

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220755

# 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

陈冲<sup>1</sup> 贾利民<sup>1,2</sup> 赵天宇<sup>3</sup> 金成日<sup>3</sup> 吴命利<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学国家能源交通融合发展研究院 北京 102206

2. 北京交通大学电气工程学院 北京 100044

3. 北京能高自动化技术股份有限公司 北京 100044)

**摘要** 该文以轨道交通能源供给去碳化为导向,以构建绿色、弹性、自洽和可持续发展的轨道交通能源系统为目标,尝试探索轨道交通用能需求与可再生能源资源禀赋适配的轨道交通能源供给去碳化技术路径和系统模式。首先,回顾国内外轨道交通既有的牵引供电制式、存在问题、研究方向与典型案例;其次,以可再生能源利用为主线,系统阐述轨道交通能源绿色化的场景、模式与演进形态;然后,提出涵盖典型场景技术架构、组分优化配置原则、协同运行控制方法、能量调度管控策略、分层式管控设计的轨道交通与新能源融合系统解决方案;最后,概述支撑轨道交通与新能源融合发展的关键使/赋能技术。

**关键词:** 去碳化 轨道交通 新能源 融合发展 形态模式 绿色自洽 使/赋能技术

**中图分类号:** TM922

## 0 引言

面对资源紧缺、气候变化、环境污染给人类带来的严峻挑战,能源供给侧与负荷需求侧协同减碳、去碳是应对这些挑战的关键举措。轨道交通作为能源消耗大户,能否合理科学地进行减碳、去碳,决定了交通绿色化的发展质量与实现进程;能源作为社会发展之基本,能否革新趋于绿色、再生、多元发展,关乎中国能源安全与永续发展。鉴于能源与轨道交通的紧密耦合关系与未来一致发展趋势,在新时代去碳化的导向下,轨道交通与能源融合发展对构建“清洁低碳、安全高效”的可持续发展能源体系和绿色、自洽、弹性的交通供给系统具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。

轨道交通具有运输能力大、速度快、安全程度高、运输成本低、占地少、能耗低、污染小、全天候等特点,是我国交通运输体系组构骨干。到2020

年底,我国铁路营业里程达14.64万km,城市轨道交通运营线路总长达7969.7km,轨道交通年总电能消耗超1000亿kW·h。电气化铁路占比超70%,用能高度依赖以化石能源为主的公共电网;非电气化铁路占比近30%,碳排比例大<sup>[4]</sup>。因此,轨道交通亟须革新自身能源结构,构建绿色、弹性、自洽和可持续发展的交通能源一体化系统,加快自身技术革命和体制革命,塑造和引领新模式、新技术、新业态、新产业,激发我国经济发展内生新动能。

鉴于此,为探索一条符合我国国情的轨道交通能源融合发展科学之路,促进轨道交通能源供给趋于绿色弹性自洽发展,形成以新能源为主体的新型供电系统体制,本文基于国内外轨道交通供电技术现状分析结果,将重点探讨轨道交通能源融合发展的形态模式、解决方案与关键技术等内容,旨在为轨道交通领域能源变革指明方向、提供参考。

## 1 国内外轨道交通牵引供电技术现状

### 1.1 轨道交通牵引供电既有方式

以保障供电可靠性为原则,兼顾考虑电源容量、经济性及牵引网特殊输电功能要求,从不同视角

国家能源集团科技创新项目(GJNY-21-189)、国家重点研发计划项目(2021YFB2601300, 2021YFB2601405)和中国工程院战略研究与咨询项目(2021-XZ-25)资助。

收稿日期 2022-05-06 改稿日期 2022-09-29

探讨轨道交通既有牵引供电方式以及国内外相关典型应用案例,具体情况分别如附图1所示和见附表1<sup>[5]</sup>。

## 1.2 轨道交通牵引供电技术存在问题

(1) 电网友好度低。城市轨道交通和电气化铁路的机车一般白天营运、晚上整修,这种大功率冲击性的机车负荷反调峰特性显著,加剧了调解能力原本有限的电网的调峰压力,阻碍以新能源为主体的新型电力系统的构建;单相脉冲式的电气化铁路牵引负荷属性,给110 kV/220 kV电网侧带来了负序、谐波、功率等一系列不利影响,恶化了其电能质量<sup>[6]</sup>。

(2) 非电化区段电气化难度大。非电化区段铁路一般地处新疆、西藏等偏远区域,环境恶劣、地形复杂、电网薄弱、桥隧比高,而且沿途其他负荷较小,如果按照传统电气化牵引供电技术制式来实现非电化区段的升级改造,需要新建110 kV/220 kV高压线路网,建设难度之大、成本之高、代价之高不言而喻,严重制约了非电化区段的电气化升级改造进程<sup>[7]</sup>。

(3) 系统弹性不足。目前,轨道交通电气化牵引供电系统过度依赖电网,能量供给路径较为单一且自身应急保电能力较弱。然而,威胁电网安全可靠稳定运行的常态(如单相、两相、三相短路等)与非常态(极端天气、自然灾害、战争损毁等)的随机扰动因素难预测、难控制、难规避。某条牵引供给路径的中断,会迫使机车停运在非安全设定区域,存在发生事故的潜在风险;某条/某几条高压中枢线路中断导致的局域或全局电网瘫痪,将造成轨道交通行业的停摆,严重影响国民经济发展甚至威胁国防安全<sup>[8]</sup>。

(4) 绿色化程度低。轨道交通主要包含电化牵引和非电化牵引两大类,每年耗能巨大。其中,30%的非电化牵引通过内燃机消耗燃油驱动机车,直接造成了碳的大量排放;剩余70%的电气化牵引尚依赖以传统化石能源为主的电力系统,间接造成了碳的大量排放。因此,轨道交通能源结构亟须革新,提高清洁能源供给占比,否则将严重制约我国双碳目标的践行<sup>[9]</sup>。

(5) 制动能量再生利用差。机车制动能量按照消纳载体的不同可分为能馈式、能耗式与储能式三种。目前轨道交通牵引供电系统一般采用空气制动+电阻消耗+相邻机车牵引消纳相结合的技术路径,不仅造成了高品质电能的严重浪费,而且长下坡路段重载机车制动能量持续馈入接触网将引发网

压的过度抬升,触发线路保护动作,影响机车连续安全运行<sup>[10]</sup>。

(6) 用能成本较高。轨道交通机车牵引耗能高、冲击性强,适配的牵引变压器容量较大。按照相关条例规定,每年轨道交通需要向电网缴纳数额很大的电度电费和容量电费,是轨道交通运营占比较大的主要支出之一,亟需采用合理技术手段予以降低。

(7) 自身具有的可再生能源未得到充分利用。轨道交通沿线风光等自然禀赋富足,闲置屋顶/空地较多,内含较大潜在利用价值,亟须采用合理的开发手段、有效的技术手段与科学的商业模式予以唤醒,盘活体量巨大的固定资产,实现轨道交通运营的低成本、高效益。

## 1.3 轨道交通牵引供电技术研究方向

目前,国内外研究学者研究方向主要聚焦在轨道交通牵引供电方式与机车负荷属性引发的问题改善或优化等方面,并取得了一定理论研究成果。

针对电气化铁路牵引供电系统高压电网电能质量恶化的问题,文献[11-14]以不同视角阐述了铁路系统高次谐波、谐振等的危害以及应对解决措施和方案。文献[15]提供了一种简化谐振机理分析来解释主要的谐振规律,总结了地面和车上多种高次谐波谐振抑制措施。文献[16]以城市轨道交通节能为目标,提出了超级电容动态充放阈值调节的控制策略,实现了城市轨道交通牵引供电的稳压和制动能量回收,并通过仿真和样机现场实验验证控制策略的有效性。针对轨道交通机车再生制动能量回收问题,文献[17]针对不同牵引变电所负荷特性的差异,提出储能型和储能+能量回馈型两种再生制动能量利用方案,并制定相应的能量管理策略及控制方法。文献[18]基于超级电容器组和模块化储能变流器构建了一种再生制动能量吸收结构,提出了均压策略以保证超级电容器组高效可靠工作。文献[19]基于储能技术提出了一种再生制动能量回馈的解决方案和控制策略,并通过仿真结果证明了所提方案和控制策略的有效性。针对电气化铁路牵引供电系统振荡问题,文献[20-24]从不同角度阐明了系统振荡危害以及抑制举措和解决方案。文献[25]提出了一种降低供电网络阻抗与改变控制参数的解决方法,有效防止了牵引振荡。文献[26]通过研究证明在适当范围内降低饱和限幅器阈值,可以减小振荡幅值。针对提高轨道交通绿电供给比例问题,文献[27-28]利用铁路沿线两侧闲置空地、车站等场景植入了新能源,提出了系统架构和接入方案,实现了轨道交通

用电趋于绿色化。文献[29]通过城市轨道交通与光伏系统相结合的工程实例，分析论证了光伏发电系统在城市轨道交通应用的可行性。

综上所述，目前研究方向主要聚焦解决轨道交通牵引供电系统电能质量和再生制动能量回收处理等方面，关于新能源和储能植入牵引供电系统仅进行了初探，并未形成面向轨道交通供电技术其他问题的完整的成套解决方案和技术体系。

### 1.4 轨道交通可再生能源应用典型案例

目前，隶属于轨道交通与新能源融合范畴的国内外典型案例，基本聚焦在依托车站屋顶、铁路沿线空地建设光伏、风电或电池储能系统，主要用以补充照明、通信、空调等非牵引负荷部分用电需求，具体情况详见附表 2。

日本公司自 1993 年利用 1 700 座车站逐步建设投运了 100 MW 屋顶光伏，2011 年又利用平井真米、平海嘴等多条铁路沿线建设了光伏+锂电联运系统<sup>[30-31]</sup>；2017 年，澳大利亚在南威尔士州火车站建设了 30 kW 屋顶光伏+锂电联运系统，荷兰铁路公司和电力公司联合则在铁路沿线建设投运了风电系统等；2020 年，印度巴拉特重型电力有限公司

(BHEL) 将 1.7 MWp 光伏接入铁路牵引供电系统，首次实现了对机车牵引用能的补充<sup>[32]</sup>。

近几年，我国则陆续在上海虹桥站、济南前大彦地铁站、潍坊北站、杭州东站、南京南站、深圳地铁 6 号线高架站等地投运了不同容量的分布式光伏系统，主要用于满足车站照明、空调、电扶梯等负荷部分用能需求<sup>[33-34]</sup>。

