



基于动态潮流追踪的牵引供电系统 碳排放核算方法

关 达¹, 肖芷涵², 王永斌¹, 付 君¹, 范浩然², 李 腾²
(1. 国能新朔铁路有限责任公司供电分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300;
2. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘 要: 提出一种基于动态潮流追踪的牵引供电系统碳排放核算方法。该方法通过复功率潮流明确牵引负荷的电能来源, 结合碳流追踪实现各能源间接碳排放的精准分摊, 并构建与列车位置和时间耦合的时变光伏修正因子, 对碳排放因子进行动态修正以提升核算精度。以海勒斯壕南线重载电气化铁路为实例, 建立包含同相供电装置及光储单元的模型, 针对全部由外部电网供电、仅由同相供电、接入光储的同相供电三种场景进行对比研究。仿真采用列车逐位置潮流计算, 获得功率分布与碳排放结果。结果表明, 相比传统碳排放核算方法, 同相供电可降低网侧损耗并减小单位牵引电能碳排放强度; 接入光储后, 受新能源就地消纳提升的影响, 系统碳排放强度与总量进一步下降。研究验证了所提出方法的合理性, 并为低碳铁路牵引供电提供了工程参考。

关键词: 牵引供电系统; 碳排放核算; 光储单元; 同相供电; 潮流计算; 重载铁路

中图分类号: U223

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)06-0192-09

0 引言

在全球气候变化和“双碳”目标的背景下, 交通运输部门正面临能源节约与碳减排的双重压力。轨道交通具有运输能力大、速度快、安全性高、运输成本低、能耗低、污染小及全天候运行等特点, 是我国综合交通运输体系的重要组成部分。然而, 电气化铁路在带来高效运输的同时, 其能源消耗和碳排放问题日益突出。截至2020年底, 轨道交通年总电能消耗超1 000亿kW·h, 其中电气化铁路占比超过70%, 用能主要源于一次能源结构以化石燃料为主的公共电网^[1]。据统计, “中国重载第一路”大秦铁路2023年全年运量突破4.22亿t, 年耗电量高达34.3亿kW·h, 折合碳排放量约105万t^[2]。由于我国电力系统供电能源结构仍以化石能源为主, 电气化铁路牵引用电因此产生大

量间接碳排放; 同时, 国内约30%的非电气化铁路采用内燃机车牵引, 直接碳排放规模较大。我国正逐步推广更多大规模重载铁路线路, 牵引供电系统在电力消费和碳排放中的地位愈发重要。因此, 亟须开展面向电气化铁路牵引系统的碳排放核算研究, 为实现交通领域的绿色低碳发展目标提供支撑。

目前, 碳排放核算方法已在电力行业得到广泛应用。学术界普遍认可的碳排放核算方法模型主要包含排放因子法、物料平衡法、实测法和大数据计算法4种^[3]。这些方法通常用于发电侧、电网侧或用户侧的碳排放统计核算, 能够较为准确地给出能源消费的总体排放水平。但这些研究主要集中于宏观层面或区域尺度, 对铁路牵引供电系统这样具有多电源耦合、强时空动态特征的复杂用电场景, 尚未形成系统性的核算框架^[4]。尤其是在同相供电、新能源接入的新型牵引供电结构逐步应用的背景下, 现有方法大多未考虑到相

基金项目: 国能集团新朔铁路“网-源-储-车”协同供能技术应用研究项目(GJNY-21-189, GNXS-2021-07)

通信作者: 李 腾, 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事储能能在供电系统中的应用及控制方面的研究; E-mail: liteng@bjtu.edu.cn

引用格式: 关达, 肖芷涵, 王永斌, 等. 基于动态潮流追踪的牵引供电系统碳排放核算方法[J]. 机车电传动, 2025(6): 192-200. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.200.

Citation: GUAN Da, XIAO Zhihan, WANG Yongbin, et al. Carbon emission accounting for traction power supply systems based on dynamic power-flow tracing[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 192-200. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.200.

应的碳排放核算问题, 因而难以直接应用。这导致铁路领域在开展碳排放定量分析时, 现有电网平均碳排放因子难以实现高效更新迭代, 无法充分反映新能源飞速发展下的电力系统清洁低碳转型成效, 也难以体现牵引供电系统内部的能源流动特征和不同电源的碳责任分摊^[5]。

近年来, 新能源接入牵引供电系统成为该领域的重要研究方向。大量研究表明, 引入储能有助于提高再生制动能量回收效率, 平抑牵引负荷峰谷差, 同时提升牵引系统对绿色电能的消纳水平^[6]。具体而言, 在牵引供电网络中配置的光伏和储能可对牵引负荷进行实时削峰填谷, 缓和牵引负荷的剧烈波动, 有利于降低最大需量, 并有效吸收列车再生制动回馈的能量, 提高系统经济性与能源利用效率^[7]。目前相关研究主要聚焦于牵引供电系统的运行优化和经济性评估, 例如建立含光伏和混合储能同相牵引供电系统优化调度模型, 以同相牵引变电所日运行成本最低为目标, 通过光伏-储能联合调度降低用能峰值和费用^[8], 或设计阶梯式碳交易机制对储能容量进行优化配置以提升投资回报率等。然而, 在新能源接入牵引供电系统所带来的碳排放减排效益方面, 现有文献尚缺乏深入的定量分析, 新能源应用对牵引系统碳排放影响的评估仍有待完善。

