

# 铁路虚拟电厂及其碳减排策略

冯毅焜<sup>1</sup>, 戴朝华<sup>1\*</sup>, 何祥照<sup>2</sup>, 韩莹<sup>1</sup>, 陈维荣<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 611756;

2. 中国铁路成都局集团有限公司, 四川省 成都市 610082)

## Railway Virtual Power Plant and Its Carbon Emission Reduction Strategy

FENG Yichen<sup>1</sup>, DAI Chaohua<sup>1\*</sup>, HE Xiangzhao<sup>2</sup>, HAN Ying<sup>1</sup>, CHEN Weirong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan Province, China;

2. China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Chengdu 610082, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** The relatively poor power quality, low capacity utilization and high electricity costs in the existing railway traction power supply systems (TPSSs) become the pain points for the railway and power system sectors. To tackle this issue, this paper proposes a railway virtual power plant (VPP) concept based on the flexible interconnection technology for different phases in a TPSS, which achieves economic benefits improvement on the premise of meeting the technical indicators for grid-connection. Besides, a carbon emission reduction regulation strategy is put forward and a capacity design model is constructed. Firstly, the primary architecture for the railway VPP is established. For the trading requirements of the carbon market, the railway VPP carbon emission reduction regulation strategy is proposed. Moreover, the railway VPP capacity design approach considering the optimal economic benefits is put forward. Finally, based on the field data and the typical operating conditions, simulation verifications are performed. The results show that, the daily power consumption of the electrified railway in the 3-phase power system is reduced by 10.72%, the regenerative braking recovery rate is 85.2%, the average power factor increases from 0.60 to 0.93, and the electricity bills are decreased by 54.54% during the project period, which verifies the important theoretical and engineering values of the proposed railway VPP.

**KEY WORDS:** railway traction power supply system; flexible interconnection of different phases; railway virtual power plant; carbon emission reduction regulation; capacity design

**摘要:** 电气化铁路牵引供电系统较差的电能质量、较低的容量利用率和高昂的电费成本已成为行业痛点。为此, 提出基于异相柔性互联技术的铁路虚拟电厂概念, 构建碳减排调控

策略和容量配置模型, 在满足电能质量并网技术指标前提下, 实现经济效益提升。首先, 建立铁路虚拟电厂的系统架构; 然后, 面向碳市场交易需求, 提出铁路虚拟电厂碳减排调控策略; 进一步地, 提出一种考虑最优经济效益的铁路虚拟电厂容量配置方法; 最后, 基于实测数据及典型工况, 进行仿真验证, 结果表明: 所提铁路虚拟电厂单日能耗降低 10.72%, 再生制动利用率 85.2%, 平均功率因数从 0.60 上升至 0.93, 项目周期内电费降低 54.54%, 具有理论和工程价值。

**关键词:** 铁路牵引供电系统; 异相柔性互联; 铁路虚拟电厂; 碳减排调控; 容量配置

## 0 引言

电气化铁路牵引供电制式与三相电力系统存在显著差异, 加之铁路牵引供电系统(traction power supply system, TPSS)属于典型冲击性负荷, 给电网带来了较为突出的负序、无功等电能质量问题<sup>[1-3]</sup>。此外, 截至 2023 年底, 我国拥有超过 119 000 km 的电气化铁路营运里程<sup>[4]</sup>, 而铁路沿线相邻牵引变电所(traction substation, TSS)间距通常为 40~50 km, 故牵引变电所分布广泛。然而, 由于列车的行车间隔, 单个牵引变电所两臂负荷多数时刻处于较低水平, 使系统能量通道的容量利用率相对较低。尽管如此, 牵引供电系统能耗仍相当可观, 如 2022 年我国电气化铁路牵引能耗高达 758 亿 kW h, 面临节能降碳的严峻挑战。综上, 铁路牵引供电系统中相对较差的电能质量、较低的容量利用率和高昂的电费成本已经成为行业的三大痛点<sup>[5-7]</sup>。

近些年来, 铁路功率调节器(railway power conditioner, RPC)不断受到关注, 其可实现牵引变电所或分区所内相邻两相间的柔性互联, 同时还可

基金项目: 国家自然科学基金项目(52377124)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52377124).

促进光伏、储能在牵引侧的直接并网<sup>[8-10]</sup>。进一步地，通过相间柔性互联，还可以将传统牵引供电系统拓展为异相柔性互联牵引供电系统<sup>[11-12]</sup>。鉴于 RPC 柔性可控的特征及其较高的兼容性<sup>[13-14]</sup>，通过合理的协调管理策略<sup>[15-17]</sup>，可综合补偿牵引变电所公共耦合点(point of common coupling, PCC)处电能质量并灵活调节牵引供电系统潮流。

尽管异相柔性互联牵引供电系统全线电能质量、再生制动能量回收率<sup>[18]</sup>、新能源消纳率<sup>[11]</sup>以及成本效益<sup>[12]</sup>相对较高，但当前研究并未解决系统容量利用率较低的问题，且没有既有的方法能够促使电气化铁路参与电力系统中的辅助服务市场。另一方面，公共电网对虚拟电厂(virtual power plant, VPP)建设的需求与日俱增<sup>[19]</sup>，而电气化铁路不仅与电网在空间分布上高度重合，且规模庞大，却无法与电网形成良好互补。基于此，考虑到虚拟电厂通过聚合与协调优化分布式能源提供电力系统辅助服务<sup>[20-22]</sup>的本质，本文基于计及新能源接入的异相柔性互联牵引供电系统，创新性地提出铁路虚拟电厂概念及其系统架构。然后，以单牵引变电所为例，针对参与全国碳排放权交易市场(简称碳市场)<sup>[23]</sup>的铁路 VPP 的调控策略及其容量配置方法展开深入研究，并分别建立相应的碳减排调控模型和容量配置模型。最后，基于四川省实际的铁路牵引变电所及其现场采集数据，验证所提铁路 VPP 调控策略和容量配置方法的可行性与有效性。

与现有基于 RPC 实现光伏、储能接入铁路牵引供电系统的研究相比，本文具有以下创新性：

1) 因基于铁路参与碳市场交易的新模式，所提的针对 RPC 与储能等设施出力的调控策略以及相关的容量配置方法，具备一定开创性；

2) 在经济性方面，既能降低铁路所缴纳的多类型电费，还可获得碳减排补贴，具备显著独特性。

综上，作为一类规模较大、分布较广的新型虚拟电厂，铁路虚拟电厂可助力铁路牵引供电系统由传统“分段被动冲击型负荷”向“跨时空主动调度型虚拟电厂”方向的突破性转变，为电力系统中的节能降碳、需求响应、电力辅助服务等提供更多的支撑，实现社会经济利益与资产效益的更大化，在“构建绿色新型电力系统”背景下，具备获得工程应用的前提条件。本文所提铁路虚拟电厂在有效实现电气化铁路主动参与电力市场或碳市场的同时，有效抑制牵引供电系统对大电网的刺性冲击以及

多重电能质量问题，对于交通运输节能降碳、铁路绿色低碳发展及铁路电网友好互洽等具备理论和工程意义。

## 1 铁路虚拟电厂概念及系统架构

### 1.1 铁路虚拟电厂概念

虚拟电厂是一种通过先进信息通信技术和软件系统，实现分布式能源资源的聚合和协调优化，以作为一个特殊电厂参与电力市场和电网运行的电源协调管理系统<sup>[24]</sup>。铁路虚拟电厂是虚拟电厂在电气化铁路领域的应用实践，包括友好铁路系统、信息网络系统和资源聚合与交易系统，如图 1 所示。其中友好铁路系统与资源聚合和交易系统通过信息网络系统实现与大电网、电力(碳)市场间的信息流交互，在实现自身友好灵活调控的同时，参与电力系统辅助服务。