## 2 轨道交通与新能源融合发展的形态模式

### 2.1 轨道交通与新能源融合场景

轨道交通与新能源融合主要涉及服务/基础设施能源化和载运装备电动化两大范畴，本文重点讨论前者。充分利用轨道沿线风光等自然禀赋与可用屋顶/空地，通过光伏和风电因地制宜、因网制宜、因荷制宜，合理植入轨道交通的不同场景，实现能源与交通的协同进化，驱动轨道交通逐步涌现“源-网-荷-储”多重属性。按照轨道交通类型、电网强弱程度、新能源植入类型进行协同演进，轨道交通与新能源融合场景与解决方案共可衍生 14 种，分别对应 10 种运行机制与文中 2.2.1~2.2.4 节的四种运行模式，具体详见表 1。

表 1 轨道交通与新能源融合场景和解决方案

Tab.1 The patterns and solutions of rail transportation and renewable energy integration

轨道交通类型	电网类型	闲置资源	设计方案	运行机制	隶属模式
城市轨道交通	强网	适中	光伏+中压配网	配网为主+绿电为辅	2.2.1 节
		较少	储能+中压配网	配网为主+制动能量回收+辅助服务	2.2.3 节
		适中	光伏+储能+中压配网	协同供电+制动能量回收+辅助服务	2.2.3 节
电气化干线铁路	强网	适中	风光+高压电网	电网为主+绿电为辅	2.2.1 节
		富足	风光+高压电网	电网支撑+绿电反送	
		较少	储能+高压电网	制动能量回收+辅助服务	2.2.3 节
非电气化干线铁路	无网	适中/富足	风光+储能+高压电网	协同供电+制动能量回收+辅助服务	
		适中	风光+高压电网	电网为主+风光为辅	2.2.1 节
		较少	储能+高压电网	制动能量回收+网压支撑	2.2.4 节
非电气化干线铁路	无网	适中/富足	风光+储能+高压电网	协同供电+制动能量回收+网压支撑	
		富足	风光+储能+中压配网	配网为辅+绿电为主+独立供电	
		适中	风光+储能+其他新能源+中压配网		2.2.2 节
		富足	风光+储能	独立供电	
		适中	风光+储能+其他新能源		

### 2.2 轨道交通与新能源融合模式

新能源与轨道交通的互动发展一直是人类社会经济过程合理、有效运转和持续进步的基本条件和保障。能源作为轨道交通的基础使能领域，轨道交通作为能源的极大负荷领域，二者关系耦合紧密。

轨道交通与新能源融合模式涌现机制如图 1 所示，以去碳化为导向的轨道交通与新能源融合发展为中心，按照轨道交通与新能源分别占主导地位两个视角审视，伴随轨道交通与新能源二者持续的互动演化，必将涌现出新能源补充的轨道交通系统、新能源

支撑的轨道交通系统、轨道交通特有的新能源系统与轨道交通专属的新能源系统的四种模式，每种模式的系统运行机制和能量流动方向将进行逐一分析<sup>[35-36]</sup>。



图1 轨道交通与新能源融合模式涌现机制

Fig.1 The emerging mechanism for rail transportation and renewable energy integration

2.2.1 新能源补充的轨道交通系统模式

城市轨道交通和电气化干线铁路部分场景现有可利用屋顶与土地面积有限，致使光伏和风电的安装容量小于机车负荷功率，需要依托现有强网将风、光等绿能植入牵引供电系统以补充电能需求。该模式下轨道交通牵引供电系统主要依托电网构建，能量按照“电网为主、风光为辅”机制供给，风光绿电按照自己自足方式全额消纳，具体能量交互路径如图2所示。

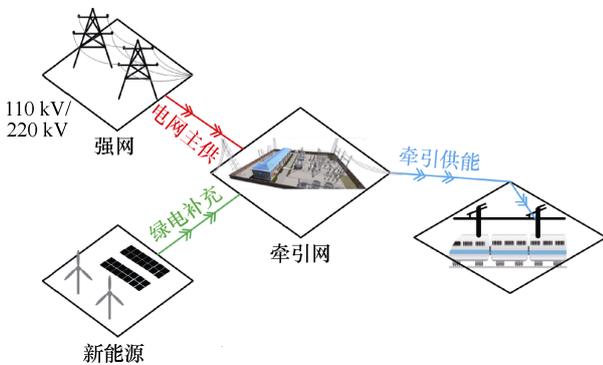


图2 新能源补充模式下能量交互路径

Fig.2 Energy interaction path under renewable energy supplementary mode

2.2.2 新能源支撑的轨道交通系统模式

非电气化干线铁路沿线电网较为薄弱甚至没有，但土地资源和风光水等自然禀赋一般较为富足，具备基于储能新建以新能源为主体的新型牵引供电系统的天然优势。该模式下铁路牵引供电系统基于“新能源+储能”构建，能量按照“新能源为主、配电网为辅、储能为核心”机制交互，“风-光-水-氢-网”各类电源按需灵活组合、提供牵引供电系统运营全部能量，储能通过将各电源能量“分时汇聚、集中释放”方式驱动机车，具体能量交互路径如图3所示。

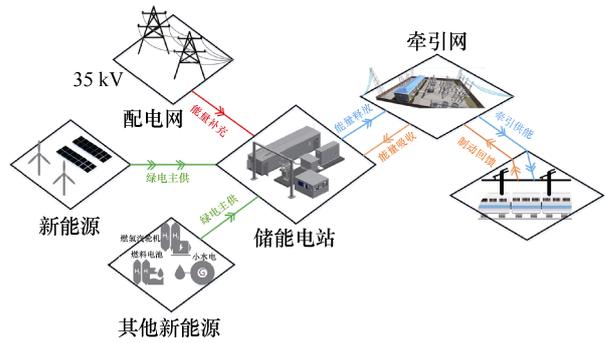


图3 新能源支撑模式下的能量交互路径

Fig.3 Energy interaction path under new energy supported mode

2.2.3 轨道交通特有的新能源系统模式

电气化干线铁路沿线土地资源和自然禀赋富足，基础设施能源化潜力很大，可依托强网在现有牵引供电系统实现风电和光伏的大容量装机，具备向电网进行绿电反送能量的能力，使牵引供电系统相对电网的“源”属性涌现；同时布置在铁路沿线的储能电站可为电网提供辅助服务，使牵引供电系统相对电网的“储”属性涌现。该模式下铁路牵引供电系统基于高压强网构建，能量按照“强网为支撑、新能源为主、储能为辅”机制交互；风光绿电按照“自给自足、余电上网”方式分配；储能按照为电网提供辅助服务和存储机车再生制动能量方式运行，不仅增加了铁路运营收益模式，而且提高系统能量利用效能，具体各组分能量交互路径如图4所示。

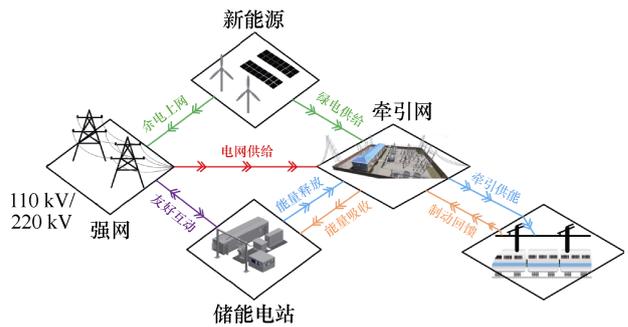


图4 轨道交通特有模式下的能量交互路径

Fig.4 Energy interaction path under rail transportation unique mode

2.2.4 轨道交通专属的新能源系统模式

电气化干线铁路部分场景地处电网末端等弱网区域，面对脉冲式高冲击负荷抵御韧性不足，为提高电网弹性、规避电网失稳风险，可充分利用路域沿线的基础设施和自然禀赋，在现有牵引供电系统中植入风电、光伏与储能等元素。该模式下轨道交通牵引供电系统基于“弱网+储能”构建，能量按

照“源储协同、弱网补充”机制交互，风光绿电进行优先消纳，网储协同进行能量辅助补充，源储配合进行绿电功率平抑，储能联动实现制动能量积蓄，具体能量交互路径如图 5 所示。

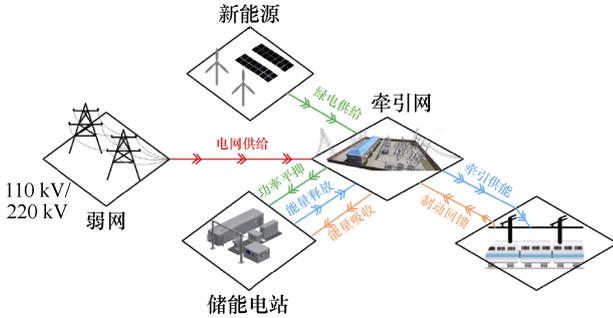


图 5 轨道交通专属模式下的能量交互路径

Fig.5 Energy interaction path under rail transportation exclusive mode

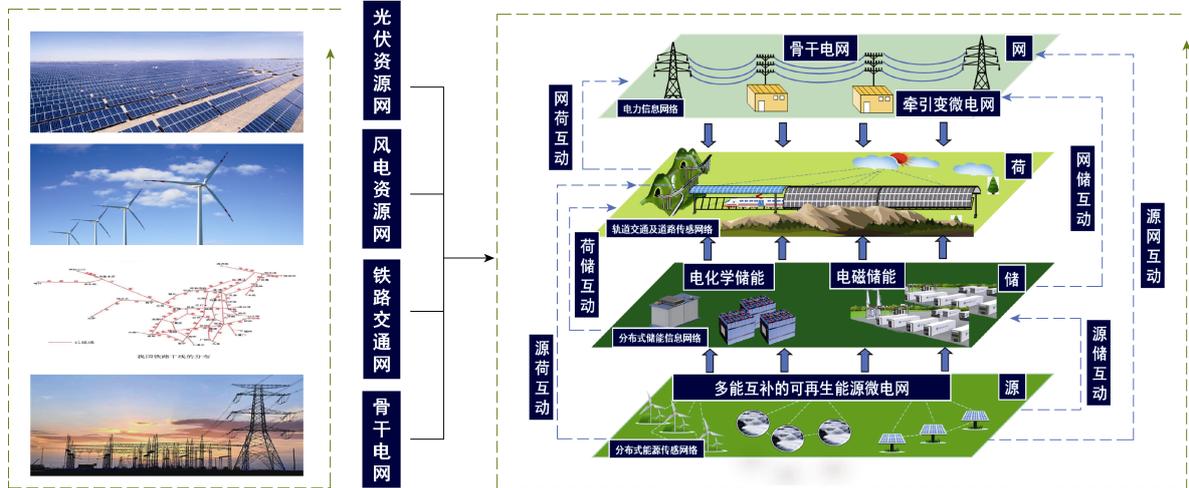


图 6 轨道交通与新能源融合愿景形态

Fig.6 The future scenarios of railway and renewable energy integration

中轨道交通部分典型场景的能源交通融合方案的技术架构展开进行详述分析，其他场景和技术方案不再进行逐一罗列展示。

### 3.1.1 城市轨道交通典型场景技术架构

面对城市轨道交通直流牵引网压波动大、绿电比例低、用电成本高、再生制动能量利用率差等主要问题，本文充分考虑了沿线资源特征，将光伏分散布置于地面车站和检修站闲置屋顶，储能布置在变电站空地或者地下可利用空间，构建了如图 7 所示的适配城轨的能量融通型光储牵引供电系统。其中，光伏产生绿电在机车通过时直接用于机车牵引消纳，牵引网空载时则通过大功率双向变流器为 10 kV/35 kV 母线非牵引负荷补充部分绿电，实现了光伏绿电 100% 的自己消纳；储能主要通过功率的快速吞吐减小直流牵引母线的波动，并实现机车制

