



# 适配无网场景的铁路新型牵引供电系统 协调控制策略

张宇<sup>1</sup>, 陈冲<sup>1</sup>, 刘文泉<sup>1</sup>, 贾利民<sup>1,2</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 先进轨道交通自主运行全国重点实验室, 北京 100091)

**摘要:** 针对无网场景下铁路牵引供电系统的绿色自洽运行需求, 文章构建一种以新能源为主体的新型牵引供电系统。为应对系统源-荷双侧供需的强随机性与波动性, 保障其稳定可靠连续运行, 文章提出一种协调控制策略。首先, 设计新型牵引供电系统拓扑, 建立光伏、储能及牵引变流系统的数学模型; 然后, 基于光伏与负荷间的不平衡功率、列车运行功率及储能荷电状态, 划分系统运行模式以实现能量的合理分配; 最后, 针对系统不平衡功率引起的直流母线电压波动及列车特性导致的频率频繁越限问题, 设计了相应的协调控制策略。通过硬件在环试验结果表明, 所提协调控制策略有效提升了新型牵引供电系统应对源-车强随机波动的能力, 有效缓解了储能系统的过充过放, 并解决了直流母线电压和频率的越限问题, 为非电气化铁路的新能源供电系统设计提供参考。

**关键词:** 非电气化铁路; 新型牵引供电系统; 光伏发电; 储能系统; 硬件在环试验; 协调控制策略

**中图分类号:** U223

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-128X(2025)06-0017-09

## 0 引言

截至2025年, 我国铁路营业里程达16.5万km, 年总能耗超1000亿kW·h<sup>[1]</sup>, 其中非电气化铁路区段的能耗占比约25%<sup>[2]</sup>。作为典型高能耗负荷主体, 非电气化铁路更应构建绿色、低碳、自洽、弹性、可持续发展的能源供给体系<sup>[3]</sup>。非电气化铁路主要位于弱电网或无网区域, 新能源资源极其丰富, 新能源发电可完全覆盖全部牵引负荷用能。因此, 将新能源发电、储能与非电气化铁路深度融合, 形成非电气化铁路新型牵引供电系统是低碳化转型的重要技术路径<sup>[4]</sup>。

新能源接入铁路牵引供电系统的方式主要划分为同相接入式、三相接入式、单相接入式、两相接入式、直流入式。相较于其他方式, 单相接入无需额外的相位转换设备, 可直接匹配牵引供电系统固有的单相

工频交流制式, 显著降低电能损耗与设备投资成本。新型牵引供电系统是一种以风、光等新能源为主体, 不以高压强网作为重要支撑甚至完全可脱网运行的全新技术路线<sup>[5]</sup>。然而, 新能源出力受气象条件、设备工况及阴影遮挡效应等多重因素制约<sup>[6]</sup>, 呈现显著的不确定性、间歇性及功率波动性<sup>[7]</sup>; 与此同时, 机车负荷因牵引/制动工况切换频繁, 其功率需求具有强冲击性与时变性<sup>[8]</sup>。供需双侧动态特性的耦合作用易引发直流母线电压失稳、储能过充过放及频率失稳等问题<sup>[9-12]</sup>。

目前关于新能源植入铁路牵引供电系统的研究成果丰富。文献[13-15]均从能量层角度开展研究, 提出了新能源植入铁路牵引供电系统的能量优化管理策略, 充分利用新能源发电功率和列车再生制动能量, 改善电能质量。文献[16-19]主要从含两、三电平铁路功率调节器 (railway power conditioner, RPC) 两相接入方案和直流式接入两种拓扑结构来开展变流层研究,

基金项目: 国家能源集团科技创新项目 (GJNY-21-189)

通信作者: 贾利民, 男, 博士, 教授, 主要从事交通控制与安全、智能交通系统、能源与交通融合等方面的研究; E-mail: lmjia@bjtu.edu.cn

引用格式: 张宇, 陈冲, 刘文泉, 等. 适配无网场景的铁路新型牵引供电系统协调控制策略[J]. 机车电传动, 2025(6): 17-25. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.204.

Citation: ZHANG Yu, CHEN Chong, LIU Wenquan, et al. Coordinated control strategy for new traction power supply systems adapted to off-grid scenarios[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 17-25. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.204.

从底层逻辑实现系统不同模式下能量平衡和电能质量补偿目标。

由上文可知，现有研究内容多集中于以强网为支撑的牵引供电场景，而对电网覆盖薄弱或完全缺失的非电气化铁路场景的研究较少；同时，已有研究多聚焦于能量层和变流层的控制方式，缺乏对协调层的深入研究。因此，针对环境恶劣、地形复杂的弱网甚至无网区域非电气化铁路的运行特性，本文将提出一种适配该场景的新型牵引供电系统协调控制策略，使得系统在不同极端运行模式下能够实现能量的合理分配，确保系统的运行状态在安全阈值之内。

### 1 系统拓扑

本文构建了如图1所示的新型铁路牵引供电系统拓扑及分层控制框图。由图1可知，光伏与储能经过DC-DC变流器接入DC 1 500 V直流母线，单相牵引变流器经过LC滤波和牵引变压器后将AC 0.69 kV升压至AC 27.5 kV实现电力机车牵引，三相变流器则经过LC滤波和三相变压器后将AC 0.69 kV升压至AC 10 kV保证非牵引负荷用能。系统采用变流控制、协调控制和能量管理3层管控架构，通过这种“本地快速响应-中间有效协调-全局系统寻优”分层递进管控方式，

实现系统稳定性、经济性与灵活性兼顾。其中，变流器控制层作为底层控制单元，直接作用于光伏DC-DC、储能DC-DC、单相牵引变流器和三相变流器，分别用于实现光伏最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)、DC 1 500 V直流母线电压稳定、AC 27.5 kV交流母线电压频率主动构建与动态调节以及AC 10 kV交流母线电压与频率的主动构建及实时稳定。协调控制层是变流控制层和能量管理层的连接纽带，其主要职责是应对系统特殊工况，确保直流母线电压与系统频率快速恢复至正常状态。具体而言，当储能系统荷电状态达到限值导致直流母线电压超过设定阈值，或机车负荷突增突减引起系统频率波动超过设定阈值时，协调控制层启动响应。其控制功能主要包括：牵引母线二次调频、直流母线低压减载、直流母线高压发电限额以及直流母线高压回馈能量抑制。能量管理层作为系统顶层控制，主要聚焦系统长时间尺度的能量优化和“源-网-储-车”各环节的状态监视与指令下达，具体包含源-车功率预测匹配、计划曲线跟踪、能量动态滚动优化和源-储-车协同互动等功能。本文将重点围绕协调控制层开展相关研究。

