



应用于光储接入铁路牵引网的多制式电能协同调度器研究

毕京斌¹, 魏芳宜², 李 艳², 方晓春²

(1. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 山东 青岛 266114;

2. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 为推进铁路牵引供电低碳化发展, 充分利用铁路沿线新能源和再生制动能量, 文章提出一种适用于多种电压制式接入牵引供电系统的电能协同调度器拓扑, 以实现不同制式电能的高效协同调度。首先, 文章归纳了现有光储接入铁路供电系统架构, 根据接入端口电压制式差距进行分类, 并对比分析各类方案的应用特点与适用场景。其次, 阐述所提多制式电能协同调度器的工作原理, 重点分析其多端口功率平衡机制与分层控制策略, 实现交直流混合能源的柔性互联。最后, 基于1 MW样机设计参数进行MATLAB仿真验证, 结果表明, 该调度器能同时兼容低压直流与高压交流接入牵引供电系统, 并入牵引网电流总谐波畸变率(THD)低于3%, 有效提升牵引网电能质量与能源消纳效率。

关键词: 铁路牵引供电系统; 光伏; 储能; 多电平变流器; 拓扑架构

中图分类号: U223.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)06-0064-11

0 引言

随着我国电气化铁路技术与建设规模的持续发展, 铁路运输密度与电力需求不断攀升。截至2024年底, 全国铁路营业里程达16.2万公里, 其中高速铁路4.8万公里, 电气化率为75%。同期, 铁路能源消耗折合标准煤1 801.2万吨, 较上年增加48.5万吨, 同比增长2.8%^[1]。《交通强国建设纲要》明确提出“优化交通能源结构, 推进可再生能源、清洁能源应用”。在此背景下, 推动电气化铁路节能降耗已成为亟待解决的关键技术难题。

铁路沿线光伏资源丰富, 开发潜力巨大。将光伏发电技术应用于铁路牵引供电领域, 不仅能增强铁路电力供应的独立性, 而且能有效降低碳排放, 加快铁路低碳化进程, 同时盘活铁路闲置土地资源, 具有良好的社会效益与经济效益^[2]。此外, 铁路运行过程中列

车制动能量占比较大, 特别是在重载、长大坡道线路或枢纽站所, 再生制动能量可达牵引能量的10%~30%。对这部分能量进行高效回收与合理利用, 有助于提升能源利用效率、减少外部能源需求, 从而降低铁路整体能耗水平^[3]。由于储能系统具有能量缓冲与功率调节能力, 引入储能环节可进一步提高能量利用效率, 保障系统平稳运行。

近年来, 国内外学者围绕光伏与储能在铁路供电系统中的应用展开了广泛研究, 重点关注典型开发场景下的系统集成方案、接入拓扑架构及其控制策略。文献[4]探讨了分布式光伏在牵引供电系统中的应用潜力与意义, 系统梳理了不同接入方式与控制策略, 并对其适用性进行了综合评价。文献[5]进一步分析了分布式光伏接入方式以及存在的电能质量问题, 综合评估了光伏接入的经济社会效益。在此基础上, 文献[6]聚焦于基于背靠背变流器的光储能接入牵引供电系统, 分类综述了不同拓扑架构及其对应的能量管控策略,

通信作者: 李 艳, 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事分布式光伏发电系统、安全储能系统、轨道与新能源融合技术、航空航天电源等方面的研究; E-mail: liyan@bjtu.edu.cn

引用格式: 毕京斌, 魏芳宜, 李艳, 等. 应用于光储接入铁路牵引网的多制式电能协同调度器研究[J]. 机车电传动, 2025(6): 64-74.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.304.

Citation: BI Jingbin, WEI Fangyi, LI Yan, et al. Research on multi-mode coordinated power scheduler for PV-storage integrated railway traction power supply systems[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 64-74.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.304.

涵盖规则法、优化控制法和强化学习法。文献[7]则以日本为例,介绍了采用直流供电的铁路中再生制动能量的解决方案,重点阐述了能量回收变流器与储能在铁路系统中的实际安装和应用情况。文献[8]从储能装置接入位置和介质类型出发,系统比较了车载式与地面式储能的电气拓扑结构,并对单一和混合介质储能系统的技术特点进行了归纳分析。

综上所述,目前关于光伏与储能接入铁路牵引供电系统的研究多聚焦于单一电压制式的接入拓扑及其控制策略。然而,光伏与储能系统所产生的电压形式多样,电压制式各异,在部分应用场景中,现有接入架构与实际工程需求之间存在不匹配的问题,因此,亟需研发能够灵活适应多种电压制式接入牵引供电系统的关键设备。基于现有典型应用场景下的研究成果,本文提出一种多制式电能协同调度器,可同时兼容低压直流与高压交流接入牵引供电系统,并在提升并网电流电能质量与优化能源消纳效率方面具有显著优势。

1 光储接入架构及控制方案

铁路分布式光伏与储能系统通常将光伏发电系统集中铺设在车站周边建筑物屋顶(如站房、雨棚)以及物流基地、厂段等沿线闲置土地。目前,光伏与储能系统普遍采用1 000 V或1 500 V直流汇集电压等级,将其技术移植至铁路牵引供电系统时,需重点研究接入方式。当前,分布式光伏接入架构主要支持单一电压制式接入牵引网,依据接入端口的电压类型可分为低压直流端口接入与高压交流端口接入两种方案。

1.1 低压直流端口型光储接入方案

低压直流端口型光储接入方案是指将光伏发电系统产生的电能以低压直流形式汇集,经DC/AC变换后,通过升压变压器接入25 kV铁路牵引网。根据与牵引网接触点的不同,该方案可分为单相接入、两相接入、跨相接入及混合接入4种类型。

单相接入方式通过DC/DC变换器将分布式光伏电能汇集至低压直流母线^[9-10],再经变流器和升压变压器实现单相接入铁路供电系统。该方案适用于3类典型场景:接入400 V系统为沿线负荷供电、接入10 kV系统为沿线负荷供电,以及直接接入牵引网为列车供电。其优势在于充分利用车站周边闲置土地资源,构建分布式光伏系统,实现电能的近距离传输。光伏单相接入铁路牵引网的拓扑结构如图1(a)所示。

两相接入方式则将光伏电能通过DC/DC变换器接入较高压直流母线^[11-12],再经背靠背变流器及变压器分别接入牵引网 α 相与 β 相。相较于单相接入,该方案通过建立公共直流母线,为两相之间提供功率交互通道,不仅提升了光伏消纳能力,还实现了 α/β 相间的功率融