### 2.3 轨道交通与新能源融合演进形态

综合轨道交通沿线自然禀赋、地域特征、空间资源等必要因素，按照因地制宜、因网制宜、因荷制宜原则推动可再生能源清洁能源与轨道交通全场景、多模式的深度适配融合。伴随时间的推移，轨道交通必将向智能化、清洁化、高效化、综合一体化的现代交通运输体系逐步演进，呈现出一幅三网合一型“源-网-荷-储”协同调度的轨道交通与新能源融合的理想图景，具体如图 6 所示。

## 3 轨道交通与新能源融合发展的解决方案

### 3.1 典型场景技术架构

鉴于新能源和储能直流汇集涌现出的能量交互高效、控制参量聚焦、运行稳定可靠等诸多优点，本文将主要聚焦交直流混合系统技术模式，将表 1

动的能量吸收与机车牵引的能量反哺，以及电网失电时的应急支撑。而且，相邻牵引网之间可通过直流母线互济互通，通过灵活多变的运行方式与控制模式，实现城市轨道交通整线能量的绿色自洽弹性

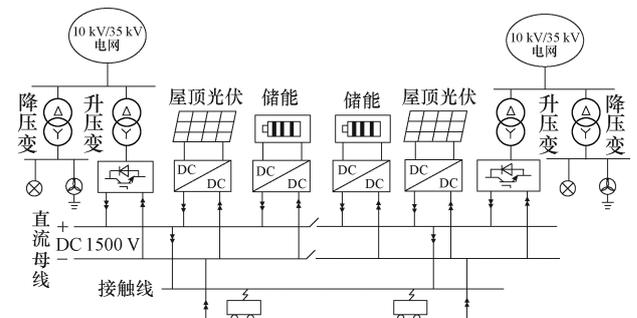


图 7 适配城轨的能量融通型光储牵引供电系统

Fig.7 Energy integrated ring network cluster traction power supply system suitable for urban rail transportation

经济供给。

3.1.2 干线铁路电气化区段典型场景技术架构

1) 强网风光互补绿色能馈场景

面对干线铁路强网线域下间接碳排放量大、用能成本高等主要突出问题，本文将光伏和风电与铁路现有空地资源进行了适配融合，构筑了如图8所示的风光互补绿电能馈式铁路牵引供电系统。其中，风光产生的绿电供给路径有三种，并按照如下工况排序依次进行能量馈入：①通过单相DC-AC牵引变流器补充机车牵引部分绿能；②通过三相DC-AC变流器用于供给10kV贯通线上负荷；③通过AC 27.5kV牵引母线有偿回馈至110kV/220kV高压电网。鉴于此，所构建的风光互补绿电能馈式铁路牵引供电系统不仅可以实现干线铁路绿色低碳经济牵引，同时也益于电网能源结构革新调整，践行双碳目标。

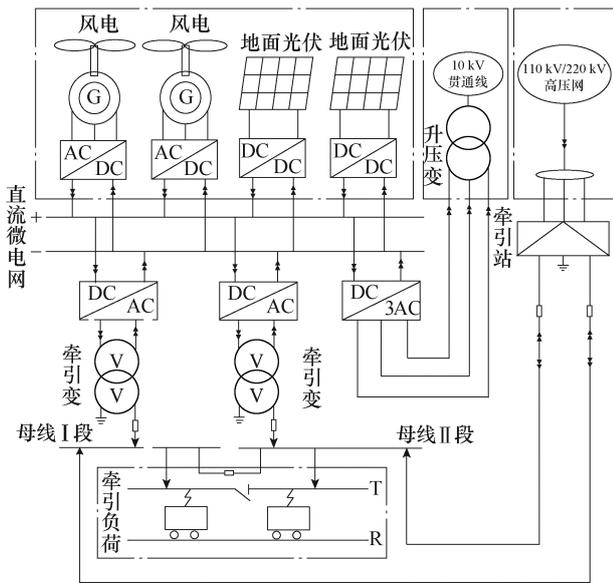


图8 风光互补绿电能馈式铁路牵引供电系统

Fig.8 Wind-solar hybrid green energy-feeding railway traction power supply system

2) 弱网源储协同支撑场景

面对干线铁路弱网线域牵引网压波动大、支撑能力不足、弹性调节裕度较小等主要突出问题，本文构筑了如图9所示“网-源-储”协同支撑的铁路牵引供电系统。根据风光储布置位置和电气接入点的不同，主要包含集中式和分散式两种方案，具体电气架构分别如图9a和图9b所示。其中，集中式协同供电系统风光储等不同组分主要布置在牵引变电站周边空地，电气耦合汇集于同一直流母线，通过多台牵引变流器并联后共同接入AC 25kV牵引

母线，具有能量流聚焦、调控相对简单、现有保护技术适用等优势，但供电冗余度低、系统硬件设备多；分散式协同供电系统风光储等不同组分主要散落在铁路沿线，构成了直流母线耦合互联的多个交流直流混合牵引微电网，并通过交流牵引变流器和牵引变压器就近多点接入接触网，具有能量互济互通、路径灵活多变等特点，但调控相对复杂、保护技术需重构。两种方案各具特色，可根据电气化铁路牵引的具体场景按需灵活遴选。

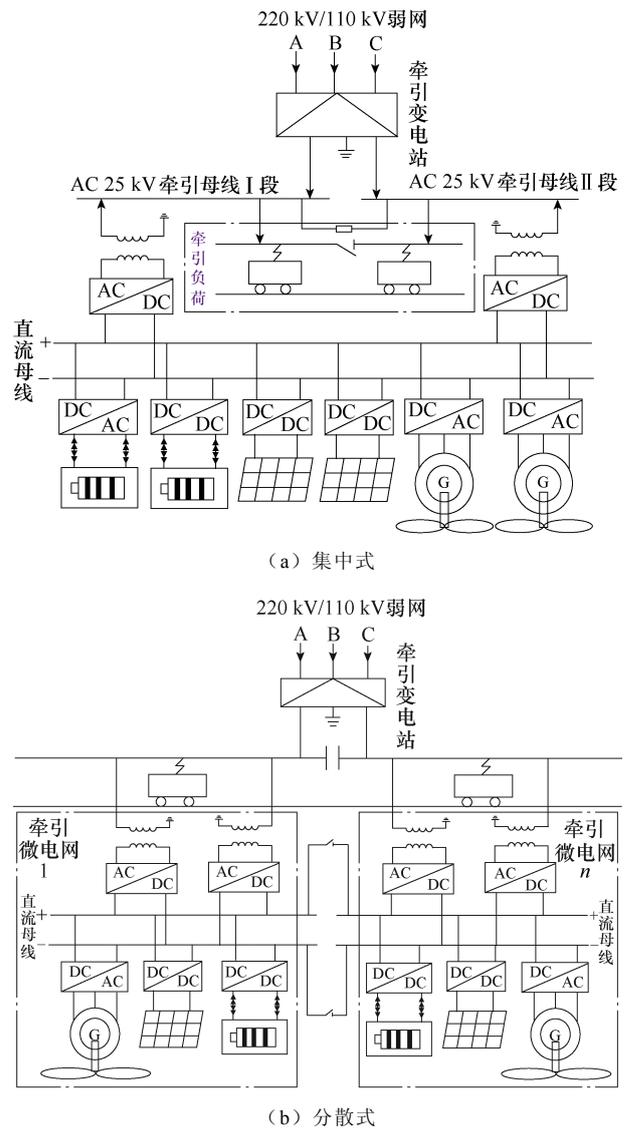


图9 网-源-储协同支撑的铁路牵引供电系统

Fig.9 Railway traction power supply system supported by grid-source-storage coordination

基于光伏、风电等可再生能源的适配植入，使干线铁路涌现出“源”属性，通过绿色能量的自发自用，提高系统能量自洽能力和绿电供给水平，降低高压弱网能量馈入压力；基于集中式储能电站与

牵引变电站的融合或分散式储能模块沿线的布置，使干线铁路涌现出“储”属性，通过功率的快速吞吐协同弱网共同支撑协同牵引供电系统，平抑牵引网压波动，回收机车再生制动能量，驱动冲击性牵引负荷由“不可控”向“可控”过渡转变，按需响应电网调度指令，同时还可为电网提供有偿辅助服务、同电网进行友好互动，充分发挥了牵引储能电站服务电网的复用功能，为新型电力系统的构建提供了有效支撑。

3) 多站协同互济场景

为提高干线铁路弱网线域牵引供电系统的供电弹性，面对干线铁路弱网整线的新能源融合布局，本文构建了如图 10 所示的多牵引站协同互济铁路牵引供电系统。其中，系统牵引站 110 kV/220 kV 高压交流侧采用双边供电方式规避线路故障导致的停运风险，牵引微电网则通过相邻直流侧手拉手式互联方式实现供电的互为备用、能量的互济互通，提高系统供电弹性和抵御风险能力。关于系统内风、光、储、网各组分作用及相互作用机制已在弱网“源-储”协同支撑场景中进行了分析描述，此处不再赘述。

