

计及电池老化的双源无轨电车与电网联合优化调度

王宇轩¹,杨欢红¹,李俊¹,黄文焘²,张卫川³,王理想³

(1.上海电力大学电气工程学院,上海 200090;

2.上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;

3.河南许继仪表有限公司,河南 许昌 461000)

摘要:针对当前公交系统运营成本高、充电负荷集中加剧电网峰谷差的问题,提出一种基于电池老化的双源无轨电车与电网联合优化调度方法。首先,搭建交通网-电网耦合的联合优化框架,基于实时交通状态构建车辆运行能耗模型;其次,分析双源无轨电车在不同运行模式下的电池老化情况,综合考虑电池老化差异与分时电价因素,构建以最小化公交系统运行成本、优化电网运行性能为目标的联合调度模型,并采用自适应遗传算法进行求解;最后,仿真结果表明,所提方案能够充分挖掘双源无轨电车在交通-电力耦合网络中的调度潜力,在提升公交系统运营经济性的同时,改善了电网负荷曲线与运行性能,实现了双系统协同优化与互利共赢。

关键词:双源无轨电车;电网;电池老化;联合优化

0 引言

在绿色能源转型与“双碳”目标驱动的大背景下,公共交通电气化成为当下交通领域改革的核心趋势^[1-2]。近年来,由架空线网与车载储能混合供电的双源无轨电车(Dual-source Trolleybus, DT)既消除了电动公交车续航里程问题,又比传统燃油公交车更加环保和节能,逐渐成为城市新型电力系统的重要组成部分^[3]。然而,大规模DT无序充电会造成电网负荷峰谷差扩大、网损增加、电压跌落等消极影响^[4-5]。与此同时,在现有分时电价机制下,无序充电无法充分利用低电价时段为车辆充电,不利于公交系统的经济运行。因此,安排DT参与电网的优化运行具有重要意义。

目前,已有国内外学者针对电动公交车在电网中的有序充电问题展开研究。文献[6]考虑电动公交车充换电模式的响应特性,构建多时间尺度的调峰能力评估模型,得到日前、日内和在线3种不同时间尺度下的调峰能力变化趋势。文献[7]分析电动公交车的多种充电场景,提出基于光储充电站的分层分级充电优化策略,以降低购电成本和提高光伏利用率为目标建立多目标优化模型。文献[8]提出一种电动公交车参与电动汽车与电网互动的多

时间尺度优化调度策略,并在日前阶段采用双层优化模型,使用改进的近似交替方向法(Proximal Alternating Direction Method, PADM)对问题进行求解。文献[9]基于数据模型双驱动提出一种电动公交车多时段负荷建模和调节潜力评估方法,建立电动公交车多时段负荷解析模型。文献[10]表明电动公交车参与电网需求响应可以通过转移充电负荷从而缓解电网拥堵问题。文献[6-10]均利用电动公交车灵活充放电特性实现与新能源的协同优化调度,但未考虑交通网与电网间信息耦合对调度计划的影响。为此,文献[11]通过分析电网与交通网耦合的模式和目标,进而对两网耦合的充电需求、充放电设施协同规划、优化运行策略等方面进行研究。文献[12]考虑电动汽车充电负荷导致的配电网稳定性下降问题,提出了一种基于电动汽车充电需求的电动汽车充电站联合电池储能系统的多目标优化规划模型。文献[13]针对分布式充换电设施难以满足电动汽车补能需求的难题,对电动汽车集中充换电设施规划和优化运行问题进行研究。文献[11-13]虽对交通网-电网耦合下的车辆充放电行为进行优化,但将电池容量设置为固定值,忽视了电池会随着充放电循环次数的累计发生容量衰减。

综上所述,本文提出一种基于电池老化差异的DT与电网联合优化调度方法。创新之处在于:(1)根据交通状态信息对车辆能耗进行优化,并以此为基础构建基于DT在线运行模式的电池老化模型,提高了调度方案的准确性;(2)综合考虑公交系统运行

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52177100)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52177100)

成本与电网性能指标建立 DT 与电网联合优化模型,实现系统经济性与稳定性的协同优化。

1 联合优化框架与能耗建模

1.1 交通网-电网耦合下联合优化框架

交通网与电网作为城市基础设施的 2 大核心系统,在能源动态交互、基础设施规划和智能协同控制等方面存在深度耦合关系。DT 作为兼具两网特性的移动储能单元,起到了优化交通网-电网协同规划以及动态负荷调节的作用。两网耦合下联合优化框架如图 1 所示。

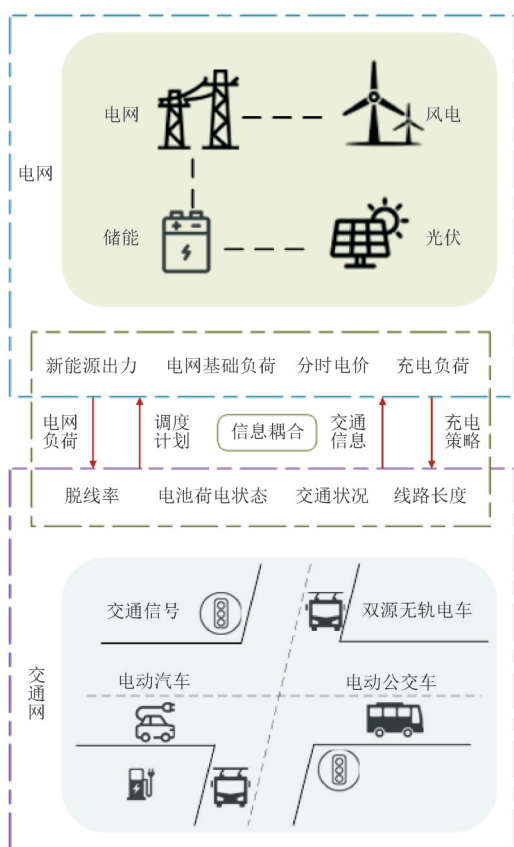


图 1 交通网与电网耦合下联合优化框架

Fig.1 Joint optimization framework under the coupling of transportation network and power grid

基于图 1 所示框架,本文提出一种多源信息耦合下的 DT 与电网联合优化方案,公交调度中心基于各线路长度、交通状况、脱线率等因素安排车辆运营计划^[14-17],在此基础上结合电网运行的性能指标协同规划车辆调度与电网优化运行,从而实现能源的高效利用并提升公共交通服务质量。考虑车辆电池老化和电网分时电价,构建 DT 与电网联合优化模型,达到降低公交系统运行成本同时平抑电网负荷峰谷差的目的。

1.2 基于交通状况的能耗建模

本文考虑交通路况因素对 DT 调度方案产生的影响。DT 在不同运行时段的能耗存在差异,早晚高峰时段,由于乘客需求增加与社会车辆造成的交通堵塞会对行程平均速度产生较大的影响^[18-19]。因此,行程平均速度很大程度上取决于当前时段的道路状况,分析交通拥堵状况对车辆行程能耗的影响。DT 的能耗主要受行驶过程中牵引力、空气阻力、滚动阻力和爬坡阻力的影响^[20],行驶驱动功率 P_M 如式(1)所示:

$$P_M = mgfv \cos \theta + \frac{1}{2} C_D A \rho v^3 + mg \sin \theta + mva \quad (1)$$