通,有助于改善牵引供电系统的电能质量。该方案同样适于车站周边建设分布式光伏,进行近距离电能传输。光伏两相接入铁路牵引网的拓扑结构如图1(b)所示。

跨相接入方式通过DC/AC变流器跨接于牵引网 α 相与 β 相之间^[13-14],系统主要由单相逆变单元、无功补偿装置及光储系统构成。其中,逆变单元由多个单相逆变器并联组成,光储系统接入其直流侧,整体经多绕组变压器实现与牵引网的连接。该结构仅需一套逆变和变压器设备即可实现相间有功功率转移,有利于降低系统改造成本。然而,由于存在功率耦合问题,在传输有功功率的同时会产生无功功率,影响电能质量,因此需借助 α/β 相的无功补偿装置进行调节。光伏跨相接入铁路牵引网的拓扑结构如图1(c)、图1(d)所示。

混合接入方式是指光伏经低压直流母线汇集后,以单相和两相混合的形式接入牵引系统,其拓扑结构如图1(e)所示。该方案以约15 km为间隔设置光伏汇集点,经DC/DC变换升压至1 500 V,并接入直流母线,并在分区所、AT所、牵引变电所等多点接入牵引网^[15]。借助多点接入结构,该方案有利于改善牵引网电能质量、抑制负序电流及控制网压波动。尽管在一定程度上缩短了传输距离,但低压直流线路仍存在较大的传输损耗。此外,受牵引负荷间歇性及储能容量限制,光伏系统常难以持续运行于最大功率点,频繁的限功率运行可能影响组件寿命。

1.2 高压交流端口型光储接入方案

高压交流端口型光储接入方案主要面向铁路沿线带状分布式光伏的远距离、高功率接入需求。此类光伏系统通常铺设于铁路沿线边坡等闲置土地,资源开发潜力较大,但由于距离牵引变电所较远,传输距离长且功率等级较高,需兼顾电能的汇集效率与传输能力,传统的分布式光伏接入架构难以适用。根据交流端口是否并网,目前已有的接入方案可分为高压交流汇集和综合贯通线汇集两类,其拓扑结构分别如图2(a)、图2(b)所示^[15-16]。

综合贯通线汇集两相接入架构依托铁路既有10 kV综合贯通线,通过就近接入预装式变电站实现并网,具有以下4方面优势^[17]:一是降低传输损耗,利用贯通线作为传输通道,避免了低压长距离输电带来的损耗问题;二是节约投资成本,减少对新增变压器、输电线路及大容量变流设备的需求;三是提升光伏消纳能力与系统寿命,借助贯通线连接公共电网的接口,富余能量可返送电网,减少光伏系统限功率运行时间;四是增强牵引网电压稳定性,通过三相AC-单相AC变流器调节有功和无功功率,实现动态稳压、改善功率因数并抑制负序电流。

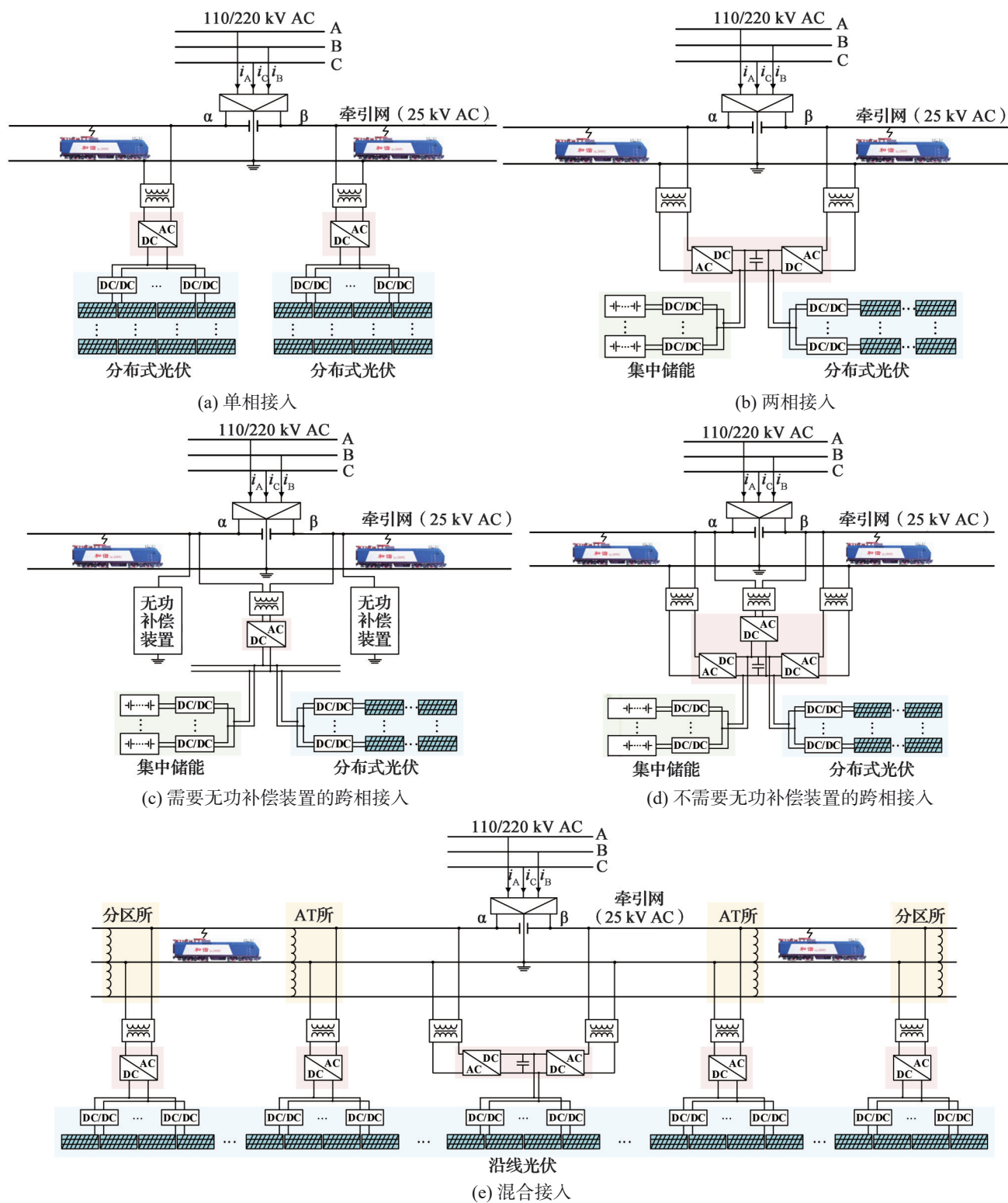


图 1 低压直流端口型接入架构图

Fig. 1 Architecture diagram of LV DC port access

2 多制式电能协同调度器基本原理

2.1 基本工作原理

多电制电能协同调度器结合前述两类接入方式的技术特点, 基于模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)实现多种电压制式(高压交流与低压直