图1中， $U_{dc}$ 为输入侧直流电压， $C_{dc}$ 为直流侧电容， $L_{in}$ 、 $C_{in}$ 、 $L_{tr}$ 、 $C_{tr}$ 分别为LC型滤波电路的电感和电容， $u_{ina}$ 、 $u_{inb}$ 、 $u_{inc}$ 和 $i_{ina}$ 、 $i_{inb}$ 、 $i_{inc}$ 分别为三相变流器经

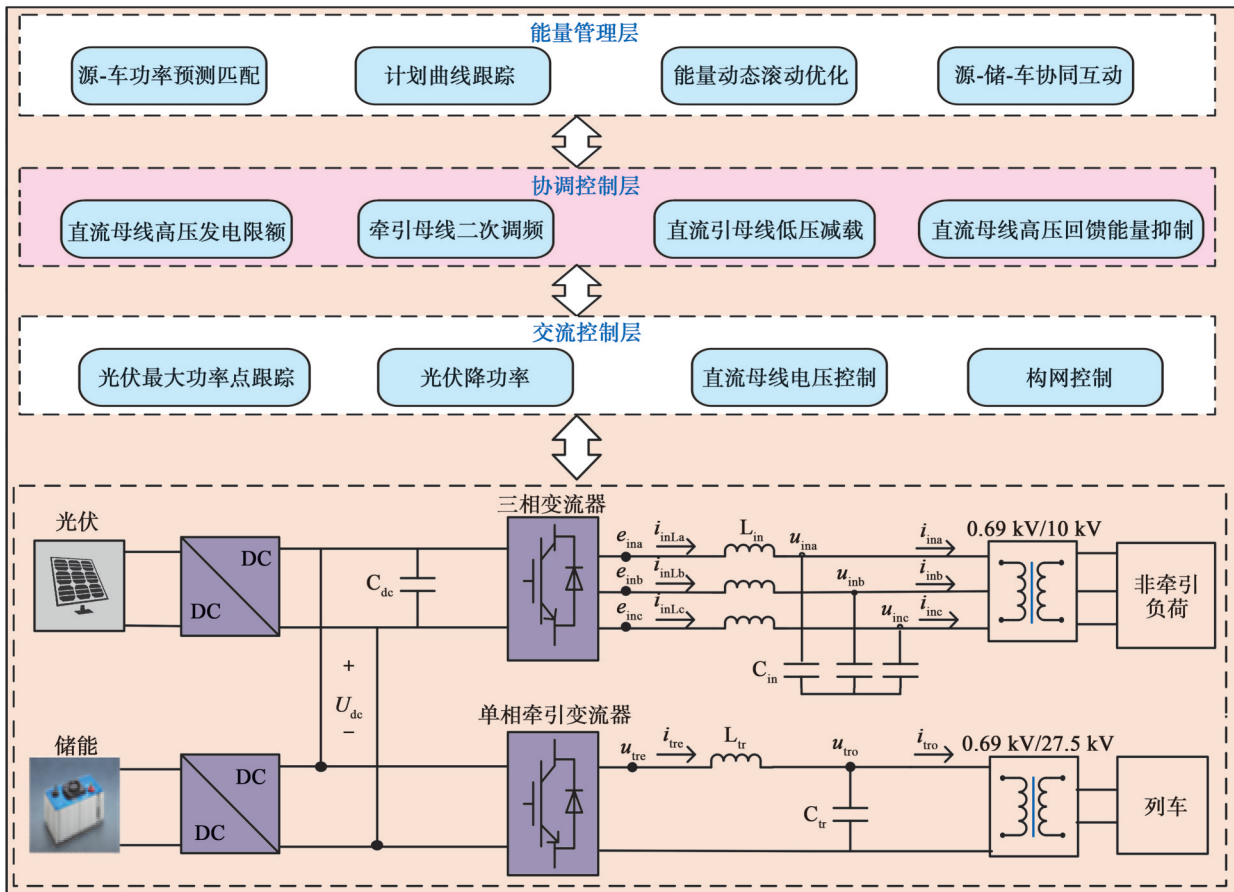


图1 新型铁路牵引供电系统拓扑及分层控制框图

Fig. 1 Topology and hierarchical control block diagram of the proposed traction power supply system

LC滤波后的电压和电流,  $e_{ina}$ 、 $e_{inb}$ 、 $e_{inc}$ 和 $i_{inLa}$ 、 $i_{inLb}$ 、 $i_{inLc}$ 分别为三相变流器出口处的电压和电流,  $i_{tre}$ 、 $u_{tre}$ 分别为单相牵引变流器出口侧的电流和电压,  $i_{tro}$ 、 $u_{tro}$ 分别为单相变流器经LC滤波后的电流和电压。

## 2 系统能量传输模式

为实现能量合理分配, 基于光伏与负荷之间的不平衡功率、列车运行功率 $P_t$ 、非牵引负荷功率 $P_s$ 和储能系统荷电状态 (state of charge, SOC) 值 $A_{SOC}$ 将系统划分为10种运行模式来进行能量管控, 系统运行模式划分如图2所示。本文将 $A_{SOC}$ 分为5个区间, 这5个区间分别表征储能电池不同的工作状态, 如式(1)所示。

$$A_{SOC} = \begin{cases} [0, A_{SOC\ min2}), & \text{严重亏电} \\ [A_{SOC\ min2}, A_{SOC\ min1}), & \text{亏电} \\ [A_{SOC\ min1}, A_{SOC\ max1}), & \text{正常范围} \\ [A_{SOC\ max1}, A_{SOC\ max2}), & \text{满电} \\ [A_{SOC\ max2}, 100), & \text{完全满电} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $A_{SOC\ min1}$ 、 $A_{SOC\ min2}$ 、 $A_{SOC\ max1}$ 、 $A_{SOC\ max2}$ 分别为每个区间的临界点。