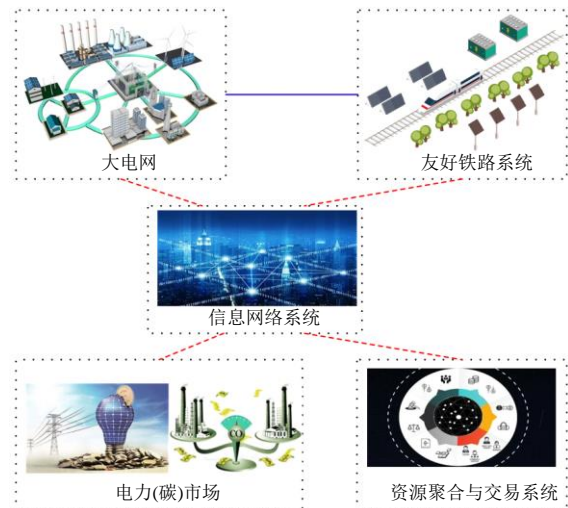


图 1 铁路虚拟电厂的主要体系

Fig. 1 Primary structure of railway VPP

资源聚合与交易系统通过聚合友好铁路系统内的分布式电力资源(列车、可再生能源、储能等)，主动优化控制牵引供电系统潮流，实现牵引变电所高压侧与大电网交互功率及能量、铁路沿线新能源单元出力、铁路功率调节器交流端的有功与无功参数等的调节。从而一方面获取铁路牵引供电系统内部能量状态的友好互洽，即：实现牵引供电系统与大电网间的友好交互，主动抑制并削弱牵引负荷对大电网的刺性冲击，极小化多重电能质量问题，使牵引变电所高压侧电能质量满足电力系统并网要求。另一方面，在保证牵引供电系统友好互洽的前提下，依据电力(碳)市场邀约信号通过资源聚合与交易系统主动参与效益导向的外部能量响应，即：协调铁路牵引供电系统主动参与电力市场或碳市

场交易,使传统电气化铁路不仅作为需求侧响应负荷,还能够作为跨空间自主调度型虚拟电厂,参与外部市场获取实际收益,提高传统电气化铁路中的设备容量利用率,实现对既有铁路牵引供电设施资产的潜在价值发掘,达到综合效益最大化;同时还能支撑性地弥补新型电力系统中电网辅助服务和需求侧响应需求中的部分缺口,促进电气化铁路向绿色、共享、友好的可持续发展模式转型。

### 1.2 系统架构

鉴于铁路牵引供电系统中电能质量的综合补偿及潮流的灵活可控需求,基于柔性互联技术的友好

铁路系统可作为实现铁路 VPP 的方式之一,其基本架构如图 2 所示。通过 RPC 分别桥接线路上多所连续的牵引变电所及分区所内的电分相区,从而使相邻多牵引变电所的供电区域间柔性互联;与此同时,基于 RPC 直流侧实现可再生能源、储能、直流微电网等在牵引侧的并网(由系统基本架构可看出,随着铁路虚拟电厂规模越大,被聚合与协调优化的牵引变电所及分布式能源越多,如同传统虚拟电厂,信息网络系统、资源聚合与交易系统对运算、通信、软件等方面的性能要求越高,因而投资成本与技术水平会一定程度限制铁路虚拟电厂的项目规模)。

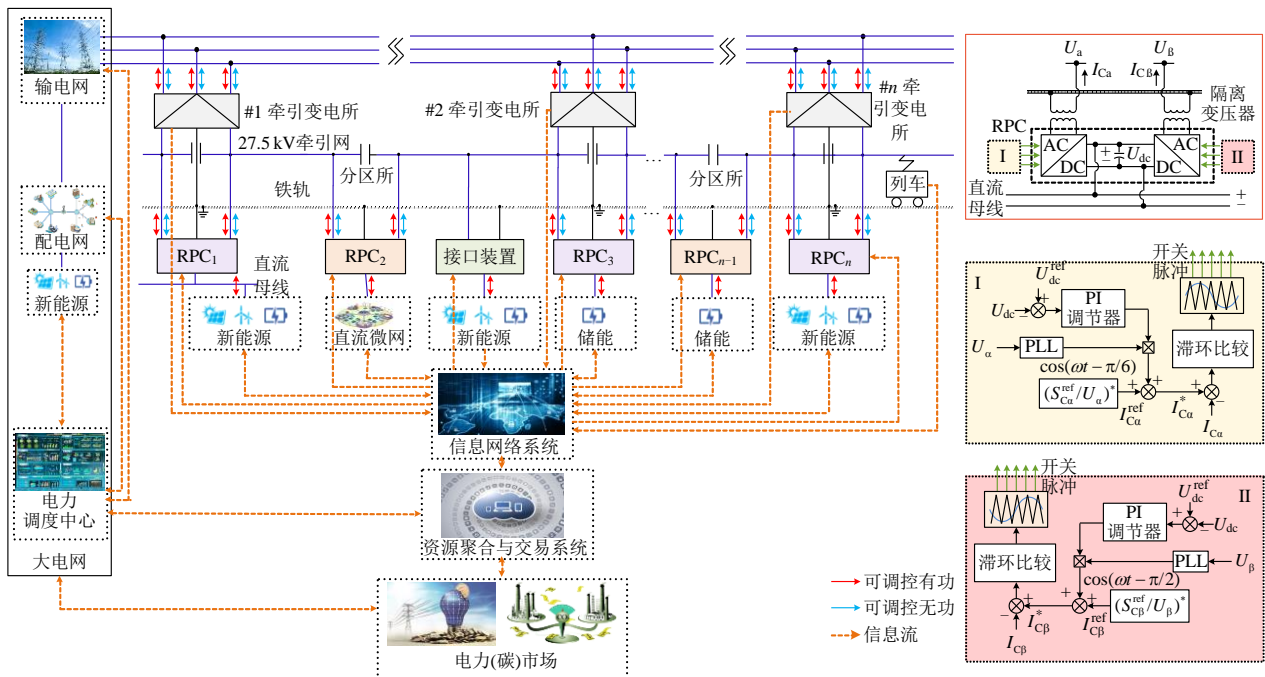


图 2 铁路虚拟电厂的牵引供电系统架构

Fig. 2 TPSS structure in railway VPP

其中, RPC 装置作为集成与协调新能源的能量路由器、转移相邻供电臂间再生制动能量的能量通道、响应附近供电臂或牵引变电所馈线中无功需求的无功补偿装置。通过合理统筹协调全线所有 RPC 装置,实现全线新能源的有效聚合,并综合改善牵引变电所内电能质量问题、抑制牵引网电压波动以及提升电气化铁路节能效益。

需要指出的是,本文提到的 RPC 不局限于某特定的换流器拓扑结构,其本质为 2 个背靠背相连的单相交-直流换流器。此外,图 2 给出了采用电压-电流双回路控制法的 RPC 典型控制回路<sup>[25-26]</sup>。考虑到相关研究已较为成熟,此处不再赘述。

### 1.3 满足 VPP 需求的铁路牵引供电并网技术指标

铁路 VPP 中牵引供电系统应当时刻遵循的并

网原则是其必须保障特定的铁路-电网友好度。根据《电力并网运行管理规定》<sup>[27]</sup>, 220 kV/110 kV 电力系统中的并网要求主要包含电压、频率、三相不平衡、功率因数等方面,因此,铁路 VPP 具体并网技术指标主要体现在牵引变电所 PCC 点处三相电压不平衡度及平均功率因数等。三相电压不平衡度与负序电流大小直接相关<sup>[25]</sup>:

$$\begin{cases} \varepsilon_u = (\sqrt{3}|U_1|I^{(-)} / S_d) \times 100\% \\ I^{(-)} = \left| \left[ \frac{1}{(3K)} \left[ (1-a)(S_{af} / \dot{U}_\alpha)^* + (a^2 - 1)(S_{bf} / \dot{U}_\beta)^* \right] \right] \right| \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_u$  为三相电压不平衡度;  $I^{(-)}$  为负序电流大小;  $U_1$  为三相系统侧额定线电压;  $S_d$  为系统短路容量;  $\dot{U}_\alpha$ 、 $\dot{U}_\beta$  分别为牵引变电所  $\alpha$ 、 $\beta$  相馈线的电压;  $S_{af}$ 、

