷标准差最小化为目标,通过滚动优化的方式减少新能源出力不确定性对电动公交车优化调度结果产生的影

响。提出电动公交车与新能源协同调度策略,达到降低电动公交车调度成本与提升配电网新能源利用率的目的。

1 电动公交车出行参数建模

本文考虑路况因素对电动公交车进站时间产生的影响,由于工作日与休息日道路路况不同,本文分别以工作日与休息日交通指数为依据,分析交通情况对电动公交车进站时间产生的影响^[21]。

电动公交车具有发车规律性强的特点,根据某公交车站某条线路发车时间计划表与进站时间计划表,得到该线路每辆公交车一天内执行运行任务次数,以及每次执行任务的发车时间与进站时间,将一天的24 h划分为96个时段,每个时段对应的时间是15 min,将电动公交车每次执行任务的发车时间与进站时间转化为发车时段与进站时段,根据电动公交车每次运行发车时段与进站时段数据,分别创建第*n*辆电动公交车发车时段矩阵、电动公交车计划进站时段矩阵、电动公交车计划运行时段矩阵,记为 T_{An} 、 T_{Bn} 、 T_{Cn} ,设第*n*辆电动公交车一天中执行任务总次数为*p*,电动公交车在运行时段属于不可调度时段,其余时段为可调度时段。

$$T_{An} = [t_{a,1,n}, \dots, t_{a,j,n}, \dots, t_{a,p,n}] \quad (1)$$

$$T_{Bn} = [t_{b,1,n}, \dots, t_{b,j,n}, \dots, t_{b,p,n}] \quad (2)$$

$$T_{Cn} = [t_{c,1,n}, \dots, t_{c,j,n}, \dots, t_{c,p,n}] \quad (3)$$

$$T_{Cn} = T_{Bn} - T_{An} \quad (4)$$

式中: $t_{a,j,n}$ 为第*n*辆电动公交车执行第*j*次任务时发车时段; $t_{b,j,n}$ 为第*n*辆电动公交车执行第*j*次任务时计划进站时段; $t_{c,j,n}$ 为第*n*辆电动公交车执行第*j*次任务时计划运行时段。

交通指数的实时发布能够帮助居民预估出行耗时,表1是研究中心公布的交通指数出行时间表。以电动公交车执行第*j*次任务为例,对电动公交车运行时段与进站时段进行修正。

表1 交通指数出行时间表

Table 1 Traffic index travel schedule

交通指数	对应情况	出行耗时	耗时系数 δ_j
0~2	畅通	正常行驶	0
2~4	基本畅通	多耗时 0.5 倍	0.5
4~6	轻度拥堵	多耗时 0.8 倍	0.8
6~8	中度拥堵	多耗时 1.1 倍	1.1
8~10	严重拥堵	多耗时 1.2 倍	1.2

根据每15 min采集的数据,可将电动公交车执行第*j*次任务时运行全程总时间设置为*m*个时段,

每个时段用变量 i 表示, 设为 T_i , 计算公交车行驶全程所需要的实际时间, 如式(5)所示。

$$t_{c',j,n} = \sum_{i=1}^m T_i \times (1 + \delta_i) \quad (5)$$

$$t_{b',j,n} = t_{a,j,n} + t_{c',j,n} \quad (6)$$

$$\mathbf{T}_{B'n} = [t_{b',1,n}, \dots, t_{b',j,n}, \dots, t_{b',i,n}] \quad (7)$$

$$\mathbf{T}_{C'n} = [t_{c',1,n}, \dots, t_{c',j,n}, \dots, t_{c',i,n}] \quad (8)$$

式中: $t_{c',j,n}$ 为考虑交通路况后第 n 辆电动公交车执行第 j 次任务时实际运行所需时段; δ_i 为表征交通拥堵状况的第 i 时段耗时系数; $t_{b',j,n}$ 为考虑交通路况后第 n 辆电动公交车执行第 j 次任务时实际进站时段; $\mathbf{T}_{B'n}$ 、 $\mathbf{T}_{C'n}$ 分别为电动公交车实际进站时段矩阵和电动公交车实际运行时段矩阵。

电动公交车可以选择在夜间电价高峰时段进行放电, 平价时段或谷价时段进行充电, 降低电动公交车充电成本, 即可以通过电动公交车与电网互动技术^[22]向电网输送电能或进行充电操作。综合考虑电动公交车用户与电网利益, 构建电动公交车夜间充放电、日间补电的调度模式。

为实现智能充电, 本文电动公交车充电设备采用调功器, 电动公交车充电功率可连续调节, 因此, 电动公交车充放电控制系数为连续变量。将第 n 辆电动公交车充放电策略矩阵用 \mathbf{X}_n 表示, 如式(9)所示。

$$\mathbf{X}_n = [x_n^1, \dots, x_n^{a,j+1,n}, \dots, x_n^{b',i,n}, \dots, x_n^{96}] \quad (9)$$

$$\begin{cases} 0 \leq x_n^t \leq 1, \forall t \in [t_{b',j,n}, t_{a,j+1,n}]; j = 1, 2, \dots, i-1 \\ -1 \leq x_n^t \leq 1, \forall t \in [t_{b',i,n}, 96] \cup [0, t_{a,1,n}] \\ x_n^t = 0, \forall t \in [t_{a,j,n}, t_{b',j,n}]; j = 1, 2, \dots, i \end{cases} \quad (10)$$

式中: x_n^t 为第 n 辆电动公交车 t 时段充放电控制系数; $t_{a,j+1,n}$ 为第 n 辆电动公交车执行下次运行任务时实际发车时段; $t_{b',i,n}$ 为第 n 辆电动公交车执行本天最后一次运行任务时的实际进站时段; $t_{a,1,n}$ 为第 n 辆电动公交车执行次日第一次运行任务时的实际发车时段。

在 $[t_{b',i,n}, 96] \cup [0, t_{a,1,n}]$ 时间范围内电动公交车已经完成运行任务, 等待明天继续发车, 在夜间通过参与车网互动进行价格套利。在 $[t_{a,j,n}, t_{b',j,n}]$ 时间范围内电动公交车处于运行时段, 无法进行充放电操作。

在 $[t_{b',j,n}, t_{a,j+1,n}]$ 时间范围内电动公交在充电站等待下次发车, 由于白天光伏发电量较高, 需要电动公交车通过充电消纳多余的光伏发电量, 因此, 电动公交车只进行充电操作。本文将第 n 辆电动公

交车执行第 j 次任务后的剩余电量用 $S_{OC',j,n}$ 表示, 电动公交车经过调度后的电量要满足下次运行要求, 电动公交车在执行第 j 次任务后在电动公交车充电站所充电量用 $S_{OC,j,n}$ 表示。

$$S_{OC',j,n} = \frac{1}{4} \frac{\sum_{t=t_{b',j,n}}^{t_{a,j+1,n}} x_n^t \eta_{EV} P_{EV}}{C} \quad (11)$$

$$S_{OC',j,n} + S_{OC,j,n} \geq S_{OCmin} + \frac{W_n \cdot L_n}{C} \quad (12)$$

$$S_{OCmin} \leq S_{OC',j,n} \leq S_{OCmax} \quad (13)$$

式中: η_{EV} 为电动公交车充电效率; P_{EV} 为电动公交车额定充电功率, kW; C 表示每台电动公交车电池容量, kWh; W_n 表示第 n 辆电动公交车每次执行任务时行驶单位距离的耗电量, kWh/km; L_n 表示第 n 辆电动公交车每次执行任务时的行程距离, km; S_{OCmax} 和 S_{OCmin} 分别为电动公交车电池电量最大值和最小值。