不同运行模式下各系统状态如表1所示。

表1 不同运行模式下的系统状态

Table1 System status under various operating modes

模式	光伏出力状态	储能运行状态	列车运行工况
1	完全消纳	最大功率放电	牵引
2	完全消纳	最大功率充电	牵引
3	完全消纳	最大功率放电	空载
4	完全消纳	最大功率充电	空载
5	完全消纳	最大功率放电	制动
6	完全消纳	最大功率充电	制动
7	弃光	充电功率受限	牵引
8	弃光	充电功率受限	空载
9	弃光	充电功率受限	制动
10	完全消纳	放电功率受限	减载

## 3 分层协调控制策略

本章将提出的分层协调控制策略如图3所示。由于本文主要聚焦于协调控制层, 故不再对底层变流控制进行详细推导。光伏、储能及交流侧的底层变流控制框图如图3所示。协调控制层根据变流层的运行状态, 及时调整控制指令, 并将指令分发至底层变流器执行。

图3中,  $I_{pv}$ 、 $U_{pv}$ 分别为光伏阵列的输出电流和输出电压;  $S_{pv}$ 为开关管控制信号;  $I_b$ 为储能电池的输

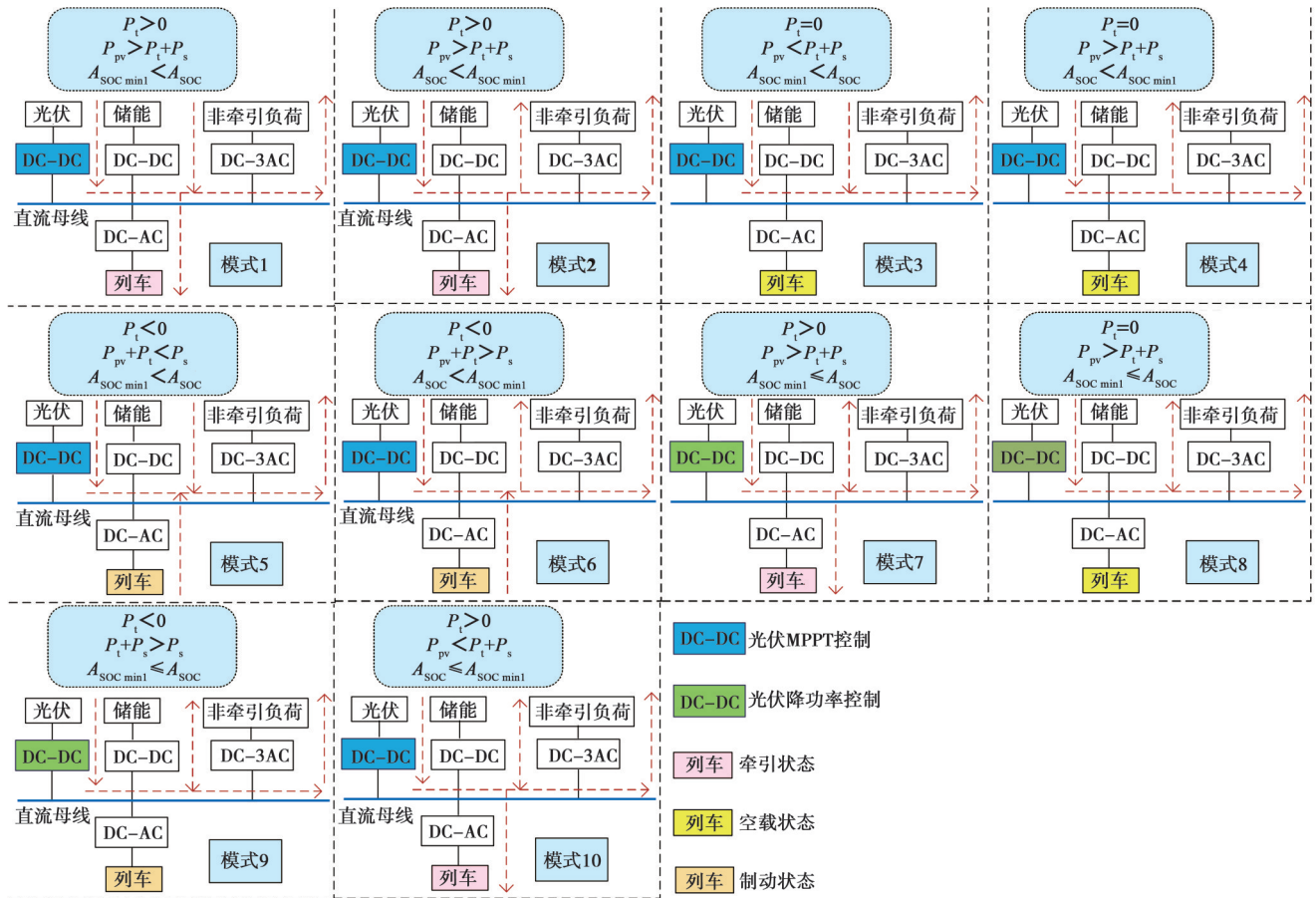


图2 系统运行模式划分

Fig. 2 Energy flow diagrams under various operating conditions

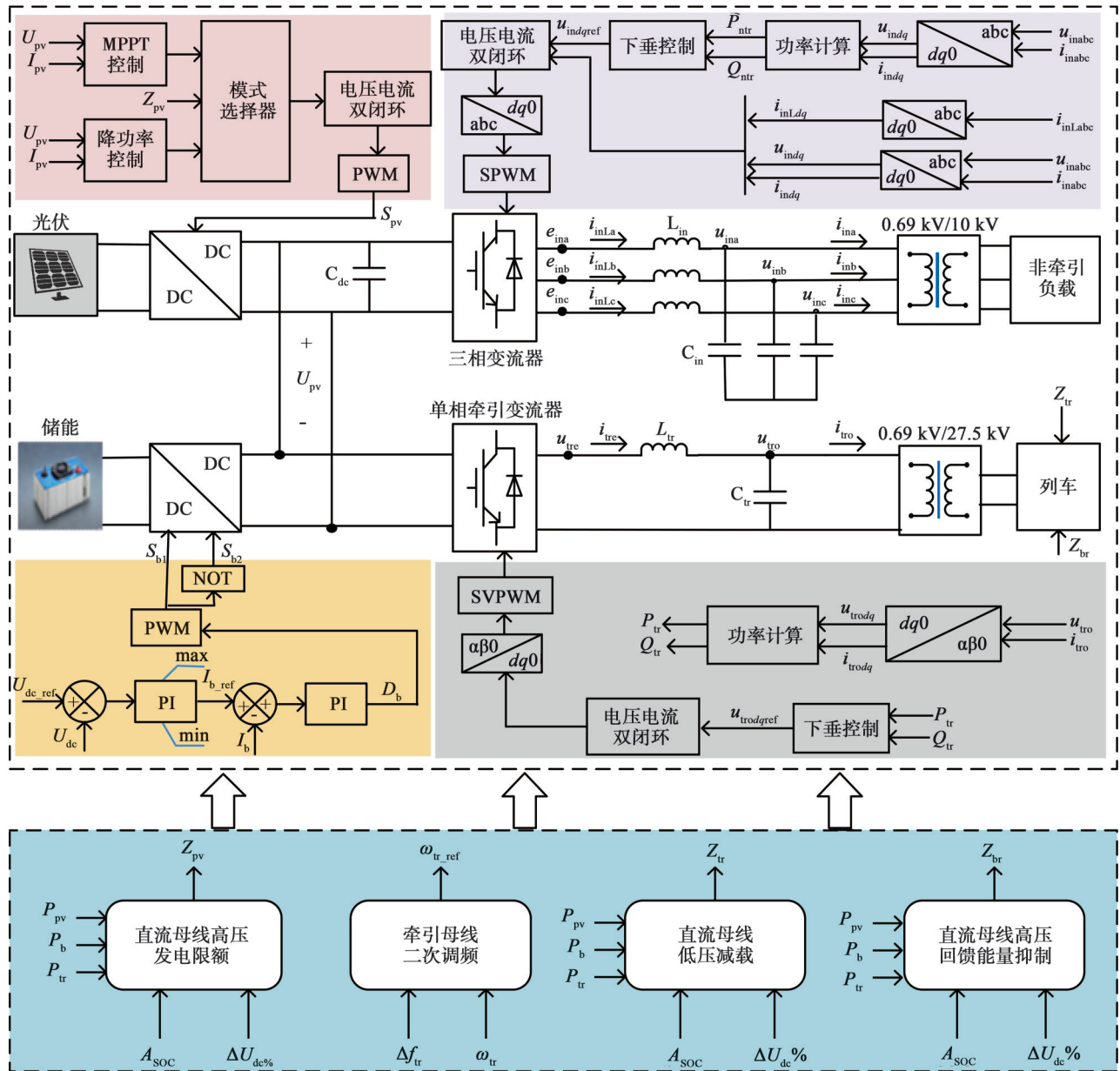


图3 分层协调控制策略

Fig. 3 Strategy of hierarchical coordinated control

流； $i_{trdq}$  为  $i_{tr}$  在  $dq$  坐标系下的  $dq$  轴分量； $u_{trdq}$  为  $u_{tro}$  在  $dq$  坐标系下的  $dq$  轴分量； $i_{inLdq}$  为  $i_{inL}$  在  $dq$  坐标系下的  $dq$  轴分量； $u_{indq}$  为  $u_{inabc}$  在  $dq$  坐标系下的  $dq$  轴分量； $e_{indq}$  为  $e_{inabc}$  在  $dq$  坐标系下的  $dq$  轴分量； $i_{indq}$  为  $i_{inabc}$  在  $dq$  坐标系下的  $dq$  轴分量。 $\Delta U_{dc}\%$  为直流母线电压偏差率， $\Delta U_{dc}\% = (U_{dc} - U_{dc\_ref}) / U_{dc\_ref}$ ； $Z_{pv}$  为光伏发电限额的控制指令； $Z_{tr}$  为列车减载的控制指令； $Z_{br}$  为制动电阻启停的控制指令； $\omega_{tr\_ref}$  为二次调频的角频率指令值； $\Delta f_{tr} = f_{tr} - f_{tr\_ref}$  为供电频率偏差； $P_{ntr}$  和  $Q_{ntr}$  为三相变流器输出的有功功率和无功功率； $U_{dc\_ref}$  为直流母线电压的参考值； $I_{b\_ref}$  为储能输出电流的参考值； $\omega_{tr}$  为系统角频率； $P_{tr}$ 、 $Q_{tr}$  分别为单相牵引变流器输出的有功功率和无功功率。

### 3.1 牵引母线二次调频

传统下垂控制通过下垂系数实现一次调频，但其

调节精度受负荷突变及系统惯性影响较大。在无网场景下，单相牵引变流器的输出功率在列车启动或制动时快速波动易导致频率瞬时偏移且无法恢复到额定值，影响供电质量。为提高频率恢复速度与精度，本文在协调控制中引入二次调频模块，如图4所示。

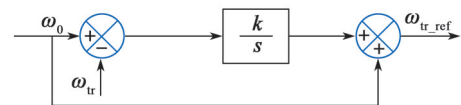


图4 牵引母线二次调频控制框图

Fig. 4 Secondary frequency control scheme for traction buses

将传统下垂控制中的频率参考  $\omega_0$  由  $\omega_{tr\_ref}$  来代替， $\omega_{tr\_ref}$  的表达式为

$$\omega_{tr\_ref} = \omega_0 + \frac{k}{s} (\omega_0 - \omega_{tr}) \quad (2)$$

### 3.2 直流母线高压发电限额

在光伏出力过剩且储能  $A_{soc}$  高于预设上限时，储

能功率受限无法消纳多余光伏出力, 导致直流母线电压因能量堆积超限。为此, 当电压偏差率超过预设阈值, 协调控制层发送光伏模式切换指令  $Z_{pv}$ ,  $Z_{pv}$  由 0 切换至 1, 光伏功率参考值如式(3)所示, 光伏由 MPPT 控制策略切换为降功率控制策略, 限制光伏出力, 使得光伏出力与负荷之间的功率差额降到储能受限功率范围以内, 避免储能过充和直流母线电压超限。

$$P_{pvref} = \begin{cases} P_t + P_s - P_{rb}, & Z_{pv} = 1 \\ P_{mppt}, & Z_{pv} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_{rb}$  为储能功率限幅值, 储能功率以释放功率为正。