$S_{\beta f}$  分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  相馈线中的功率，参考方向均朝向牵引供电系统，若  $S_{\alpha f} = S_{\beta f}$ ，则  $I^{(-)} = 0$ ； $K$  为牵引变压器变比，通常  $K = 220/27.5$  或  $110/27.5$ ； $a = e^{j120^\circ}$ 。

电力部门通常依据牵引变电所每月的平均功率因数给予其奖励或惩罚：

$$\bar{\lambda} = \left\{ \sum_{t=1}^{T_{\text{month}}} [|P_{\alpha f}(t) + P_{\beta f}(t)| / |S_{\alpha f}(t) + S_{\beta f}(t)|] \right\} / T_{\text{month}} \quad (2)$$

式中： $P_{\alpha f}$ 、 $P_{\beta f}$  分别为  $S_{\alpha f}$ 、 $S_{\beta f}$  的有功分量； $T_{\text{month}}$  为 1 个月内功率因数值的记录次数。

## 2 铁路虚拟电厂碳减排调控策略

### 2.1 碳减排调控原理

通过优化铁路牵引供电系统在三相电网中的净负荷(在牵引供电系统负荷功率及功率损耗之和上叠加牵引侧光、储等新能源有功出力以及再生制动能量后的功率需求)，如图 3 所示，铁路 VPP 使牵引供电系统负荷曲线得到降低，根据碳市场交易机制，等效地实现了传统发电厂中碳排放量的削减(电气化铁路负荷功率需求的降低，可能进一步导致公共电网中网损总量的降低，因此实际上参与碳市场交易核算的碳减排量对应的节省电能至少为牵引供电系统有功需求的削减量)。

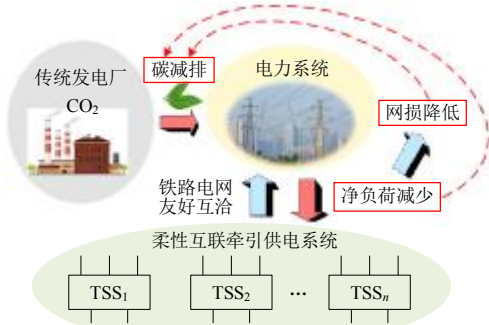


图 3 铁路虚拟电厂碳减排调控模式

Fig. 3 Carbon emission reduction mode in railway VPP

### 2.2 碳减排调控模型

以  $\alpha$ 、 $\beta$  两相柔性互联的单牵引变电所为例，建立铁路 VPP 碳减排调控模型，旨在获得 RPC、储能的实时输出功率参考值、相应的潮流优化结果以及铁路 VPP 收益。

从实际角度而言，虚拟电厂的目标应当为最大化其参与调控所获得的经济收益，从而产生激励效应。因而，铁路 VPP 碳减排调控的目标函数为

$$\min f = P_{\text{TSS}}^{\text{CER}}(t)\Delta t \quad (3)$$

式中： $P_{\text{TSS}}^{\text{CER}}(t)$  为牵引变电所与三相电网间在时刻  $t$  的交换功率，参考方向为从三相电网到牵引供电系

统； $\Delta t$  为铁路 VPP 调控的时间步长。

此外，基于牵引供电系统的正常运行及其友好并入电力系统的前提，结合图 4 所示牵引变电所中的潮流关系，可推导出如下约束条件：

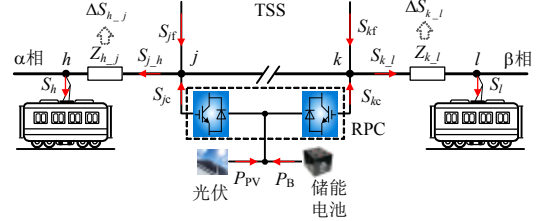


图 4 光储接入的异相柔性互联牵引供电系统潮流示意图

Fig. 4 Diagram of power flow in the different-phase flexibly-interconnected TPSS with PV and ESS

1) 直流侧的功率平衡。

$$P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{B}}(t) = P_{\text{jc}}(t) + P_{\text{kc}}(t) \quad (4)$$

式中： $P_{\text{PV}}$  为光伏系统的输出功率； $P_{\text{B}}$  为储能电池的放电功率，其值为负时表示电池处于充电状态； $P_{\text{jc}}$ 、 $P_{\text{kc}}$  分别为 RPC 输出功率  $S_{\text{jc}}$ 、 $S_{\text{kc}}$  的有功分量，参考方向均由 RPC 朝向供电臂。

2) 储能电池放电功率约束。

$$\begin{cases} P_{\text{B}}^{\text{U}}(t) \leq P_{\text{B}}(t) \leq P_{\text{B}}^{\text{L}}(t) \\ P_{\text{B}}^{\text{L}}(t) = -\min\{P_{\text{cha}}^{\text{max}}, [S_{\text{max}} - S(t-1)]E_{\text{B}}^{\text{N}} / (\eta_{\text{B}}^{\text{cha}} \Delta t)\} \\ P_{\text{B}}^{\text{U}}(t) = \min\{P_{\text{dis}}^{\text{max}}, [S(t-1) - S_{\text{min}}]E_{\text{B}}^{\text{N}} \eta_{\text{B}}^{\text{dis}} / \Delta t\} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $P_{\text{B}}^{\text{U}}(t)$ 、 $P_{\text{B}}^{\text{L}}(t)$  分别为储能电池在时刻  $t$  的放电功率上、下限； $P_{\text{cha}}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{dis}}^{\text{max}}$  分别为储能电池最大充、放电功率； $S$ 、 $S_{\text{max}}$  和  $S_{\text{min}}$  分别为储能电池的荷电状态、所允许的荷电状态上、下限值； $E_{\text{B}}^{\text{N}}$  为储能电池的额定容量； $\eta_{\text{B}}^{\text{cha}}$ 、 $\eta_{\text{B}}^{\text{dis}}$  分别为储能电池的充、放电效率。

3) 储能电池荷电状态约束。

$$\begin{cases} E_{\text{B}}(t) = E_{\text{B}}(t-1) - |P_{\text{B}}(t)| / \eta_{\text{B}}^{\text{dis}} S_{\text{B}}^{\text{dis}}(t)\Delta t + |P_{\text{B}}(t)| \eta_{\text{B}}^{\text{cha}} S_{\text{B}}^{\text{cha}}(t)\Delta t \\ E_{\text{B}}(t) = S(t)E_{\text{B}}^{\text{N}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} S_{\text{B}}^{\text{dis}}(t) = 1, S_{\text{B}}^{\text{cha}}(t) = 0, & 0 < P_{\text{B}}(t) \leq P_{\text{B}}^{\text{U}}(t) \\ S_{\text{B}}^{\text{dis}}(t) = 0, S_{\text{B}}^{\text{cha}}(t) = 1, & P_{\text{B}}^{\text{L}}(t) \leq P_{\text{B}}(t) < 0 \\ S_{\text{B}}^{\text{dis}}(t) = 0, S_{\text{B}}^{\text{cha}}(t) = 0, & P_{\text{B}}(t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中： $E_{\text{B}}$  为储能电池中剩余的储存电能； $S_{\text{B}}^{\text{cha}}$ 、 $S_{\text{B}}^{\text{dis}}$  分别为储能电池的充、放电状态变量。