2 多时间尺度优化调度数学模型

2.1 风光出力不确定性建模

风电光伏不确定性指定为预测值与实际值之间的误差。风电光伏实际输出功率定义为预测值与误差值之和, 如式(14)所示。

$$W_t = \hat{W}_t + \gamma_t \quad (14)$$

式中: W_t 为 t 时段实际输出功率, kW; \hat{W}_t 为 t 时段输出功率预测值, kW; γ_t 为 t 时段输出功率预测误差, γ_t 服从均值为 0、标准差为 σ_t 的正态分布, 即 $\gamma_t \sim N(0, \sigma_t^2)$ 。通常认为在日前预测中, 标准差值 σ_t 为 t 时段预测输出功率 \hat{W}_t 的百分比。

利用轮盘赌机制^[23-24]对风电光伏出力预测误差进行分析并生成风电光伏出力场景。首先, 利用蒙特卡洛模拟产生 $[0, 1]$ 之间的随机数 R ; 其次, 用随机数 R 生成预测误差概率模型, 以此来生成相应场景。

丰富的场景数量有助于确保实验结果的准确性, 但是会导致计算负担加重、计算效率下降。因此, 采用 K-means 聚类算法对场景数量进行削减, 以生成具有代表性的场景。对风光发电进行不确定性建模时, 风电、光伏发电日前预测标准差值 σ_t 取值为 20%, 日内预测标准差值 σ_t 取值为 10%。本文将削减前的风电出力场景与光伏出力场景均设置为 100 次, 将削减后的风电出力场景与光伏出力场景均设置为 10 次。削减后的日内风电、光伏发电出力场景分别如附录 A 图 A1、图 A2 所示。

2.2 日前优化调度目标函数

2.2.1 风光发电经济指标

$$F_1 = F_{WT} + F_{PV} \quad (15)$$

式中: F_1 为风光发电经济收益值, 元/kWh; F_{WT} 为风电经济收益值, 元; F_{PV} 为光电经济收益值, 元。

$$F_{WT} = \frac{1}{4} \sum_{t=1}^{96} (C_t P_t^{wo} - C^r P_t^{wr}) \quad (16)$$

式中: C_t 为新能源上网电价, 元/kWh; P_t^{wo} 为风电日前预测功率, kW; C^r 为惩罚电价, 元/kWh; P_t^{wr} 为配电网风电消纳受阻量^[25], kW。

$$F_{PV} = \frac{1}{4} \sum_{t=1}^{96} (C_t P_t^{po} - C^r P_t^{pr}) \quad (17)$$

式中: P_t^{po} 为光伏发电日前预测功率, kW; P_t^{pr} 为配电网光伏发电消纳受阻量, kW。

2.2.2 电动公交车调度成本

锂离子电池能够在相对小的体积和质量下存储大量的电能, 具有较长的循环寿命。本文电动公交车采用锂离子电池实现电能与化学能的转化。

$$F_2 = \sum_{n=1}^N (F_{EV_cf}(n) + F_{EV_deg}(n) - F_{EV_tf}(n)) \quad (18)$$

式中: F_2 为第 n 辆电动公交车参与调度产生的成本, 元; N 为配电网电动公交车总数量; $F_{EV_cf}(n)$ 为第 n 辆电动公交车的充放电成本, 元; $F_{EV_deg}(n)$ 为第 n 辆电动公交车充放电产生的电池损耗成本, 元/kWh; $F_{EV_tf}(n)$ 为第 n 辆电动公交车参与削峰填谷辅助服务的补偿收益, 元。

为了激励配电网中的电动公交车更好地发挥削峰填谷的作用, 本文对电动公交车采用动态分时电价协同辅助服务奖励机制的激励形式, 动态分时电价的设置参照文献[26]。本文所提辅助服务奖励机制是一种用于平衡电力系统负荷的手段, 能够帮助电力系统应对负荷峰值, 确保系统在高负荷时期具有足够的供电能力。

$$F_{EV_cf}(n) = \frac{1}{4} \sum_{t=1}^{96} x_n^t P_{EV,max} P_r(t) \quad (19)$$

式中: $P_r(t)$ 为 t 时段配电网动态分时电价, 元/kWh。

电动公交车在进行调度时, 其调度状态不断地经历充电、闲置、放电 3 种状态的转换, EV 循环充放电会带来电池退化问题, 因此, 电池退化带来的电池损耗费用应当考虑在内。电动公交车的锂离子电池损耗模型参照文献[26]。第 n 辆电动公交车因放电产生的电池损耗成本如式(20)所示。

$$F_{EV_deg}(n) = \sum_{t=1}^{96} C_{n,t}^{V2G} \quad (20)$$

$$\begin{cases} C_{n,t}^{V2G} = C^B \frac{\beta_{n,t}}{C} \left| \frac{B_n}{100} \right| \\ \beta_{n,t} = \max \{0, (S_{OCn,t-1} - S_{OCn,t}) C\} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $C_{n,t}^{V2G}$ 为第 n 辆电动公交车在 t 时段的电池损耗成本, 元; C^B 为电池更换成本, 元; $\beta_{n,t}$ 为第 n 辆电动公交车在 t 时段的循环充放电电量, kWh; B_n 为电池退化系数绝对值, 本文取 0.0063; $S_{OCn,t-1}$ 为第 n 辆电动公交车在上一时段的电量, kWh。

当电动公交车进行充电或放电操作时, 其 t 时段的电池荷电状态计算公式如式(22)所示。

$$\begin{cases} S_{n,t} = S_{n,t-1} + \frac{1}{4} \frac{x_n^t P_{EV} \eta_{EV}}{C}, x_n^t \geq 0 \\ S_{n,t} = S_{n,t-1} + \frac{1}{4} \frac{x_n^t P_{EV}}{\eta_{EV} C}, x_n^t < 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$P_{bo}(t) = P_{evo}(t) + P_{blo}(t) - P_t^{po} - P_t^{wo} \quad (23)$$

式中: $S_{n,t}$ 为电动公交在 t 时段的荷电状态; $P_{bo}(t)$ 为 t 时段配电网日前净负荷, kW; $P_{evo}(t)$ 为 t 时段电动公交车集群日前的总的充电功率, kW; $P_{blo}(t)$ 为 t 时段配电网日前基础负荷预测值, kW。