流)接入牵引网的功能。其电路拓扑以 MMC 结构为核心, 可实现一个三相交流端口、两个单相交流端口以及多个直流端口之间的电能转换, 拓扑结构如图 3 所示。与牵引网 α 侧与 β 侧相连的变流器均采用单相 MMC 结构, 每个桥臂由 N 个普通子模块(submodule, SM)和桥臂电感构成, 经升压变压器及网侧电感分别接入 α 相和 β 相供电臂, 具备光储系统与牵引网之间的电

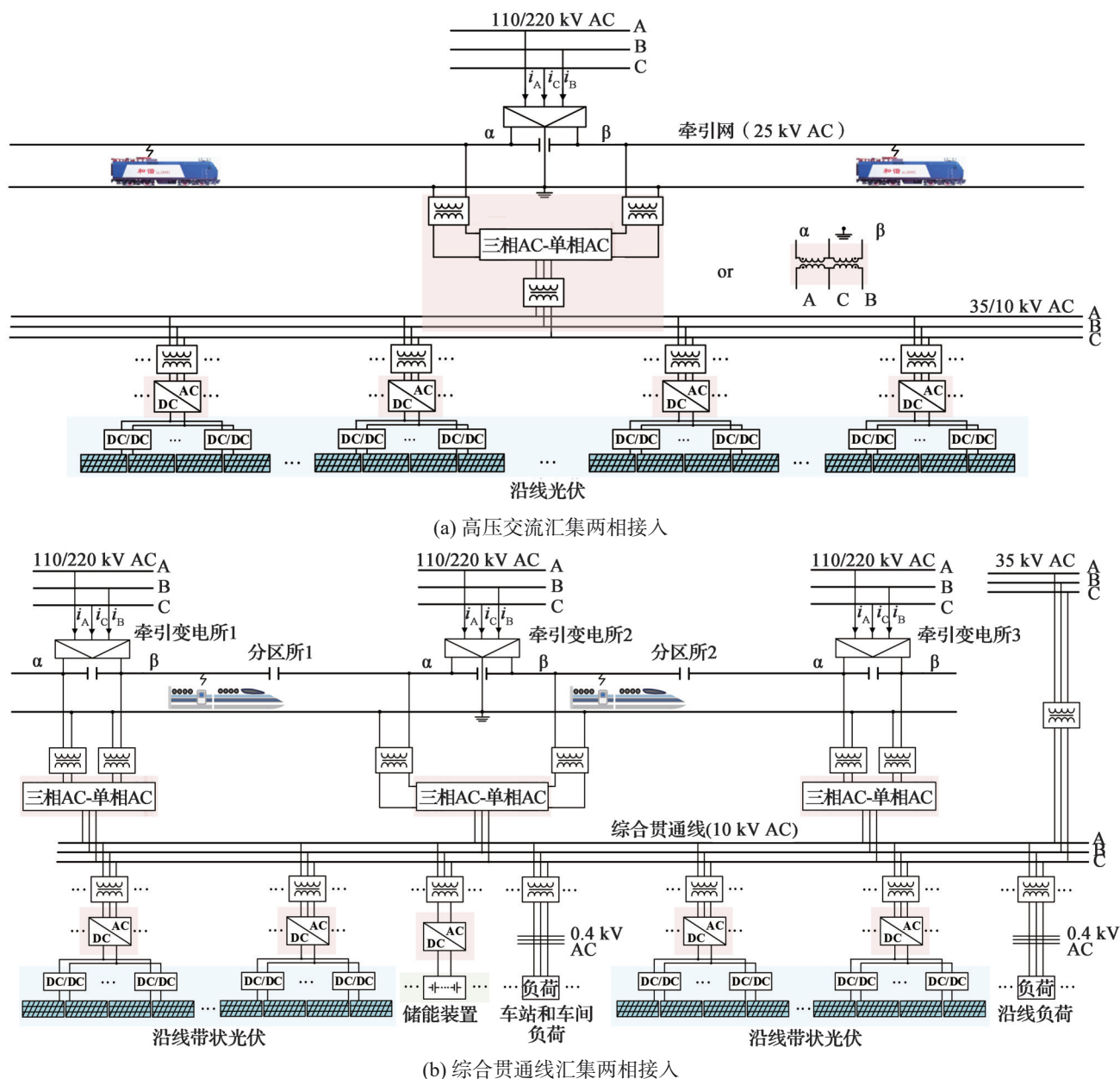


Fig. 2 Architecture diagram of high-voltage AC two-phase access

气隔离功能。三相侧MMC变流器采用三相结构，每个桥臂由 N 个储能子模块(energy storage submodule, ESM)和桥臂电感构成，无须变压器直接接入三相 10 kV 交流网。其中，SM 和 ESM 均基于半桥子模块拓扑，ESM 额外集成了 Boost 电路，用于实现低压直流端口与子模块电容之间的电能变换与功率调节。

2.1.1 MMC工作原理

以单相 MMC 为例, 正常稳定运行时, 各子模块工作于投入或切除两种状态。假设各子模块电容电压值恒定且平均值为 U_c , 设上桥臂投入的子模块数量为 $n_{\text{upper_on}}$, 下桥臂投入的子模块数量为 $n_{\text{lower_on}}$ 。当子模块投入时, 其输出电压为 U_c ; 当子模块切除时, 输出电压为 0, 因此, 仅投入状态的子模块对 MMC 直流侧电压有贡献, 忽略桥臂电感压降, 可得

$$U_{\text{dc}} = U_{\text{C}} (n_{\text{upper on}} + n_{\text{lower on}}) \quad (1)$$

式中: U_{dc} 为直流侧电压; U_C 为子模块电容电压平均值。

在MMC正常运行过程中,上、下桥臂投入的子模块数量 $n_{upper\ on}$ 和 $n_{lower\ on}$ 应满足如下关系:

$$n_{\text{upper on}} + n_{\text{lower on}} = n \quad (2)$$

式中: n 为 MMC 上/下桥臂子的子模块个数。

根据式(1)和式(2), 可推导出 U_c 与 U_{dc} 之间的关系如下:

$$U_C = \frac{U_{dc}}{n} \quad (3)$$

在任意时刻,上、下桥臂投入的子模块数量保持对称互补关系。通过改变上、下桥臂投入子模块数目,MMC交流侧可输出相应的电平值,如表1所示。其中, u_{u_n} 表示上桥臂输出电压, u_{l_n} 表示下桥臂输出电压, u_n