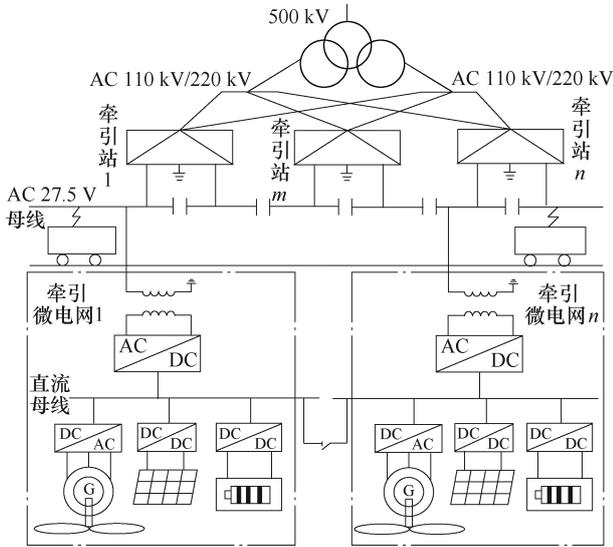


图 10 多牵引站协同互济铁路牵引供电系统

Fig.10 Multi-traction station coordination and mutual aid railway traction power supply system

3.1.3 干线铁路非电化区段典型场景技术架构

1) 无网独立牵引场景

面对干线铁路非电化区段无网区域牵引系统电气化转型升级的迫切需求，紧紧围绕轨道交通能源系统“清洁低碳、安全高效”的发展宗旨，本文充分利用铁路沿线风-光-水-氢等再生清洁的资源禀赋，基于储能能量自由吞吐的技术属性，构建了如图 11 所示的绿色低碳、高效弹性、经济适配的以新

能源为主体的新型供电系统。所构筑的新型牵引供电系统横向多源主动协调互补，纵向“网-源-储-车”多元素深度双向友好互动，已形成 AC 25 kV 牵引供电系统的全线贯通。系统原始能量主要源自可再生能源，电源择取类型广泛多样、互为补充，风电、光伏、燃氢汽轮机、小水电、10 kV/35 kV 电网等可根据干线铁路沿线实际情况按需自由组合，并汇集耦合于直流母线，实现了“源-荷”能量总体供给自洽；储能系统作为电源和牵引/非牵引负荷之间的能量供需枢纽，保障了直流母线电压的稳定，支撑了 AC 25 kV 牵引网的构建。基于能量“分时汇聚、集中释放”的技术属性，实现了列车无网的直接牵引和 10 kV 贯通线非牵引负荷的供电保障。

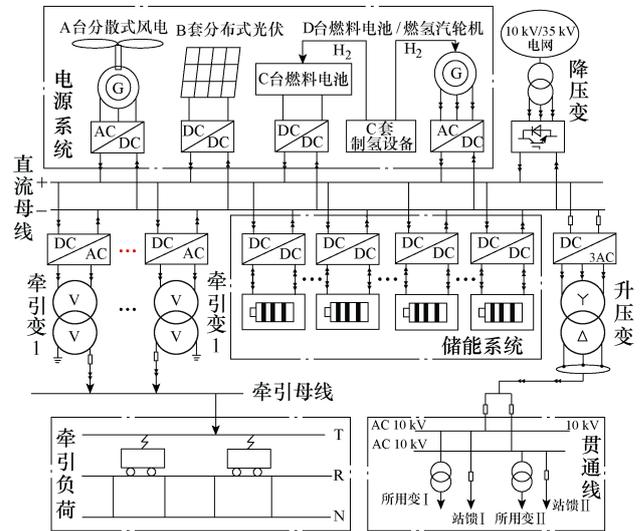


图 11 无网独立式新型牵引供电系统

Fig.11 A new type of independent traction power supply system without grid

2) 新型牵引微电网群协同场景

面向干线铁路非电化区段全线的电气化升级需求，构建了如图 12 所示的新型微电网群协同的铁路牵引供电系统。各牵引微电网电源可根据牵引站附近风-光-水-氢-网等具体资源禀赋实际情况进行灵活组合，并基于储能和牵引变压器进行系统构网。相邻牵引微电网通过直流母线和 AC 27.5 kV 交流牵引母线实现相邻能量路径的连通，并按照“单个牵引微电网自洽供给，相邻牵引微电网相互支撑”原则进行能量交互，实现新型牵引微电网群的协同高弹性运行。关于新型牵引系统内风-光-水-氢-储网各组分作用及相互作用机制已在无网独立牵引场景中进行了分析描述，此处不再赘述<sup>[10]</sup>。

3.2 系统组分优化配置原则

为实现轨道交通与新能源合理科学经济组配，

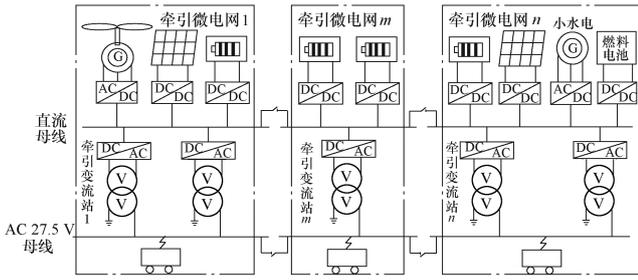


图12 新型牵引微电网群协同的铁路牵引供电系统

Fig.12 Railway traction power supply system based on new traction micro-grid group coordination

解决不同场景下的突出问题及刚性需求, 本文引入风、光、储投资建设单位以投资成本小、售电收入高等为最优目标, 从宏观层面提出了强网、弱网、无网三种场景下的边界条件与组分匹配原则, 以供后续聚焦需求明确的特定场景开展详细研究时提供参考借鉴、启发思路, 具体算法可由决策者根据实际需求进行遴选与改进。

式(1)~式(3)为轨道交通与新能源融合强网场景下组分容量配置模型。该场景下系统成本主要由设备一次投资、系统运维费用、储能向电网购电等构成, 系统盈利通过向铁路和电网售电、碳汇交易、电网辅助服务等实现。在满足约束条件的前提下, 根据变元函数在保障经济收入最优时求取出风光储的适配容量。

约束条件

$$\begin{cases} 0 \leq P_{pvn} \leq P_{pvmax} \\ 0 \leq P_{windn} \leq P_{windmax} \\ 0 \leq P_{esn} \leq P_{esmax} \\ 0 \leq E_{es} \leq E_{esmax} \\ 0 \leq t \\ 0 \leq T_a \end{cases} \quad (1)$$

优化函数

$$\begin{cases} f_{sr} = s_{sr} (P_{esn} t_{sres} + P_{windn} t_{srwind} + P_{pvn} t_{srpv}) \\ f_{sg} = s_{sg} (P_{windn} t_{sgwind} + P_{pvn} t_{sgpv}) \\ f_c = c_c (P_{windn} t_{cwind} + P_{pv} t_{cpv}) \\ f_a = a_{es} P_{esn} T_a \\ f_b = s_{esb} P_{esn} t_{bes} \\ f_i = i_{es} E_{es} + i_{wind} P_{windn} + i_{pv} P_{pvn} \\ f_m = m_{st} E_{es} + m_{wind} P_{windn} + m_{pv} P_{pvn} \\ f_{max} = f_{sr} + f_{sg} + f_c + f_a - f_i - f_m - f_b \end{cases} \quad (2)$$

均衡策略

$$\{E_{es}, P_{esn}, P_{windn}, P_{pvn}\} = \text{Argmax} f_{max} \quad (3)$$

式中,  $P_{windn}$ 、 $P_{pvn}$ 、 $E_{es}$  分别为风、光、储优化配置容量;  $P_{windmax}$ 、 $P_{pvmax}$ 、 $E_{esmax}$  为考虑场地面积等条件下的容量配置上限;  $P_{esn}$ 、 $P_{esmax}$  分别为储能充电的额定功率与最大值;  $t$  为风光储设备不同工况下的等效时间;  $T_a$  为储能为电网提供调频辅助服务次数;  $s_{sr}$ 、 $t_{srwind}$ 、 $t_{srpv}$ 、 $t_{sres}$  分别为风、光、储向铁路度电售电价格和等效时间;  $s_{sg}$ 、 $t_{sgwind}$ 、 $t_{sgpv}$  分别为风、光向电网度电售电价格和等效时间;  $c_c$ 、 $t_{cwind}$ 、 $t_{cpv}$  分别为风、光度电碳汇收益与等效时间;  $a_{es}$  为储能每次提供调频等辅助服务时单位容量收益;  $s_{esb}$  和  $t_{bes}$  分别为储能向电网度电购电价格和等效时间;  $i_{wind}$ 、 $i_{pv}$ 、 $i_{es}$  为风、光、储单位容量投资成本;  $m_{wind}$ 、 $m_{pv}$ 、 $m_{es}$  为风、光、储单位容量运维成本;  $f_{sr}$ 、 $f_{sg}$ 、 $f_c$ 、 $f_a$ 、 $f_b$ 、 $f_i$ 、 $f_m$ 、 $f_{max}$  分别为向铁路和电网售电收益、碳汇收益、辅助服务收益、购电支出、一次性投资成本、系统运维成本、系统最大收益;  $\text{Argmax}$  为最大变元函数, 用于求取风光储最优配置。

式(4)、式(5)为轨道交通与新能源融合弱网场景下组分容量配置模型。由式(4)、式(5)可知, 机车牵引功率由电网和储能协同分配、共同支撑牵引母线, 机车日均部分能量由风光日发电量供给、降低对弱网依赖, 在满足约束条件的前提下, 根据变元函数在保障经济收入最优时求得风光储的适配容量。

约束条件

$$\begin{cases} P_{grid\_max} + K_{esp} P_{esn} = P_{tr} \\ K_{es1} (P_{pvn} T_{pv} + P_{windn} T_{wind}) = K_{es2} E_{es} = E_{tr} - P_{grid\_max} T_{tr} \\ 0 \leq P_{pvn} \leq P_{pvmax} \\ 0 \leq P_{windn} \leq P_{windmax} \\ 0 \leq t \\ 0 \leq T_a \\ 0 \leq P_{esn} \leq P_{esmax} \end{cases} \quad (4)$$

优化函数

$$\begin{cases} f_{sr} = s_{sr} (P_{esn} t_{sres} + P_{windn} t_{srwind} + P_{pvn} t_{srpv}) \\ f_c = c_c (P_{windn} t_{cwind} + P_{pv} t_{cpv}) \\ f_a = a_{es} P_{esn} T_a \\ f_b = s_{esb} P_{esn} t_{bes} \\ f_i = i_{es} E_{es} + i_{wind} P_{windn} + i_{pv} P_{pvn} \\ f_m = m_{st} E_{es} + m_{wind} P_{windn} + m_{pv} P_{pvn} \\ f_{max} = f_{sr} + f_c + f_a - f_i - f_m - f_b \end{cases} \quad (5)$$