式中: m 为车辆总质量; g 为重力加速度; f 为滚动阻力系数; v 为车辆的速度; C_D 为空气阻力系数; A 为车辆前表面面积; ρ 为空气密度; θ 为道路坡度; a 为车辆加速度。

DT 通过动力传动系统将电能转换为车轮扭矩过程产生的损耗功率 P_D 可表示为^[21]:

$$P_D = \kappa_1 v^3 + \kappa_2 v^2 + \kappa_3 v + \gamma_c \quad (2)$$

式中: $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ 均为车辆相关常数; γ_c 为非运行状态下车辆传动系统功率。

DT 大多服务于城市中心交通网发达地区,道路状况较好且应避免明显的加减速行为来保障乘客的舒适度^[22],故认为道路坡度 θ 和加速度 a 为 0。采用拥堵系数描述交通状况信息对 DT 行程平均速度的影响,如表 1 所示。

表 1 不同拥堵指数下的行程速度与衰减系数

Table 1 Travel speed and attenuation coefficient under different congestion indices

拥堵指数	交通状况	行程平均速度	速度衰减系数 λ_i
[1.0, 1.5)	畅通	v_0	1
[1.5, 1.8)	缓行	$0.85v_0$	0.85
[1.8, 2.0)	拥堵	$0.8v_0$	0.8
[2.0, ∞)	严重拥堵	$0.7v_0$	0.7

注: v_0 为道路畅通时的平均行驶速度。

引入速度衰减系数 λ 表征交通状况信息对 DT 行程平均速度的影响,则车辆 k 执行行程 i 的能耗 E_{ki} 如式(3)所示:

$$E_{ki} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \eta_b \eta_h \frac{l_{ki}}{\lambda_{ki} v_0} (P_M^{ki} + P_D^{ki}) \quad (3)$$

式中: η_b 为电池效率; η_h 为电机效率; l_{ki} 为车辆 k 行程 i 的行驶距离; λ_{ki} 为表征交通状态信息的速度衰减系数; P_M^{ki}, P_D^{ki} 分别为车辆 k 行程 i 的行驶驱动功率和损耗功率。

1.3 基于运行模式的电池老化分析与成本量化

电池的老化主要由其内部复杂的物理或化学反应耦合引起^[23],影响电池老化的主要因素包括充放电速率、放电深度、循环次数和充放电电量^[24]。本文重点考虑充放电电量对电池老化的影响。研究发现电池循环老化速率与充放电过程中电池的荷电状态(State of Charge, SOC)变化范围关系密切,构建了电池循环老化速率 ξ 估计模型^[25],即:

$$\xi = \gamma_1 \psi_{\text{dev}} e^{(\gamma_2 \psi_{\text{av}})} + \gamma_3 e^{(\gamma_4 \psi_{\text{av}})} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \psi_{\text{dev}} = \frac{\psi_{\text{max}} - \psi_{\text{min}}}{2} \\ \psi_{\text{av}} = \frac{\psi_{\text{max}} + \psi_{\text{min}}}{2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\psi_{\text{av}}, \psi_{\text{dev}}$ 分别为电池荷电状态区间上下界均值和差值; $\psi_{\text{max}}, \psi_{\text{min}}$ 分别为电池荷电状态的最大值和最小值; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ 为电池循环老化模型系数。

虽然 DT 具有架空线网和车载动力电池 2 个动力系统,且两者独立运行,若车辆运行在架设线网的路段则会利用线网供给车辆电能且为电池充电直至充满,脱线路段则由电池驱动车辆^[26]。电池容量衰减导致 DT 脱网运行时的续航里程缩短,需频繁依赖线网供电,而产生额外充电需求,造成充电成本和电网峰值负荷的增加。为解决无差充电峰上加峰的问题,根据车辆动力来源和电池状态的不同划分为 3 种运行模式,如表 2 所示。

表 2 双源无轨电车运行模式

Table 2 Operating modes of dual-source trolleybus

运行模式	运行模式描述	车辆动力源	电池状态
A	线网驱动并为电池充电	架空线网	充电
B	线网驱动	架空线网	
C	电池驱动	电池	放电

分析不同运行模式下充放电电量对电池老化的影响,根据电池状态将 DT 运行中发生的充放电行为分为以下 3 种情况:(1)架空线网驱动车辆并为电池充电电量;(2)电池作为车辆动力源时的放电电量;(3)车辆行程结束后空驶至下一行程始站的放电电量。

综合考虑 DT 运行模式和能耗,得到车辆 k 行程 i 的充电电量 $\Delta q_{ki}^{\text{ch}}$ 和放电电量 $\Delta q_{ki}^{\text{dch}}$ 如式(6)所示:

$$\begin{cases} \Delta q_{ki}^{\text{ch}} = P_{ki}^{\text{ch}} t_{ki}^{\text{ch}} X_{ki}^{\text{ch}} \\ \Delta q_{ki}^{\text{dch}} = E_{ki} [l_{ki} \alpha_i + l_{ki} (1 - \alpha_i) (1 - X_{ki}^{\text{dr}}) (1 - X_{ki}^{\text{ch}}) + l_{kij} Y_{kij}] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{ki}^{\text{ch}}, t_{ki}^{\text{ch}}$ 分别为车辆 k 行程 i 的充电功率和充电时间; α_i 为行程 i 的脱线率; $X_{ki}^{\text{dr}}, X_{ki}^{\text{ch}}$ 分别为车辆 k 行

程 i 是否为线网驱动和线网驱动并为电池充电运行模式, $X_{ki}^{\text{dr}}, X_{ki}^{\text{ch}}$ 均为 0-1 变量; l_{kij} 为车辆 k 行程 i 终点与行程 j 起点之间的空驶距离; Y_{kij} 为车辆 k 执行完行程 i 后是否继续执行行程 j ,且行程 j 与行程 i 为相邻行程, Y_{kij} 为 0-1 变量。

结合车辆充放电过程电池 SOC 变化区间得到车辆 k 行程 i 的电池循环老化速率 ξ_{ki} ,如式(7)所示:

$$\xi_{ki} = \gamma_1 (\psi_{ki}^{\text{dev-dch}} + \psi_{ki}^{\text{dev-ch}}) e^{\gamma_2 (\psi_{ki}^{\text{av-dch}} + \psi_{ki}^{\text{av-ch}})} + \gamma_3 e^{\gamma_4 (\psi_{ki}^{\text{av-dch}} + \psi_{ki}^{\text{av-ch}})} \quad (7)$$

式中: $\psi_{ki}^{\text{av-ch}}, \psi_{ki}^{\text{dev-ch}}, \psi_{ki}^{\text{av-dch}}, \psi_{ki}^{\text{dev-dch}}$ 为车辆 k 行程 i 充电、放电过程电池荷电状态区间上下界均值和差值。

此外,充电功率也会对电池老化产生影响,由充电功率导致的日电池老化容量为 ω_k^{ch} ,如式(8)所示:

$$\omega_k^{\text{ch}} = \frac{\sum_{i=1}^I P_{ki}^{\text{ch}}}{C_k} \gamma_5 \sqrt{Q_k} \quad (8)$$

式中: γ_5 为电池老化模型系数; C_k, Q_k 分别为车辆 k 电池初始容量与额定容量; I 为行程 i 的最大值,即终止行程。

尽管电池在存储的过程中还存在日历老化现象,但日历老化对电池的影响有限,本文不考虑日历老化对电池容量的影响。综上所述,得到车辆 k 在阶段 r 的日电池老化容量 ω_{rk} ,如式(9)所示:

$$\omega_{rk} = \sum_{i=1}^I \left(\xi_{rki} (\Delta q_{rki}^{\text{ch}} + \Delta q_{rki}^{\text{dch}}) + \frac{P_{rki}^{\text{ch}}}{C_{rk}} \gamma_5 \sqrt{Q_k} \right) \quad (9)$$