当配电网日前净负荷大于 0 时, 对电动公交车的放电行为进行奖励, 由于电动公交车充电不利于维持配电网供电量与用电量的平衡关系, 对电动公交车的充电行为进行惩罚; 当配电网日前净负荷小于 0 时, 对电动公交车的充电行为进行奖励, 对电动公交车的放电行为进行惩罚。

$$Q_t^n = \begin{cases} -\frac{1}{4} q(t) x_n^t P_{EV,max}, \\ (x_n^t < 0, P_{bo}(t) > 0) \cup (x_n^t > 0, P_{bo}(t) > 0) \\ \frac{1}{4} q(t) x_n^t P_{EV,max}, \\ (x_n^t < 0, P_{bo}(t) < 0) \cup (x_n^t > 0, P_{bo}(t) < 0) \end{cases} \quad (24)$$

式中: Q_t^n 为第 n 辆电动公交车在 t 时段获得的补偿奖励, 元; $q(t)$ 为补偿价格(惩罚价格), 元/kWh。

对电动公交车进行调度时, 当配电网净负荷值大于 0 时, 配电网净负荷值越大, 配电网新能源发电量与负荷用电量不平衡程度越高, 配电网亟需电动公交车进行放电操作, 电动公交车放电时辅助服务补偿价格越高。配电网净负荷值大于 0 时辅助服务补偿价格如式(25)所示。当配电网净负荷值小于 0 时, 配电网净负荷值越小, 配电网弃风、弃光量越多, 配电网亟需电动公交车进行充电操作消纳多余的风电、光伏发电量, 电动公交车充电时辅助服务补偿价格越高。配电网净负荷值小于 0 时辅助服务

补偿价格如式(26)所示。

$$q(t) = q_{\text{car}} + q_{\text{car}} \frac{P_{\text{bo}}(t)}{P_{\text{bo,max}}}, P_{\text{bo}}(t) > 0, x_n^t < 0 \quad (25)$$

$$q(t) = q_{\text{car}} + q_{\text{car}} \frac{P_{\text{bo}}(t)}{P_{\text{bo,min}}}, P_{\text{bo}}(t) < 0, x_n^t > 0 \quad (26)$$

式中: q_{car} 为辅助服务补偿价格固定值, 元/kWh; $P_{\text{bo,max}}$ 、 $P_{\text{bo,min}}$ 分别为配电网日前调度净负荷最大、最小值, kW。

当配电网日前净负荷小于 0 时, 对电动公交车的放电行为进行惩罚, 当配电网日前净负荷大于 0 时, 对电动公交的充电行为进行惩罚, q_{bar} 为惩罚价格固定值, 元/kWh。

$$q(t) = q_{\text{bar}} \quad (27)$$

$$F_{\text{EV_tf}}(n) = \sum_{t=1}^{96} Q_t^n \quad (28)$$

2.2.3 配电网的网损成本

网损成本计算方式参照文献[27], 对含有 M 条支路的配电网进行潮流计算, 支路的有功损耗为

$$P_{t,m}^{\text{loss}} = R_m (|V_{ml} - V_{mr}| |Y_m|)^2 \quad (29)$$

式中: $P_{t,m}^{\text{loss}}$ 为 t 时段内第 m 条支路的有功损耗; R_m 、 Y_m 分别为第 m 条支路的电阻、导纳; V_{ml} 、 V_{mr} 为第 m 条支路两端节点电压。

t 时段内的网损成本为

$$P_t^{\text{loss}} = \sum_{m=1}^M P_{t,m}^{\text{loss}} \quad (30)$$

则网损总成本为

$$F_3 = \sum_{t=1}^{96} k_2 P_t^{\text{loss}} \quad (31)$$

式中: k_2 为网损成本折算系数, 设定为 100。

配电网节点电压约束条件为

$$U_{\text{min}}^* < U_i^* < U_{\text{max}}^* \quad (32)$$

式中: U_i^* 为节点 i 的电压标么值; U_{max}^* 、 U_{min}^* 分别为节点 i 的电压标么值上、下限, 本文分别设置为 1.05、0.95。

2.2.4 配电网碳排放量

$$F_4 = \sum_{t=1}^{96} Z_t \times E_{\text{mg}} \quad (33)$$

式中: F_4 为配电网碳排放量, kg; Z_t 为配电网 t 时段产生碳排放量所对应的电能, kWh; E_{mg} 为配电网平均碳排放因子, t/MWh。

$$Z_t = \begin{cases} \frac{1}{4} P_{\text{bo}}(t), P_{\text{bo}}(t) \geq 0 \\ 0, P_{\text{bo}}(t) < 0 \end{cases} \quad (34)$$

2.2.5 日前优化调度多目标函数归一化

由于 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 数量级不同, 需要对其进行归一化处理。由于 F_1 是正向指标, F_2 、 F_3 、 F_4 是负向指标, 因此, 需要对 F_1 进行变号处理。通过对多目标函数的归一化处理, 将多目标函数转化为单目标函数, 如式(35)所示。

$$\min F^* = \sum_{s=1}^{10} \alpha_s \left(\frac{-F_1}{F_{1,\text{base}}} + \frac{F_2}{F_{2,\text{base}}} + \frac{F_3}{F_{3,\text{base}}} + \frac{F_4}{F_{4,\text{base}}} \right) \quad (35)$$

式中: 由于本文日前调度采用削减后的风电出力场景与光伏出力场景, 其场景次数均设置为 10 次, 每种场景出现概率相同, 因此场景 $s(s=1,2,\dots,10)$ 出现的概率 α_s 设置为 0.1; $F_{1,\text{base}}$ 为 F_1 的基准值, 取值为电动公交车未参与日前调度时配电网风光净收益, 元; $F_{2,\text{base}}$ 为 F_2 的基准值, 取值为电动公交车无序充电时的调度成本, 元; $F_{3,\text{base}}$ 为 F_3 的基准值, 取值为电动公交车未参与日前调度时配电网的网损成本, 元; $F_{4,\text{base}}$ 为 F_4 的基准值, 取值为电动公交车未参与日前调度时配电网碳排放量, kg。

2.3 日内优化调度目标函数

2.3.1 配电网性能指标

配电网新能源利用率 J_1 是指在配电网中整合和利用新能源的效率。

$$J_1 = \frac{\sum_{t=1}^{96} \min(P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WT}}(t), P_a(t))}{\sum_{t=1}^{96} (P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WT}}(t))} \times 100\% \quad (36)$$

式中: $P_{\text{PV}}(t)$ 为 t 时段日内光伏发电预测功率, kW; $P_{\text{WT}}(t)$ 为 t 时段日内风电预测功率, kW; $P_a(t)$ 为 t 时段日内配电网总负荷值, kW。

$$P_a(t) = P_{\text{ev}}(t) + P_{\text{bl}}(t) \quad (37)$$

式中: $P_{\text{ev}}(t)$ 为电动公交车集群在 t 时段日内总的充电功率, kW; $P_{\text{bl}}(t)$ 为配电网基础负荷在 t 时段的日内预测功率, kW。

配电网净负荷标准差是指在配电网中净负荷的波动程度或离散程度的度量。

$$J_2 = \sqrt{\frac{1}{96} \sum_{t=1}^{96} [P_{\text{ev}}(t) + P_{\text{bl}}(t) - P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{WT}}(t) - P_{\text{ave}}]^2} \quad (38)$$