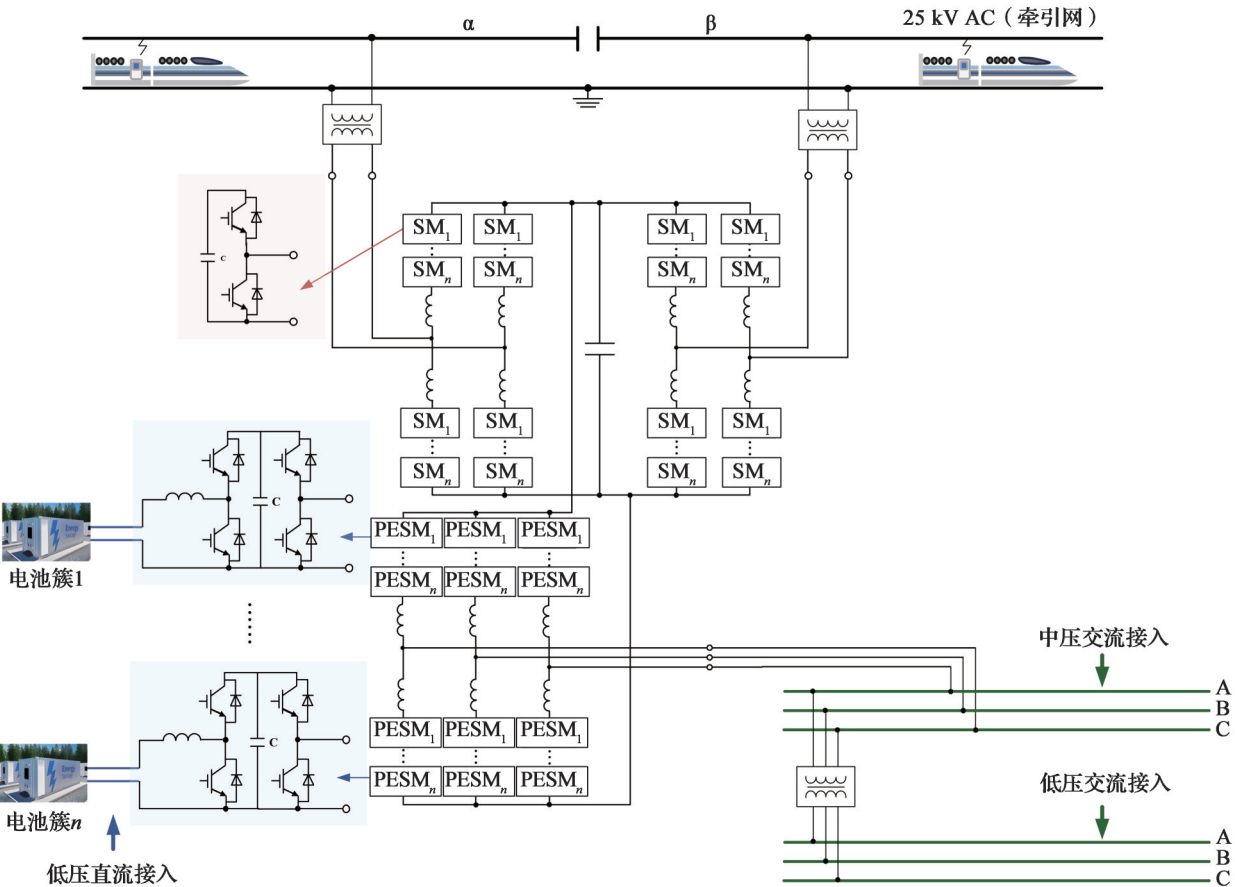


图 3 多制式电能协同调度器拓扑架构

Fig. 3 Topology of the multi-mode coordinated power scheduler

表示交流侧输出电压。采用适当的调制和控制策略，控制子模块在投入与切除两种状态之间转换，使单相 MMC 交流输出端产生 $n+1$ 电平的阶梯波电压，从而实现多电平逆变功能。

表 1 一相 MMC 桥臂子模块投入数量与交流侧输出电平对应关系

Table 1 Correlation between number of engaged submodules on bridge arms per MMC phase and AC-side output level

n_{upper_on}	n_{lower_on}	u_{ux}	u_{lx}	u_x
0	n	0	nU_c	$(n/2)U_c$
1	1	0	$(n-1)U_c$	$(n/2-1)U_c$
...	...	...	...	...
$n/2-1$	$n/2+1$	$(n/2-1)U_c$	$(n/2+1)U_c$	U_c
$n/2$	$n/2$	$n/2U_c$	$n/2U_c$	0
$n/2+1$	$n/2-1$	$(n/2+1)U_c$	$(n/2-1)U_c$	$-U_c$
...	...	...	...	...
$n-1$	1	$(n-1)U_c$	U_c	$-(n/2-1)U_c$
n	0	nU_c	0	$-n/2U_c$

2.1.2 子模块接入 MMC 工作原理

在 SM 的基础上，通过集成储能单元和对应的 DC-DC 接口，可构成 ESM。ESM 主要由 SM、双向 DC-DC 变换器(由开关管 T_3 、 T_4 构成)以及电池储能单元构成，如图 4 所示。具体运行模式的划分如表 2 所示。其中，开关管 T_1 和 T_2 的开关状态决定了 SM 和 ESM 的 3 种工作模式：子模块电容 C 投入、切除、闭锁。开关管 T_3 、

T_4 的开关状态则控制双向 DC-DC 变换器的工作模式，进而实现电池储能的充放电管理：在 Buck 模式下，通过控制 T_3 的通断实现对储能模块的充电；在 Boost 模式下，通过控制 T_4 的通断实现储能模块的放电。

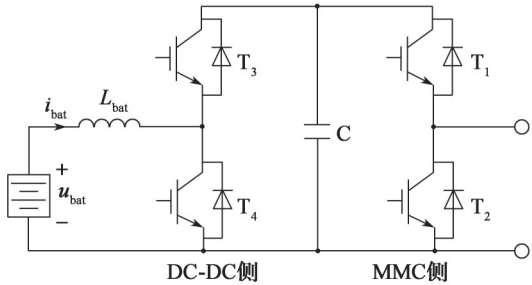


图 4 低压直流接入的多制式电能协同调度器子模块拓扑

Fig. 4 Topology of the multi-mode coordinated power scheduler sub-module for low-voltage DC access