牵引供电系统根据牵引变压器接线方式的不同分为同相供电和异相供电, 目前电气化铁路新能源接入的研究主要集中于传统的异相供电。同相供电提供了取消变电所出口的电分相的可能, 消除了无电区, 解决了电能质量问题, 更有利于列车运行和再生能量在牵引网的直接利用, 同时也为左右供电臂相互利用光伏提供了便利。同相供电通过消除分相区并采用综合补偿装置, 可以显著降低系统阻抗、抬升牵引网络的电压水平, 从而有效改善电能质量^[9]。特别是在电网支撑能力薄弱的地区, 同相贯通供电展现出卓越的应用价值: 其能够更加均衡地利用三相电源供电, 减少局部电压跌落, 稳定区域电压和提高供电可靠性^[10]。然而, 目前文献更多关注同相供电在降低负序、电压支撑等技术层面的收益, 对于该技术所带来的碳排放减排效益仍未进行充分的量化评估。这一不足进一步凸显了将碳排放视角引入牵引供电技术评估的必要性, 也为本文工作的开展提供了动力和依据。

综上所述, 现有文献鲜有在同相牵引供电系统中引入碳排放核算, 更缺乏基于潮流追踪方法的动态碳流分摊研究。这使得铁路部门在评估同相供电及新能源接入的减排效果时, 难以获得定量而直观的结论。因此, 有必要提出一种能够结合牵引供电潮流分布与碳排放因子的核算方法, 从电能流动角度准确揭示不同电源供给对牵引能耗碳排放的贡献。

基于上述分析, 本文将提出一种面向重载铁路牵

引供电系统的基于动态潮流追踪的碳排放核算方法。该方法结合潮流追踪与碳流分摊, 对碳排放因子进行动态修正, 能够准确反映不同电源供给下牵引能耗的碳排放水平。通过对比3种供电方案, 表明同相供电及新能源接入可有效降低系统碳排放, 为铁路部门制定绿色低碳发展策略提供了参考, 同时也为进一步推广低碳供电模式和优化轨道交通能源结构提供支撑。

1 牵引同相供电网络模型

牵引网同相供电系统是在单相组合式同相供电系统的基础上进一步扩展而成, 其结构如图1所示。该系统主要由公共电网、同相供电装置以及牵引供电网络构成。其中, 同相供电装置采用单相组合式结构, 由单相牵引变压器TT与同相补偿装置并联构成。TT作为能量传输主通道, 同相补偿装置由匹配变压器MT1和MT2及单相AC/DC/AC变流器构成, 主要进行电能质量补偿, 并作为能量传输辅助通道。MT1一端接入电力系统, 另一端接至TT一次侧绕组的中点, MT1和TT构成90°接线, 从而实现相位补偿与电气贯通, 降低负序电流和谐波, 提高牵引网运行的稳定性与可靠性。本文研究涉及的纳林川站和四道柳站即采用如图1所示的结构。

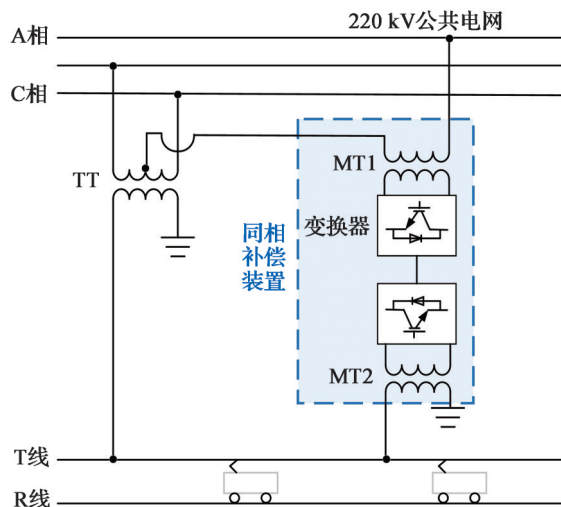


图1 同相供电系统

Fig. 1 Co-phase power supply system

光储式同相供电系统如图2所示。光伏系统由光伏板与并网接口装置组成, 可直接向牵引网就地供电, 具有源侧零燃料、低碳出力与就地消纳的优势, 可直接降低牵引供电的等效碳强度与线路损耗, 减少牵引系统对公共电网高碳电力的依赖。储能系统通过变流器与母线相连, 以锂电池作为核心介质, 用于储存和利用电力机车产生的再生制动能量。当电力机车处于再生制动状态时, 储能装置储存机车产生的再生制动能量; 当电力机车处于牵引状态时, 储能装置释放电能为机车供电, 从而削弱了再生制动能量对三相电网

的影响,并提升了再生制动能量的利用率。此外,当牵引负荷功率较大且储能装置具备放电能力时,储能装置通过向牵引负荷释放储能实现削峰填谷;当牵引负荷功率较小且储能装置具备充电能力时,储能装置可以通过平缓充电来减小对电网的冲击。光储单元的引入不仅提升了再生能量的利用效率,而且在高峰时段起到削峰作用,在低谷时段实现平缓充电,降低了电网受冲击的程度。本文进一步考虑了光伏出力随列车运行位置和时间动态变化的特性,以更准确地刻画不同运行条件下牵引供电系统的电源分配与碳排放水平。本文研究的海勒斯壕南站即采用如图2所示的结构。

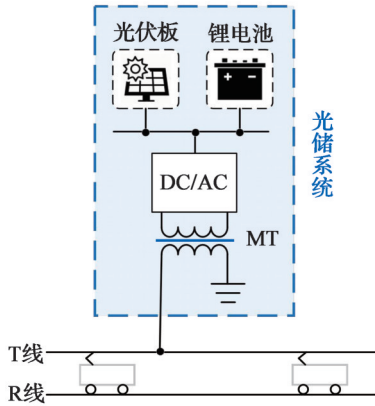


图2 光储式同相供电系统

Fig. 2 Co-phase power supply system integrated with PV-ESS

综上,光储式同相供电网络通过“源-网-车-储”的协同运行机制,一方面优化了牵引系统的电能分配方式,提高了运行灵活性;另一方面为后续开展基于潮流的碳排放核算提供了更加多元的电源结构和动态数据基础。该模型为不同供电工况下碳排放的定量对比提供了仿真条件。