均衡策略同式 (3)。

式中,  $P_{\text{grid\_max}}$  为考虑牵引网压约束的弱网可提供的最大功率;  $K_{\text{esp}}$ 、 $K_{\text{es1}}$ 、 $K_{\text{es2}}$  均为小于 1 的无量纲修正系数;  $T_{\text{wind}}$ 、 $T_{\text{pv}}$  分别为风、光日均等效发电时间;  $T_{\text{tr}}$  为机车牵引日等效时间;  $U_{\text{tr}}$ 、 $U_{\text{trmin}}$ 、 $U_{\text{trmax}}$  分别为牵引网压及其上、下限值;  $E_{\text{tr}}$  为机车牵引日需能量。

式 (6)、式 (7) 为轨道交通与新能源融合无网场景下组分容量配置模型。由式 (6)、式 (7) 可知, 机车牵引功率由储能和出力可控的电压源协同保障, 日牵引所需能量则由风光等各类型电源共同供给, 储能系统额定功率按照大于机车额定牵引功率配置, 容量则按照大于机车日牵引能量设计, 在满足约束条件的前提下, 根据变元函数在保障经济收入最优时求取出风光储的适配容量。

约束条件

$$\begin{cases} K_{\text{ps}} P_{\text{es\_n}} = P_{\text{tr}} \\ K_{\text{es1}} (P_{\text{pvn}} T_{\text{pv}} + P_{\text{windn}} T_{\text{wind}}) = K_{\text{es2}} E_{\text{es}} = E_{\text{tr}} \\ 0 \leq P_{\text{pvn}} \leq P_{\text{pvmax}} \\ 0 \leq P_{\text{windn}} \leq P_{\text{windmax}} \\ 0 \leq t \end{cases} \quad (6)$$

优化函数

$$\begin{cases} f_{\text{sr}} = S_{\text{sr}} E_{\text{tr}} \\ f_{\text{c}} = c_{\text{c}} (P_{\text{windn}} t_{\text{cwind}} + P_{\text{pvn}} t_{\text{cpv}}) \\ f_{\text{i}} = i_{\text{es}} E_{\text{es}} + i_{\text{wind}} P_{\text{windn}} + i_{\text{pv}} P_{\text{pvn}} \\ f_{\text{m}} = m_{\text{st}} E_{\text{es}} + m_{\text{wind}} P_{\text{windn}} + m_{\text{pv}} P_{\text{pvn}} \\ f_{\text{max}} = f_{\text{sr}} + f_{\text{c}} - f_{\text{i}} - f_{\text{m}} \end{cases} \quad (7)$$

均衡策略同式 (3)。

### 3.3 系统协同运行控制方法

基于风光储构建的铁路牵引供电系统是轨道交通与新能源融合具有代表型的典型场景, 本文将以此为阐明强网、弱网、无网三种不同场景下系统内各组分协同控制核心理念与设计思路, 其他场景据此按照控制目标进行调整。轨道交通与新能源融合典型场景的系统协同控制方法如图 13 所示。由图 13 可知, 系统风电、光伏、储能、牵引变流四部分设备层控制是以上层管控目标为导向, 通过设备层的协调配合响应上层下达指令。

风电和光伏 DC-DC 变流器在不同场景下始终以最大功率跟踪控制模式运行, 以为系统注入更多绿电。储能能在强网场景下运行恒功率控制模式, 在

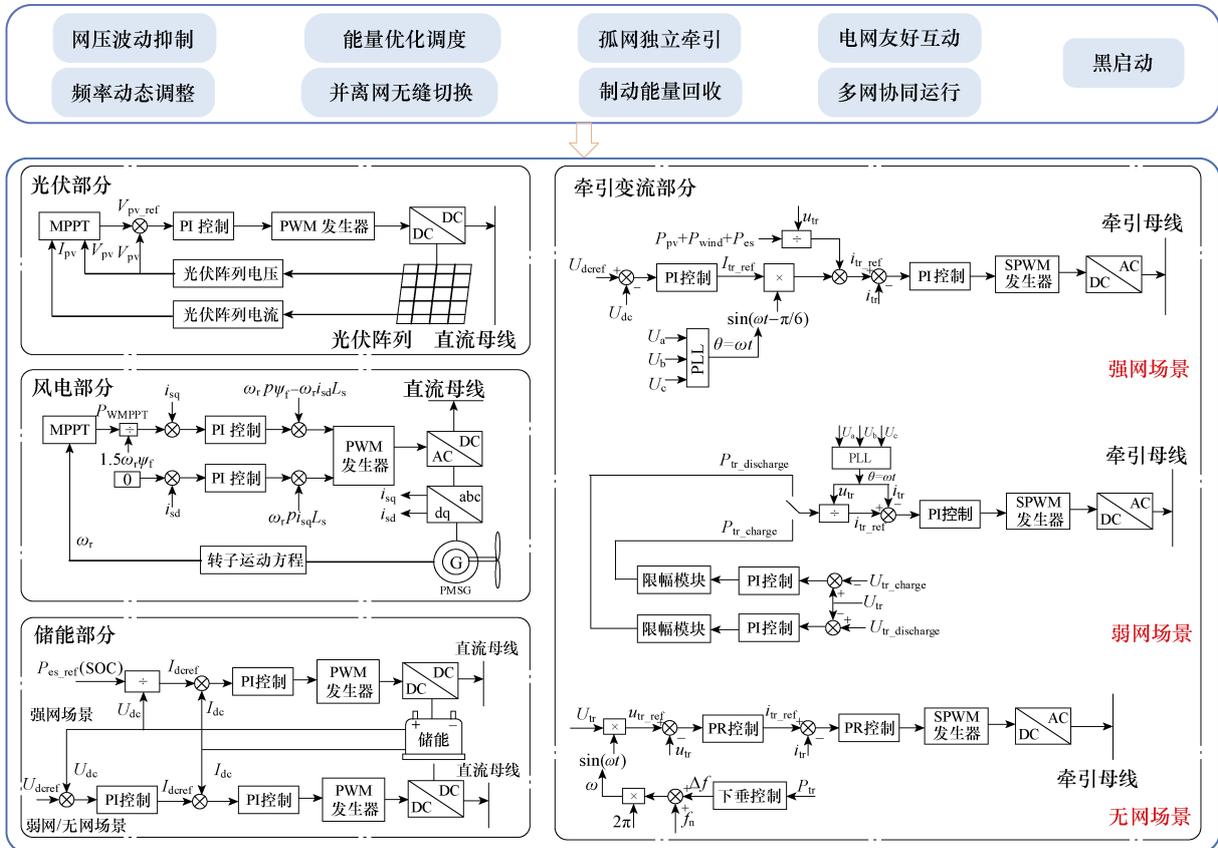


图 13 轨道交通与新能源融合典型场景的系统协同控制方法

Fig.13 System coordination control method for typical scenarios of rail transportation and renewable energy integration

计及荷电状态 (State of Charge, SOC) 约束前提下通过功率充放满足系统需求; 在弱网/无网场景下转换为恒压控制模式, 保障直流母线电压实时稳定。牵引变流器在强网场场景下运行在恒压控制模式, 保障直流母线电压实时稳定, 实现牵引变流器输入和输出两侧能量的对等透传; 在弱网场景下转换为网压阈值控制模式, 实现牵引网压波动抑制, 保证牵引网压运行在正常范围之内; 在无网场景下则转换为下垂控制模式, 使端口具备电压源输出特性, 建立牵引网电压和频率, 实现机车独立牵引。

图 13 中,  $P_{pv}$ 、 $V_{pv\_ref}$ 、 $V_{pv}$ 、 $I_{pv}$  分别为光伏输出功率、端口参考电压、实际电压和电流;  $P_{wind}$ 、 $P_{WMPPT}$ 、 $\omega_r$ 、 $\psi_f$ 、 $L_s$ 、 $p$ 、 $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$  分别为风电机组的输出功率、最优参考功率、机械角速度、主磁链、线路电感、磁极对数、d、q 轴电流;  $U_{dc}$  和  $U_{dref}$  分别为直流母线实际电压和参考电压;  $P_{es\_ref}$  (SOC)、

$P_{es}$ 、 $I_{dref}$ 、 $I_{dc}$  分别为储能计及 SOC 的参考充放电功率、实际充放电功率、电流参考值与实际值;  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$  分别为 110 kV/220 kV 三相电网电压;  $\theta$  和  $\omega$  分别为牵引供电系统角度和电气角速度;  $I_{tr\_ref}$ 、 $i_{re\_ref}$ 、 $i_{re}$  和  $u_{tr}$  分别为牵引母线电流峰值、实时参考值、实际值与电压实际值;  $U_{tr}$ 、 $P_{tr\_charge}$ 、 $P_{tr\_discharge}$  和  $U_{tr\_charge}$ 、 $U_{tr\_discharge}$  分别为牵引母线电压幅值、牵引变流器输入输出功率与电压关联触发参考幅值;  $f_n$  和  $\Delta f$  分别为牵引网额定频率与波动量。

### 3.4 系统能量调度管控策略

能量调度管控是轨道交通与新能源融合系统运行的“大脑”, 是系统功率能量不同时间尺度下平衡的调控中心。本文以风光储与现有牵引供电系统融合的典型场景为例, 着重探讨控制策略的核心思想与设计思路, 旨在为后续深入研究其他场景提供必要参考借鉴。图 14 所示的能量管控策略阐明了系统