### 3.3 直流母线高压制动能量抑制

储能  $A_{soc}$  高于预设上限且光伏出力充足时, 储能功率受限无法消纳多余能量, 列车制动能量回馈将造成直流母线电压抬升超限。为抑制过压风险, 当直流母线电压偏差率超过预设阈值, 协调控制层发送制动电阻启动指令  $Z_{br}$ ,  $Z_{br}$  由 0 切换至 1, 采用制动电阻消散再生制动能量, 功率如式(4)所示, 使得系统功率差额降到储能受限功率范围以内, 储能所采取的直流母线电压控制策略可以迅速调节直流母线电压恢复到额定值, 避免直流母线电压超限。

$$P_{br} = \begin{cases} -P_t, & Z_{br} = 1 \\ 0, & Z_{br} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_{br}$  为制动电阻吸收的功率。

### 3.4 直流母线低压减载

当储能  $A_{soc}$  低于预设下限且光伏出力不足时, 储能功率受限, 无法提供负荷所需功率, 会导致直流母线电压被拉低。当电压偏差率超过预设阈值时, 协调控制层发送列车减载指令  $Z_{tr}$ ,  $Z_{tr}$  由 0 切换至 1, 此时列车减载功率如式(5)所示。系统通过让列车减载快速响应, 将直流母线电压恢复至正常范围。

$$P_{tr} = \begin{cases} P_{pv} + P_{rb} - P_s, & Z_{tr} = 1 \\ P_t, & Z_{tr} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_{tr}$  为列车减载功率参考值。

## 4 试验验证

为了验证所提分层协调控制策略的有效性和准确性, 图5给出了硬件在环试验平台, 其中, 主电路及底层变流控制策略部署在 RTLAB OP5700 仿真机中, 协调控制策略部署在 NI PXIe-1071 中, 试验参数及变量单位见表2。

### 4.1 交流母线二次调频试验验证

试验时, [0, 1)s 机车空载, [1, 7)s 机车功率为 10 MW, [7, 10)s 机车制动功率为 5 MW, 非牵引负荷功率

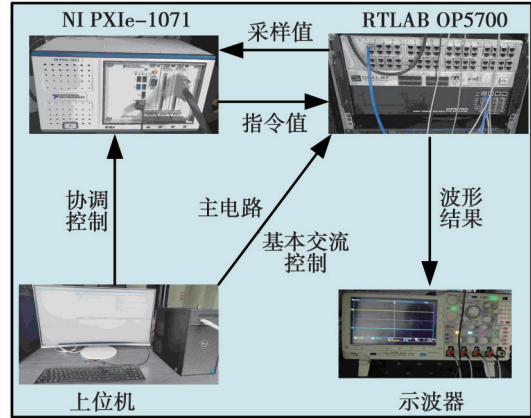


图5 硬件在环试验平台

Fig. 5 Hardware-in-loop experimental platform

表2 试验关键参数

Table 2 Key experimental parameters

模型	参数项目	参数值
光伏	温度/°C	25
	光伏侧储能电感 $L_{pv}$ /mH	1
	光伏侧支撑电容 $C_{pv}$ /mF	1
	开关频率 $f_{sw}$ /kHz	20
	直流母线电容 $C_{dc}$ /mF	200
	光伏装机容量 $P_{AZ}$ /MW	14
储能	储能侧储能电感 $L_b$ /μH	1.63
	储能侧支撑电容 $C_b$ /mF	10.7
	开关频率 $f_{sw}$ /kHz	20
	直流母线电压参考值 $V_{dc\_ref}$ /V	1 500
	锂电池容量/(MW·h)	70
单相牵引系统	滤波电感 $L$ /mH	0.1
	滤波电容 $C$ /mF	0.56
	升压变压器变比	690/27 500
	开关频率 $f_{sw}$ /kHz	20
	有功下垂系数 $m_p$	$1.25 \times 10^{-7}$
	无功下垂系数 $n_q$	$8 \times 10^{-7}$
三相系统	滤波电感 $L_r$ /mH	0.155
	滤波电容 $C_r$ /mF	1.68
	升压变压器变比	690/10 000
	开关频率 $f_{sw}$ /kHz	20
	有功下垂系数 $m_p$	$2.5 \times 10^{-7}$
	无功下垂系数 $n_q$	$3 \times 10^{-6}$

为 2 MW。分别在 1 s 和 7 s 模拟机车启动和制动场景, 光照强度为 1 000 W/m<sup>2</sup>, 光伏最大功率为 14 MW。光伏功率  $P_{pv}$ 、储能功率  $P_b$ 、单相牵引变流器输出功率  $P_{tr}$  和三相变流器输出功率  $P_{mr}$  变化的仿真结果如图 6 所示。

直流母线电压偏差率、交流侧电压有效值及频率偏差波形如图 7 所示, 直流母线电压在机车启动和制动发生时刻有略微波动, 储能快速调节直流母线电压恢复至额定值, 交流侧电压有效值均稳定在额定值, 由此可验证基本变流控制的有效性。未加入二次调频时系统的频率偏差如图 7(a) 所示, 在机车瞬时大功率启动和制动时刻所造成的频率偏移使得系统频率无法恢复

到 50 Hz，加入二次调频时系统的频率偏差如图 7(b)所示，在系统频率偏移时，二次调频模块快速响应将系统频率迅速恢复到 50 Hz，验证了交流母线二次调频策略的有效性。