式中: J_2 为配电网净负荷标准差, kW; P_{ave} 为配电网净负荷平均值, kW。

2.3.2 电动公交车调度成本

电动公交车参与车网互动时, 其日内调度产生的成本 J_3 主要分为 4 部分: 电动公交车充放电成本、电动公交车电池损耗成本、电动公交车日前-日内充

放电计划偏差惩罚成本^[22]、电动公交车辅助服务补偿收益。日内调度电动公交车充放电成本、电动公交车电池损耗成本与电动公交车辅助服务补偿收益参照日前调度公式。

$$J_3 = J_{EV_cha_dis} + J_{EV_deg} + J_{EV_cheng} - J_{EV_tf} \quad (39)$$

式中： $J_{EV_cha_dis}$ 为电动公交车集群在调度期间充放电产生的成本，元； J_{EV_deg} 为电动公交车电池损耗成本，元； J_{EV_cheng} 为电动公交日前-日内充放电计划偏差惩罚成本，元； J_{EV_tf} 为电动公交车辅助服务补偿收益，元。

$$J_{EV_cheng} = \sum_{t=1}^{96} \omega |P_t^{in,z} - P_t^{da,z}| \quad (40)$$

式中： ω 为惩罚成本系数，元/kWh； $P_t^{in,z}$ 、 $P_t^{da,z}$ 分别为日前优化后和日内阶段电动公交集群 t 时刻的总充放电功率，kW。日内优化调度多目标函数归一化处理方式与日前优化调度多目标函数处理方式类似，在此不再赘述。

3 电动公交车多时间尺度优化调度策略

本文设计的考虑辅助服务奖励机制的电动公交车多时间尺度优化调度策略框架如图1所示。

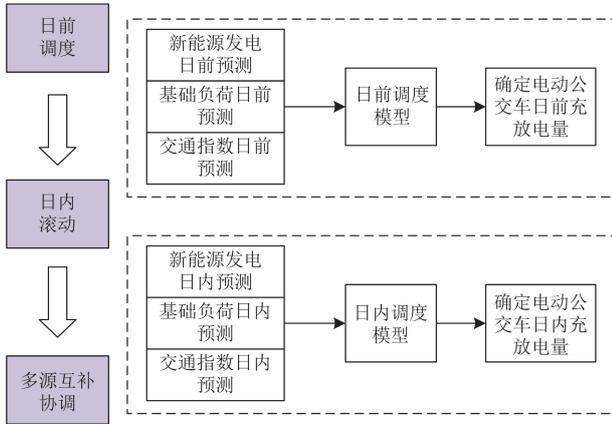


图1 多时间尺度调度框架图

Fig. 1 Multi-time-scale scheduling framework

本文采用电动公交车夜间充放电、日间补电的调度模式。对电动公交车充放电功率进行优化控制时，以24h为一个优化周期，将一天分为96个时段，每个时段对应时间为15min。

$$P_b(t) = P_{ev}(t) + P_{bl}(t) - P_{pv}(t) - P_{WT}(t) \quad (41)$$

式中： $P_b(t)$ 为配电网日内调度净负荷，kW。

根据净负荷数据制定各个时段的峰、平、谷电价，峰、平、谷电价均对应32个时段，将净负荷较大的32个时段设置为峰时电价，将净负荷较小的

32个时段设置为谷时电价，其余时段为平时电价，利用优化算法对目标函数进行求解。

4 算例分析

4.1 参数设置

交通指数参考文献[28]，仿真环境参考文献[27]，基于附录A图A3所示的IEEE33节点配电网测试系统建立，4条双线公交线路与1条环线共100辆公交车的运营数据如附录A表A1所示，每辆电动公交车夜间额定充电功率设置为30kW，日间充电功率设置为60kW^[28]，即电动公交日间仅进行充电操作，耗电量为1.1kWh/km，电池容量为250kWh^[29]，电池充放电效率为0.95。电动公交车充电峰谷分时电价数据来源于文献[26]，峰时电价为1.322元/kWh，平时电价为0.832元/kWh，谷时电价为0.369元/kWh。我国2023年将电池生产价格降低到0.7元/(W·h)，由此设置电池更换成本 $C^B = 175000$ 元，2023年9月18日，国家能源局华中监管局印发了《华中区域电力辅助服务管理实施细则》、《华中区域电力并网运行管理实施细则》(简称《两个细则》)。《两个细则》中，明确了储能辅助服务的补偿标准为0.3元/kWh。辅助服务补偿价格固定值 q_{car} 设置为0.3元/kWh，惩罚价格固定值 q_{bar} 设置为0.5元/kWh，电动公交车日前-日内充放电计划偏差惩罚成本系数 ω 设置为0.1元/kWh^[22]。

在工作日，由于办公室、工厂等需要正常运营，工业部门的用电需求通常较高，而在休息日，这些用电需求通常会减少，导致休息日与工作日基础负荷具有明显差异。工作日基础负荷数据来源于文献[22]，休息日基础负荷数据参考文献[27]。

基础负荷的日前、日内预测误差分别为3%、1%^[30]。工作日、休息日基础负荷预测功率与实际功率曲线分别如图2、图3所示。

分布式风电、光伏装机容量分别为1000kW、4000kW，主网与配电系统交换功率最大值设置为3000kW。本文新能源上网电价的设定采用固定分时电价的形式，风电、光伏发电上网电价参照文献[1]，01:00—07:00、23:00—24:00时段为谷时电价，10:00—15:00、18:00—21:00时段为峰时电价，其余时段为平时电价。电价峰、平、谷时段上网电价分别设置为1.256元/kWh、0.503元/kWh、0.249元/kWh，惩罚电价设置为0.6元/kWh。电网平均碳排放因子 E_{mg} 取值为0.6101t/MWh。

为了体现本文所提方案的优越性，算例分析设置一下对比方案进行讨论。

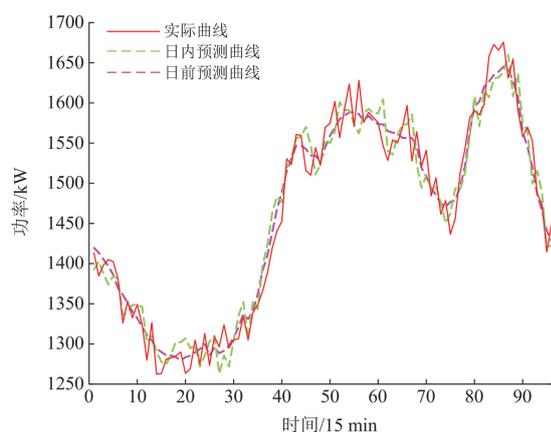


图2 工作日基础负荷预测功率与实际功率

Fig. 2 Forecast and actual power of basic load on weekdays

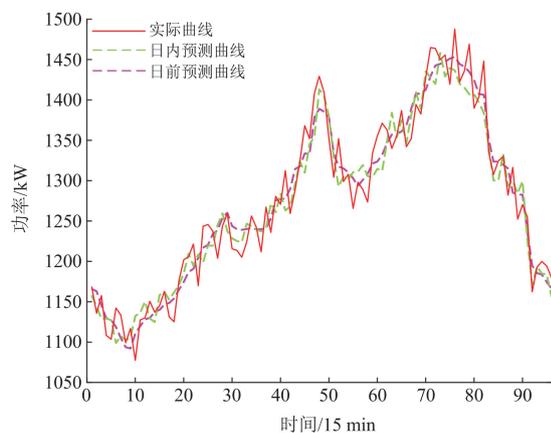


图3 休息日基础负荷预测功率与实际功率

Fig. 3 Forecast and actual power of basic load on weekends

方案 1: 电动公交车在动态分时电价的引导下进行有序充电操作, 但不进行放电, 不考虑对电动公交车辅助服务进行补偿。

方案 2: 电动公交车在动态分时电价的引导下进行有序充放电操作, 充分发挥电动公交车移动储能的作用, 不考虑对电动公交车辅助服务进行补偿。

方案 3: 电动公交车在动态分时电价的引导下进行有序充放电操作, 充分发挥电动公交车移动储能的作用。考虑对电动公交车辅助服务进行补偿, 补偿价格为固定值 0.3 元/kWh。