式中: ξ_{rki} 为阶段 r 车辆 k 行程 i 的电池循环老化速率; $\Delta q_{rki}^{\text{ch}}, \Delta q_{rki}^{\text{dch}}$ 分别为阶段 r 车辆 k 行程 i 的充电和放电电量; P_{rki}^{ch} 为阶段 r 车辆 k 行程 i 的充电功率; C_{rk} 为阶段 r 车辆 k 的电池初始容量。

2 DT-电网联合优化模型

为实现 DT 与电网的联合优化,以公交系统运行成本和电网性能指标为优化目标,考虑电池电量、充电时间、节点电压等约束条件,建立车网联合优化模型。

2.1 联合优化目标函数

2.1.1 公交系统运行成本

考虑到电池容量衰退是一个长期累积的过程,为研究电池老化对 DT 与电网联合优化调度的影响,将车辆生命周期划分为多个阶段,对存在电池老化程度差异的车辆调度进行优化。公交系统运行成本由车辆购置成本、电池老化成本、运营成本 and 线损成本构成,如式(10)所示:

$$F_1 = C^{\text{pur}} + C^{\text{dec}} + C^{\text{oper}} + C^{\text{loss}} \quad (10)$$

式中： F_1 为公交系统运行成本； C^{pur} 为车辆购置成本； C^{dec} 为电池老化成本； C^{oper} 为运营成本； C^{loss} 为线损成本。

1) 车辆购置成本 C^{pur} 。车辆购置成本由完成公交公司制定行程表所需车辆的数量决定。将购置成本分摊到生命周期内转化为日均购置成本，如式(11)所示：

$$C^{\text{pur}} = \sum_{k=1}^K \frac{C_{\text{DT}}}{L_{\text{DT}} \times 365} \quad (11)$$

式中： C_{DT} 为每辆 DT 的购置成本； L_{DT} 为 DT 生命周期年限； K 为行程所需 DT 总数量。

2) 电池老化成本 C^{dec} 。电池容量受充放电循环次数和充电功率的影响持续衰减，容量衰减至初始容量的 80% 电池性能会显著退化甚至引发安全问题^[27]，需更换电池以确保车辆正常运行。电池老化成本 C^{dec} 如式(12)所示：

$$C^{\text{dec}} = \sum_{k=1}^K C_k^{\text{bat}} \frac{\omega_{rk} \times 100\%}{C_k(100\% - 80\%)} \quad (12)$$

式中： C_k^{bat} 为车辆 k 的电池购置成本。

3) 运营成本 C^{oper} 。运营成本与分时电价下各电价时段消耗的电能有关，由于行程能耗、行程在线运行模式、充电功率和充电时间的差异，需要分别考虑各行程架空线网驱动 DT 的电能成本和充电成本。运营成本 C^{oper} 如式(13)所示：

$$\begin{cases} C^{\text{oper}} = C_r^{\text{ch}} + C_r^{\text{dr}} \\ C_r^{\text{ch}} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I c_{rki}^{\text{price}} P_{rki}^{\text{ch}} t_{rki}^{\text{ch}} X_{rki}^{\text{ch}} \\ C_r^{\text{dr}} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I c_{rki}^{\text{price}} E_{rki} l_{rki} (1 - \alpha_{rki}) X_{rki}^{\text{dr}} \end{cases} \quad (13)$$

式中： C_r^{dr} 、 C_r^{ch} 分别为阶段 r 线网驱动车辆的电能成本和充电成本； c_{rki}^{price} 、 P_{rki}^{ch} 、 t_{rki}^{ch} 分别为阶段 r 车辆 k 行程 i 运行时段电价、充电功率和充电时长； E_{rki} 、 l_{rki} 、 α_{rki} 分别为阶段 r 车辆 k 行程 i 的能耗、线路长度和线路脱线率； X_{rki}^{ch} 、 X_{rki}^{dr} 分别为阶段 r 车辆 k 行程 i 运行在架空线网路段是否充电和利用线网电能驱动车辆， X_{rki}^{ch} 、 X_{rki}^{dr} 均为 0-1 变量。

4) 线损成本 C^{loss} 。电网 10 kV 交流电经变电站降压整流变换为 600 V 直流电，通过馈线供给供电分段内的 DT 行驶和电池充电。由于架空线网馈线和触线电阻的存在，功率在传输过程会产生损耗，损耗的大小随变电站与无轨电车之间距离的增加而增大。

DT 上下行道路为双向交通，采用上下行并路馈

电方式，馈线正极和回流线负极成对连接，线网触线选用 100 mm² 双沟型硬铜导线。DT 电压由于线路损耗产生电压降，无法与变电站电压相等。因此，线路电压降会导致 DT 从变电站获取更大的电流，以维持车辆运行所需功率。车辆 k 行程 i 从线网获取的总功率 P_{ki} 如式(14)所示：

$$P_{ki} = \begin{cases} P_M + P_D + P_{\text{ch}} & X_{ki}^{\text{ch}} = 1 \\ P_M + P_D & X_{ki}^{\text{dr}} = 1 \\ 0 & X_{ki}^{\text{ch}} = X_{ki}^{\text{dr}} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中： P_{ch} 为 DT 充电功率。

根据 DT 所需功率与架空线网电压降、补偿电流关系，由式(15)得到架空线网电压降和补偿电流，即：

$$\begin{cases} P_{ki} = 600 I_{\text{DT}} = (600 - \Delta U) \times I_{ki} \\ I_{ki} = I_{\text{DT}} + I_{\text{comp}} \end{cases} \quad (15)$$

式中： ΔU 为架空线网电压降； I_{ki} 为车辆 k 行程 i 行驶在供电分段处所需电流； I_{DT} 为未考虑电压降时车辆所需电流； I_{comp} 为补偿电流。

同一供电分段内通常有多辆 DT 同时运行，同行车辆也会对架空线网电压降产生影响。DT 在架空线网产生的平均有功功率损失 Δp_{ki} 如式(16)所示：

$$\Delta p_{ki} = n L \bar{r} I_{ki}^2 \left[\frac{1.1\varepsilon}{2} + \frac{1}{3}(n-1) \right] \times 10^{-3} \quad (16)$$

式中： n 为供电分段内车辆数； L 为供电分段长度； \bar{r} 为单位长度线路电阻值； ε 为电流中断系数。

综上所述，线损成本 C^{loss} 如式(17)所示：

$$C^{\text{loss}} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I s_{ki} c_{ki}^{\text{price}} \Delta p_{ki} \frac{L}{\lambda_{ki} v_0} \quad (17)$$

式中： s_{ki} 为车辆 k 行程 i 的供电分段数。

2.1.2 电网性能指标

1) 新能源利用率。本文所指的新能源为风电和光伏发电，新能源利用率表示新能源实际发电量占其理论可发电量的比例。新能源利用率 F_2 计算方式参照文献[28]，如式(18)所示：

$$F_2 = \sum_{t=1}^T \frac{\min\{P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t), P_{\text{all}}(t)\}}{P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t)} \times 100\% \quad (18)$$