2 基于潮流的碳排放核算

2.1 负功率潮流追踪模型

在牵引供电系统中,用户负荷的供电来源具有多电源、多支路耦合的特点,包括来自两端变电所的电网电源、沿线分布式光伏发电以及储能放电等。这些电源通过牵引网和同相供电装置向列车和接触网提供电能,其供电比例受拓扑结构、列车位置、电压水平和线路阻抗等多因素影响。为精确量化不同电源对各用电节点的功率贡献,本文在潮流计算结果的基础上引入负功率潮流追踪方法^[11-12],获得更符合实际运行特性的分摊结果。

当潮流有功功率与无功功率的正方向不同时,本文以有功功率的正方向来定义节点注入潮流。因为系统碳流最终只与有功功率分配有关,因此在保证有功功率为正的前提下,线路有功和无功功率不同向不会影响碳流计算结果。

该方法以稳态潮流计算为前提,将系统中的节点注入功率表示为

$$S_i = \sum_{j \in \Gamma_i} S_{ji} + S_{Gi} \quad (1)$$

式中: S_i 为节点 i 的注入复功率; Γ_i 为与节点 i 相连的上游节点集合; S_{ji} 为支路 j 到 i 的复功率流入量; S_{Gi} 为电源在节点 i 的注入功率。

由于实际牵引网存在线路损耗,直接追踪可能导致分配不守恒,因此在计算中将支路损耗等效为附加在支路末端的虚拟负荷,将有损网络转化为无损网络,使分摊过程能够保持功率平衡,同时便于对损耗部分进行独立统计。

在进行上述分析后,利用节点功率平衡关系确定各电源对下游负荷的贡献比例。在潮流计算得到节点注入功率与支路功率的基础上,按照复功率比例共享原则^[13],将每一节点的负荷功率按上游不同电源注入的功率比例进行分配,从而获得电源到负荷的复功率追踪矩阵。根据功率平衡关系,可构造功率分配矩阵 T 如式(2)。

$$T_{ij} = \begin{cases} 1, & i=j \\ -\frac{S_{ji}}{S_j}, & i \in \Gamma_j \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, S_j 为节点 j 的注入功率。若矩阵 T 可逆,则其逆矩阵即为功率追踪矩阵。由此,可以得到节点注入功率向量 S 与电源注入功率向量 S_G 的关系式如下:

$$T_r = T^{-1} \quad (3)$$

$$S = T_r \cdot S_G \quad (4)$$

对于任意与节点 i 相连的线路 L 上的潮流,电源 k 通过该线路提供的功率为

$$S_{L,i,k} = \frac{S_{Li}}{S_i} T_{r,ik} S_{G,k} \quad (5)$$

式中: S_{Li} 为节点 i 的复功率负荷; $S_{G,k}$ 为电源 k 的注入功率。

式(5)表明,节点 i 的负荷可按照潮流分配系数 T_r 分解为各电源的供电份额。

在本文的 Simulink 模型中,通过测量各牵引所二次侧有功功率 P_{S1} 、 P_{S2} 、 P_{S3} 以及列车负荷 P_{car} ,可近似地认为电源分摊系数为

$$w_m = \frac{P_{Sm}}{P_{S1} + P_{S2} + P_{S3}}, m=1,2,3 \quad (6)$$

电源 m 对列车负荷的供电功率为

$$P_{t,m} = w_m \cdot P_{car} \quad (7)$$

将系统总网损 $P_{loss} = \sum_m P_{Sm} - P_{car}$ 也按相同份额 w_m 分摊,从而实现了在仿真环境下对复功率潮流追踪方法的近似应用。

在同相供电条件下,潮流追踪可反映出相联处电压平衡和阻抗分配对功率流向的调节作用,使得供电能力增强、部分电源负担减轻。在光伏并网场景中,

光伏发电功率作为独立电源注入, 因其功率具有波动性, 需要在不同日照条件下开展多场景追踪分析。储能放电状态下等效为电源节点参与分摊, 在充电状态下则作为负荷节点, 需在时间序列计算中动态切换角色。

通过将列车运行区间分散为若干典型位置, 并在每个位置进行潮流计算与追踪, 可得到列车全程功率来源分布曲线, 为后续的碳排放计算提供直接输入。该方法能够兼顾牵引负荷的时空特性和电源种类的多样性, 适用于包含同相联络、光伏和储能的复杂牵引供电系统。

2.2 碳流追踪模型

2.2.1 三工况的碳流追踪模型

在复功率潮流追踪的基础上, 可将各电源的碳排放因子沿功率流路径分配至负荷和网损节点, 从而构建碳流追踪模型, 实现全系统碳排放的源-荷映射。该方法能够定量评估不同供电方式下列车运行的单位碳排放强度以及全程总排放量, 并区分网损部分的碳排放贡献。网络上任一支路的功率流动都会对应产生一定量的二氧化碳排放, 通过建立支路潮流与碳排放的对应关系, 可在潮流计算基础上进一步得到碳流。碳流并不真实存在, 而是一种基于潮流的虚拟网络流。碳排放产生于发电环节, 通过引入碳流概念, 可将碳排放从发电环节转移至电力用户侧。牵引系统碳流模型以复功率追踪结果为依据, 引入各类电源的碳排放强度参数, 计算各支路和各节点负荷所对应的碳排放量。