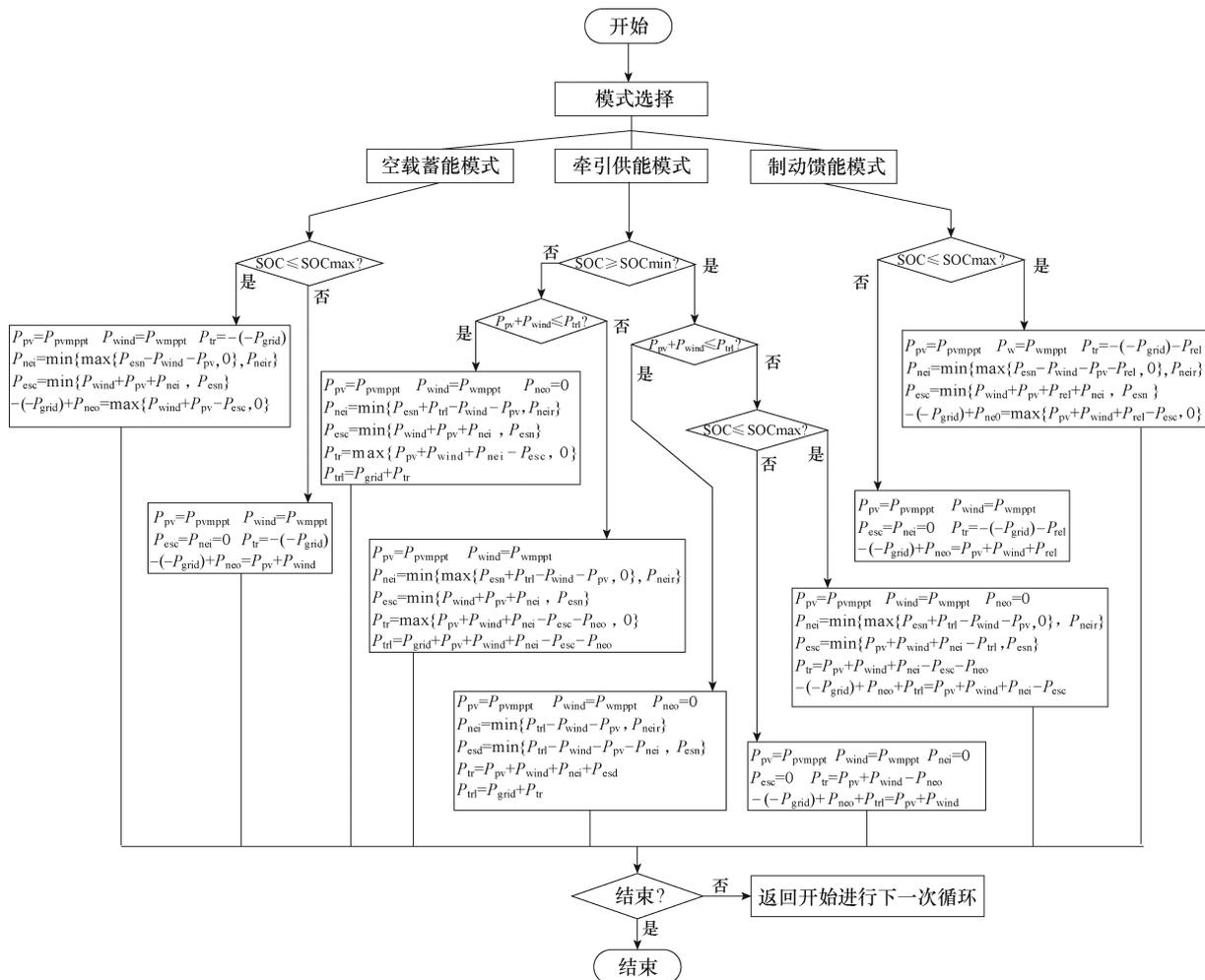


图 14 轨道交通与新能源融合典型场景的系统能量管控策略

Fig. 14 System energy management and control strategies for typical scenarios of rail transportation and renewable energy integration

不同模式下的不同工况系统内风光储网之间的关系以及系统外部同相邻牵引微电网的能量交互情况，主要包含空载蓄能、牵引供能、制动馈能三种模式。

图 14 中， $P_{tr}$  为牵引变流器输出功率， $P_{tr} < 0$  代表制动能量馈入； $P_{grid}$  为 110 kV/220 kV 高压电网输出功率； $P_{neo}$  为系统可向临近微电网提供功率， $P_{nei}$  为系统需要临近微电网提供功率， $P_{neo} > 0$ ，则  $P_{nei} = 0$ ，反之，亦然； $-P_{grid}$  为代表向高压电网返送功率； $P_{neir}$  为临近微电网可提供实际功率； $P_{rel}$  为机车再生制动功率； $P_{trl}$  为机车牵引功率； $P_{esc}$  为储能单元实时充电功率； $P_{esd}$  为储能单元实时放电功率； $P_{esn}$  为储能额定充放电功率； $P_{pvmppt}$  为光伏实时最大功率； $SOC_{max}$  为储能荷电状态上限； $SOC_{min}$  为储能荷电状态下限； $SOC$  为储能实时荷电状态。

当系统处于空载蓄能模式时，储能以不超过额定功率积蓄风光绿能或相邻微电网注入能量直至达到设定上限，调控过程中剩余的风光绿能则通过返送电网或者邻近牵引微电网途径消纳。

当系统处于制动馈能模式时，如储能荷电状态未达到设定上限则以不超过额定功率积蓄风光绿能、机车制动馈能或相邻微电网注入能量，剩余能量返送电网或者供给邻近牵引微电网；如储能荷电状态达到设定上限。风光绿电、机车制动馈能则直

接返送电网或者供给邻近牵引微电网。

当系统处于牵引供能模式时，如储能大于荷电状态下限且风光能量较少，风电、光伏、储能、电网或相邻牵引微电网协同配合，满足机车牵引实时功率需求；如储能处于荷电状态上下限之间且风光能量较大，风光绿电按照机车牵引、储能充电、电网返送或邻近牵引微电网供给顺序进行消纳；如储能处于荷电状态达到上限且风光能量较大，风光绿电主要供给机车以及进行电网返送和邻近牵引微电网供给；如储能达到荷电状态下限且风光绿电较小时，风光绿电或相邻牵引微电网有限为储能充电，剩余能量用于机车牵引补给，电网则用于机车牵引主要支撑；如储能达到荷电状态下限且风光绿电较大时，风光绿电在注入储能后，协同电网满足机车牵引，仍有剩余能量则返送电网或供给相邻牵引微电网。

### 3.5 系统分层式管控架构设计

轨道交通能源系统具有组分多元、设备多样、系统交错、模式多变、工况复杂等特点，为保障系统通信信息的有序传递、变流器动作的协调统一、调控指令的快速精准响应，本文构建了一种逻辑层次完备清晰的分层式纵向管控架构如图 15 所示。由图 15 可知，设备管控、协调管控、能量管控、微电

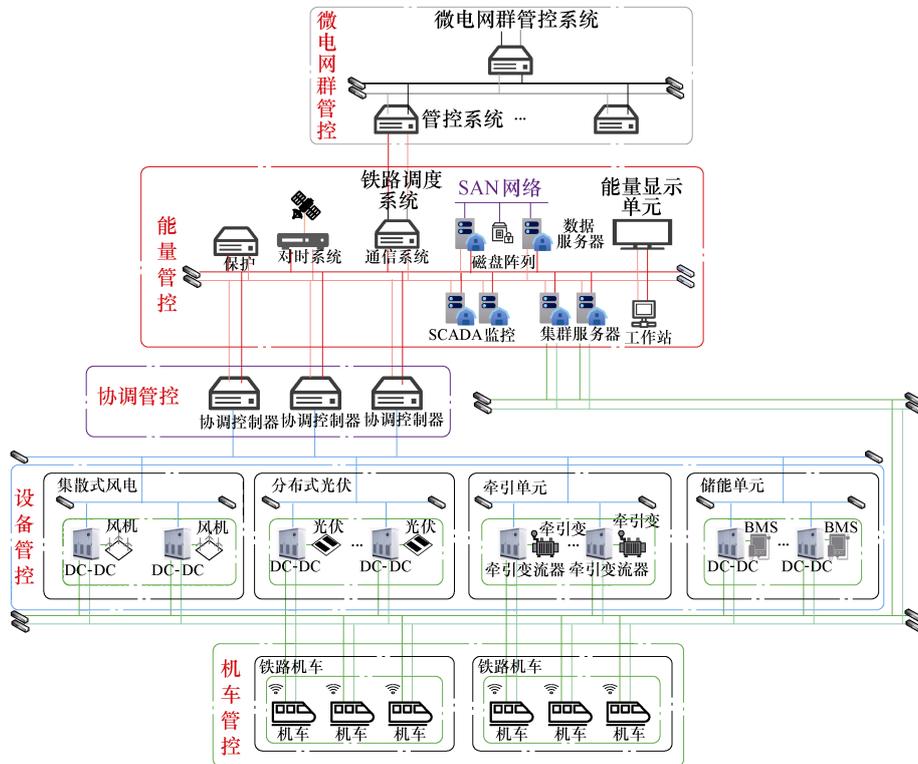


图 15 轨道交通与新能源融合系统分层式管控架构

Fig.15 Layered management and control architecture of rail transportation and renewable energy integration system

网群管控按照自下向上方式进行贯通,信息数据逐层传递反馈、指令逐层管控交互。其中,微电网群管控主要负责多个牵引微电网之间的能量均衡调配,系统能量管控主要负责风光储网等不同组分间的多时间尺度能量平衡,协调管控主要负责保障不同类别变流器的协同配合与同一类别的多个变流器动作的一致统一,设备管控主要负责风光储按照指令精准有效的响应。

## 4 轨道交通能源融合发展的使/赋能技术

轨道交通与新能源融合一体化发展尚处于萌芽阶段,亟需新一代信息通信技术、电力变换与控制技术、新能源牵引网群控制技术、先进储能技术、广域保护与自愈技术、能量自洽调度技术等使/赋能技术的支撑,使适配轨道交通能源融合系统的新技术、新模式、新设备等得以涌现,规划配置、系统效能、运行弹性、能量调度、保护控制等技术性能得以优化提升,为构建一套轨道交通与新能源融合发展驱动下的完整闭环技术理论体系提供保障。

### 4.1 新一代信息通信技术

轨道交通与新能源融合发展需要充分借助新一代信息通信技术。基于物联网、大数据、云计算、人工智能、预诊断等新一代数字信息处理技术,贯通数据采集、传输、存储与分析环节,保障轨道交通能源融合系统的全要素和全运行过程的可监、可测、可视、可控,实现实时感知设备级、区域级、系统级信息,提前预警设备和系统不安全运行状态,并主动进行动态适配调整,为系统功率安全稳定运行、能量自洽调度、保护控制、应急响应等进行赋能。

### 4.2 电力变换与控制技术

轨道交通与新能源融合系统的构建得益于电力变换与控制技术。面向城市轨道交通、干线铁路电化区段和非电化区段提出的不同场景下的适配方案,电力电子化特征显著,风电、光伏、燃氢汽轮机、小水电、10 kV/35 kV 电网、储能等全部基于电力变换设备互联耦合,横向多源协同互补、纵向“网-源-储-车”深度互动的功能亦是依托设备控制技术实现,使轨道交通牵引系统涌现出并网协同运行、独立无网运行、应急支撑、辅助服务、电能质量改善、一/二次调频调压等多种运行模式,并可根据需要主动柔性灵活适配调整,具有较强的自组织、自适应与自趋优能力,提升了系统运行弹性和效能。