式中： $P_{\text{WT}}(t)$ 为 t 时段的风电出力； $P_{\text{PV}}(t)$ 为 t 时段的光伏出力； $P_{\text{all}}(t)$ 为 t 时段的电网总负荷； T 为时段 t 的最大值。

2) 电网负荷峰谷差。电网负荷峰谷差能够综合反映负荷波动性、线路负载率、电压稳定性等指标。故采用负荷峰谷差表征 DT 调度对电网削峰填谷的效果，如式(19)所示：

$$F_3 = \max P_{\text{all}}(t) - \min P_{\text{all}}(t) \quad (19)$$

式中: F_3 为统计周期内电网负荷峰谷差。

2.1.3 多目标归一化与综合目标函数

由于公交系统运行成本、新能源利用率、电网负荷峰谷差单位不同,需要进行归一化处理。本文采用对数比值归一法解决数据分布失真问题,如式(20)所示:

$$X_{\text{norm}} = \frac{\lg(1 + X_{\text{actual}})}{\lg(1 + X_{\text{max}})} \quad (20)$$

式中: X_{actual} 为需归一化数据的实际值; X_{norm} 为归一化至同一区间的结果; X_{max} 为最大值,本文取 F_2 的最大值为100%。

当DT无序充电时,公交系统运行成本和电网负荷峰谷差最大。故 F_1, F_3 最大值分别取无序充电时运行成本与峰谷差。

通过归一化处理,将多目标优化问题转化为单目标。此外,新能源利用率与效益成正向关联,而运行成本和峰谷差则希望越小越好。目标函数如式(21)所示:

$$\min F' = \theta_1 F'_1 + \theta_2 F'_2 + \theta_3 F'_3 \quad (21)$$

式中: F'_1, F'_2, F'_3 分别为 F_1, F_2, F_3 归一化后的取值; $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 均为加权系数。

2.2 约束条件

2.2.1 时间约束

1)行程时间约束。为保证调度方案的可行性,需满足行程时间约束,如式(22)所示:

$$t_{rki}^{\text{start}} + t_{rki} + t_{rki} \leq t_{rki}^{\text{start}} \quad \forall r \in R, \forall k \in K, \forall i, j \in I \quad (22)$$

式中: t_{rki}^{start} 和 t_{rki}^{start} 为阶段 r 车辆 k 行程 i 和 j 的发车时间; t_{rki} 为阶段 r 车辆 k 行程 i 运营时长; t_{rki} 为阶段 r 车辆 k 行程 i 和 j 间空驶时长。

2)充电时间约束。DT只有运行在架设线网的路段才能为电池充电,需满足充电时间约束,如式(23)所示:

$$t_{rki}^{\text{ch}} \leq (1 - \alpha_{rki}) t_{rki} X_{rki}^{\text{ch}} \quad \forall r \in R; \forall k \in K; \forall i \in I \quad (23)$$

式中: R 为实数。

2.2.2 电池电量约束

为避免车辆运行在无架空线网路段出现电池电量耗尽无法支持脱线行驶的情况,需保证任务车辆在行程开始前电池电量处于安全电量区间,如式(24)所示:

$$q_{rki}^{\text{min}} \leq q_{rki}^{\text{start}} \quad \forall r \in R; \forall k \in K; \forall i \in I \quad (24)$$

式中: q_{rki}^{start} 为阶段 r 车辆 k 行程 i 开始前电池电量; q_{rki}^{min} 为规定的电池最低电量。

执行相邻2次行程车辆的电量应满足式(25):

$$q_{rki}^{\text{start}} = q_{rki}^{\text{start}} + \Delta q_{rki}^{\text{ch}} - \Delta q_{rki}^{\text{dech}} \quad \forall r \in R; \forall k \in K; \forall i, j \in I \quad (25)$$

式中: q_{rki}^{start} 和 q_{rki}^{start} 分别为阶段 r 车辆 k 相邻行程 i 和 j 的起始电量; $\Delta q_{rki}^{\text{ch}}$ 和 $\Delta q_{rki}^{\text{dech}}$ 分别表示阶段 r 车辆 k 行程 i 的充放电电量。

所有车辆每日总充电电量应与总放电电量相等,约束如式(26)所示:

$$\sum_{i=1}^I (\Delta q_{rki}^{\text{ch}} - \Delta q_{rki}^{\text{dech}}) = 0 \quad \forall r \in R; \forall k \in K \quad (26)$$

2.2.3 功率约束

1)充电功率约束。仅当DT处于线网驱动车辆并为电池充电运行模式时,电池处于充电状态,充电功率约束如式(27)所示:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{rki}^{\text{ch}} \leq \min\{P_{\text{max}}^{\text{bat}}, P_{\text{max}}^{\text{line}}\} & X_{rki}^{\text{ch}} = 1 \\ P_{rki}^{\text{ch}} = 0 & X_{rki}^{\text{ch}} = 0 \end{cases} \quad \forall r \in R, \forall k \in K, \forall i \in I \quad (27)$$

式中: $P_{\text{max}}^{\text{bat}}$ 为电池允许的最大充电功率; $P_{\text{max}}^{\text{line}}$ 为线网最大充电功率。

2)功率平衡约束。DT与电网联合优化模型需满足功率平衡约束,如式(28)所示:

$$P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WT}}(t) - P_{\text{load}}(t) - P_{\text{ch}}(t) = 0 \quad (28)$$

式中: $P_{\text{grid}}(t)$ 为 t 时刻电网购电功率; $P_{\text{load}}(t)$ 为 t 时刻基础负荷功率; $P_{\text{ch}}(t)$ 为 t 时刻DT充电功率。

2.2.4 架空线网电压降约束

受架空线网馈线、触线上电阻的影响,直流系统额定电压在触线上传输存在电压降落。当DT运行至供电分段末端时电压降最大,可能导致车辆无法充电甚至影响正常运行。故必须保证线网末端电压降处于安全范围内,线网末端电压降约束如式(29)所示:

$$U_{\text{fall}}^{\text{max}} < 0.2U_N \quad (29)$$

式中: $U_{\text{fall}}^{\text{max}}$ 为线网电压降最大值,即线网末端电压降; U_N 为直流系统额定电压。

2.2.5 节点电压约束

为确保充电时不会造成过大的电网电压偏差,需要将电压波动限制在一定的范围内。节点电压约束如式(30)所示:

$$U_{\text{min}} < U_x < U_{\text{max}} \quad (30)$$

式中: U_x 为节点 x 处的节点电压; U_{max} 和 U_{min} 分别为额定电压的最大值和最小值,本文将 U_{max} 和 U_{min} 设置为线路额定电压的 $\pm 5\%$ 。

2.3 求解算法

DT与电网联合优化调度作为一个非确定性多项式困难问题(NP-hard问题)包含了充电功率、车

辆能耗等连续变量以及电池充电状态、行程连续性决策变量等布尔型整数变量。本文采用自适应遗传算法进行求解,在传统遗传算法的基础上对交叉率和变异率进行自适应调节,解决了传统遗传算法易陷入局部最优和收敛速度慢的问题。

自适应遗传算法按照行程表将随机生成的行程和充电计划分配给车辆,采用实数编码的方式,选择目标函数的倒数作为适应度函数。通过精英保留策略与轮盘赌相结合的方法筛选优秀个体。为提升算法的收敛能力,根据个体适应度值对交叉概率和变异概率进行动态调整。迭代更新后得到当前阶段兼顾公交系统与电网利益的最优调度方案。自适应遗传算法求解流程如图2所示。其中, r 为DT生命周期阶段数; r_{max} 为DT生命周期阶段数的最大值。