本模型使用碳排放强度向量 C_G 记录各发电机碳排放强度。不同类型的电源具有不同的碳排放强度, 可大体分为两类: 一是风电、水电、光伏电厂及核电等基本无污染的零碳排放电源; 二是常规火力发电厂, 该类电厂根据发电原料的不同, 排放强度也不一样。排放统计较为简单, 排放强度即为机组运行的二氧化碳排放因子, 可根据每个电厂自身发电原料类型和机组特征进行计算。

假设电源集合为 G , 各电源的碳因子向量为

$$C_G = \{EF_1, EF_2, \dots, EF_{|k|}\} \quad (8)$$

其中, EF_k 表示电源 k 的单位发电碳排放强度, 则电源 k 对节点 i 负荷的碳排为

$$C_{L,i,k} = \text{Re}(S_{L,i,k}) \cdot EF_k \quad (9)$$

节点 i 的总碳排放为

$$C_{L,i} = \sum_{k \in G} C_{L,i,k} \quad (10)$$

同理, 支路损耗节点的碳排亦可按上述公式计算, 最终系统总碳排放为

$$C_{\text{total}} = \sum_i C_{L,i} = C_{\text{train}} + C_{\text{loss}} \quad (11)$$

式中: C_{train} 为列车消耗部分的碳排; C_{loss} 为线路损耗部分的碳排。

在本文的仿真模型中, 考虑以下3种工况:

①工况1 (电网独立供电): 各牵引变电所相互独立运行, 不存在电气互联。当列车位于某一变电所对应的供电区段内时, 仅由该变电所单独供电, 其余变电所不参与供电。此时, 列车负荷的供电份额向量可分别表示为 $w_1=[1,0,0]$ 、 $w_2=[0,1,0]$ 、 $w_3=[0,0,1]$, 即供电完全由所在变电所承担。由于3所均直接取电于公共电网, 其碳排放因子统一取为内蒙古电网平均碳因子 $EF_{\text{grid}}=0.6849 \text{ g/(kWh)}$ 。

②工况2 (同相供电): 3所牵引变电所通过同相供电方式实现电气互联, 形成多电源并列供电结构。列车负荷由多所共同承担, 其供电份额不再预先设定, 而是由系统潮流分布决定。具体而言, 各变电所对列车及网损的供电比例依据前述复功率潮流追踪模型计算得到。在该工况下, 虽然供电结构发生变化, 但电能仍全部来源于电网, 因此各变电所的碳排放因子仍统一取电网碳因子 EF_{grid} 。

③工况3 (接入光储的同相供电): 在工况2的同相供电结构基础上, 引入光伏作为独立电源节点参与潮流与追踪, 光伏出力按典型日曲线的离散时刻 t_q 取值 $P_{\text{pv}}(t_q)$ 。在功率追踪中扩展系统电源集合 $G=\{S1, S2, S3, \text{PV}\}$, 对任意空间位置与时间点 (i, q) , 由复功率追踪得到各电源到列车与网损的供电份额 $\alpha(i, q)$ 。电网侧各所的碳因子统一取 EF_{grid} , 光伏的碳因子取 $EF_{\text{pv}}=0$, 则该时空点的列车与网损碳排为

$$C_{\text{train}}(i, q) = \sum_{g \in G} (\alpha_g(i, q) P_{\text{train}}(i, q) EF_g \Delta t) \quad (12)$$

相比传统将S3的碳因子设为固定折减值的做法, 上述处理将光伏的时序波动与列车空间位置同时纳入分摊, 避免静态近似带来的偏差。

2.2.2 光伏-位置-时间耦合的动态取样与追踪

为体现光伏出力的时序波动与列车空间位置的耦合关系, 将区间离散为 $i=1, \dots, 9$ 共9个典型位置, 并从图3的光伏典型日曲线中选取与之对应的9个代表时刻 t_q 。

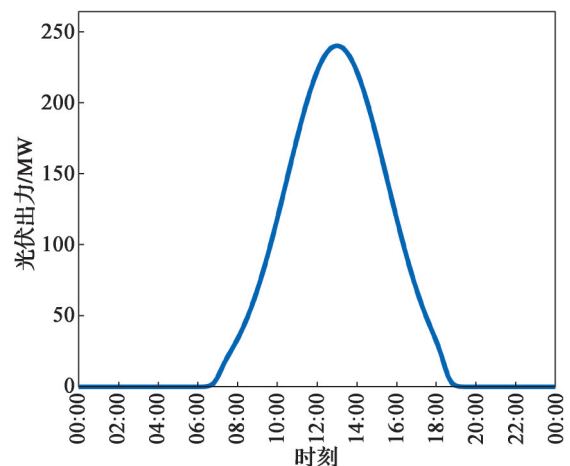


图3 光伏典型日出力曲线图

Fig. 3 Typical daily output curves of PV power generation

将曲线按装机容量缩放, 得到光伏注入 $P_{pv}(t_q)$, 并在每个 (i, t_q) 下进行潮流计算, 获得各电源向牵引网正向供电功率 $P_{S1}^+(i, t_q)$ 、 $P_{S2}^+(i, t_q)$ 、 $P_{S3}^+(i, t_q)$ 。定义该位置某一时刻下的总供给功率为

$$P_{tot}(i, t_q) = P_{S1}^+(i, t_q) + P_{S2}^+(i, t_q) + P_{S3}^+(i, t_q) + P_{pv}(t_q) \quad (13)$$

并给出光伏的动态份额系数为

$$\alpha_{pv}(i, t_q) = \frac{P_{pv}(t_q)}{P_{tot}(i, t_q)} \quad (14)$$

同理, 各供电所的份额系数为

$$\alpha_{Sk}(i, t_q) = \frac{P_{Sk}^+(i, t_q)}{P_{tot}(i, t_q)}, \quad k \in \{1, 2, 3\} \quad (15)$$