表 2 储能双向 DC-DC 变换器工作模式

Table 2 Operating mechanism of energy storage bidirectional DC-DC converter

工作模式	储能电池状态	T_3	T_4
Boost	放电	0，二极管续流	PWM
Buck	充电	PWM	0，二极管续流

2.2 多制式电能协同调度器控制策略

多制式电能协同调度器的变流器层控制主要包含 α 侧单相 MMC 控制、 β 侧单相 MMC 控制、三相 MMC 控

制以及各子模块储能单元的充放电控制4个部分。

MMC本体控制策略包括电流电压闭环控制、子模块电容电压均衡控制以及环流抑制等环节, 整体控制框图如图5所示, 图5(a)为子模块电容电压均衡控制与环流抑制控制模块, 图5(b)~图5(d)分别为单相MMC与三相MMC的控制框图, 图5(e)为载波移相PWM调制模块。

MMC变换器采用载波移相调制策略, 令 α 侧单相变换器作为主变换器, 负责稳定直流母线电压, 采用电压电流双闭环控制; β 侧单相变换器和三相变换器作为从变换器, 采用电流单环控制。在此基础上, 为确保子模块电容电压稳定, 引入相平衡控制和子模块间平衡控制; 同时为抑制桥臂环流, 提高输出波形质量, 增加环流抑制策略。具体控制策略分述如下。

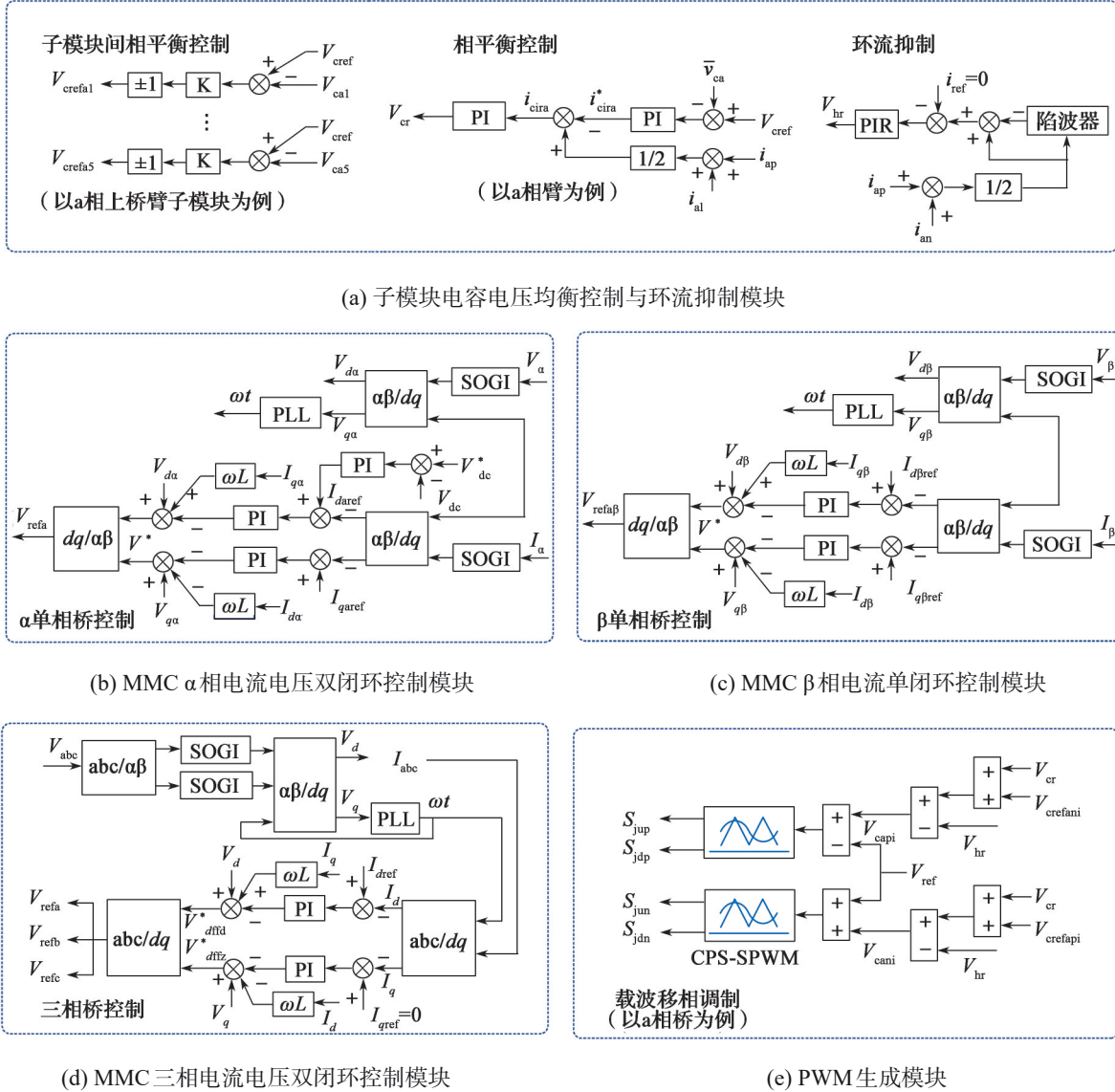


图5 多制式电能协同调度器控制策略框图

Fig. 5 Block diagram of control strategy for the multi-mode coordinated power scheduler

2.2.1 单相MMC闭环控制策略

在所述系统中, α 侧单相变换器作为主变换器, 采用电压、电流双闭环控制策略实现中间直流母线电压稳定; β 侧单相变换器作为从变换器, 采用电流单闭环控制。

以单相MMC整流运行为例, 为实现对系统的有效控制, 需将静止坐标系下的交流量通过构造虚拟正交信号变换至两相旋转 dq 坐标轴下, 从而获得对应的直流分量, 具体表达如式(4)所示。将变换后的 dq 轴分量

与给定值进行比较, 经反变换后生成调制信号。该控制过程的核心在于解决 dq 轴电流之间的耦合问题, 为此引入PI控制器进行解耦控制, 以消除稳态误差, 并精确获取电流指令值 i_{sd}^* 和 i_{sq}^* , 进而实现对直流母线电压与交流电流的精准控制。单相MMC电流内环控制器的控制框图如图5(b)、图5(c)所示。

$$\left. \begin{aligned} e_d^* &= u_{sd} + 2\omega L_s i_{sq} + (k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s})(i_{sd}^* - i_{sd}) \\ e_q^* &= u_{sq} - 2\omega L_s i_{sd} + (k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s})(i_{sq}^* - i_{sq}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: e_d^* 、 e_q^* 分别为单相MMC在旋转 dq 坐标系下的 d 轴和 q 轴调制电压指令; u_{sd} 、 u_{sq} 分别为交流侧电压的 d 轴和 q 轴前馈分量; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为交流侧实际电流的 d 轴和 q 轴分量; i_{sd}^* 、 i_{sq}^* 为其对应的电流指令值; ω 为交流系统基波角频率; L_s 为交流侧等效电感; k_{ip} 、 k_{ii} 分别为电流内环PI控制器的比例增益与积分增益; s 为拉普拉斯算子。