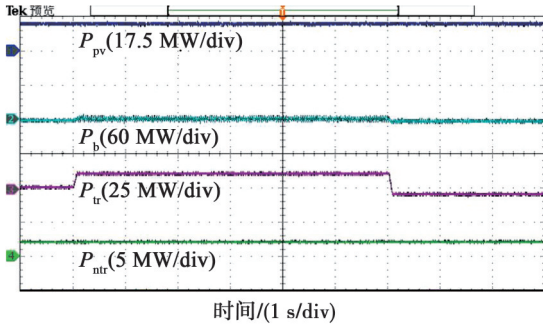
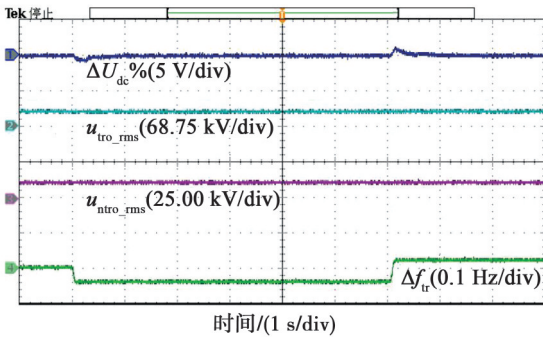
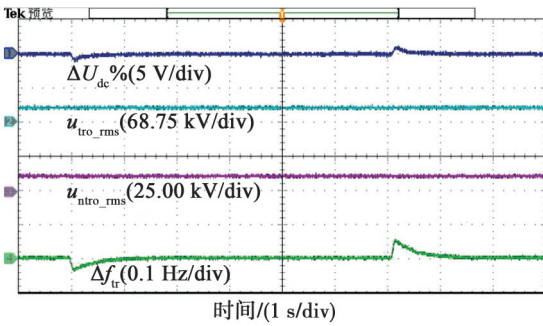


图 6 各模块功率变化波形

Fig. 6 Power change waveforms of each module



(a) 未加入二次调频模块



(b) 加入二次调频模块

图 7 直流母线电压偏差率、交流电压有效值及频率偏差  
Fig. 7 DC bus voltage deviation rate, AC voltage RMS and frequency deviation

#### 4.2 直流母线高压发电限额试验验证

在初始工况下，机车功率为 7 MW，光照强度为 1 000 W/m<sup>2</sup>，光伏功率为 14 MW，储能  $A_{SOC}$  初始值为 89.7%，储能功率未受限，系统处于充电状态。当  $A_{SOC}$  上升至预设上限 90% 时，储能功率限幅为  $\pm 3$  MW，储能吸收功率有限，导致多余光伏能量抬升直流母线电压。本文设定直流母线电压偏差率  $\Delta U_{dc}\%$  的正常范围为  $\pm 5\%$ ，阈值设为  $\pm 4\%$ 。当  $\Delta U_{dc}\%$  超过阈值时，协调控制层发出光伏运行指令，光伏控制由 MPPT 切换为降功率控制，光伏功率降为 10 MW。由此，直流母线电压迅速恢复至额定值，储能  $A_{SOC}$  上升速率减小，避免

了储能系统过充；同时，交流侧电压有效值及频率偏差均满足运行要求，验证了直流母线高压发电限额策略的有效性。各模块功率变化波形如图 8 所示，直流母线电压偏差率及  $A_{SOC}$  变化如图 9 所示，交流侧电压有效值及频率偏差如图 10 所示。

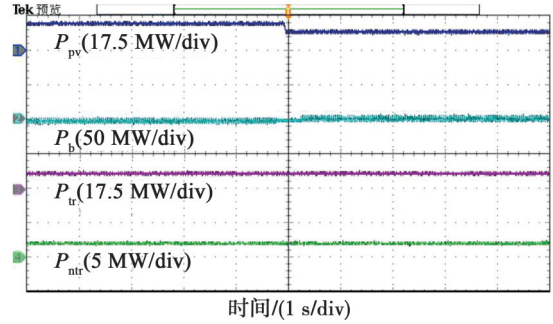


图 8 各模块功率变化波形

Fig. 8 Power change waveforms of each module

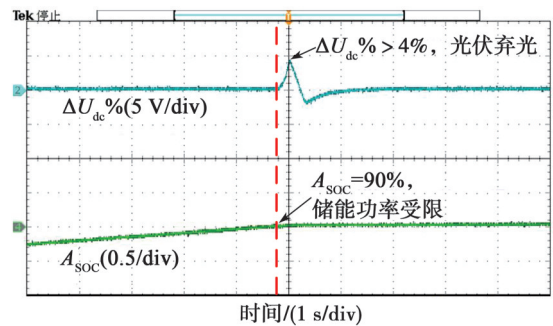


图 9 直流母线电压偏差率及  $A_{SOC}$

Fig. 9 DC bus voltage deviation rate and  $A_{SOC}$

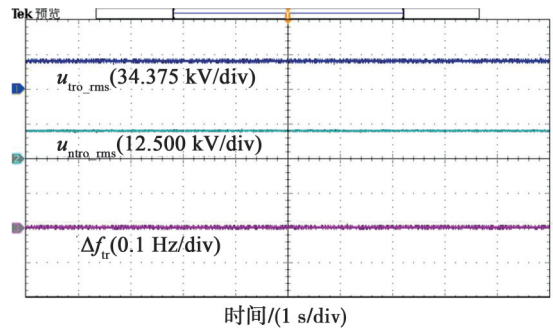


图 10 交流电压有效值及频率偏差

Fig. 10 RMS and frequency deviation of AC voltage

#### 4.3 直流母线高压回馈能量抑制试验验证

在初始工况下，机车制动功率为 5 MW，光照强度为 230 W/m<sup>2</sup>，光伏功率为 3 MW。储能  $A_{SOC}$  初始值为 89.7%，储能功率未受限。此时，机车多余的可再生制动能量和光伏能量共同为储能系统充电， $A_{SOC}$  上升到预设上限 90%，储能功率限幅为  $\pm 3$  MW，多余能量导致直流母线电压抬升。因此当直流母线电压偏差率超过阈值时，协调控制层给出制动电阻启动指令，由制动电阻来吸收掉机车回馈能量，由此直流母线电压迅速恢复至额定值，储能  $A_{SOC}$  上升速率减小，从而避免储能系统进入过充状态；同时，交流侧电压有效值及频