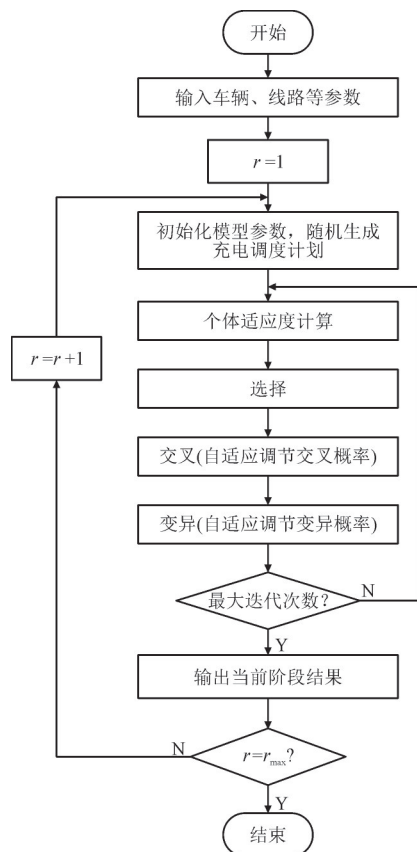


图2 自适应遗传算法求解流程
Fig.2 Solution flowchart of adaptive genetic algorithm

3 算例分析

3.1 参数设置

本文基于 IEEE 33 节点系统进行算例分析,3条公交线路运营数据如表3所示。

表3 公交线路运营数据
Table 3 Bus line operation data

线路	线路总长/km	脱线率/%	发车时刻(行程编号)	行程总数/次
20路	9.5	28	5:00(1),5:20(2), ... 22:45(92),23:00(93)	186
23路	10.1	26	6:30(187),6:45(188), ... 21:40(273),22:00(274)	176
24路	10.5	30	6:00(363),6:15(364), ... 22:15(466),22:30(467)	210

表3中记录了各线路长度、脱线率、行程编号和行程总数。所有DT参照中通LCK5180A车型,采用磷酸铁锂电池作为车载动力电池。分时电价参考上海市工业用电电价制定,峰时电价1.12元/kWh,平时电价0.68元/kWh,谷时电价0.35元/kWh。典型日负荷及新能源出力如图3所示。

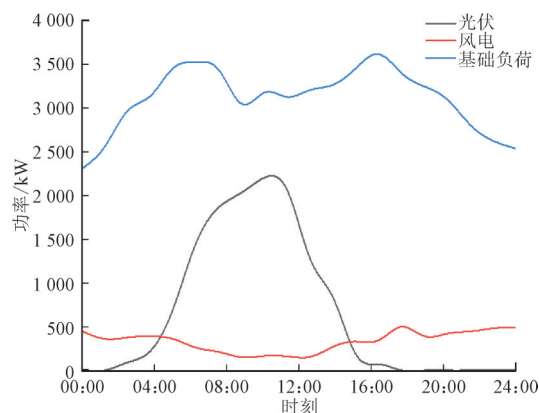


图3 典型日负荷及新能源出力
Fig.3 Typical daily load and renewable energy output
其他参数设置如表4所示。

表4 仿真计算参数
Table 4 Simulation parameters

参数	取值
重力加速度 $g/(m \cdot s^{-2})$	9.8
滚动摩擦系数 f (无量纲)	0.016
空气阻力系数 C_D	0.67
迎风面积 A/m^2	7.5
空气密度 $\rho/(kg \cdot (m^3)^{-1})$	1.29
$\eta_b/\%$	94
电机效率 $\eta_m/\%$	88
$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$	$-4.08 \times 10^{-4}, -2.17,$ $1.417 \times 10^{-5}, 6.12, 3.57 \times 10^{-5}$
DT车辆成本 $C_{DT}/$ 万元	100
电池容量 $C_b/(kW \cdot h)$	80
$\bar{r}/(\Omega \cdot km^{-1})$	0.215

3.2 行程能耗计算

依据1.2节对DT在不同线路、不同时刻的能耗率进行计算,结果如图4所示。本文交通拥堵系数

数据来源于文献[29]。

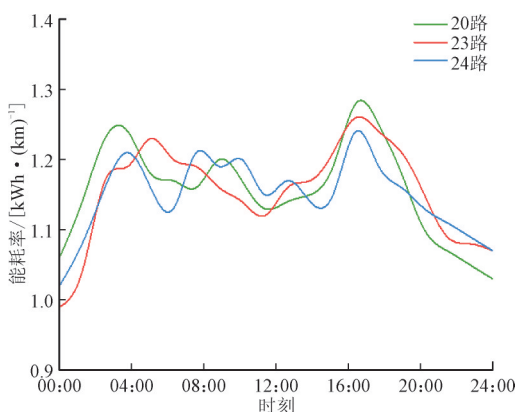


图4 线路能耗率

Fig.4 Line energy consumption rate

由图4可知,DT各时段能耗率差异较大。因此,未考虑交通状态对能耗率的影响,采用固定能耗率对车辆进行调度,会造成行程充放电估计不准确,进而导致电池老化速率加快和运营成本的增加。

3.3 优化结果

3.3.1 车辆调度方案分析

为分析电池老化对优化调度的影响,将车辆生命周期12年平均划分为4个阶段,每阶段3年,采用第2节提出的联合优化模型,利用自适应遗传算法进行求解,得到生命周期各阶段最优调度方案共

需48辆DT执行行程表调度任务,由于车辆间调度方案不同,使得电池老化程度产生差异。在此情况下,若维持原有调度计划,会导致电池容量较高的车辆剩余电量较多,造成资源浪费,而电池容量较低的车辆因电量不足造成运营成本增加甚至运营中断的问题。为探究电池老化程度差异对调度方案的影响,选取生命周期内电池更换次数不同的3辆DT(1号,25号,48号)进行分析,最优调度方案示意图如图5所示。

由图5可知,因老化程度差异致使车辆间电池更换次数不同,车辆在各阶段的行程与充电调度方案会随电池容量衰减而改变。电池老化程度较高时,需频繁利用架空线网充电来保证运营的连续性,导致计划外充电需求的产生,迫使车辆在高电价时段充电,故不适合执行数量较多的行程任务。虽然每辆DT可用充电时间不同,但基本选择在电价谷段及平段,降低了车辆的充电成本。

3.3.2 不同调度方案下的充电负荷分析

为验证本文所提方法的有效性,采用3种方案进行对比分析:方案(1):无序充电,即车辆运行于架设线网路段就为电池充电直至充满;方案(2):有序充电(一次性规划),即在满足运营需求的前提下对充电行为进行优化,但未分阶段规划,忽略了电池老化