4) RPC 输出功率约束。

$$P_{\text{xc}}^2(t) + Q_{\text{xc}}^2(t) \leq S_{\text{xc,max}}^2, \quad x = j, k \quad (8)$$

式中： $S_{\text{jc,max}}$ 、 $S_{\text{kc,max}}$  分别为 RPC 内与  $\alpha$ 、 $\beta$  相臂相

连换流器的额定容量;  $Q_{jc}$ 、 $Q_{kc}$  分别为  $S_{jc}$ 、 $S_{kc}$  的无功分量。

若要抑制三相侧电压不平衡度, 牵引变电所牵引侧两相中功率需求应当被平衡<sup>[28]</sup>。

$$\begin{cases} S_{jf} = S_{j-h} - S_{jc} \\ S_{kf} = S_{k-l} - S_{kc} \\ S_{jf} = S_{kf} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $S_{jf}$ 、 $S_{kf}$  分别为与  $\alpha$ 、 $\beta$  相臂相连接线中的功率, 参考方向均朝向牵引供电系统;  $S_{j-h}$ 、 $S_{k-l}$  分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  相臂中的负荷功率。

5) 三相不平衡约束。

$$\varepsilon_u(t) \leq \varepsilon_u^d \quad (10)$$

式中  $\varepsilon_u^d$  为电压不平衡度上限, 国家标准为 2%。

6) 功率因数约束。

$$\bar{\lambda} \geq \lambda_{\text{demand}} \quad (11)$$

式中  $\lambda_{\text{demand}}$  为允许的平均功率因数下限值。

### 3 铁路虚拟电厂容量配置

#### 3.1 容量配置模型

为最大化铁路 VPP 经济效益, 展现其应用价值, 其容量配置问题在工程应用中应当被首要地考虑。仍以  $\alpha$ 、 $\beta$  两相柔性互联的单牵引变电所为例, 搭建参与碳市场的铁路 VPP 容量配置模型。

铁路 VPP 的建造及运行成本包含新引入设备的装机成本及运维成本。总装机成本可表示为

$$C_{\text{INS}} = S_{\text{RPC}}^N c_1 + P_{\text{PV}}^N c_2 + E_{\text{B}}^N c_3 \lceil T/T_{\text{B}} \rceil + S_{\text{IT}}^N c_4 + P_{\text{DC}}^N c_5 \quad (12)$$

式中:  $c_1$ — $c_5$  分别为 RPC、光伏、储能、隔离变压器与 DC/DC 的单位容量投资成本;  $S_{\text{RPC}}^N$ 、 $P_{\text{PV}}^N$ 、 $E_{\text{B}}^N$ 、 $S_{\text{IT}}^N$ 、 $P_{\text{DC}}^N$  分别为其装机容量;  $T$  为预设系统寿命, 年;  $T_{\text{B}}$  为蓄电池投入使用年限;  $\lceil \cdot \rceil$  为向上取整运算。

由于 RPC 装置中 2 个换流器共享直流母线, 应当取同等容量值<sup>[29]</sup>。因此, RPC 装机容量表示为

$$S_{\text{RPC}}^N = 2S_{\text{C}}^N \quad (13)$$

式中  $S_{\text{C}}^N$  为 RPC 中单个 AC/DC 换流器的装机容量。

新增设备的总运维成本可表示为

$$C_{\text{MAI}} = \sum_{i=1}^T [S_{\text{RPC}}^N m_1 (1+r_{m1})^{i-1} + P_{\text{PV}}^N m_2 (1+r_{m2})^{i-1} + S_{\text{IT}}^N m_4 (1+r_{m4})^{i-1} + P_{\text{DC}}^N m_5 (1+r_{m5})^{i-1}] + \lceil T/T_{\text{B}} \rceil \cdot \sum_{j=1}^{T_{\text{B}}} [E_{\text{B}}^N m_3 (1+r_{m3})^{j-1}] + \sum_{k=1}^{T-\lceil T/T_{\text{B}} \rceil T_{\text{B}}} [E_{\text{B}}^N m_3 (1+r_{m3})^{k-1}] \quad (14)$$

式中:  $m_1$ — $m_5$  和  $r_{m1}$ — $r_{m5}$  分别为 RPC、光伏、储能、隔离变压器与 DC/DC 的年运维系数和运维成本年

增长率;  $\lfloor \cdot \rfloor$  为向下取整运算。

参与碳市场的铁路 VPP 运行收益主要为节省的电费及碳减排补贴。其中节省电费所得收益为:

$$R_{\text{E}} = R_{\text{EE}} + R_{\text{EB}} + R_{\text{EP}} \quad (15)$$

$$R_{\text{EE}} = \sum_{i=1}^T \{365 \sum_{t=1}^{86400} [(P_{\text{TSS}}^0(t) - P_{\text{TSS}}^{\text{CER}}(t)) \Delta t p_e(t)]\} \quad (16)$$

$$R_{\text{EB}} = \sum_{i=1}^T \{12 p_d [\sum_{t=t_1}^{t_1+899} P_{\text{TSS}}^0(t) - \sum_{\tau=t_2}^{t_2+899} P_{\text{TSS}}^{\text{CER}}(\tau)] / 900\} \quad (17)$$

$$R_{\text{EP}} = (R_{\text{EE}} + R_{\text{EB}}) \gamma \quad (18)$$

式中:  $R_{\text{EE}}$ 、 $R_{\text{EB}}$ 、 $R_{\text{EP}}$  分别为节省电度电费、基本电费与力调电费带来的收益;  $p_e$ 、 $p_d$  分别为工业电价与需量电价;  $P_{\text{TSS}}^0(t)$  为在 RPC 及新能源未接入且保持相同车情形下牵引供电系统与三相电网间在时刻  $t$  的交换功率, 其参考方向与  $P_{\text{TSS}}^{\text{CER}}$  相同;  $t_1$ 、 $t_2$  分别为铁路虚拟电厂和传统牵引变电所中最大需量电能表所记录的最大 15 min 平均功率值所在 15 min 时间段的开始时刻;  $\gamma$  为功率因数调整电费比例。

铁路 VPP 碳减排补贴收益为

$$R_{\text{CER}} = \sum_{i=1}^T \{365 \sum_{t=1}^{86400} [(P_{\text{TSS}}^0(t) - P_{\text{TSS}}^{\text{CER}}(t)) \Delta t e_c p_c]\} \quad (19)$$

式中:  $e_c$  为碳排放系数;  $p_c$  为碳交易价格<sup>[30]</sup>。

综上, 可通过采用“性价比”形式设置铁路 VPP 容量配置目标函数如下:

$$\min F = (C_{\text{INS}} + C_{\text{MAI}}) / (R_{\text{E}} + R_{\text{CER}}) \quad (20)$$

基于铁路 VPP 的碳减排调控原理, 容量配置中的约束条件除式(4)–(11)外, 还包含:

$$\begin{cases} 0 \leq S_{\text{C}}^N \leq S_{\text{Cmax}}^N \\ 0 \leq P_{\text{PV}}^N \leq P_{\text{PVmax}}^N \\ 0 \leq E_{\text{B}}^N \leq E_{\text{Bmax}}^N \end{cases} \quad (21)$$

式中  $S_{\text{Cmax}}^N$ 、 $P_{\text{PVmax}}^N$ 、 $E_{\text{Bmax}}^N$  分别为 RPC 中 AC/DC 换流器、光伏系统、储能的装机容量预设上限值。