### 4.3 新能源微电网群控技术

伴随基于风、光、储、水、氢等元素组构的牵

引新能源网在轨道交通沿线因地制宜、因荷制宜、因网制宜的逐步集聚,必将牵引轨道交通能源系统向绿色、弹性、自洽方向逐步演进。面向轨道交通构建的广域新能源牵引网群具有时间和空间双重属性,电气上互联互通、能量上互济互动、供电上互保互备,基于全局动态调整优化和本地独立自治的有效结合,实现了新能源牵引网集群的高效协同运行,提升了轨道交通与新能源融合系统运行方式的灵活性、能量供给的可靠性以及扰动抵御的坚韧性。

### 4.4 先进储能技术

储能是支撑轨道交通与新能源融合发展的关键核心要素,具有能量转化、搬移、存储、释放等内核技术属性,是新型轨道交通牵引供电系统关键使能技术,系统源荷能量互动关键媒介。轨道交通能源融合系统中风光等绿色再生能源的出力具有一定随机性、间歇性与波动性,列车牵引负荷的功率具有一定冲击性、波动性与不确定性。面对源荷随机强波动的系统特征,具有大容量、大倍率、高安全、强惯性技术属性的先进储能系统利用快速吞吐功率的能力,可实现系统能量的供给自洽和功率的实时平衡,保证交通能源融合系统运行的稳定性,提升系统能效与运行弹性。

### 4.5 广域保护与自愈技术

轨道交通与新能源融合系统具有布局分散、广域互联、能流时空耦合等特征,设备特性、故障类型、产生机理等与轨道交通现有供电系统差异较大,需考虑采用广域保护与自愈技术进行赋能。广域保护技术构建于不同工况下故障扰动在系统内传播特性的分析与不同时间尺度下故障暂态演化过程的研究的基础之上,是一套涵盖设备、区域、系统多层级的逻辑架构完整清晰的安全广域保护体系,继电保护方案和整定计算根据  $N-1$  供电安全准则提出,通过多层级的协同配合可实现扰动抵御与故障的快速识别、隔离与自愈,提升了轨道交通与新能源融合系统运行的弹性与设备的安全性。

### 4.6 能量自洽调度技术

轨道交通与新能源融合系统具有气象型驱动属性,系统能量几乎全部来自风光等新能源,电能供给受天气影响很大。为实现含高比例新能源的轨道交通能源系统能量供需平衡,考虑采用能量自洽调度技术进行赋能。能量自洽调度技术以日前和日内不同时间尺度下的新能源发电功率预测结果和行车时刻表为依据,提前下发新能源牵引网内部和新能源牵引网群之间的日前调度计划,并根据日内源荷

的动态变换进行灵活适配调整与滚动优化，保证轨道交通与新能源系统能量供给平衡自洽，支撑系统安全可靠连续稳定运行。

### 5 结论

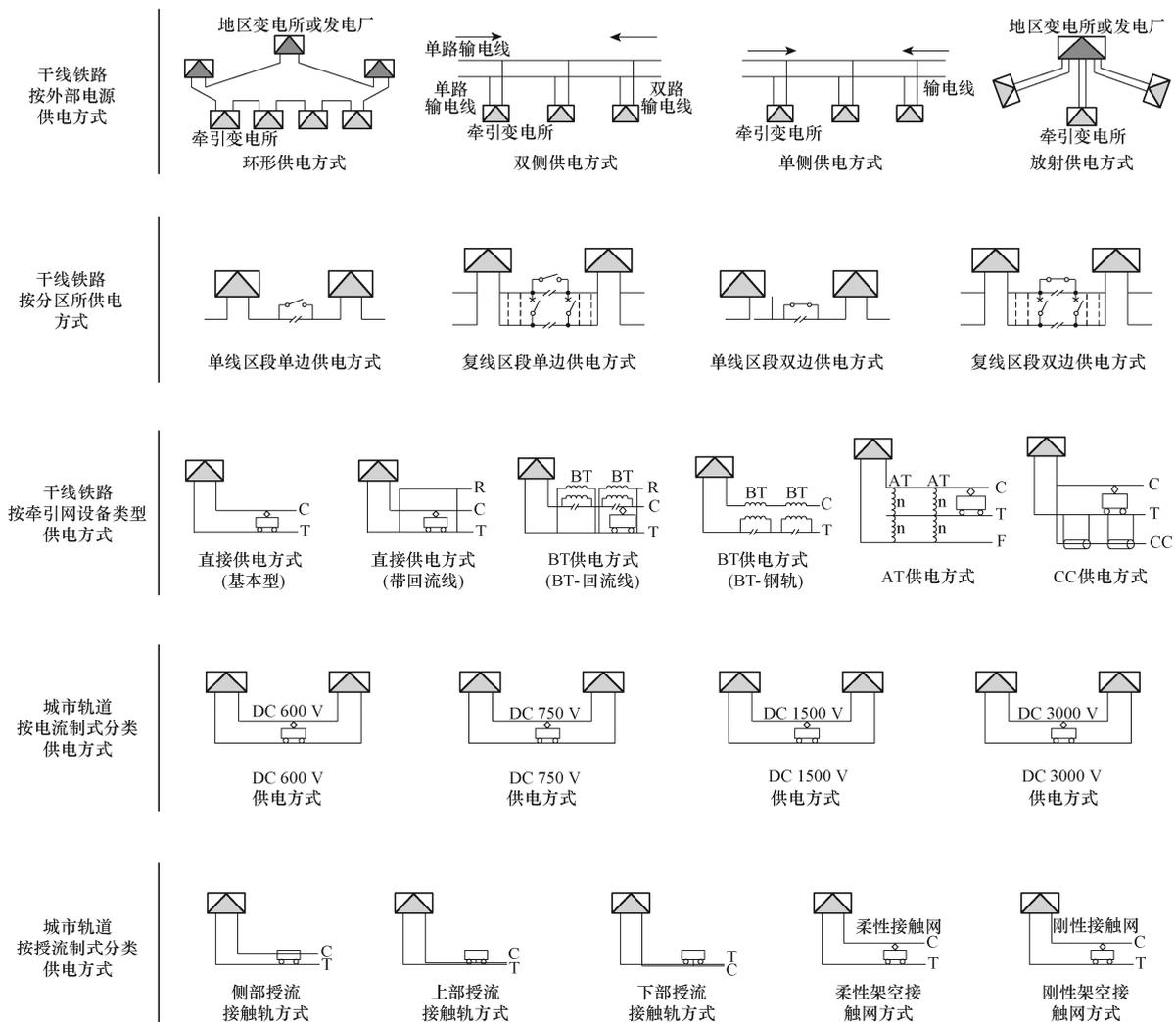
轨道交通与新能源绿色、弹性、自洽、可持续一体化发展，是去碳化导向下变革交通能源结构、保障能源安全和支撑国家“双碳”战略的必由之路。作为社会经济体系重要的基础产业和具有集大成者特征的科技领域及产业领域，二者高度融合与协同创新势必会促进学科交叉与技术融通，产生新理论、新形态、新模式、新技术、新装备与新产业，不仅可以促进新能源产业健康有序发展、利于国家能源重构愿景，同时对于轨道交通技术体制革新、构建以新能源为主体的新型供电系统亦大有裨益。而且，

还将促进两大领域相关部门的资源共通与协同合作，利于资源复用共享、统筹规划布局与决策流程优化，有效释放资源内在价值，实现轨道交通和新能源两大行当的相互赋能。

由此可鉴，轨道交通与新能源的融合发展科学价值、社会效益、经济效益与生态效益显著，是支撑经济社会可持续发展切实可行、符合国情并具有普适意义的科学路径，势必会对人类社会经济发展新模式和新文明的持续形成发挥不可替代的作用，战略意义深远。

### 附 录

轨道交通牵引供电方式如附图 1 所示。国内外轨道交通牵引供电方式见附表 1。轨道交通可再生能源应用的典型案例见附表 2。



附图 1 轨道交通牵引供电方式

App.Fig.1 Traction power supply methods for rail transportation

附表1 国内外轨道交通牵引供电方式

App.Tab.1 Domestic and international traction power supply methods for rail transportation

铁路供电制式	直接供电	BT-回流线	BT-钢轨	AT 供电	CC 供电
率先应用	法国 英国 前苏联	英国 法国 瑞典	挪威	日本 美国 前苏联 中国	日本
铁路供电制式	DC 3 000 V	AC 15 kV 16.7 Hz	AC 25 kV 50 Hz	AC 25 kV 60 Hz	
率先应用	意大利	德国	中国 欧洲	美国	
城市轨道交通供电制式	DC 600 V	DC 750 V	DC 1 500 V	DC 3 000 V	
率先应用	广州地铁 APM 线	北京	上海 深圳 广州	前苏联	

附表2 轨道交通可再生能源应用的典型案例

App.Tab.2 Typical cases of renewable energy applied in rail transportation

区域	轨道交通类型		投运年限	基础设施	能源类型			保障负荷	
	城轨	铁路			光伏	风电	储能	牵引	非牵引
日本	√		1993	屋顶	√		√		√
澳大利亚	√		2017	屋顶	√		√		√
德国	√		2015	沿线	√	√		√	
西班牙	√		2020	沿线	√				√
荷兰	√		2017	沿线		√		√	
印度	√		2020	沿线	√			√	
北京	√		2008	屋面	√				√
上海虹桥	√	√	2010	屋面	√				√
山东济南	√		2020	屋面	√				√
浙江杭州	√		2017	屋面	√				√
江苏南京	√		2013	屋面	√				√
深圳	√		2019	屋面	√				√

参考文献

[1] 何晨可, 朱继忠, 刘云, 等. 计及碳减排的电动汽车充换储一体站与主动配电网协调规划[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 92-111.  
He Chenke, Zhu Jizhong, Liu Yun, et al. Coordinated planning of electric vehicle charging-swapping-storage integrated station and active distribution network considering carbon reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 92-111.

[2] 潘超, 范宫博, 王锦鹏, 等. 灵活性资源参与的电热综合能源系统低碳优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1633-1647.  
Pan Chao, Fan Gongbo, Wang Jinpeng, et al. Low-carbon optimization of electric and heating integrated energy system with flexible resource participation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1633-1647.