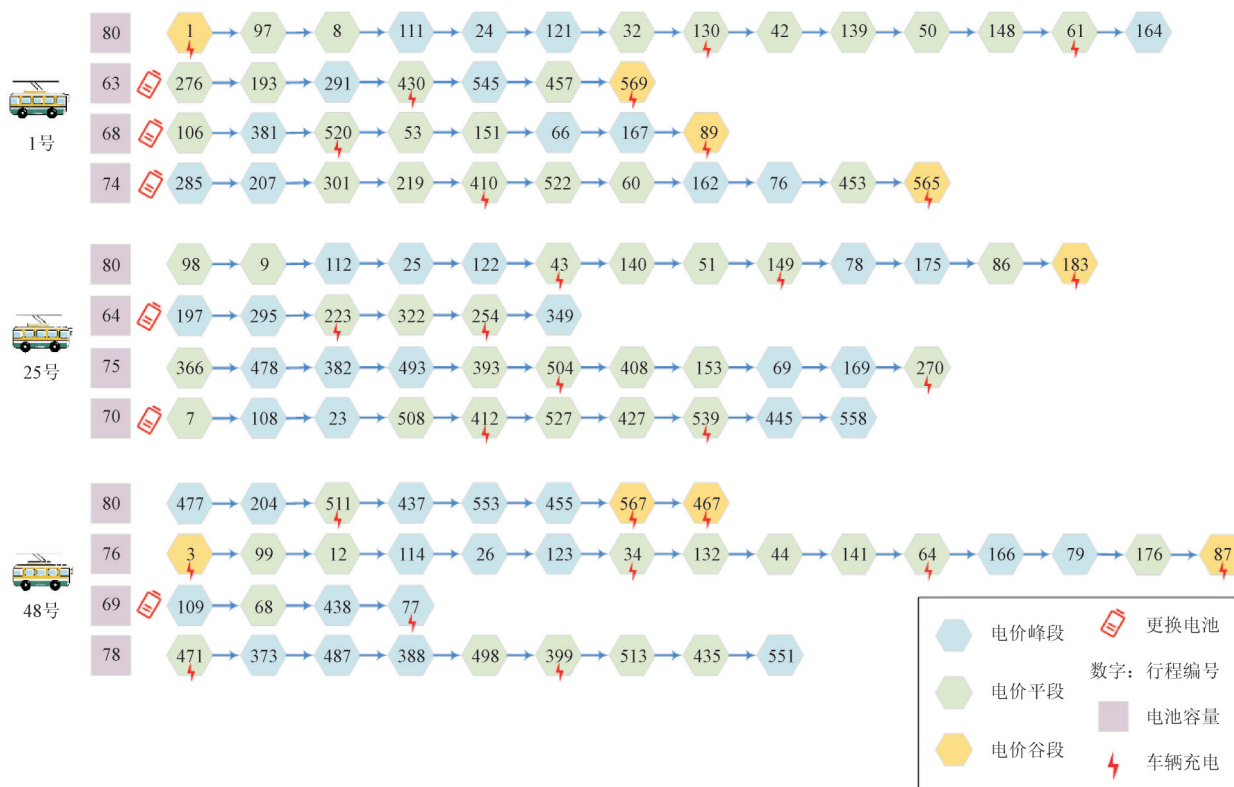


图5 最优调度方案示意图

Fig.5 Schematic diagram of optimal scheduling scheme

对联合优化调度的影响;方案(3):本文所提方案。

3种方案下DT充电电量统计图如图6所示。

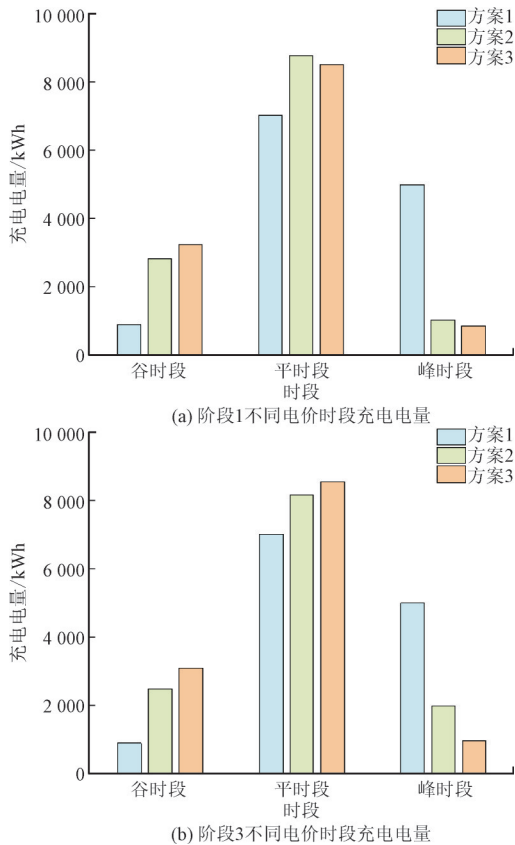


图6 3种方案下DT充电电量统计图

Fig.6 Statistical chart of DT charging electricity quantity under three schemes

由图6可知,由于方案1采用无差充电运行模式,充电成本完全取决于运营时段的电价情况,导致公交系统运营经济性较差;方案2与方案1相比,可以根据行程安排、电池电量、分时电价灵活调整车辆在线运行模式,具有将充电负荷转移至电价平、谷时段的能力;方案3在方案2的基础上考虑电池老化对联合优化调度结果的影响。车辆生命周期电池容量示意图如图7所示。

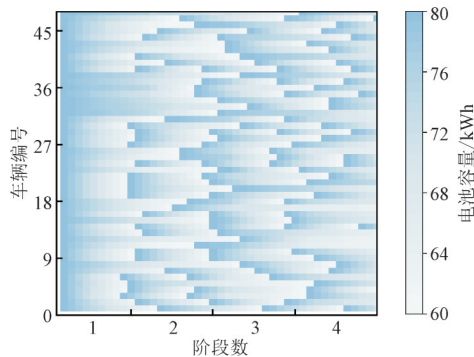


图7 车辆全生命周期电池容量分布示意图

Fig.7 Schematic diagram of battery capacity distribution over the vehicle life cycle

由图7可知,阶段1电池初始容量相同,两种方案下电池老化程度保持一致,故不同电价时段充电电量在阶段1相差无几。随着老化程度的加深,电池容量衰减会缩短DT脱线运行时的续航里程,增加电网峰值负荷压力,方案3对比方案2在阶段3峰时段电价充电电量优势显著,体现出分阶段规划的必要性。

通过车辆调度协同优化电网运行性能指标。优化结果如图8所示。

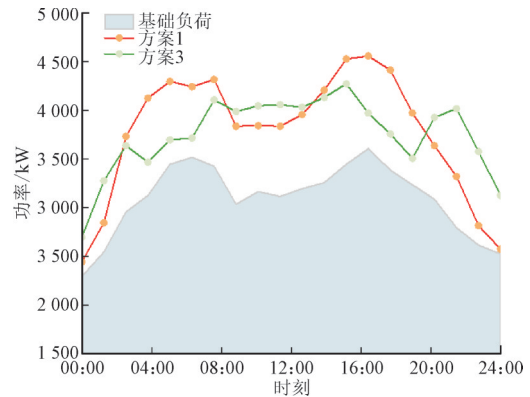


图8 不同调度方案下电网总负荷曲线对比

Fig.8 Comparison of total power grid load profiles under different scheduling schemes

由图8可知,方案1由于充电负荷与电网用电高峰时刻重合,导致峰谷差扩大、充电成本激增、电压质量恶化,威胁电网的安全运行。方案3基于车辆运行模式对充电时间和功率进行优化。线路首班车正处于电网负荷谷值时段,采取无差充电运行模式,由架空线网提供车辆行驶所需功率并为电池充电,充电负荷逐渐上升。交通高峰时段,此时道路拥堵较为严重导致能耗偏高,架空线网仅为DT提供运行所需功率,避免因电量不足对运营产生影响。后续可利用午间光伏出力较大时段为车辆进行充电,以促进新能源的消纳。为满足公交系统与电网利益,在电网用电高峰期由电池电能维持该时段车辆正常运行,降低充电成本的同时起到了削峰填谷的作用。证明了将DT与电网进行联合优化调度,可以降低公交系统运行成本,提升电网的综合效益。