在此基础上,进一步设计电压外环控制策略。将直流电压给定值与实际直流电压进行比较,所得偏差经PI调节器后生成 d 轴电流的给定值 i_{sd}^* ,从而构成完整的电压电流双闭环控制器。

2.2.2 三相MMC闭环控制策略

三相MMC作为从变换器,同样采用电流单闭环控制。与单相MMC不同,三相MMC无须构建虚拟正交分量,可直接通过坐标变换将静止坐标系下的交流量转换至旋转 dq 坐标系下的直流量,进而建立其数学模型。基于该数学模型,可推导出相应的电流控制环。电流环PI控制器的设计如式(5)所示,对应的控制框图如图5(d)所示。

$$\begin{cases} e_d = u_{sd} + \omega L_{eq} i_{sq} - R_{eq} i_{sd} - G_i(s)(i_{sdref} - i_{sd}) \\ e_q = u_{sq} - \omega L_{eq} i_{sd} - R_{eq} i_{sq} - G_i(s)(i_{sqref} - i_{sq}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: e_d 、 e_q 分别为三相MMC换流器输出电压在旋转 dq 坐标系下的 d 轴和 q 轴分量; u_{sd} 、 u_{sq} 分别为三相交流网侧电压的 d 轴和 q 轴分量; i_{sd} 、 i_{sq} 分别为交流侧实际电流的 d 轴和 q 轴分量; i_{sdref} 、 i_{sqref} 分别为 i_{sd} 、 i_{sq} 对应的电流指令值; L_{eq} 、 R_{eq} 分别为交流回路的等效电感和等效电阻; $G_i(s)$ 为电流环调节器的传递函数。

2.2.3 子模块电容电压均衡控制策略

MMC子模块的频繁投切会导致其电容反复充电,使得电压偏离参考值且各模块间不平衡,从而增加开关器件的电流应力,威胁系统安全运行;同时,内部环流会进一步加剧桥臂电流畸变与电容电压波动,为此需采取协同控制策略解决子模块电容电压的均衡问题。引入能量均分控制,使各子模块电容电压均值跟踪设定参考值,实现能量在模块间的均匀分配;电压环比例调节器则实时跟踪电容电压参考值,输出平衡调节量。将该均衡控制策略与前述电压电流闭环控制及调制策略相结合,如图5(e)所示,通过调制波与三角载波比较生成PWM信号,控制子模块投切,最终输出稳定的桥臂电压。

2.2.4 环流抑制策略

环流抑制是MMC技术中的关键问题之一。在各相桥臂中,除负载电流外,还存在一定量的环流,环流不仅会加剧子模块电容电压的波动,影响输出波形质量,还会导致桥臂电流畸变、电流幅值增大,进而增加功率开关管的电流应力与开关损耗。在非理想情况下,各相桥臂内部的环流主要由直流分量和二倍频分

量叠加构成。假设直流分量在三相中均匀分配,则可推导出各相环流的表达式,如式(6)所示。

$$\begin{cases} i_{cira}(t) = \frac{i_{dc}}{3} + I_{2f} \sin(2\omega t + \varphi) \\ i_{cirb}(t) = \frac{i_{dc}}{3} + I_{2f} \sin\left[2\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi\right] \\ i_{circ}(t) = \frac{i_{dc}}{3} + I_{2f} \sin\left[2\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi\right] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i_{cira}(t)$ 、 $i_{cirb}(t)$ 、 $i_{circ}(t)$ 分别为三相MMC各相的内部环流瞬时值; i_{dc} 为MMC直流侧总电流; I_{2f} 、 φ 分别为环流中二倍频交流分量的幅值和初相角。

除直流分量外,环流中主要成分为二倍频分量,需进行抑制。采用陷波器检测MMC桥臂环流中的二倍频分量后,通过滤除该分量获得直流分量,再将环流减去直流分量即可得到待抑制的二倍频环流分量。引入PIR控制器对该分量进行无静差调节,生成环流抑制补偿电压,从而有效抑制二倍频环流。交流侧环流抑制策略的控制框图如图5(a)所示,相关控制量被整合至MMC协同控制体系中。

2.2.5 储能充放电控制策略

储能充放电控制采用恒功率模式,其功率参考值由顶层功率调度与储能SOC均衡控制共同生成。SOC均衡控制包括相间均衡、桥臂间均衡和子模块间均衡三个层级。为避免影响电池总功率输出,各层级均基于SOC偏差采用纯比例控制器计算功率修正量,其中相间均衡产生的功率修正量为 ΔP_k ,桥臂间均衡产生的功率修正量为 ΔP_{kj} ,子模块间均衡产生的功率修正量为 ΔP_{kji} ,SOC分层均衡控制框图如图6所示,其中 α 、 β 、 γ 为功率均衡系数。为满足均衡速度“相间>桥臂间>子模块间”的要求,均衡系数 α 一般按照 β 的4倍设计。储能恒功率充放电控制策略如图7所示。

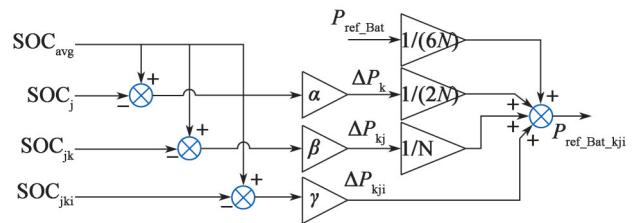


图6 相间、桥臂间、子模块间SOC均衡控制策略框图

Fig. 6 Block diagram of control strategy for phase-to-phase, arm-to-arm and submodule-to-submodule SOC balancing

3 仿真实验

本文基于MATLAB/Simulink平台搭建了系统仿真模型,如图8所示。仿真参数依据工程实际元器件选型

与控制算法进行设置, 具体数值如表3所示。

表3 仿真参数

参数	数值
单相变压器变比	27.5/10
三相输入电压/kV	10.5
桥臂子模块数	18
直流侧电压/kV	18
$\alpha/\beta/\gamma$ 侧变流器子模块电容/mF	2
$\alpha/\beta/\gamma$ 侧变流器桥臂电感/mH	6
γ 侧变流器滤波电感/mH	1
载波频率/Hz	3 333