且满足: $\alpha_{pv} + \alpha_{S1} + \alpha_{S2} + \alpha_{S3} = 1$ 。其中, $\alpha_{pv}(i, t_q)$ 即该位置-时刻下光伏对牵引供电的即时占比, 随日照与列车位置不同而变化。同相供电通过抬升二次侧等效电压、改善联络分配, 体现在 $\alpha_{Sk}(i, t_q)$ 更加均衡、峰值更低。后续对各电源碳因子进行加权, 得到单位时段的列车侧与网损侧碳排放, 并将两者累加成全程结果。当清晨或傍晚 $P_{pv}(t_q) \approx 0$ 时, $\alpha_{pv}(i, t_q)$ 自然趋近于 0。

相较传统采用定值碳因子或固定功率份额的碳核算方法, 上述时空耦合的时变系数能够刻画光伏波动与潮流再分配的边际影响, 避免在清晨与傍晚或坡道区间对碳排强度的系统性误估; 当 P_{pv} 很小或为零时, α_{pv} 自然趋近零并退化为基准情景; 在接入光储并提升新能源就地消纳后, 等效碳因子随时间下降更为显著, 核算结果对低碳减排效益的表征更准确。

3 仿真验证

3.1 牵引供电系统分析

牵引供电系统如图 4 所示, 由纳林川 (S1)、四道柳 (S2) 与海勒斯壕南 (S3) 3 座牵引变电所沿线布置; 上部为馈电线, 下部为回流线, 接触网标称电压为 27.5 kV, 钢轨与回流线构成牵引回路。区间设置分区以实现电气隔离与故障限域; 各变电所二次侧通过同相供电装置及联络实现互联与功率协调。S₃ 侧配置

的光伏-储能单元经双向变换器接入同相系统, 用于促进新能源就地消纳、平抑功率波动并吸收再生制动能量, 从而降低对公用电网的等效依赖并改善沿线电流分布与网损。为体现光伏时序与列车空间位置的耦合, 采用“9 位置×9 时刻”的离散采样: 位置节点覆盖区段关键里程, 光伏时刻取典型日曲线上的 $t_q = \{0, 60, \dots, 480\} \text{min}$, 其对应出力示例为 $[0.3, 1.2, 3.0, 4.2, 5.0, 4.5, 3.2, 1.6, 0.7] \text{MW}$ 。对每个 (i, q) 运行潮流追踪, 获得 3 种工况下的整线碳排放并进行对比。

工况设置为:

①工况 1 (电网独立供电): 保持 3 所独立运行并保留分区所, 牵引负荷完全由电网承担;

②工况 2 (同相供电): 在取消分区所的前提下, 引入同相供电装置实现互联, 功率可在区段间共享, 电流分布更均衡、线路损耗下降, 形成以网络降损为主的减排效果;

③工况 3 (接入光储的同相供电): 在工况 2 基础上接入 S₃ 侧 PV/ESS, 通过新能源就地消纳实现对电网出力的低碳替代, 并依托储能削峰填谷与再生能量回收, 获得更高的总量减排效果。

3.2 海勒斯壕南站的阻抗参数辨识

本研究以新朔铁路海勒斯壕南站示范工程为例。测试时间为 2024 年 5 月 27 日 14 时—30 日 14 时, 分析数据时长为 3 天。测量数据为未加装光伏和储能装置时的工况, 主要测得的电气量有: 海勒斯壕南站牵引变电站 ac 臂和 bc 臂首端的牵引网电压相量、电流相量、功率因数、27.5 kV 侧总有功功率、27.5 kV 侧总无功功率、27.5 kV 侧总视在功率。

海勒斯壕南站至四道柳站的距离为 29.555 km, 四道柳站至纳林川站的距离为 51.547 km。根据线路设计资料, 211 供电臂长度为 5.167 km, 213 供电臂长度为 17.785 km, 214 供电臂长度为 17.421 km。根据实测数据, 采用波动量法^[14-15]可以辨识出海勒斯壕南站多导体线路的阻抗参数, 并以此建立海勒斯壕南牵引所至四道柳变电所之间分区所的仿真模型, 如图 5 所示。

基于戴维南等效对 3 种工况进行统一表征, 从而清

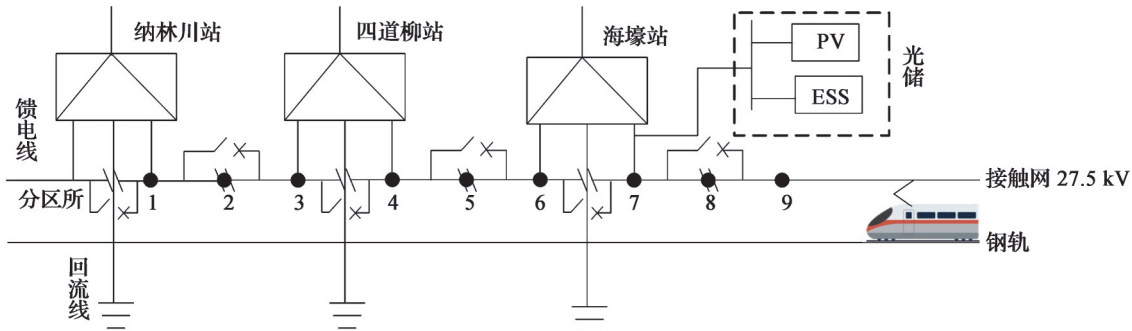


图 4 牵引供电系统图

Fig. 4 Schematic diagram of the traction power supply system

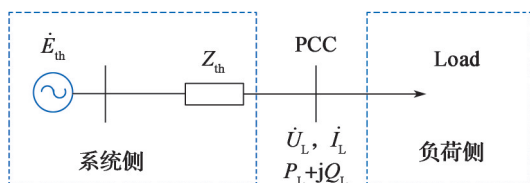


图5 戴维南等效电路

Fig. 5 Thevenin equivalent circuit

晰对比其电气特性及对损耗和电压品质的影响。

①工况1: 各区段由本段牵引变电所独立供电, 辨识得到的等效参数相近, 可视为3组独立且参数相近的戴维南等效电路; 此时列车在各区段的等效源阻抗较高, 线路电流主要在本段闭合, 网络损耗由区段内电阻主导。