3.3.3 联合优化结果分析

3种方案下的公交系统相关成本对比如表5所示。从表5中可以看出,初始阶段电池容量未发生衰减时,方案2相较于方案1运营成本减少1496.6元,虽然电池老化成本和线损成本有所增加,但是有序充电调度使得公交系统运行成本降低了5.49%。在

电池容量差异较大的阶段3,方案3与方案2相比运营成本降低由阶段1的0.95%扩大至5.26%。方案3相较于方案1和2,公交系统运行成本分别减少1411.04元和735.01元。表明在现有分时电价机制下,考虑电池老化对DT优化调度的影响,有利于公交系统实现经济性发展。

表5 3种方案下公交系统相关成本对比

Table 5 Comparison of bus system-related costs under three schemes 元

阶段数	方案	电池老化成本	运营成本	线损成本	公交系统运行成本
1	1	902.33	5 897.6	659.18	17 996.51
	2	1 389.15	4 401	680.48	17 008.03
	3	1 106.27	4 359.02	583.35	16 586.04
3	1	975.8	5 897.6	683.2	18 094
	2	1 522.17	4 655	703.4	17 417.97
	3	1 143.5	4 410.06	592	16 682.96

为验证自适应遗传算法具备较强的全局寻优能力,分别采用自适应遗传算法与传统遗传算法求解方案3在第3阶段的公交系统运行成本,对其寻求最优解的优化过程进行分析。算法迭代过程如图9所示。

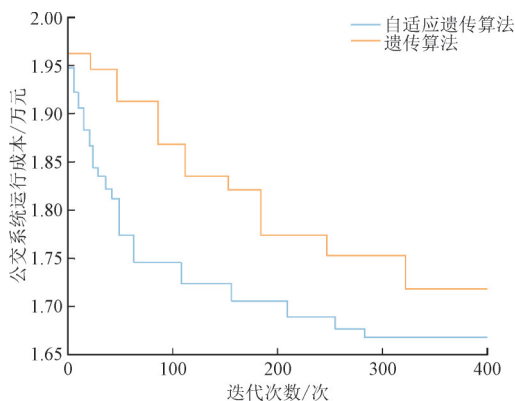


图9 不同算法迭代过程对比

Fig.9 Comparison of iteration processes for different algorithms

由图9可知,自适应遗传算法能够更快地搜索到可行解并且不断迭代最终收敛,相较传统遗传算法拥有更快的收敛速度和更优的收敛结果,适用于车辆与电网优化调度这样的大规模联合优化问题。

表6展示了3种方案下电网负荷峰谷差与新能源利用率的优化结果。从表6中可以看出,相比于方案1的无序充电方式,本文所提方案得到的电网负荷峰谷差值在阶段1和3分别下降了535 kW和683 kW,新能源利用率则分别提升了7.3%和9.6%。尽管方案2对无差充电运行模式进行优化使得电网性能指标得到改善,但忽略电池老化差异

导致调度结果存在偏差。通过方案3与方案2在阶段3的对比可知,电网负荷峰谷差下降了434 kW,新能源利用率提升了4.7%。由此可见,本文所提方案在满足公交运营的前提下,改善电网运行的性能指标。

表6 3种方案下电网性能指标对比

Table 6 Comparison of grid performance indicators under three schemes

阶段数	方案	峰值/kW	谷值/kW	峰谷差值/kW	新能源利用率/%
1	1	4 560	2 450	2 110	74.2
	2	4 352	2 597	1 755	78.9
	3	4 275	2 700	1 575	81.5
3	1	4 728	2 552	2 176	72.7
	2	4 630	2 703	1 927	77.6
	3	4 259	2 766	1 493	82.3

4 结论

本文基于“交通网-电网”耦合的协同优化框架,深入研究了电池老化差异对分布式终端(DT)与电网联合优化调度的影响。主要结论如下:

1)通过引入交通拥堵系数对车辆行驶能耗进行动态修正,有效克服了传统固定能耗率模型中无法准确评估电池老化容量衰减的局限。在此基础上,充分利用架空线网与车载电池的多源互补优势,系统分析了DT在不同运行模式下的充放电特性,建立了精细化电池老化模型。

2)在差异化考虑电池老化状态的基础上,构建了DT与电网联合优化调度模型,并采用自适应遗传算法进行高效求解。仿真结果表明,与传统方案相比,本文所提出的优化调度方案可显著降低公交系统运行成本,并有效平抑电网负荷峰谷差,验证了模型在提升经济性与运行稳定性方面的优越性。

本文构建的模型与方法不仅为当前系统优化提供了有效工具,也为后续研究奠定了基础。未来工作将聚焦于极端场景(如接触网断电、电压骤降、谐波污染等电网故障)下的应急响应策略,以进一步提升DT系统的可靠性与鲁棒性,为其规模化工程应用提供支持。

参考文献

- [1] 蔡子龙,束洪春,杨博,等.电动公交区域调度计划与有序充电策略研究[J].电网技术,2021,45(6):2246-2257.
CAI Zilong, SHU Hongchun, YANG Bo, et al. Research on regional dispatching plan and coordinated charging strategy of electric bus [J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2246-2257.