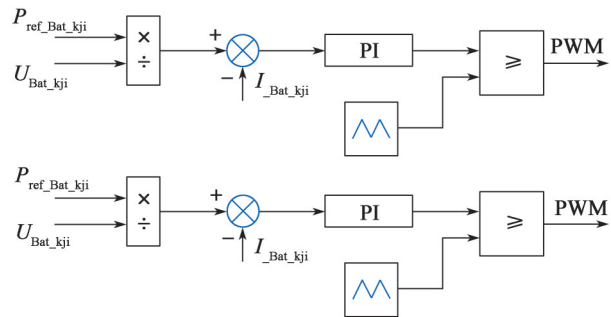


图7 恒功率充放电控制策略框图

Fig. 7 Block diagram of control strategy for constant-power charging and discharging

牵引负荷采用阻感负载进行模拟, 系统额定功率为1 MW, 仿真结果如图9所示。结果表明, 多制式电能协同调度器可实现高压交流、低压直流与牵引网 α/β 相交流之间的电能转换。当调度器工作于1 MW交流电能转换时, 牵引网 α 相、 β 相电流THD分别为1.34%、1.58%, 三相电流THD为1.47%; 当调度器工作于1 MW直流电能转换时, 三相电流THD为3.52%, 牵引网 α 相与 β 相电流THD不受影响。

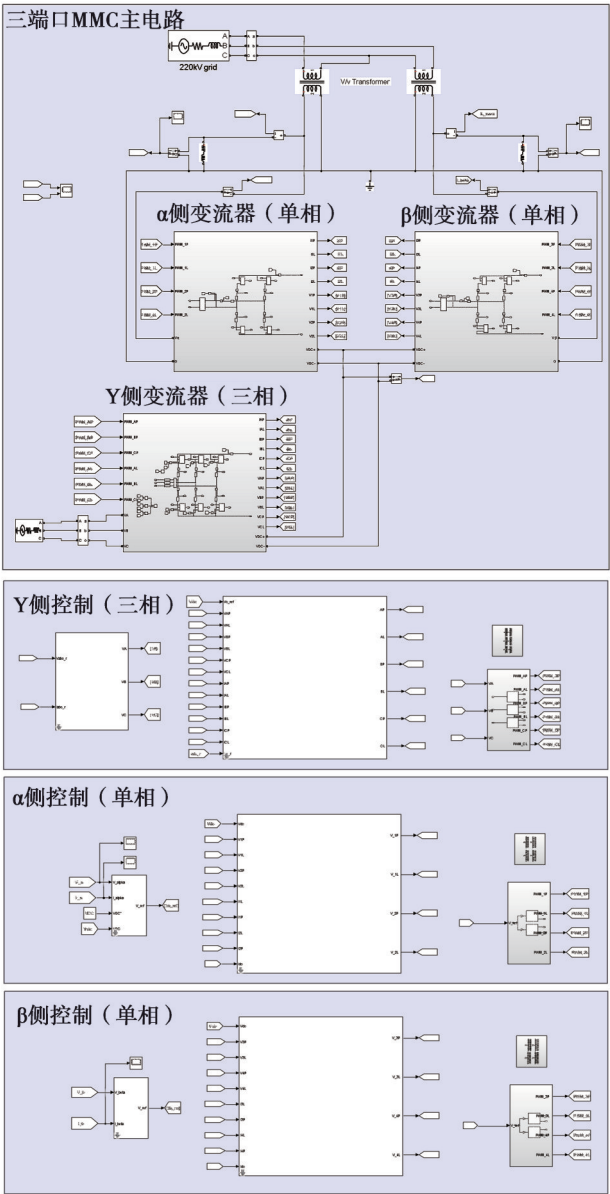
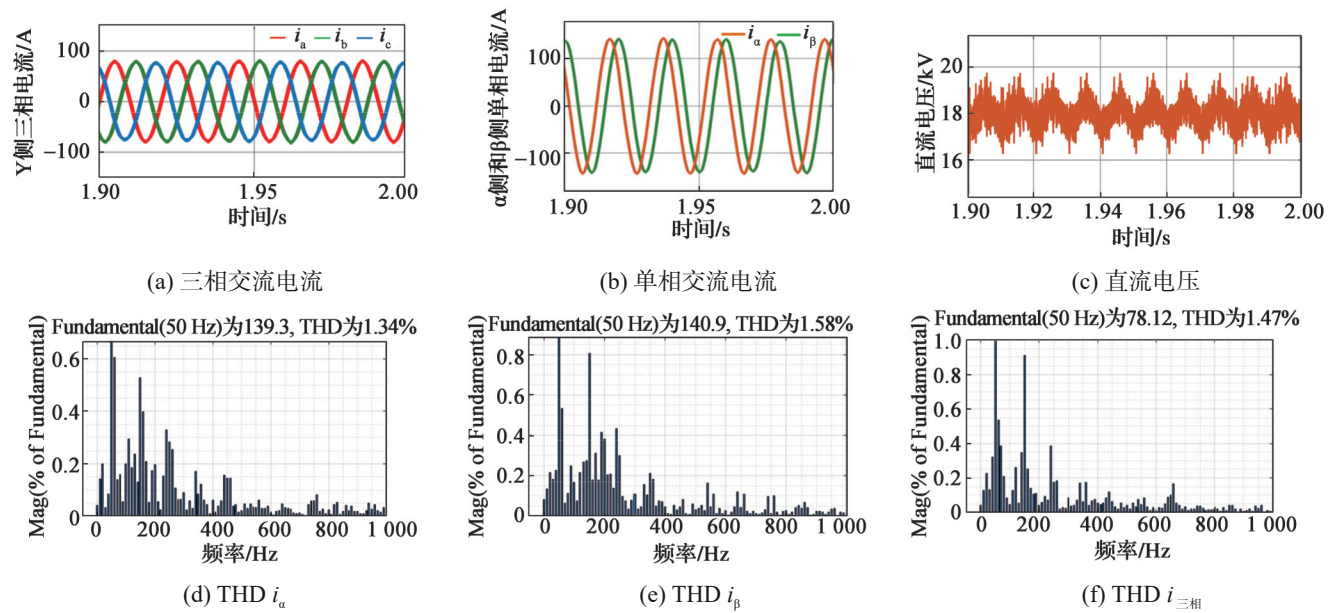