②工况2: 引入同相装置后, 3所于二次侧并联, 电流在多支路分担, 等效源阻抗明显降低, 短路容量增大, 馈电电流分布更加均衡, 由此带来以网络降损为主的改善, 同时母线刚度提高、端电压对牵引功率波动的敏感性减弱。

③工况3: 在同相供电的基础上, 海勒斯壕南站(S3)退出电网侧供能, 由本地光伏-储能单元承担该区段的牵引供电, 系统从“三源并联”变为“含光储的两源并联”, 列车端等效源阻抗进一步下降, 长距离馈电电流随之减少, 线路损耗继续降低; 同时储能的功率平抑与再生能量吸收使电压波动受控、稳态水平更为稳定。

上述等效视角为后续仿真比较提供了解释: 工况2的改进主要来源于并联互联带来的网络降损, 工况3则在此基础上叠加了源侧的低碳替代与本地供能路径缩短效应, 从而在机理上支撑其整体碳排优于工况2和工况1的结论。

3.3 3工况的仿真结果对比分析

3工况整线总碳排放对比如图6所示。由图6可知, 3工况呈现出由高到低的阶梯式分布: 工况1(全部由电网供电)的总碳排放最高, 约为215 198 kg; 工况2引入同相互联后整线总碳排放显著下降, 约为166 213 kg; 在此基础上接入光伏与储能的工况3碳排放降至最低, 约为72 303.6 kg。原因在于: 同相供电实现了二次侧同相与联络分流, 等效短路容量上升、运行电压水平抬升; 在相同牵引功率下电流减小, 根据 I^2R 规律, 线路与回流损耗随之下降, 网损对应的碳排放同步减少, 由此形成网络侧的减排效果。引入光伏/储能后, 部分牵引能量由光储低碳电源提供, 有效碳因子降低; 同时削峰与再生能量吸收使潮流更平滑, 进一步压低等效电流与线路损耗。

3工况各供电所碳排放贡献如图7所示。由图7可知, 工况2下S1、S2、S3的碳排放贡献同步下降且更趋均衡, 反映同相互联降低联络阻抗、抬升二次侧电

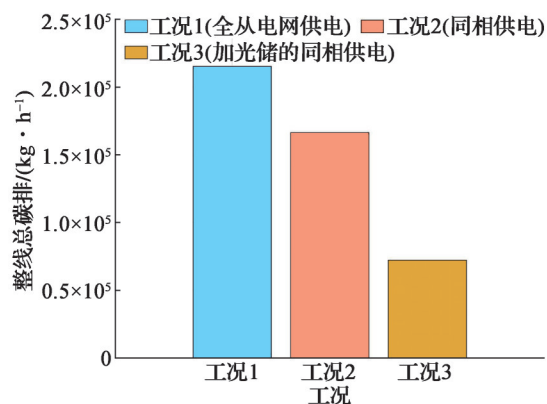


图6 3工况整线总碳排放对比图

Fig. 6 Comparison of total carbon emissions under three scenarios

压并重构潮流分配, 因而各区段电流峰值与线路损耗协同回落。由工况2过渡至工况3, 总体柱高继续下移, 其中S3的降幅最为显著: S3侧的光储就地注入使其对牵引负荷的供给由电网购电转向本地清洁供能; 充电与再生回收阶段缩短能量传输路径、减少往返潮流, 从网络与源侧两端同步削减碳排放。同相供电先通过电压抬升与潮流均衡调节, 实现普遍降损, 光储再以本地低碳替代和路径缩短来放大末端S3的减排效果。

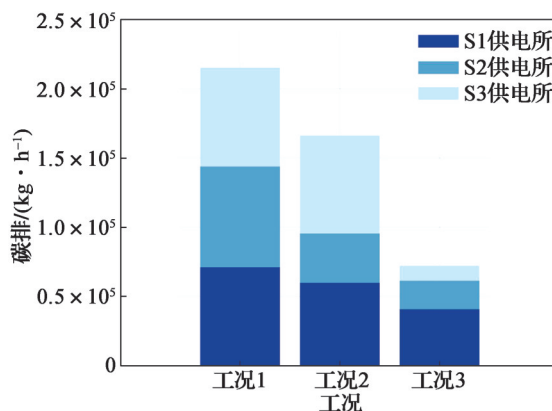


图7 3工况各供电所碳排放贡献图

Fig. 7 Carbon emission contributions of each power supply station under three scenarios

工况2和工况3相对工况1的减排量和减排率如图8所示。由图8可知, 相较于工况1, 工况2的减排主要来自网络侧降损: 同相互联带来的电压间接抬升与系统强度提升使等效电流下降, 线路损耗随之减少; 在此基础上, 工况3的增量减排由源侧结构优化主导: S3的有效碳因子随光储供能占比上升而降低, 同时削峰与再生吸收进一步压低电流水平。两种机制叠加, 使工况3获得最大减排效果。这对工程实践的意义在于: 在同相互联已将系统置于高电压、强网络状态后, 优先在负荷集中或末端牵引所配置光储, 可同时获得更小的有效碳因子与更低的网络损耗, 具备更高的边际减排收益。