本文方案: 电动公交车在动态分时电价的引导下进行有序充放电操作, 充分发挥电动公交车移动储能的作用。考虑对电动公交车辅助服务进行补偿, 补偿价格为动态价格, 其随着配电网供电量与用电

量的平衡关系的变化而变化。

4.2 工作日基于动态补偿价格机制的调度结果

在本文方案的实验条件下, 工作日电动公交车集群的日内充电功率与日前充电功率如图 4 所示。

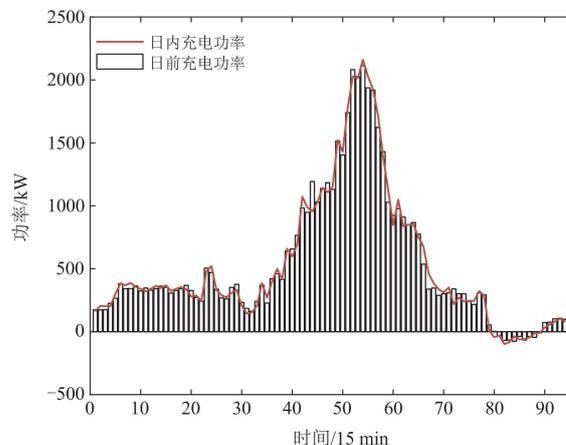


图4 工作日电动公交集群的日内充电功率与日前充电功率

Fig. 4 Intra day charging power and pre day charging power of electric bus clusters on weekdays

由图 4 与附录 A 图 A1、图 A2 可知, 第 48—56 时段(12: 00—14: 00)光伏发电量较高, 配电网新能源消纳受阻量较大, 此时电动公交车进行大量充电以完成对配电网新能源的消纳; 而第 64—96 时段(16: 00—24: 00)光伏发电量逐渐降低至 0, 风力发电无法满足工作日基础负荷用电需求, 此时段电网基础负荷值较高, 为避免配电网供电量与用电量不平衡程度进一步扩大, 电动公交车集群充电电量较少, 甚至在第 80—88 时段(20: 00—22: 00)进行放电。

在不同的实验方案下, 工作日风、光电站与电动公交车经济指标如表 2 所示。

表 2 工作日风、光电站与电动公交经济指标

Table 2 Economic indicators for weekday wind, photovoltaic stations, and electric buses

实验方案	风电 净收益	光伏发电 净收益	电动公交车 集群调度 成本	元
				电动公交车集群 辅助服务补偿
方案 1	8454.30	17 287.10	6740.88	0
方案 2	8991.76	17 824.56	4170.93	0
方案 3	9092.22	17 925.16	652.06	4062.27
本文方案	9152.82	17 985.62	737.95	3672.58

采用本文所提方案对电动公交车进行调度时, 工作日电动公交车的荷电状态如图 5 所示。工作日配电网节点电压如图 6 所示, 均满足本文约束条件。

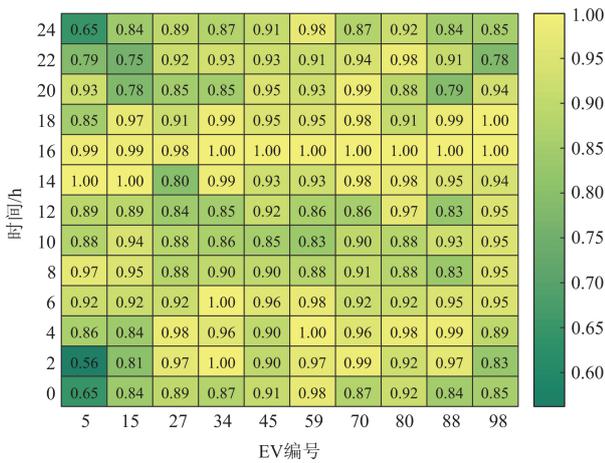


图5 工作日电动公交车的荷电状态

Fig. 5 State of charge of electric buses on weekdays

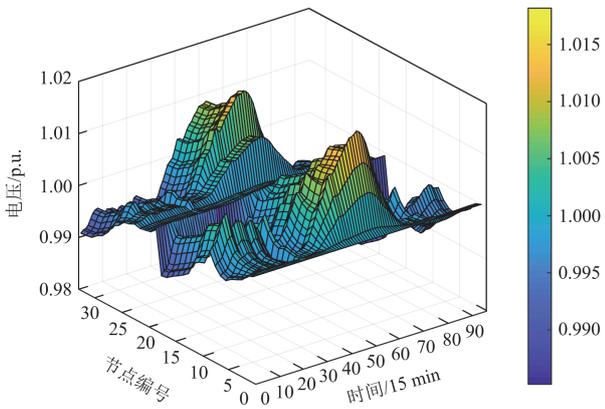


图6 工作日配电网节点电压

Fig. 6 Node voltage of distribution networks on weekdays

本文所提方案综合考虑电动公交车的日前调度与日内调度，并充分发挥了电动公交车移动储能的作用。相比于方案1，本文所提方案充分利用了电动公交车的储能特性，对配电网新能源消纳效果更好，配电网新能源利用率较高，因此，配电网新能源惩罚成本较少，风电、光伏发电净收益更多。由于引进了基于动态补偿价格的辅助服务奖励机制，相比于方案2、方案3，本文所提方案下电动公交车对配电网新能源消纳效果更好，风电、光伏发电净收益更多。4种方案下工作日配电网网损成本与碳排放量如图7所示。

方案1、方案2、方案3调度策略下的配电网网损成本分别为44.32元、34.88元、33.17元；本文所提方案网损成本为31.25元，相比于3种对比方案，分别降低了29.49%、10.41%、5.79%。方案1、方案2、方案3调度策略下的配电网碳排放量分别为10 092.1 kg、9311.4 kg、9094.6 kg；本文所提方

案碳排放量为8968.7 kg，相比于3种对比方案，分别降低了1123.4 kg、342.7 kg、125.9 kg。

在不同的实验方案下，工作日配电网系统性能指标如表3所示。由表3可知，本文方案的工作日配电网各项性能指标均优于其他方案。由表2与表3可知，相比于方案3，本文所提方案电动公交车集群获得的辅助服务补偿较少，但对配电网的性能指标优化效果更好，即电动公交车的充放电响应更为有效。