率偏差均满足要求, 验证了直流母线高压回馈能量抑制策略的有效性。各模块功率变化波形如图11所示, 直流母线电压偏差率及 $A_{SOC}$ 变化如图12所示, 交流侧电压有效值及频率偏差如图13所示。

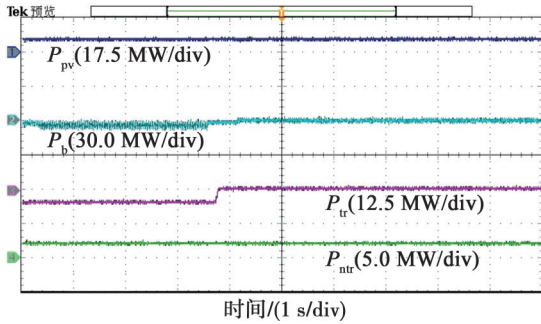


图11 各模块功率变化波形

Fig. 11 Power change waveforms of each module

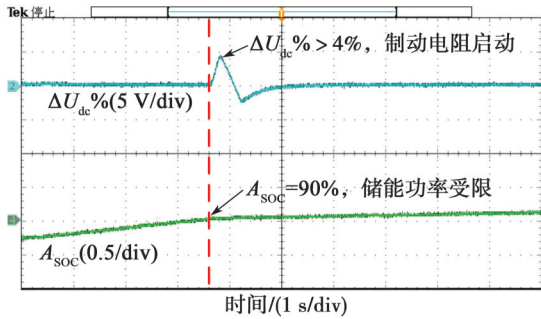


图12 直流母线电压偏差率及 $A_{SOC}$

Fig. 12 DC bus voltage deviation rate and  $A_{SOC}$  profiles

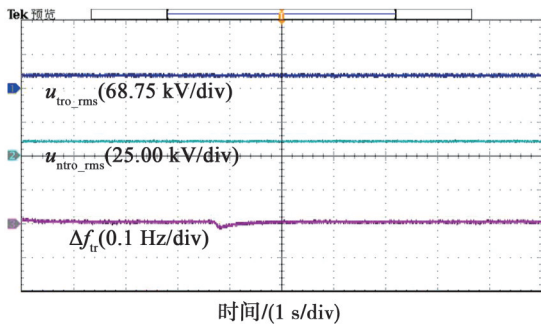


图13 交流电压有效值及频率偏差

Fig. 13 RMS and frequency deviation of AC voltage

#### 4.4 直流母线低压减载试验验证

在初始工况下, 机车功率为8 MW, 光照强度为230 W/m<sup>2</sup>, 光伏功率为3 MW。储能 $A_{SOC}$ 初始值为10.2%, 储能功率未受限。此时光伏功率无法满足负荷需求, 储能系统放电补足功率差额。当 $A_{SOC}$ 下降至预设下限10%时, 储能功率限幅为 $\pm 3$  MW, 储能释放功率有限, 导致直流母线电压降低。当直流母线电压偏差率低于阈值时, 协调控制发出机车减载指令, 将机车功率参考值设置为4 MW, 列车迅速减载至该值。因此, 直流母线电压迅速恢复至额定值, 储能 $A_{SOC}$ 下降速率减缓, 避免储能系统进入过放状态; 同时, 交流侧电压有效值及频率偏差均满足运行要求, 验证了直

流母线低压减载策略的有效性。各模块功率变化波形如图14所示, 直流母线电压偏差率及 $A_{SOC}$ 变化如图15所示, 交流侧电压有效值及频率偏差变化如图16所示。

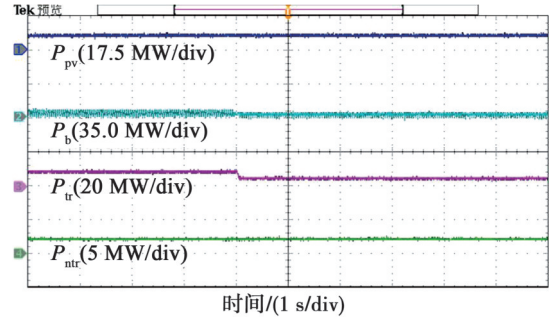


图14 各模块功率变化波形

Fig. 14 Power change waveforms of each module

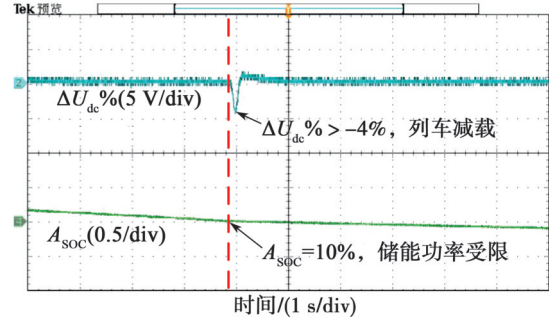


图15 直流母线电压偏差率及 $A_{SOC}$

Fig. 15 DC bus voltage deviation rate and  $A_{SOC}$

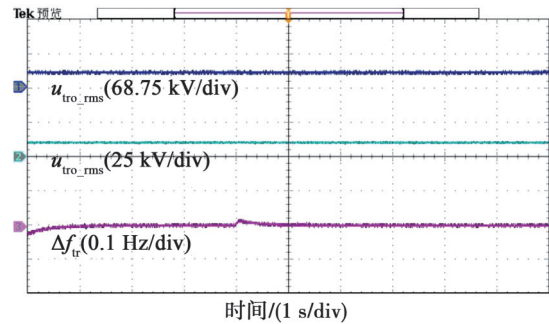


图16 交流电压有效值及频率偏差

Fig. 16 RMS and frequency deviation of AC voltage

## 5 结论

本文针对弱网/无网区域非电气化铁路的供电需求, 提出一种适配离网场景的新型牵引供电系统, 并构建了分层协调控制策略, 通过理论分析与硬件在环试验验证了系统与策略的有效性, 主要结论如下:

①在协调控制层二次调频和构网下垂控制的共同作用下, 系统能够有效抑制机车大功率频繁切换引起的频率波动, 频率偏差维持在 $\pm 0.2$  Hz以内。

②在协调控制层直流母线低压减载、高压发电限幅及高压制动能量抑制等功能的协同作用下, 当直流母线电压出现越限时, 电压偏差率可控制在 $\pm 5\%$ 以内。

③硬件在环试验结果表明, 本文所提协调控制策略适用于非电气化区段, 可在无强电网支撑的条件下, 有效应对“源-车”强随机性波动, 保证系统安全平稳运行。

#### 参考文献:

- [1] 发展和改革委员会. 中国国家铁路集团有限公司2023年统计公报[N]. 人民铁道, 2024-03-01(2).  
Ministry of development and reform. China national railway group corporation 2023 statistical bulletin[N]. People's railway daily, 2024-03-01(2).
- [2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告[R/OL]. (2024-03-29) [2025-06-25]. <https://www.camet.org.cn/xytj/tjxx/14894.shtml>.  
China association of metros. China urban rail transit 2020 annual statistics and analysis report[R/OL]. (2024-03-29) [2025-06-25]. <https://www.camet.org.cn/xytj/tjxx/14894.shtml>.
- [3] 胡海涛, 葛银波, 黄毅, 等. 电气化铁路“源-网-车-储”一体化供电技术[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4374-4390.  
HU Haitao, GE Yinbo, HUANG Yi, et al. "Source-network-train-storage" integrated power supply system for electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4374-4390.
- [4] 贾利民. 中国陆路交通能源融合的形态、模式与解决方案[M]. 北京: 科学出版社, 2020.  
JIA Limin. Scenarios, patterns and solutions of ground transportation and energy convergence in China[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [5] 陈冲, 贾利民, 赵天宇, 等. 基于储能的非电气化铁路新型牵引供电系统架构及关键技术[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(1): 162-177.  
CHEN Chong, JIA Limin, ZHAO Tianyu, et al. Architecture and key technologies of new traction power supply system for non-electrified railway based on energy storage[J]. China railway science, 2024, 45(1): 162-177.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 陈冲, 贾利民, 赵天宇, 等. 光伏和储能植入铁路牵引供电系统的拓扑架构与控制策略研究综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(24): 7874-7901.  
CHEN Chong, JIA Limin, ZHAO Tianyu, et al. Research review on topology and control strategy of PV and energy storage connected to railway traction power supply systems [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2024, 39(24): 7874-7901.
- [9] ZHONG J, BOLLEN M, RÖNNBERG S. Towards a 100% renewable energy electricity generation system in Sweden [J]. Renewable energy, 2021, 171: 812-824.
- [10] CHENG P, KONG H W, MA J, et al. Overview of resilient traction power supply systems in railways with interconnected microgrid[J]. CSEE journal of power and energy systems, 2021, 7(5): 1122-1132.
- [11] NDREKO M, RÜBERG S, WINTER W. Grid forming control scheme for power systems with up to 100% power electronic interfaced generation: a case study on Great Britain test system[J]. IET renewable power generation, 2020, 14(8): 1268-1281.
- [12] ROSSO R, WANG X F, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends—a review[J]. IEEE open journal of industry applications, 2021, 2: 93-109.
- [13] GE Y B, HU H T, CHEN J Y, 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.
- [14] AGUADO J A. SÁNCHEZ RACERO A J, DE LA TORRE S. Optimal operation of electric railways with renewable energy and electric storage systems[J]. IEEE transactions on smart grid, 2018, 9(2): 993-1001.
- [15] LIU Y L, CHEN M W, CHENG Z, et al. Robust energy management of high-speed railway co-phase traction substation with uncertain PV generation and traction load[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(6): 5079-5091.
- [16] 王翰林, 黄小红, 李昊洋, 等. 含分布式光伏接入的三相牵引供电系统电压协调控制方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(4): 1645-1654.  
WANG Hanlin, HUANG Xiaohong, LI Haoyang, et al. Voltage coordination control method of three-phase traction power supply system with distributed photovoltaic integration[J]. High voltage engineering, 2024, 50(4): 1645-1654.
- [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.  
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.
- [18] 郭亚, 陈小强, 王英, 等. 计及电网电压不平衡的储能型铁路功率调节器负序优化补偿策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 772-780.
- GUO Ya, CHEN Xiaoqiang, WANG Ying, et al. Negative sequence optimization compensation strategy for energy storage type railway power conditioner considering grid voltage imbalance[J]. High voltage engineering, 2023, 49(2): 772-780.
- [19] 黄小红, 赵艺, 李群湛, 等. 电气化铁路同相储能供电技术[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(4): 856-864.
- HUANG Xiaohong, ZHAO Yi, LI Qunzhan, et al. Co-phase traction power supply and energy storage technology for electrified railway[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2020, 55(4): 856-864.

## Coordinated control strategy for new traction power supply systems adapted to off-grid scenarios

ZHANG Yu<sup>1</sup>, CHEN Chong<sup>1</sup>, LIU Wenquan<sup>1</sup>, JIA Limin<sup>1,2</sup>

( 1. China Institute of Energy and Transportation Integrated Development, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2.State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China )

**Abstract:** This paper established a renewable-dominated traction power supply system to achieve green, self-sufficient railway traction in off-grid scenarios. To ensure stable, reliable, and continuous operation under conditions of significant supply-demand randomness and fluctuations, a coordinated control strategy was proposed. First, the system topology was constructed with models duly established for photovoltaic generation, energy storage, and traction conversion systems. Second, operational modes were categorized based on power imbalance between PV generation and loads, train operating power, and storage state of charge to facilitate rational power allocation. Subsequently, a coordinated control strategy was designed to address DC bus voltage instability arising from power imbalance and frequent frequency violations caused by train dynamics. Finally, hardware-in-loop experiments demonstrate that the proposed coordinated control strategy effectively enhances the system's resilience to significant "power source-train demand" randomness and fluctuations, mitigates storage overcharging/overdischarging issues, and resolves DC bus voltage/frequency violations.

**Keywords:** non-electric railway; new traction power supply system; PV generation; energy storage; hardware-in-loop experiments; coordinated control strategy