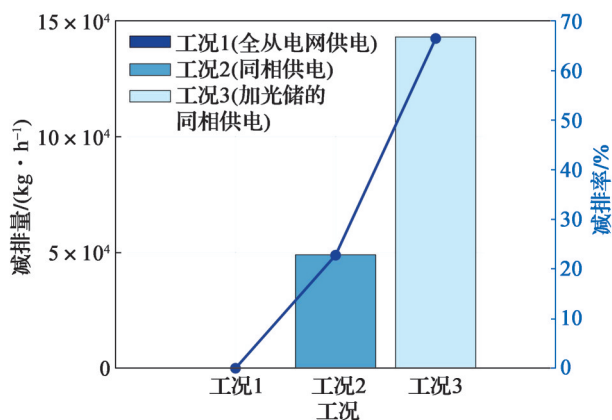


图8 相对工况1的减排量和减排率

Fig. 8 Carbon emission reductions and reduction rates relative to scenario 1

工况3整线的总碳排放如图9所示。图9给出了工况3下列车在9个典型位置运行过程中的整线总碳排放随位置变化的曲线。由结果可见,列车运行初段(POS=1~3)碳排放逐渐上升,并在POS=3附近达到峰值8 200 kg/h,此阶段牵引负荷主要由电网供电所承担,光伏出力占比偏低,导致系统等效碳因子较高。进入中段(POS=4~6)后,碳排放维持在8 100~8 200 kg/h的高位区间,表明尽管潮流分配有所变化,但新能源出力对碳排放削减的作用尚不显著。当列车进入末端区段(POS=7~9)时,总碳排放呈现显著下降趋势,最低点约为7 650 kg/h。其原因在于列车逐步靠近配置有光伏与储能装置的供电所,光伏替代比例上升,有效碳因子降低,叠加储能能在削峰填谷与功率调节中的作用,使得系统整体碳排放水平显著改善。这一结果验证了本文提出的基于潮流追踪的碳排放核算方法在捕捉新能源接入对系统碳排放时空特性影响方面的有效性,并进一步说明光伏与储能在重载铁路牵引供电系统碳减排中的重要作用。

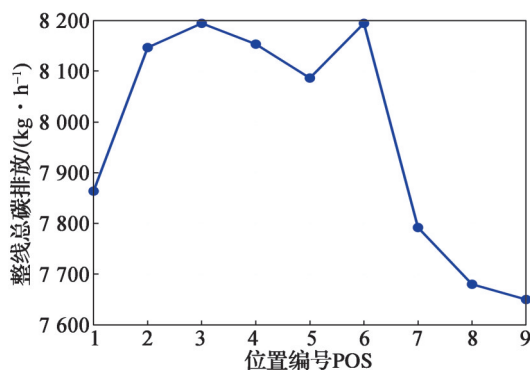


图9 工况3整线总碳排放

Fig. 9 Total carbon emissions of the entire line in scenario 3

4 结论

本文基于负功率潮流追踪与碳流追踪方法,建立了牵引供电系统不同工况下的碳排放核算模型,并在

MATLAB/Simulink平台上开展了3类典型工况的对比研究。研究结论如下:

①在工况1(电网独立供电)中,列车负荷完全由所在区段的单一变电所承担,系统等效供电能力有限,功率分配刚性,线路损耗较高,导致碳排放水平最高。

②在工况2(同相供电)中,相邻变电所通过二次侧联络线互相支援,间接抬升了电压,形成了更强的供电网络。功率潮流得以在不同电源间灵活分配,显著降低了区段电压降和线路损耗,系统总碳排放较工况1下降约22.76%,碳排放强度同步降低。

③在工况3(接入光储的同相供电)中,光储出力与电网共同供电,等效降低了3号所的电网出力份额,其碳因子得到削减。仿真结果表明,该工况下系统总碳排放降至72 303.6 kg,较工况1、工况2分别下降66.39%、56.50%,充分体现了新能源就地消纳对牵引供电系统碳排放减排的显著作用。

综上所述,同相供电能够改善供电网络的潮流分布、减少损耗,光伏与储能的接入则进一步降低碳排放,二者协同作用显著提升了铁路牵引系统的绿色低碳水平。本研究为后续在实际同相供电铁路工程中核算碳排放量、推广清洁能源利用、构建低碳牵引供电系统提供了理论依据与技术参考。

参考文献:

- [1] 陈冲,贾利民,赵天宇,等.去碳化导向的轨道交通与新能源融合发展-形态模式、解决方案和使/赋能技术[J].电工技术学报,2023,38(12):3321-3337.
CHEN Chong, JIA Limin, ZHAO Tianyu, et al. Decarbonization-oriented rail transportation and renewable energy integration development—configurations, solutions, and enabling/empowering technologies[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2023, 38(12): 3321-3337.
- [2] 李群湛,黄小红,吴波,等.电气化铁路绿电利用与零碳贯通供电技术[J/OL].西南交通大学学报.(2025-05-19) [2025-09-15]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.u.20250517.1635.002>.
LI Qunzhan, HUANG Xiaohong, WU Bo, et al. Green power utilization and zero-carbon through-railway power supply technology for electrified railways[J]. Journal of southwest jiaotong university. (2025-05-19) [2025-09-15]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.u.20250517.1635.002>.
- [3] 吴杏平,康重庆,袁启恒.我国碳排放影响因素及电力碳排放核算方法研究综述[J].中国电机工程学报,2024,44(增刊1):1-18.
WU Xingping, KANG Chongqing, YUAN Qiheng. A review of the impact factors of carbon emissions and the accounting methods for electricity carbon emissions in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(Suppl 1): 1-18.
- [4] 于万水,易俊,杨文丽,等.考虑边际碳排放和需求响应的用户侧动态碳责任核算方法[J].中国电力,2025,58(12):