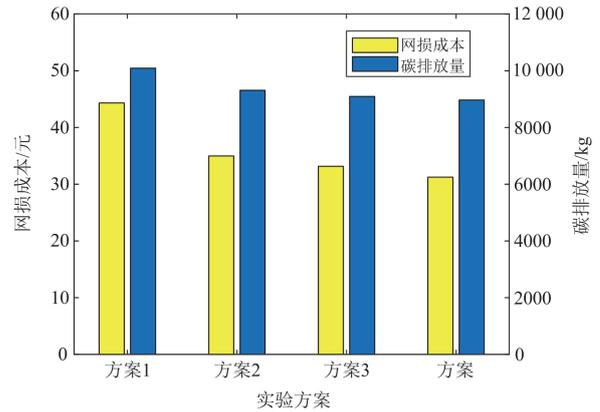


图7 工作日配电网网损成本与碳排放量

Fig. 7 Cost of network losses and carbon emissions in distribution networks on weekdays

表3 工作日配电网系统性能指标

Table 3 Performance indicators of distribution network on weekdays

实验方案	新能源 消纳量/kWh	净负荷 方差/kW ²	净负荷 标准差/kW	净负荷 峰谷差/kW
方案1	3.0581×10^4	2.3457×10^5	484.33	1765.27
方案2	3.2371×10^4	1.5497×10^5	393.67	1597.78
方案3	3.2726×10^4	1.2851×10^5	358.49	1385.71
本文方案	3.2934×10^4	1.1384×10^5	337.50	1228.43

4.3 休息日基于动态补偿价格机制的调度结果

在本文方案的实验条件下，休息日电动公交车集群的日内充电功率与日前充电功率如图8所示。

由图8可知，休息日电动公交车集群日内充电功率曲线、日前充电功率曲线与工作日大致相同，但相比于工作日，休息日在第40—60时段(10:00—15:00)交通指数较高，路况拥挤，电动公交车可以进行充电的时间较短。因此，相比于工作日，休息日电动公交车在10:00—15:00充电电量更低。

采用本文所提方案对电动公交车进行调度时，休息日电动公交车的荷电状态如图9所示，休息日配电网节点电压如图10所示，均满足本文约束条件。

在不同的实验方案下，休息日风、光电站与电动公交车经济指标如表4所示。4种方案下休息日

配电网网损成本与碳排放量如图 11 所示,对 4 种方案配电网网损与碳排放量的分析思路与工作日相同, 在此不再赘述。

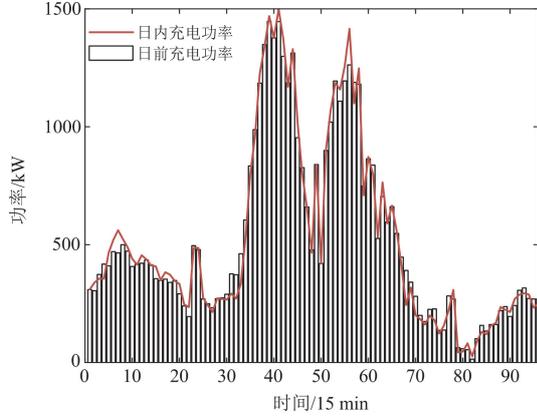


图 8 休息日电动公交车集群的日内充电功率与日前充电功率
Fig. 8 Intra day charging power and pre day charging power of electric bus clusters on weekends

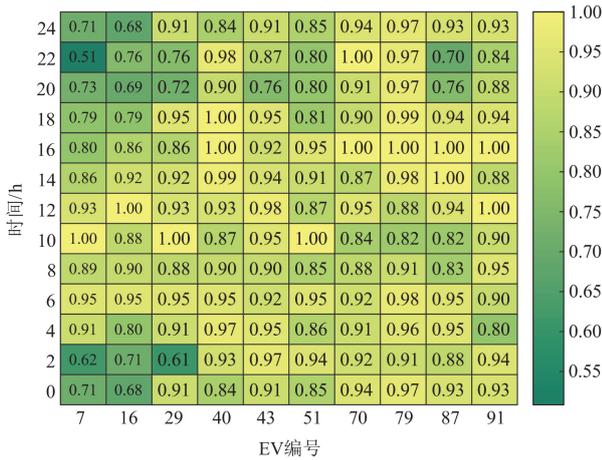


图 9 休息日电动公交车的荷电状态
Fig. 9 State of charge of energy storage system on weekends

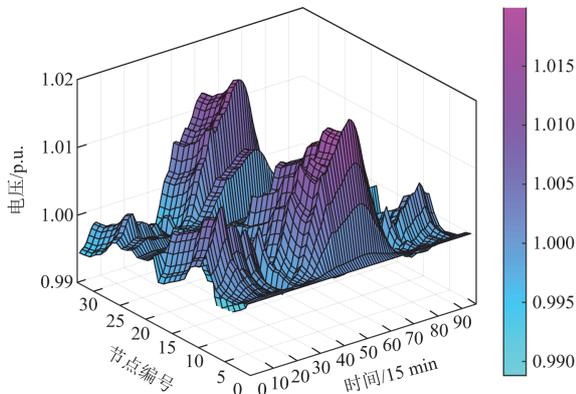


图 10 休息日配电网节点电压
Fig. 10 Node voltage of distribution network on weekends

表 4 休息日风、光电站与电动公交车经济指标
Table 4 Economic indicators of wind, photovoltaic stations, and electric buses on weekends

实验方案	风电净收益	光伏发电净收益	元	
			电动公交车集群调度成本	电动公交车集群辅助服务补偿
方案 1	8010.32	16 843.23	7012.22	0
方案 2	8296.24	17 129.12	4286.25	0
方案 3	8336.72	17 169.65	682.48	3932.10
本文方案	8403.76	17 236.11	1864.79	3137.44

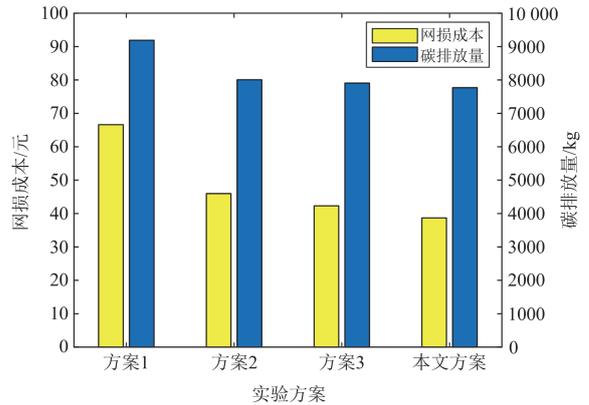


图 11 休息日配电网网损成本与碳排放量
Fig. 11 Cost of network losses and carbon emissions in distribution networks on weekends

相比于方案 1、方案 2、方案 3, 本文方案风电净收益分别增加了 4.92%、1.29%、0.81%, 光伏发电净收益分别增加了 2.33%、0.63%、0.38%。本文方案风电、光伏发电获得净收益最高, 对休息日配电网经济指标优化效果最好。