- [2] 颜俊,罗宇杰,颜安,等.计及用户响应特性的电动汽车充电站设备优化配置方法[J].中国电力,2025,58(4):140-147.
YAN Jun, LUO Yujie, YAN An, et al. Optimal equipment configuration method for electric vehicle charging stations considering user response characteristics[J]. Electric Power, 2025, 58(4): 140-147.
- [3] 杨欢红,柴磊,黄文焘,等.考虑道路交通信息的双源无轨电车与电动公交车协同优化[J].电力系统自动化,2024,48(17):77-87.
YANG Huanhong, CHAI Lei, HUANG Wentao, et al. Collaborative optimization of dual-source trolleybuses and electric buses considering road traffic information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(17): 77-87.
- [4] 马力,彭伟伦,范晋衡,等.基于改进纵横交叉算法的车网互动模式下电动汽车充放电优化调度策略研究[J].电测与仪表,2025,62(2):133-142.
MA Li, PENG Weilun, FAN Jinheng, et al. Research on electric vehicle charging and discharging optimization scheduling strategy under V2G mode based on improved crisscross algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(2): 133-142.
- [5] 邓衍辉,李剑,卢国强,等.考虑分区域动态电价机制引导的电动汽车充电优化策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(7):33-44.
DENG Yanhui, LI Jian, LU Guoqiang, et al. Charging optimization strategy of electric vehicles guided by the dynamic tariff mechanism of a subregion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 33-44.
- [6] 章锐,于继来.电动公交车负荷参与新型电网调峰的能力评估[J].中国电机工程学报,2022,42(S1):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.
- [7] 朱珈汛,刘德宝,张钰.电动公交车光储充电站的分层分级充电优化控制策略[J].吉林电力,2022,50(5):36-40.
ZHU Jiaxun, LIU Debao, ZHANG Yu. Optimal control strategy of hierarchical charging for electric bus optical storage charging station[J]. Jilin Electric Power, 2022, 50(5): 36-40.
- [8] 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.
- [9] 何聪,耿建,刘建涛,等.基于数据模型双驱动的电动公交车多时段负荷建模和调节潜力评估[J].电力系统保护与控制,2024,52(13):25-34.
HE Cong, GENG Jian, LIU Jiantao, et al. Multi-period load modeling and regulation potential assessment for electric buses based on data-driven and model-driven[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 25-34.
- [10] WU Z, GUO F, POLAK J, et al. Evaluating grid-interactive electric bus operation and demand response with load management tariff[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113798.
- [11] 胡泽春,邵成成,何方,等.电网与交通网耦合的设施规划与运行优化研究综述及展望[J].电力系统自动化,2022,46(12):3-19.
HU Zechun, SHAO Chengcheng, HE Fang, et al. Review and prospect of research on facility planning and optimal operation for coupled power and transportation networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 3-19.
- [12] 何国彬,杨金新,施铭涛,等.基于多目标蜉蝣算法的电动汽车充电站联合储能系统最优规划方法[J].电力系统保护与控制,2025,53(15):95-102.
HE Guobin, YANG Jinxin, SHI Mingtao, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations integrated with energy storage systems based on multi-objective mayfly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15): 95-102.
- [13] 袁洪涛,徐潇源,严正,等.电动汽车集中换电设施规划和优化运行研究综述[J].电力系统保护与控制,2024,52(19):157-174.
YUAN Hongtao, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Review of centralized EV charging and battery swapping facility planning and optimal scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 157-174.
- [14] 程慧琳,武剑,张晶,等.计及电动汽车充放电时空分布的输电网协同降损低碳策略研究[J].电测与仪表,2024,61(11):122-132.
CHENG Huilin, WU Jian, ZHANG Jing, et al. Research on the low-carbon strategy of coordinated loss reduction of transmission and distribution network considering the temporal-spatial distribution of EV charging and discharging[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 122-132.
- [15] 胡梦锴,陈胜,卫志农,等.考虑V2G参与意愿与充电需求的配电网-电动汽车协同优化研究[J].浙江电力,2025,44(8):3-14.
HU Mengkai, CHEN Sheng, WEI Zhinong, et al. Research on collaborative optimization of distribution network considering Vehicle-to-Grid and elastic queuing theory[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(8): 3-14.
- [16] 宣羿,樊立波,孙智卿,等.考虑低碳交通的电动汽车充电站优化配置方法[J].浙江电力,2024,43(6):69-79.
XUAN Yi, FAN Libo, SUN Zhiqing, et al. An optimal allocation method for electric vehicle charging stations considering low-carbon transportation[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(6): 69-79.
- [17] 李高扬,王宁,高若田,等.面向新型电力系统智能化提效的多源异构数据融合技术研究[J].电测与仪表,2024,61(11):116-121.
LI Gaoyang, WANG Ning, GAO Ruotian, et al. Research on multi-source heterogeneous data integration technology for smart efficiency improvement in novel power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 116-121.
- [18] 曹昉,郑怡馨,王斯琪,等.计及实时交通特征的电动公交车备用率与充电桩联合优化[J].电力自动化设备,2024,44(4):127-134,150.
CAO Fang, ZHENG Yixin, WANG Siqi, et al. Joint optimization of electric bus reserve rate and charging piles considering real-time traffic characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 127-134, 150.
- [19] 高润天,罗李子,韩少华,等.电力-交通混合约束下电动汽车充电行为时空引导方法[J].浙江电力,2025,44(8):24-33.
GAO Runtian, LUO Lizi, HAN Shaohua, et al. A spatiotemporal guidance method for EV charging behaviors under coupled power transportation network constraints[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(8): 24-33.

- [20] PAN Y, FANG W, GE Z, et al. A hybrid on-line approach for predicting the energy consumption of electric buses based on vehicle dynamics and system identification[J]. *Energy*, 2024, 290: 130205.
- [21] XIAO Y, ZHANG Y, KAKU I, et al. Electric vehicle routing problem: A systematic review and a new comprehensive model with nonlinear energy recharging and consumption[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 151: 111567.
- [22] 郭鸿钧. 城市公交运营性能和服务质量评价指标研究[J]. *专用汽车*, 2024(8): 86-88.
GUO Hongjun. Research on evaluation indicators of urban bus operational performance and service quality[J]. *Special Purpose Vehicle*, 2024(8): 86-88.
- [23] 董晓红, 董进波, 王明深, 等. 基于新型健康特征的锂电池健康状态快速估计方法[J]. *电力工程技术*, 2025, 44(1): 136-142, 206.
DONG Xiaohong, DONG Jinbo, WANG Mingshen, et al. Rapid estimation method of lithium battery state of health based on novel health feature[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2025, 44(1): 136-142, 206.
- [24] 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): 45-56.
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): 45-56.
- [25] 陈宏宇, 陶志军, 朱永利, 等. 退役动力锂离子电池健康状态及剩余使用寿命预测技术研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(7): 174-187.
CHEN Hongyu, TAO Zhijun, ZHU Yongli, et al. Research on health status and remaining useful life prediction technology for retired lithium-ion power batteries[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(7): 174-187.
- [26] 张帝. 双源无轨电车载储能系统及新型供电网络优化控制[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [27] 王永兴, 毕军, 谢东繁, 等. 计及电池老化特征的电动公交车静态无线充电设施布局优化[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(6): 45-55.
WANG Yongxing, BI Jun, XIE Dongfan, et al. Layout optimization of static wireless charging facilities for electric buses by considering battery degradation characteristics[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 52(6): 45-55.
- [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 Jiuhong, 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] CHEN J, LIAO W, YU C. Route optimization for cold chain logistics of front warehouses based on traffic congestion and carbon emission [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 161: 107663.
(责任编辑 钱文妹)

收稿日期: 2025-05-08; 修改日期: 2025-12-02

作者简介: 王宇轩(2000), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要研究方向为电气化交通和电网优化运行。E-mail: 735797854@qq.com

李俊(1978), 男, 通信作者, 湖北随州人, 博士, 主要研究方向为新能源系统建模及控制、电网及综合能源优化运行。E-mail: lijun_wh@163.com

Joint Optimal Scheduling of Dual-source Trolleybuses and Power Grid Considering Battery Aging

WANG Yuxuan¹, YANG Huanhong¹, LI Jun¹, HUANG Wentang²,
ZHANG Weichuan³, WANG Lixiang³

(1.College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2.Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Ministry of Education), Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3.Henan Xuji Instrument Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: To address the issues of high operational costs in current bus systems and the intensified peak-valley difference in the power grid caused by concentrated charging loads, this paper proposes a joint optimal scheduling method for dual-source trolleybuses and the power grid that accounts for battery aging. First, a coupled transportation-power grid joint optimization framework is established, and a vehicle energy consumption model is constructed based on real-time traffic conditions. Second, the battery aging of dual-source trolleybuses under different operating modes is analyzed. Considering both the variations in battery aging and time-of-use electricity prices, a joint scheduling model is developed with the objectives of minimizing the bus system's operational costs and optimizing the power grid's performance. This model is solved using an adaptive genetic algorithm. Finally, simulation results demonstrate that the proposed scheme can fully exploit the scheduling potential of dual-source trolleybuses within the coupled transportation-power grid network. It not only enhances the operational economy of the bus system but also improves the power grid's load profile and operational performance, achieving synergistic optimization and mutual benefits for both systems.

Key words: dual-source trolleybus; power grid; battery aging; joint optimization