#### 3.2 容量配置实现流程

所提铁路 VPP 实现碳减排调控下的容量配置优化流程如图 5 所示: 首先, 由①实地调研与收集设备容量投资成本、年运维系数、运维成本年增长率、电度电费、基本电费、换电周期、碳排放系数、碳交易价格等数据, 并根据工程规划时事先给定的各设备装机容量上限, 通过②枚举得到 RPC、光伏及储能系统的装机容量(由于现实应用中电力电子器件是由有限个晶体管通过串、并联等方式组合而成,

而光伏板与蓄电池在商业生产中拥有特定的规格，因此上述设备装机容量在一定范围内的取值可被认为是离散性的，故也适合在容量配置时运用枚举法。其次，基于(i)铁路 VPP 碳减排调控方法，通过③计算典型日内的 RPC、储能参考功率，求解出铁路 VPP 调控后的牵引供电系统和三相电网间的交换功率(本文在求解典型日内的碳减排调控优化问题时采用了粒子群优化算法，具体的步骤如图 5(i)所示。不失一般性地，该求解过程不局限于所应用的算法，其他的优化求解方法也能良好地嵌入此容量配置流程中)。再次，通过底层(ii)参与碳市场的铁路 VPP 容量配置方法，基于④铁路 VPP 在牵引供电系统中新增设备的装机成本与运维成本，以及铁路 VPP 在系统寿命周期内通过节省缴纳电费与参与碳市场交易所获得的收益，得到当前装机容量

组合下的容量配置性能。最后，基于⑤最优的容量配置性能来配置 RPC、光伏及储能系统的装机容量，实现铁路 VPP 投资价值与激励效应最优化。

### 4 算例分析

#### 4.1 算例数据

鉴于光伏出力具有间歇性及随机性，牵引负荷具备日周期性，为进一步考察所提铁路 VPP 在长时间尺度下产生的经济性价值，选取四川省某铁路牵引变电所典型日实测负荷数据(采样间隔：1s/次)，开展铁路 VPP 碳减排调控与定容配置有效性研究。如图 6 所示，牵引两臂负载瞬时功率差值高至 14.9MW，再生制动能量瞬时值最高近 13 MW。相应地，牵引变电所单日耗电约 40.1 MW h，未被直接利用的再生制动能量约 8.1 MW h，占日耗电量的 20.20%。为规划光伏装机容量，选取该地某光伏场典型日的单位装机容量出力曲线。此外，其他主要参数如表 1<sup>[28,31-33]</sup>、2<sup>[28]</sup>所示(各设备运维成本年增长率均为 5%，表 1 中  $C_B$  为蓄电池最大充、放电倍率)。

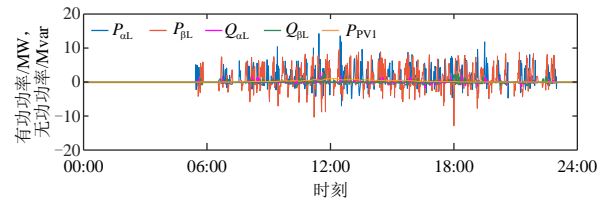


图 6 典型日牵引负荷功率与光伏单位装机输出功率  
Fig. 6 Typical daily traction load and PV power output corresponding to unit installed capacity

表 1 案例详细参数

Table 1 Detailed variables of the capacity design case

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$c_1$ /(元/MW)	480 000	$m_5$ /(元/W)	0.02	$S_{min}$	0.1
$c_2$ /(元/MWp)	485 000	$T/a$	15	$S_{max}$	0.9
$c_3$ /(元/(MW·h))	1 975 500	$r_{m5}/\%$	5	$C_B$	3
$c_4$ /(元/(MV·A))	30 000	$p_e$ /(元/(kW·h))	0.725	$\eta_B^{ic}$	0.95
$c_5$ /(元/MW)	83 000	$p_d$ /(元/(kW·月))	40	$\eta_B^{dis}$	0.95
$m_1$ /(元/W)	0.03	$\lambda_{demand}$	0.9	$T_B/a$	5
$m_2$ /(元/Wp)	0.05	$S_{Cmax}^N/MW$	15	$e_c$ /(t/(MW·h))	0.570 3
$m_3$ /(元/(W·h))	0.06	$E_{Bmax}^N/(MW·h)$	1.5	$p_e$ /(元/t)	76
$m_4$ /(元/(V·A))	0.01	$P_{PVmax}^N/MW$	3		

#### 4.2 容量配置结果

基于所提容量配置模型，得到最优配置结果为：RPC 为 9.08+9.08 MW，储能为 0.42 MW h，光伏为 3 MWp，隔离变压器为(9.08+9.08) MV·A，DC/DC 为 4.26 MW。

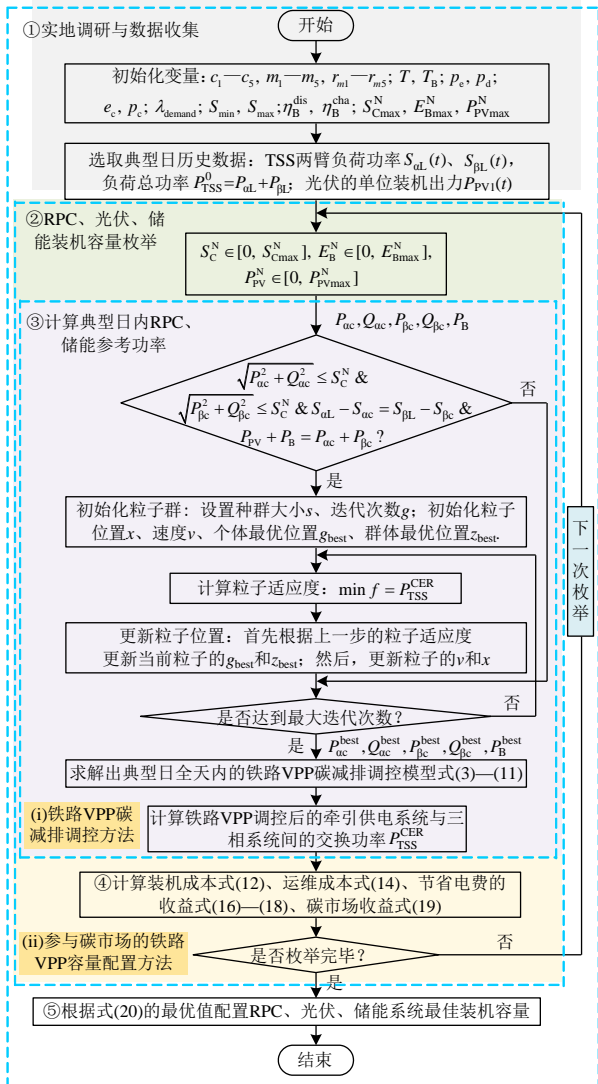


图 5 参与碳市场的铁路 VPP 容量配置流程图  
Fig. 5 Capacity design flow chart of railway VPP participating in the carbon market

表2 功率因数调整电费比例

Table 2 Ratio of power factor adjustment charge

功率因数	$\gamma\%$
$\geq 0.95$	-0.75
0.94	-0.60
0.93	-0.45
0.92	-0.30
0.91	-0.15
0.90	0.00
0.89	0.50
0.88	1.00
0.87	1.50

4.3 典型工况下并网指标验证

为验证所提铁路 VPP 有效性,拟选取以下多类典型工况:

工况 1(11:56:28)。牵引所两臂负载均为牵引状态,光、储均有效出力。

工况 2(21:31:47)。两臂均为牵引状态,光伏未出力。

工况 3(10:06:20)。两臂均为牵引状态,储能无法放电。

工况 4(10:50:07)。单臂牵引单臂制动状态,光、储均有效出力。

工况 5(21:16:51)。单臂牵引单臂制动状态,光伏未出力。

工况 6(10:28:11)。单臂牵引单臂制动状态,储能无法放电。

工况 7(12:31:55)。两臂均为制动状态,光、储均有效出力。

工况 8(05:33:36)。两臂均为制动状态,光伏未出力。

工况 9(10:07:42)。两臂均为制动状态,储能无法放电。

上述各典型工况下铁路 VPP 调控前后的功率分布情况及电能质量指标集中对比于表 3 中,表中  $\Delta P_{TSS}$  为牵引变电所有功需求减量。由表 3 可见,负序与功率因数符合并网指标要求。此外,为节省篇幅,仅给出了工况 1、2 下铁路 VPP 调控后的有功、无功功率平衡关系及节能减排情况,分别如图 7、8 所示。

由表 3 及图 7、8 可知,不同典型工况下的调控结果验证了所提铁路 VPP 可以依据两臂负荷工况实现光伏和(或)储能电能的实时动态分配,三相不平衡度均小于 2%,功率因数均不低于 0.9,整体

表3 不同典型工况下铁路 VPP 的调控结果

Table 3 Regulation results of railway VPP under the different typical operating conditions

典型 工况	铁路 VPP 调控前				$P_{PV}/$ MW	SOC	$\Delta P_{TSS}/$ MW	$S_{ac}/$ (MV·A)	$S_{bc}/$ (MV·A)	$P_B/$ MW	铁路 VPP 调控后			
	$S_{a1}/$ (MV·A)	$S_{\beta 1}/$ (MV·A)	$\lambda$	$I^{(3)}/A$							$S_{a1}/$ (MV·A)	$S_{\beta 1}/$ (MV·A)	$\lambda$	$I^{(3)}/A$
工况 1	6.32+j0.26	3.84-j0.14	1.000	6.59	2.91	0.73	3.80	3.14+j0.31	0.66-j0.09	0.89	3.18-j0.05	3.18-j0.05	1.000	0
工况 2	2.44-j0.94	7.78-j0.61	0.989	14.04	0.00	0.83	1.04	-2.15-j1.53	3.19-j1.20	1.04	4.59+j0.59	4.59+j0.59	0.992	0
工况 3	1.88-j0.15	6.29-j0.47	0.997	11.63	1.13	0.10	0.67	-1.27-j1.19	1.94-j1.51	-0.46	3.75+j1.04	3.75+j1.04	0.964	0
工况 4	5.65-j0.35	-5.92+j0.11	0.747	30.39	1.47	0.67	2.73	7.15+j0.09	-4.42+j0.55	1.26	-1.50-j0.44	-1.50-j0.44	0.960	0
工况 5	5.40-j0.68	-2.80-j0.11	0.957	21.57	0.00	0.88	1.26	4.73-j0.65	-3.47-j0.08	1.26	0.67-j0.03	0.67-j0.03	0.999	0
工况 6	4.06-j0.62	-3.65+j0.65	0.997	20.50	0.91	0.10	0.91	4.31-j0.57	-3.40+j0.70	0.00	-0.25-j0.05	-0.25-j0.05	0.981	0
工况 7	-7.03+j2.04	-1.36-j0.09	0.974	15.90	1.97	0.62	3.23	-1.22+j4.30	4.45+j2.17	1.26	-5.81-j2.26	-5.81-j2.26	0.932	0
工况 8	-1.18+j0.57	-4.20-j0.05	0.995	8.09	0.00	0.71	1.26	2.14-j0.09	-0.88-j0.71	1.26	-3.32+j0.66	-3.32+j0.66	0.981	0
工况 9	-0.73-j0.15	-0.10-j0.38	0.840	1.74	1.15	0.10	0.21	-0.21-j0.03	0.42-j0.26	-0.94	-0.52-j0.12	-0.52-j0.12	0.974	0

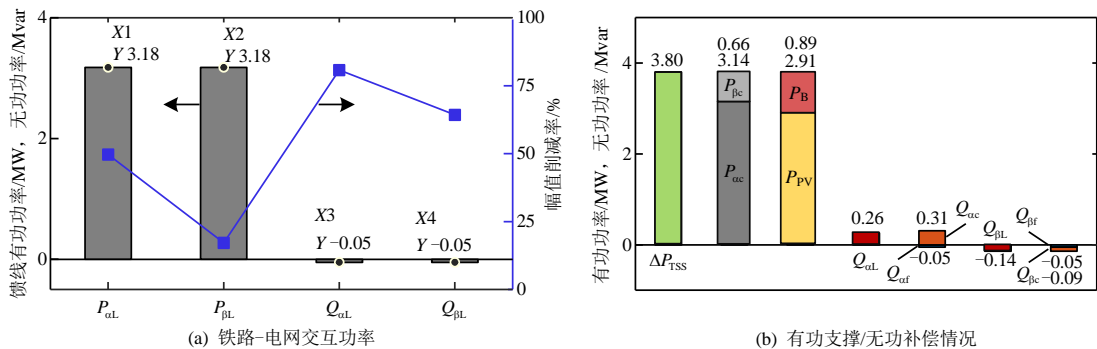


图7 工况1下系统功率变化  
Fig. 7 Power of the system under working condition 1

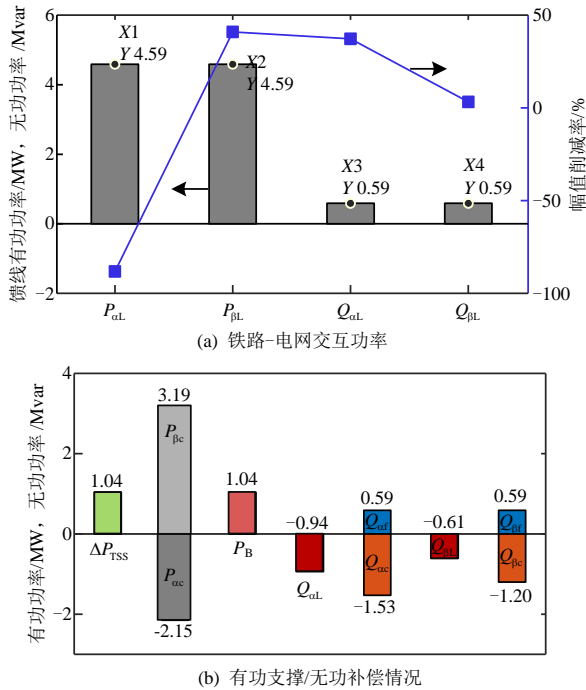


图 8 工况 2 下系统功率变化

Fig. 8 Power of the system under working condition 2

负序与功率因数均满足并网指标要求，使电气化铁路不仅可以有效地降低自身在公共电网中的有功需求，甚至能使其作为虚拟发电厂向电力系统提供高质量电能，从而在各运行工况下均能实现节能减排，具备有效参与碳市场的潜能。

#### 4.4 典型日异相柔性互联牵引供电系统潮流优化结果

图 9 为铁路 VPP 调控前后牵引变电所消耗三相电网的有功功率曲线。相应地，图 10 为储能系统典型日的放电功率及荷电状态变化情况。牵引变

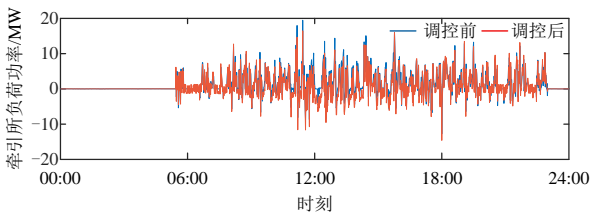


图 9 铁路 VPP 调控前后牵引所消耗三相电网功率变化  
Fig. 9 Power consumption of the TSS in the three-phase grid without and with railway VPP regulation