在不同的实验方案下, 休息日配电网系统性能指标如表 5 所示。由表 5 可知, 本文方案的休息日配电网多个性能指标均优于其他方案。

表 5 休息日配电网系统性能指标
Table 5 Performance indicators of distribution network system on weekends

实验方案	新能源	净负荷	净负荷	净负荷峰
	消纳量/kWh	方差/kW ²	标准差/kW	谷差/kW
方案 1	2.9575×10^4	4.2519×10^5	652.14	1705.89
方案 2	3.0052×10^4	3.4279×10^5	585.48	2208.19
方案 3	3.0216×10^4	3.1960×10^5	565.33	2157.56
本文方案	3.0439×10^4	2.9577×10^5	543.84	2029.15

5 结论

本文提出一种基于动态补偿价格辅助服务奖励机制的电动公交车多时间尺度优化调度策略。通过

与其他方案的对比,说明了本文方案优化配电网系统经济指标与配电网性能指标的优越性。

1) 在工作日与休息日两种调度场景下,与未采用基于动态补偿价格的辅助服务奖励机制相比,采用基于动态补偿价格的辅助服务奖励机制进行调度时会改善配电网的经济指标与配电网的性能指标。

2) 交通路况会对电动公交车集群的调度结果产生影响,在交通路况相对畅通时,电动公交车集群日间可调度时间较长,对电动公交车集群进行调度时的优化效果更为突出。

附录 A

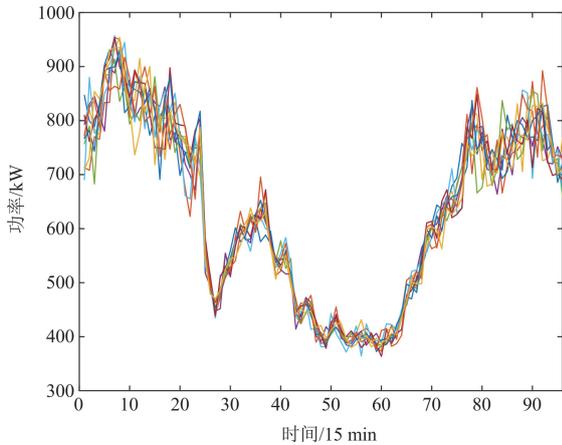


图 A1 削减后的日内风电出力场景

Fig. A1 Reduced wind power output scenarios within the day

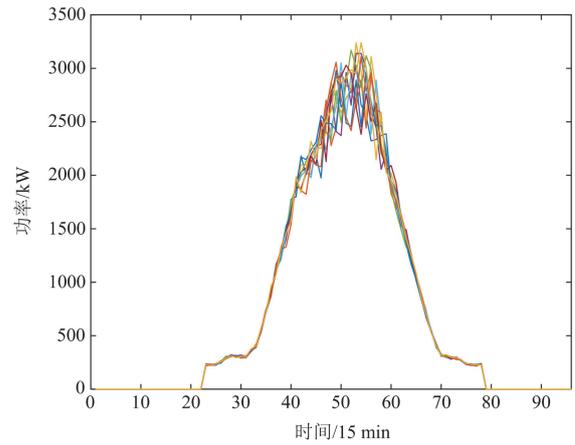


图 A2 削减后的日内光伏发电出力场景

Fig. A2 Reduced photovoltaic output scenarios within the day

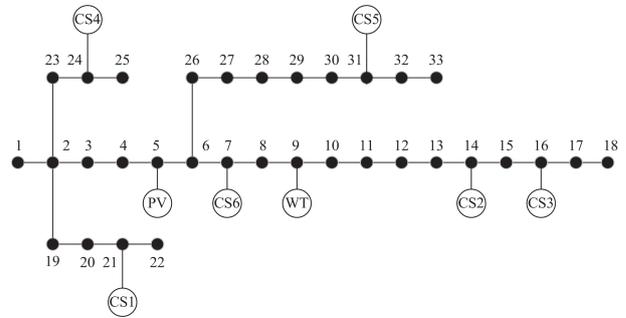


图 A3 IEEE33 节点配电网测试系统

Fig. A3 IEEE33-bus distribution network test system

表 A1 电动公交车的运营数据表

Table A1 Operational data sheet for electric buses

线路编号	始发站	终点站	运行台数/辆	单程运行时间/min	单程行驶距离/km	行程间隔/min	首末班车时间
195	充电站 5	充电站 1	13	59	15.3	8	05:20—19:05
195	充电站 1	充电站 5	13	59	15.3	8	06:00—20:05
315	充电站 3	充电站 1	9	35	11.8	10	06:00—20:30
315	充电站 1	充电站 3	9	35	11.8	10	06:00—20:00
1	充电站 2	充电站 1	8	35	11.4	10	06:00—18:50
1	充电站 1	充电站 2	8	35	11.4	10	05:50—18:10
2	充电站 4	充电站 1	9	35	9.8	10	06:00—18:40
2	充电站 1	充电站 4	9	35	9.8	10	05:50—18:00
158	充电站 6	充电站 6	22	56	27.4	8	05:50—19:00

参考文献

[1] 张良, 郑丽冬, 冷祥彪, 等. 基于灰狼算法的风-光-抽水蓄能联合系统多目标优化策略[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(10): 1554-1566.
ZHANG Liang, ZHENG Lidong, LENG Xiangbiao, et al. Multi-objective optimization strategy for wind-photovoltaic-pumped storage combined system based on gray wolf algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024, 58(10): 1554-1566.

[2] 张娜, 赵琳, 商文颖, 等. 基于 STIRPAT 模型的大连市全流程碳足迹溯源[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 133-139.
ZHANG Na, ZHAO Lin, SHANG Wenyong, et al. Whole process carbon footprint traceability of dalian city based on STIRPAT model[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 133-139.

[3] 贺旭辉, 王灿, 李欣然, 等. 计及 CLHG-SOFC 碳捕集的多能源系统低碳优化调度[J]. 智慧电力, 2023, 51(5): 57-64.