- 86-95.
- YU Wanshui, YI Jun, YANG Wenli, et al. User-side dynamic carbon responsibility accounting method considering marginal carbon emission and demand response[J]. Electric power, 2025, 58(12): 86-95.
- [5] 何耿生, 曾金灿, 朱浩骏, 等. 电网平均碳排放因子统计核算方法综述[J]. 环境影响评价, 2024, 46(4): 64-70.
- HE Gengsheng, ZENG Jincan, ZHU Haojun, et al. Summary of statistical accounting methods for average carbon emission factors of power grid[J]. Environmental impact assessment, 2024, 46(4): 64-70.
- [6] 刘若飞. 储能式同相供电系统的建模与优化控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- LIU Ruofei. Research on modeling and optimizing control strategy of energy storage co-phase power supply system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [7] 王威, 黄小红, 郭镔, 等. 考虑光伏接入的储能式同相供电系统及协同控制策略[J]. 西南交通大学学报. (2025-08-14) [2025-10-12]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.u.20250814.1112.004>.
- WANG Wei, HUANG Xiaohong, GUO Kai, et al. Research on energy storage-based co-phase traction power supply considering photo-voltaic access and its cooperative control strategy[J]. Journal of southwest jiaotong university. (2025-08-14) [2025-10-12]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1277.u.20250814.1112.004>.
- [8] 刘元立, 李群湛. 含光伏和混合储能的同相牵引供电系统日前优化调度[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(1): 30-39.
- LIU Yuanli, LI Qunzhan. Day-ahead optimal scheduling of co-phase traction power supply system with photovoltaic and hybrid energy storage[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2023, 58(1): 30-39.
- [9] 王辉. 电气化铁路新型贯通式同相供电方案及其供电能力研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- WANG Hui. Research on novel continuous co-phase power supply scheme and its power supply capacity of electrified railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [10] 李腾, 马永刚, 侯凤娟, 等. 基于储能型铁路功率调节器的弱牵引网电压越限抑制措施研究[J]. 电气工程学报, 2024, 19(3): 115-127.
- LI Teng, MA Yonggang, HOU Fengjuan, et al. Research on voltage over limit suppression measures for weak traction networks based on energy storage type railway power conditioner[J]. Journal of electrical engineering, 2024, 19(3): 115-127.
- [11] 龚昱, 蒋传文, 李明炜, 等. 基于复功率潮流追踪的电力用户侧碳排放计量[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 113-117.
- GONG Yu, JIANG Chuanwen, LI Mingwei, et al. Carbon emission calculation on power consumer side based on complex power flow tracing[J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(17): 113-117.
- [12] 闫丽梅, 胡汶硕. 基于复功率分布矩阵的电力系统碳流追踪方法[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(8): 1-10.
- YAN Limei, HU Wenshuo. Carbon flow tracking method of power systems based on the complex power distribution matrix[J]. Integrated intelligent energy, 2023, 45(8): 1-10.
- [13] 伍文城, 张友刚, 陈辉, 等. 基于复功率追踪的网损分配方法探讨[J]. 继电器, 2004, 32(12): 82-86.
- WU Wencheng, ZHANG Yougang, CHEN Hui, et al. Discussion on the methods for loss allocation using complex power tracing[J]. Relay, 2004, 32(12): 82-86.
- [14] 孙华东, 陈树勇, 常晓鹏, 等. 适应大扰动的电力系统戴维南等值参数跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22): 126-132.
- SUN Huadong, CHEN Shuyong, CHANG Xiaopeng, et al. A tracing algorithm of Thevenin equivalent parameters for power systems with large disturbance[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22): 126-132.
- [15] 熊宏栋. 分布式储能的控制策略与电网频率特性提升方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- XIONG Hongdong. Research on distributed energy storage control strategy and power grid frequency characteristics improvement method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.

Carbon emission accounting for traction power supply systems based on dynamic power-flow tracing

GUAN Da¹, XIAO Zhihan², WANG Yongbin¹, FU Jun¹, FAN Haoran², LI Teng²

(1. Power Supply Branch of Guoneng Xinshuo Railway Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300, China;
2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper proposed a method for calculating carbon-emissions in railway traction power supply systems based on dynamic power-flow tracing. Complex power flow analysis was used to identify the energy sources supplying traction demand, while carbon-flow tracing was applied to apportion indirect emissions to their respective sources. Furthermore, a time-varying photovoltaic-energy storage (PV-ESS) correction factor, coupled with train position and temporal data, was developed to dynamically adjust carbon-emission factors and enhance calculation accuracy. Taking the electrified, heavy-haul Hailesihao South Line as a case study, a model incorporating co-phase power supply devices and PV-ESS units was established. Three scenarios were compared: utility grid supply only, co-phase supply only, and co-phase supply integrated with PV-ESS. Simulations were performed using position-by-position power-flow calculations to derive power flow profiles and carbon emission data. The results demonstrate that, compared with conventional calculation methods, co-phase supply reduces grid-side losses and lowers both the carbon intensity and total emissions per unit of traction energy. Notably, the integration of PV-ESS promotes the local consumption of renewables, further reducing system carbon intensity and total emissions. This study verifies the rationality of the proposed method and provides a practical engineering reference for the development of low-carbon traction power supply systems.

Keywords: traction power supply system; carbon-emission accounting; PV-ESS unit; co-phase power supply; power-flow calculation; heavy haul railway

收稿日期: 2025-10-27