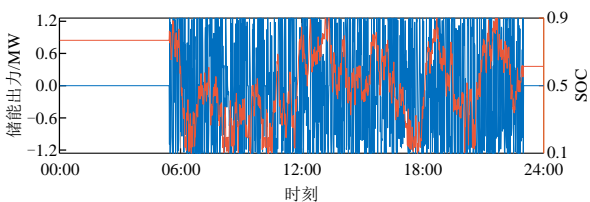


图 10 储能出力及荷电状态变化  
Fig. 10 Power and SOC of the ESS

电所单日耗电下降至 35.8 MW h，下降比例为 10.72%。

图 11 所示 RPC 向两臂的输出功率表明：RPC 实时地转移再生制动能量，并基于两臂负载情况，实时向两臂分配光伏和(或)储能输出功率；同时，通过向供电臂注入或吸收无功功率，以完成无功就地补偿，其中，RPC 提供的无功补偿量约为 19.3 Mvar。单日内通过 RPC 转移被利用的再生制动能量约为 6.9 MW h，再生制动能量利用率可达到 85.2%。

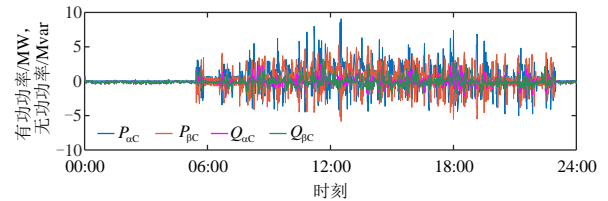
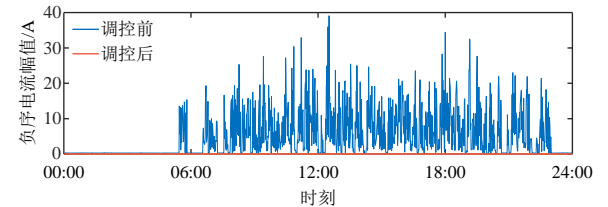


图 11 RPC 向两臂的输出功率

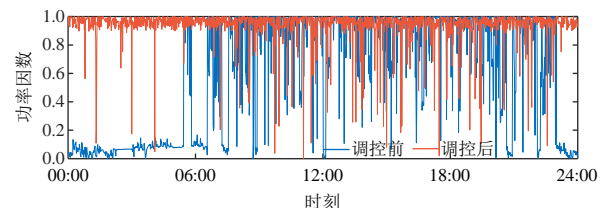
Fig. 11 Power injected by the RPC into the power arms

#### 4.5 典型日电能质量综合改善结果

图 12 为铁路 VPP 调控前后牵引变电所 PCC 点处负序电流及功率因数波形图。PCC 点处负序电流被充分抑制；平均功率因数由 0.60(对应功率因数调整电费比例为+25%)上升至 0.93，避免平均功率因数低于 0.9 而被罚款。



(a) 负序电流



(b) 功率因数

图 12 铁路 VPP 调控前后系统电能质量

Fig. 12 Power qualities of the system without and with railway VPP regulation

#### 4.6 经济效益分析

参照国家相关部门针对 VPP 在内的并网主体制订的《并网调度协议》《购售电合同》<sup>[34]</sup>等，可通过制定电气化铁路购售电合同(前提是铁路 VPP 必须满足电力系统并网要求)，激励铁路 VPP 实时

参与电力系统中的调度市场。本文算例假设在此激励政策下,铁路 VPP 与电网企业根据平等互利的原则,按购电价格向电网出售符合并网要求的电能。

如表 4 所示,从缴纳电费、投资成本、运维成本、成本回收周期、年平均净收益等多方面对所提铁路 VPP 的定容配置方案开展经济性分析。

表 4 经济效益

Table 4 Economic benefits

情形	净电度电费/ (万元/a)	基本电费/ (万元/a)	力率电费/ (万元/a)	总缴纳电费/ 万元	AC/DC 换流器			隔离变压器		
					容量/ MW	投资成本/ 万元	运维成本/ 万元	容量/ (MV·A)	投资成本/ 万元	运维成本/ 万元
无新能源、RPC 接入	1061.9	341.8	350.9	26320.5	—	—	—	—	—	—
铁路 VPP 调控	514.8(↓51.53%)	286.5(↓16.19%)	—3.6(↓101.03%)	11964.8 (↓54.54%)	9.08×2	871.7	1175.6	9.08×2	54.5	391.9

情形	光伏板			储能			换电 次数	DC/DC 换流器			碳市场收益/ (万元/a)	成本回收 周期/a	年平均净收 益/万元
	容量/ MWp	投资成本/ 万元	运维成本/ 万元	容量/ (MW h)	投资成本/ 万元	运维成本/ 万元		容量/ MW	投资成本/ 万元	运维成本/ 万元			
无新能源、 RPC 接入	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
铁路 VPP 调控	3	145.5	323.7	0.42	248.9	41.8	3	4.26	35.4	183.9	19.9	4	977.0

由表 4 可知:在 15 年的项目周期内,铁路 VPP 调控使牵引变电所缴纳电费的净值由 263205 千元降至 119648.1 千元,降低了 54.54%;参与碳市场所获总收益为 2985.1 千元。铁路 VPP 总投资成本为 13559.3 千元,总运维成本为 21167.7 千元,总净收益为 146541.9 千元,成本回收周期大约为 4 年。从经济性角度考虑,所提铁路 VPP 具有推广前景。

## 5 结论

针对广泛分布的传统牵引供电系统内能量通道的容量利用率相对较低且公共电网对虚拟电厂的需求与日俱增的现象,本文提出了一种铁路 VPP 概念。同时,针对参与碳市场交易的铁路 VPP 构建了一种碳减排调控策略,并提出了一种考虑最优经济效益的铁路 VPP 定容配置策略。基于实测算例验证了本文所提方法的正确性与优越性,得出以下结论:

1) 本文所提铁路 VPP 方法通过充分利用 RPC 内剩余装机容量、储能系统输出功率的柔性可控、再生制动能量与牵引状态能量需求的互补性等,在整体改善牵引变电所 PCC 点处电能质量的前提下,不仅可主动地有效降低电气化铁路在公共电网中的有功需求,甚至还能适时地使其发挥发电厂的功能、向电力系统提供较为优质的电能,有效地实现“节能减排”。

2) 通过对比传统方案,本文所提铁路 VPP 定容配置策略所得优化方案能够降低牵引变电所单日消耗三相电网的电量,下降比例为 10.72%;同时,

使再生制动能量的利用率高达 85.2%;项目周期内,牵引变电所所需缴纳的电费降低 54.54%;进一步地,结合参与碳市场直接所获的收益,成本回收周期较短,使铁路 VPP 在经济角度上具有推广前景。

需要说明的是,在铁路虚拟电厂框架下,基于异相柔性互联技术的新能源与储能接入,同样面临谐波谐振、安全稳定等问题,因此统筹运行安全性、稳定性与经济性的铁路虚拟电厂综合控制策略,亦是今后研究的重点;再者,尽管理论层面上基于异相柔性互联技术的牵引供电系统满足电力系统并网条件时,即可实施铁路虚拟电厂功能,但在实际操作层面目前仍然面临管理体制方面的挑战,一是电力部门仍不欢迎来自铁路牵引供电系统的供电,二是铁路部门暂未有参与电力部门调度的意愿,因此相关激励政策或制度的制定不可或缺;此外,为更充分挖掘铁路虚拟电厂的功能与潜能,铁路虚拟电厂的调峰、调频等调控策略及相关容量配置方法亦值得未来继续探讨。

## 参考文献

- [1] GAZAFRUDI S M M, LANGERUDY A T, FUCHS E F, et al. Power quality issues in railway electrification: a comprehensive perspective[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3081-3090.
- [2] ZHU Zhen, MA Fujun, WANG Xin, et al. Operation analysis and a game theoretic approach to dynamic hybrid compensator for the V/v traction system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9):