- HE Xuhui, WANG Can, LI Xinran, et al. Low carbon optimal scheduling of multi-energy system considering CLHG-SOFC carbon capture[J]. *Smart Power*, 2023, 51(5): 57-64.
- [4] 周原冰, 张士宁, 侯方心, 等. 电力行业碳达峰及促进全社会碳减排影响分析[J]. *中国电力*, 2024, 57(9): 1-9. ZHOU Yuanbing, ZHANG Shining, HOU Fangxin, et al. Analysis of carbon peaking in power sector and its impact on promoting whole-society carbon emissions reduction[J]. *Electric Power*, 2024, 57(9): 1-9.
- [5] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(5): 1-13.
- [6] LIU Y, HAO L, XING Z, et al. Multi-objective coordinated optimization of power system with wind power accommodation[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 188-195.
- [7] 张冠宇, 付炜, 陈晨, 等. 面向电-气-热综合能源系统的恢复力研究现状与展望[J]. *智慧电力*, 2023, 51(1): 69-77. ZHANG Guanyu, FU Wei, CHEN Chen, et al. Status and prospects of resilience research for electric-gas-thermal integrated energy system[J]. *Smart Power*, 2023, 51(1): 69-77.
- [8] 李欣, 陈英彰, 李涵文, 等. 考虑碳交易的电-热综合能源系统两阶段鲁棒优化低碳经济调度[J]. *电力建设*, 2024, 45(6): 58-69. LI Xin, CHEN Yingzhang, LI Hanwen, et al. Two-stage robust optimization of low-carbon economic dispatch for electricity-thermal integrated energy system considering carbon trade[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(6): 58-69.
- [9] 文劲宇, 周博, 魏利岫, 等. 中国未来电力系统储电网初探[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(7): 1-10. XWEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen, et al. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(7): 1-10.
- [10] 李志勇, 周鹏鹏, 陈朋, 等. 电化学储能电站协调控制器动模试验关键技术研究及应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(4): 165-173. LI Zhiyong, ZHOU Pengpeng, CHEN Peng, et al. Key technologies research and application of a dynamic test for coordination controller of an electrochemical energy storage power station[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(4): 165-173.
- [11] PAN Xueping, XU Qijie, XU Tao, et al. Primary frequency control considering communication delay for grid-connected offshore wind power systems[J]. *Global Energy Interconnection*, 2024, 7(3): 241-253.
- [12] 程杉, 汪业乔, 廖玮霖, 等. 含电动汽车的新能源微电网多目标分层优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(12): 63-71. CHENG Shan, WANG Yeqiao, LIAO Weilin, et al. Bi-level multi-objective optimization of a new energy microgrid with electric vehicles[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(12): 63-71.
- [13] 颜湘武, 王庆澳, 卢俊达, 等. 含计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(11): 69-79. YAN Xiangwu, WANG Qingao, LU Junda, et al. Microgrid energy scheduling with electric vehicles and flexible loads[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(11): 69-79.
- [14] 罗继东, 邹梦丽, 侯宝华, 等. 考虑 V2G 及碳排放量的风光储综合能源系统协调优化运行[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(6): 20-25, 35. LUO Jidong, ZOU Mengli, HOU Baohua, et al. Coordinated and optimal operation of wind-solar-battery integrated energy system considering V2G and carbon emission[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(6): 20-25, 35.
- [15] 陈忠华, 王才倩, 陈嘉敏, 等. V2G 模式下的电动汽车有序充放电控制模型研究[J]. *浙江电力*, 2019, 38(8): 37-42. CHEN Zhonghua, WANG Caiqian, CHEN Jiamin, et al. Study on coordinated charging and discharging control model of electric vehicles under V2G mode[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(8): 37-42.
- [16] 徐冉, 徐潇源, 王晗, 等. 考虑公交车移动特性的电动公交车-充电站-配电网联合调度[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(24): 36-44. XU Ran, XU Xiaoyuan, WANG Han, et al. Coordinated dispatching of electric bus, charging station and distribution network considering bus travelling characteristics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(24): 36-44.
- [17] ZHOU Boya, WU Ye, ZHOU Bin, et al. Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions[J]. *Energy*, 2016, 96: 603-613.
- [18] 叶伦, 姚建刚, 杨胜杰, 等. 含高比例可再生能源电力系统的调峰成本量化与分摊模型[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(15): 20-28. YE Lun, YAO Jiangang, YANG Shengjie, et al. Quantification and allocation model of peak regulation cost

- for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 20-28.
- [19] 崔杨, 于世鹏, 张节潭, 等. 考虑光热电站调峰补偿的高比例新能源电力系统经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 4922-4934.
CUI Yang, YU Shipeng, ZHANG Jietan, et al. Economic dispatch of high-proportion renewable energy power system considering peak-shaving compensation of concentrating solar power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 4922-4934.
- [20] 李昕如, 沈瑾, 陈卓航. 考虑用户分摊调峰辅助服务费用的微网梯次电池储能优化配置[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5): 217-224.
LI Xinru, SHEN Jin, CHEN Zhuohang. Optimization of microgrid secondary batteries energy storage considering user-shared peak-shaving auxiliary service cost[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(5): 217-224.
- [21] 章锐, 于继来. 电动公交车负荷参与新型城网调峰的能力评估[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(增刊 1): 82-94.
ZHANG Rui, YU Jilai. Capacity evaluation of electric bus load participating in peak shaving of new urban power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(S1): 82-94.
- [22] 陈丽娟, 秦萌, 顾少平, 等. 计及电池损耗的电动公交车参与 V2G 的优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 52-60.
CHEN Lijuan, QIN Meng, GU Shaoping, et al. Optimal dispatching strategy of electric bus participating in vehicle-to-grid considering battery loss[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 52-60.
- [23] ZANDRAZAVI S F, GUZMAN C P, POZOS A T, et al. Stochastic multi-objective optimal energy management of grid-connected unbalanced microgrids with renewable energy generation and plug-in electric vehicles[J]. Energy, 2022, 241.
- [24] AGHAEI J, KARAMI M, MUTTAQI K M, et al. MIP-based stochastic security-constrained daily hydrothermal generation scheduling[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(2): 615-628.
- [25] 朱磊, 黄河, 高松, 等. 计及风电消纳的电动汽车负荷优化配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊 1): 194-203.
ZHU Lei, HUANG He, GAO Song, et al. Research on optimal load allocation of electric vehicle considering wind power consumption[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 194-203.
- [26] 张良, 孙成龙, 蔡国伟, 等. 基于 PSO 算法的电动汽车有序充放电两阶段优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1837-1852.
ZHANG Liang, SUN Chenglong, CAI Guowei, et al. Two-stage optimization strategy for coordinated charging and discharging of EVs based on PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1837-1852.
- [27] 陈凯炎, 牛玉刚. 基于 V2G 技术的电动汽车实时调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 1-9.
CHEN Kaiyan, NIU Yugang. Real-time scheduling strategy of electric vehicle based on vehicle-to-grid application[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 1-9.
- [28] 张良, 黄久鸿, 戚佳金, 等. 计及碳配额的电动公交车-配电网协同优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(12): 48-57.
ZHANG Liang, HUANG Jiahong, QI Jiajin, et al. Cooperative optimal scheduling strategy for distribution network with electric buses considering carbon quota[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 48-57.
- [29] 蔡子龙, 束洪春, 杨博, 等. 计及行车计划编制的电动公交车有序充电策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 45-52.
CAI Zilong, SHU Hongchun, YANG Bo, et al. Coordinated charging strategy of electric bus considering driving plan[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 45-52.
- [30] 金力, 房鑫炎, 蔡振华, 等. 考虑特性分布的储能电站接入的电网多时间尺度源储荷协调调度策略[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3541-3648.
JIN Li, FANG Xinyan, GAI Zhenhua, et al. Multiple time-scales source-storage-load coordination scheduling strategy of grid connected to energy storage power station considering characteristic distribution[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3541-3648.

收稿日期: 2024-10-30; 修回日期: 2025-03-20

作者简介:

戚佳金(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为智能用电及电动汽车充换电技术; E-mail: qijiajin@126.com

黄久鸿(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电动汽车灵活性资源利用; E-mail: 1594886192@qq.com

张良(1985—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为车-网耦合互动、储能系统优化调度。E-mail: xiaozhanghit@163.com

(编辑 周金梅)