[3] 程鹏, 刘文泉, 陈冲, 等. 面向电气化铁路牵引供电的光伏发电分相电流控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 145-153.  
Cheng Peng, Liu Wenquan, Chen Chong, et al. Individual phase current control strategy of photovoltaic power generation for traction power supply of electrified railway[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 145-153.

[4] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国交通的可持续发展[R/OL].(2020-12-22)[2021-12-15]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1695297/1695297.htm>.

[5] 张福生. 牵引供电系统[M]. 北京: 北京交通大学出版社, 2013.

[6] 梁立中, 陈冲. 一种具有储能辅助服务功能的电铁供电系统及控制方法: 中国, 109038630A[P]. 2018-12-18.

[7] 梁立中, 陈冲. 基于电池储能多能互补的孤网电铁供电系统及供电方法: 中国, 109687503A[P]. 2019-04-26.

[8] 陈冲, 贾利民, 金成日, 等. 基于多源接入结构的电气化铁路牵引供电系统及方法: 中国, 110994690A[P]. 2020-04-10.

[9] 陈冲, 贾利民, 金成日, 等. 一种电气化铁路牵引供电系统及方法: 中国, 111137180A[P]. 2020-05-12.

[10] 陈冲, 贾利民, 金成日, 等. 基于混合储能的电气化铁路牵引供电系统及方法: 中国, 111016742A[P]. 2020-04-17.

[11] Holtz J, Keli H J. The propagation of harmonic currents generated by inverter-fed locomotives in the distributed overhead supply system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1989, 4(2): 168-174.

[12] Zynovchenko A, Xie Jian, Jank S, et al. Resonance phenomena and propagation of frequency converter harmonics the catenary of railways with single-phase A.C[C]//European Conference on Power Electronics

- and Applications, Dresden, 2006: 1-10.
- [13] He Zhengyou, Hu Haitao, Zhang Yangfan, et al. Harmonic resonance assessment to traction power-supply system considering train model in China high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1735-1743.
- [14] Hu Haitao, He Zhengyou, Li Xin, et al. Power-quality impact assessment for high-speed railway associated with high-speed trains using train timetable—part I: methodology and modeling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 693-703.
- [15] 宋可荐, 吴命利, 杨少兵, 等. 我国电气化铁路高次谐波谐振问题研究综述[J]. 铁道学报, 2021, 43(1): 64-76.
- Song Kejian, Wu Mingli, Yang Shaobing, et al. Review of high-order harmonic resonances of electric railways in China[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(1): 64-76.
- [16] 赵亚杰, 夏欢, 王俊兴, 等. 基于动态阈值调节的城轨交通超级电容储能系统控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 427-433.
- Zhao Yajie, Xia Huan, Wang Junxing, et al. Control strategy of ultracapacitor storage system in urban mass transit system based on dynamic voltage threshold[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 427-433.
- [17] 胡海涛, 陈俊宇, 葛银波, 等. 高速铁路再生制动能量储存与利用技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 246-256, 391.
- Hu Haitao, Chen Junyu, Ge Yinbo, et al. Research on regenerative braking energy storage and utilization technology for high-speed railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 246-256, 391.
- [18] 许爱国, 谢少军, 姚远, 等. 基于超级电容的城市轨道交通车辆再生制动能量吸收系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 117-123.
- Xu Aiguo, Xie Shaojun, Yao Yuan, et al. Regenerating energy storage system based on ultra-capacitor for urban railway vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 117-123.
- [19] 董志杰, 杨振龙, 林晨, 等. 电气化铁路再生电能利用研究[J]. 电气化铁道, 2021, 32(2): 6-8.
- Dong Zhijie, Yang Zhenlong, Lin Chen, et al. Studies on regenerative energy utilization for electrified railway[J]. Electric Railway, 2021, 32(2): 6-8.
- [20] Danielsen S, Toftevaag T, Fosso O B. Application of linear analysis in traction power system stability studies[C]//Proceedings of Eleventh International Conference on Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transportation Systems, Italy, 2008: 401-410.
- [21] Pika S, Danielsen S. Understanding of the stability criterion for a double-feedback loop system[C]//Proceedings of Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, Bologna, Italy, 2010: 1-5.
- [22] Danielsen S. Electric traction power system stability: low-frequency interaction between advanced rail vehicles and a rotary frequency converter[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2010.
- [23] Wang Hui, Wu Mingli, Sun Juanjuan. Analysis of low-frequency oscillation in electric railways based on small-signal modeling of vehicle-grid system in dq frame[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(9): 5318-5330.
- [24] 周毅, 胡海涛, 杨孝伟, 等. 电气化铁路车网耦合系统低频振荡分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(增刊1): 72-80.
- Zhou Yi, Hu Haitao, Yang Xiaowei, et al. Analysis of low-frequency oscillation in train-traction network coupling system of electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 72-80.
- [25] 周毅, 胡海涛, 雷科, 等. 电气化铁路低频等幅振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3024-3037.
- Zhou Yi, Hu Haitao, Lei Ke, et al. Mechanism analysis of the sustained low-frequency oscillation in the electric railway system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3024-3037.
- [26] Mayer O, Lynass M, Gomez M, et al. Design aspects for high voltage MW PV systems for railway power supply[C]//European PV Solar Energy Conference, Amsterdam, Netherlands: European PV Solar Energy Conference, 2014: 2876-2879.
- [27] Wu Mingliang, Wang Weiyang, Deng Wenli, et al. Back-to-back PV generation system for electrified railway and its control strategy[C]//Proceedings of

- 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Harbin, China, 2017: 1-6.
- [28] Hayashiya H, Itagaki H, Morita Y, et al. Potentials, peculiarities and prospects of solar power generation on the railway premises[C]//2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Nagasaki, Japan, 2013: 1-6.
- [29] 王振海, 陈霞, 党敏, 等. 光伏发电系统接入城市轨道交通供电系统的应用研究[J]. 太阳能, 2020(11): 56-61.  
Wang Zhenhai, Chen Xia, Dang Min, et al. Application research of PV power generation system connected to urban rail transit power supply system[J]. Solar Energy, 2020(11): 56-61.
- [30] Okui A, Hase S, Shigeeda H, et al. Application of energy storage system for railway transportation in Japan[C]//Power Electronics Conference, Sapporo, Japan, 2010: 3117-3123.
- [31] Hayashiya H. Recent trend of regenerative energy utilization in traction power supply system in Japan[J]. Urban Rail Transit, 2017, 3(4): 183-191.
- [32] van Lieshout R N, van den Akker J M, Borges R M, et al. Microscopic simulation of decentralized dispatching strategies in railways[R]. Econometric Institute Research Papers, 2021.
- [33] 中国政府网. 京沪高铁上海虹桥站光伏发电项目正式并网发电[EB/OL]. (2010-07-21)[2021-12-15]. [http://www.gov.cn/gzdt/2010-07/21/content\\_1660307.htm](http://www.gov.cn/gzdt/2010-07/21/content_1660307.htm).
- [34] 中国政府网. 杭州火车东站屋顶光伏发电项目正式并网发电[EB/OL]. (2010-06-29)[2021-12-15]. [http://www.gov.cn/jrzg/2013-06/29/content\\_2436903.htm](http://www.gov.cn/jrzg/2013-06/29/content_2436903.htm).
- [35] 贾利民, 师瑞峰, 马静. 中国陆路交通基础设施资产能源化潜力研究[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [36] 贾利民, 马静, 吉莉. 中国陆路交通能源融合的模式、模式与解决方案[M]. 北京: 科学出版社, 2020.

#### 作者简介

陈冲 1992年生,男,博士研究生,主要从事能源交通融合、储能技术、新能源发电技术等方面的研究工作。

E-mail: 1510383504@qq.com

贾利民 1963年生,男,博士,教授,博士生导师,研究方向为能源交通融合,高速铁路、控制科学与工程,安全科学与工程。

E-mail: lmjia@bjtu.edu.cn (通信作者)

## Decarbonization-Oriented Rail Transportation and Renewable Energy Integration Development—Configurations, Solutions, and Enabling/Empowering Technologies

Chen Chong<sup>1</sup> Jia Limin<sup>1,2</sup> Zhao Tianyu<sup>3</sup> Jin Chengri<sup>3</sup> Wu Mingli<sup>2</sup>

(1. China Institute of Energy and Transportation Integrated Development

North China Electric Power University Beijing 102206 China

2. School of Electrical Engineering Beijing Jiaotong University Beijing 100044 China

3. Beijing Nego Automation Technology Co. Ltd Beijing 100044 China)

**Abstract** Taking the decarbonization of energy supply in rail transportation as the orientation, this paper explores a technology path and systemic scenario of the energy supply decarbonization, in which the energy demand of rail transportation is harmonized with the resource endowment of renewable energy. Thus, a green, flexible, self-contained, and sustainable energy system for rail transportation is built.

This paper summarizes the existing traction power supply mode of rail transportation, existing technical problems, main research directions, and typical cases of renewable energy applications. Furthermore, 14 integration scenarios and solutions for rail transportation and renewable energy are concluded according to the coordinated evolution mode of rail transit type, power grid strength, and new energy implantation type. Four integrated modes are proposed for rail transportation and renewable energy from the two perspectives that rail transit and new energy are dominant, respectively. Rail transportation and renewable energy can be integrated, and “source-grid-load-storage” can coordinate by adjusting at any time according to the grid, land, and load. Moreover, the technical architectures for urban rail transit and electrified section of trunk railway and

non-electrified section of trunk railway are constructed. Boundary conditions, components matching principles, and collaborative control design are proposed under strong, weak or no network conditions. System energy dispatching, control strategy, and energy interaction between “wind-solar-storage-network” under no-load energy storage, traction power supply, and braking feedback energy are clarified. A hierarchical vertical management and control architecture with a complete and clear logical hierarchy is built. In the end, this paper describes novel information communication, power transformation and control, new energy traction grid group control, advanced energy storage, wide area protection and self-healing, energy self-contained dispatching, and other enabling/enabling technologies driving the integrated development of rail transportation and renewable energy.

The integrated development of rail transportation and renewable energy is crucial for trans-energy structural transformation and energy security, which can achieve carbon peaking and carbon neutrality goals under decarbonization. The tight integration and collaborative innovation of these two sectors will significantly improve multi-interdisciplinary development and technology collaboration. It is important for the new scenario of human socio-economic development and the sustainable formation of a new civilization.

**Keywords:** Decarbonization, rail transportation, new energy, integration development, pattern and model, green and self-sustained, enabling/empowering technologies

(编辑 陈 诚)