- 8574-8587.
- [3] WANG Ke, HU Haitao, ZHENG Zheng, et al. Study on power factor behavior in high-speed railways considering train timetable[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2018, 4(1): 220-231.
- [4] 中华人民共和国中央人民政府. 2023 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. (2024-06-18)[2025-08-08]. [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202406/content\\_6957901.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202406/content_6957901.htm).
- [5] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣, 等. 双碳目标下铁路友好体系形态、架构与关键技术[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(20): 7892-7912.
- DENG Wenli, DAI Chaohua, CHEN Weirong, et al. Form, architecture, key technology of railway-friendly system under dual carbon target[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(20): 7892-7912(in Chinese).
- [6] XU Changan, LI Sihan, XU Heying, et al. Exploring passenger train occupation rate influencing factors using association rules: a case study in China[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2020, 38(5): 5753-5761.
- [7] GAO Shengfu, LI Qunzhan, HUANG Xiaohong, et al. Optimal sizing and operation of hybrid energy storage systems in co-phase traction power supply system considering battery degradation[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2023, 17(9): 2038-2054.
- [8] HUANG Yi, HU Haitao, GE Yinbo, et al. Joint sizing optimization method of PVs, hybrid energy storage systems, and power flow controllers for flexible traction substations in electric railways[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(2): 1210-1223.
- [9] MA Qian, YANG Zhijun, LUO Pei, et al. A rolling-adaptive peak clipping control strategy coordinating RBE recycling and PV consumption[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(4): 4348-4363.
- [10] LUO Pei, LI Qianru, ZHOU Yang, et al. Multi-application strategy based on railway static power conditioner with energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(4): 2140-2152.
- [11] GE Yinbo, HU Haitao, CHEN Junyu, et al. Hierarchical energy management of networked flexible traction substations for efficient RBE and PV energy utilization within ERs[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(3): 1397-1410.
- [12] PILO E, MAZUMDER S K, GONZÁLEZ-FRANCO I. Smart electrical infrastructure for AC-fed railways with neutral zones[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(2): 642-652.
- [13] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣, 等. 铁路功率调节器研究进展[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(14): 4640-4655.
- DENG Wenli, DAI Chaohua, CHEN Weirong, et al. Research progress of railway power conditioner [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(14): 4640-4655(in Chinese).
- [14] HU Sijia, XIE Bin, LI Yong, et al. A power factor-oriented railway power flow controller for power quality improvement in electrical railway power system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(2): 1167-1177.
- [15] GE Yinbo, HU Haitao, CHEN Junyu, et al. Combined active and reactive power flow control strategy for flexible railway traction substation integrated with ESS and PV[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(4): 1969-1981.
- [16] GE Yinbo, HU Haitao, HUANG Yi, et al. Quadratic sensitivity models for flexible power quality improvement in AC electrified railways[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(3): 2844-2849.
- [17] DENG Wenli, DAI Chaohua. A multifunctional energy storage system with fault-tolerance and its hierarchical optimization control in AC-fed railways[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(4): 2440-2452.
- [18] 杨凯, 胡海涛, 陈俊宇, 等. 电气化铁路再生制动能量利用系统保护方案研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(24): 9523-9534.
- YANG Kai, HU Haitao, CHEN Junyu, et al. Research on protection scheme of regenerative braking energy utilization system of electrified railway[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(24): 9523-9534(in Chinese).
- [19] 国家发展改革委, 国家能源局, 国家数据局. 关于印发《加快构建新型电力系统行动方案(2024-2027 年)》的通知[EB/OL]. (2024-07-25)[2025-08-08]. [https://zfxgk.nea.gov.cn/2024-07/25/c\\_1310783890.htm](https://zfxgk.nea.gov.cn/2024-07/25/c_1310783890.htm).
- [20] WANG Siyuan, WU Wenchuan. Aggregate flexibility of virtual power plants with temporal coupling constraints [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(6): 5043-5051.
- [21] ZHANG Yunfan, LIU Feng, WANG Zhaojian, et al. Robust scheduling of virtual power plant under exogenous and endogenous uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(2): 1311-1325.
- [22] WANG Qi, WU Wenchuan, WANG Bin, et al. Asynchronous decomposition method for the coordinated operation of virtual power plants[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(1): 767-782.
- [23] 朱子恒, 张策, 丁肇豪, 等. 数据中心纳入全国碳排放权交易市场机制研究[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(14): 5562-5573.
- ZHU Ziheng, ZHANG Ce, DING Zhaohao, et al. Incorporating data centers into China's national carbon

- emissions trading system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5562-5573(in Chinese).
- [24] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.  
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9(in Chinese).
- [25] 邓文丽, 戴朝华, 张涵博, 等. 复杂电气化铁路牵引用光伏发电系统综合优化控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5849-5864.  
DENG Wenli, DAI Chaohua, ZHANG Hanbo, et al. Research on comprehensive optimization control method for traction photovoltaic generation system of complex electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5849-5864(in Chinese).
- [26] 吴传平, 罗安, 徐先勇, 等. 采用 V/v 变压器的高速铁路牵引供电系统负序和谐波综合补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 111-117.  
WU Chuanping, LUO An, XU Xianyong, et al. Integrative compensation method of negative phase sequence and harmonic for high-speed railway traction supply system with V/v transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 111-117(in Chinese).
- [27] 国家能源局. 国家能源局关于印发《电力并网运行管理规定》的通知[EB/OL]. (2021-12-21)[2025-08-08]. [http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c\\_1310391369.htm](http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c_1310391369.htm).
- [28] CHEN Junyu, HU Haitao, GE Yinbo, et al. Techno-economic model-based capacity design approach for railway power conditioner-based energy storage system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 4730-4741.
- [29] AN Bonan, LI Yong, LIU Fang, et al. An asymmetrical connection balance transformer-based hybrid railway power conditioning system with cost-function optimization[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(2): 577-590.
- [30] CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Optimal flexible operation of a CO<sub>2</sub> capture power plant in a combined energy and carbon emission market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1602-1609.
- [31] YING Yichen, TIAN Zhongbei, WU Mingli, et al. Capacity configuration method of flexible smart traction power supply system based on double-layer optimization[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(3): 4571-4582.
- [32] MOHAMMAD-ALIKHANI A, MAHMOUDI A, KHEZRI R, et al. Multiobjective optimization of system configuration and component capacity in an AC minigrd hybrid power system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(3): 4158-4170.
- [33] 中华人民共和国生态环境部. 关于做好 2023-2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知[EB/OL]. (2023-02-07)[2025-08-08]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/202302/t20230207\\_1015569.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html).
- [34] 国家能源局, 国家市场监督管理总局. 国家能源局 国家市场监督管理总局关于印发《并网调度协议示范文本》《新能源场站并网调度协议示范文本》《电化学储能电站并网调度协议示范文本(试行)》《购售电合同示范文本》的通知[EB/OL]. (2021-12-28)[2025-08-08]. [http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-12/28/c\\_1310417604.htm](http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-12/28/c_1310417604.htm).



冯毅焜

在线出版日期: 2025-03-24。

收稿日期: 2024-07-01。

作者简介:

冯毅焜(1993), 男, 博士研究生, 研究方向为牵引供电系统理论、电能质量分析与控制, [fengyichen@my.swjtu.edu.cn](mailto:fengyichen@my.swjtu.edu.cn);

\*通信作者: 戴朝华(1973), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划与运行优化、轨道交通新能源, [daichaohua@swjtu.edu.cn](mailto:daichaohua@swjtu.edu.cn)。

(责任编辑 李泽荣)