图8 仿真示意图

Fig. 8 Simulation diagram



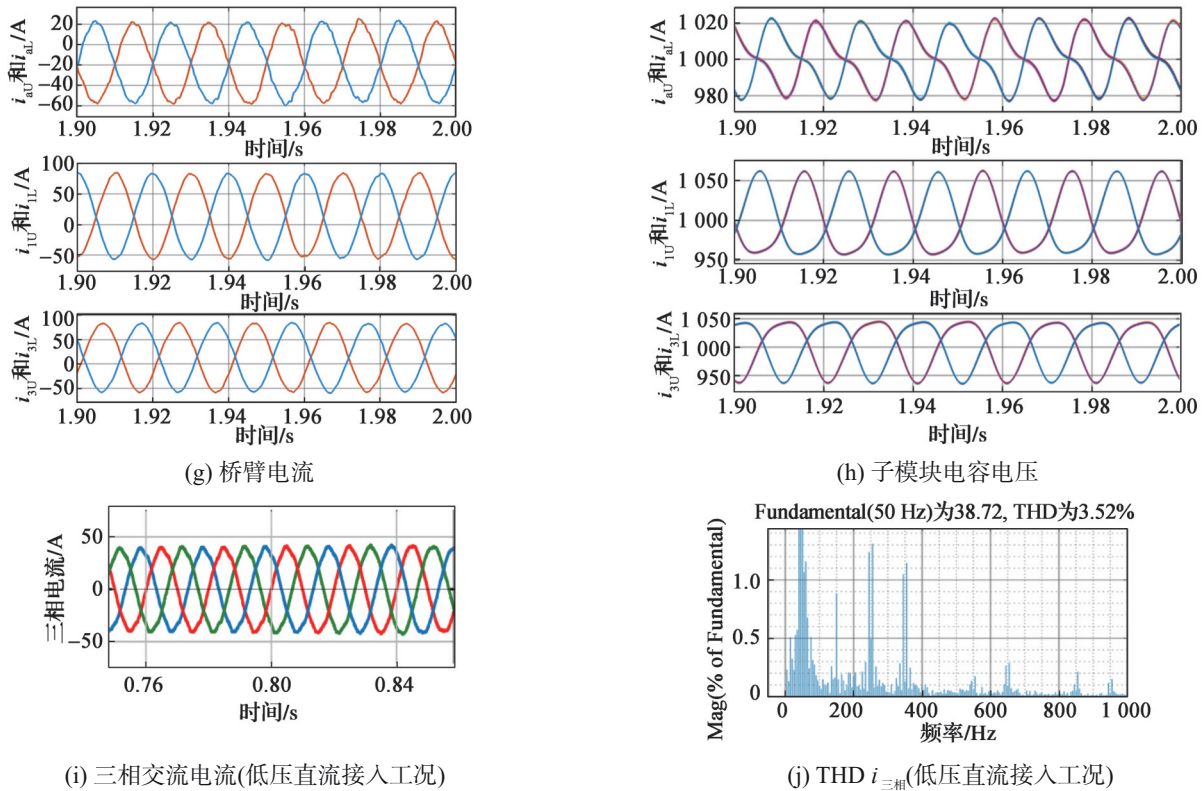


图9 仿真波形图

Fig. 9 Simulation waveforms

4 结论

本文围绕轨道交通与新能源融合的发展需求,以牵引供电系统低碳化为目标,提出一种适用于多电压制式的电能协同调度器,实现多制式电能的高效互联与灵活调控。主要结论如下:

①系统归纳了现有光储接入铁路供电系统的主要架构,依据端口电压制式差异进行分类,对比分析接入方案的适用场景与技术特点。研究表明,通过“网-源-储-车”协同运行与多能互补能量调度策略,可显著提升系统运行效能与供电弹性,为牵引供电系统低碳转型、保障能源安全及“双碳”目标实现提供重要技术路径。

②仿真结果验证了所提分层控制策略在多制式电能协同调度中的有效性。研究表明,该调度器通过多端口功率平衡机制,实现了低压直流与高压交流能源的功率双向可控流动。在1 MW工况下,牵引网侧并网电流谐波含量得到有效抑制,在保障牵引网电能质量的同时,提升了系统对多源能量的协同利用效率。

面对全球气候治理与能源结构转型的新挑战,轨道交通与新能源深度融合已成为必然趋势。本研究提出的多电压协同技术路径与系统方案,可为构建绿色、弹性、可持续发展的交通能源体系提供理论支撑与工程参考。

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2024年统计公报[R/OL]. (2025-02-28) [2025-05-21]. http://www.china-railway.com.cn/xwzx/zhxw/202503/t20250305_143296.html.
Ministry of development and reform. China national railway group corporation 2024 statistical bulletin[R/OL]. (2025-02-28) [2025-05-21]. http://www.china-railway.com.cn/xwzx/zhxw/202503/t20250305_143296.html.
- [2] 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.
- [3] 林锦杰, 李勇, 胡斯佳, 等. 计及再生制动能量的铁路潮流控制器功率柔性分配方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6121-6132.
LIN Jinjie, LI Yong, HU Sijia, et al. Flexible power assignment method for railway power flow controller considering regenerative braking energy[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2023, 38(22): 6121-6132.
- [4] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣. 轨道交通能源互联网背景下光伏在交/直流牵引供电系统中的应用及关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5692-5702.

- DENG Wenli, DAI Chaohua, CHEN Weirong. Application of PV generation in AC/DC traction power supply system and the key problem analysis under the background of rail transit energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5692-5702.
- [5] 陈维荣, 王璇, 李奇, 等. 光伏电站接入轨道交通牵引供电系统发展现状综述[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3663-3670.
- CHEN Weirong, WANG Xuan, LI Qi, et al. Review on the development status of PV power station accessing to traction power supply system for rail transit[J]. Power system technology, 2019, 43(10): 3663-3670.
- [6] CHEN J Y, HU H T, WANG M H, et al. Power flow control-based regenerative braking energy utilization in AC electrified railways: review and future trends[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2024, 25(7): 6345-6365.
- [7] HAYASHIYA H, IINO Y, TAKAHASHI H, et al. Review of regenerative energy utilization in traction power supply system in Japan: applications of energy storage systems in D. C. traction power supply system[C]//IEEE. IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing: IEEE, 2017: 3918-3923.
- [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] MAYER O, LYNASS M, GÓMEZ M, et al. Design aspects for high voltage MW PV systems for railway power supply [C]//29th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Amsterdam, 2014: 2876-2879.
- [10] 李欣, 卢景涛, 黄文勋. 绿电牵引场景下高速铁路长大坡道混合储能系统容量优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(10): 3865-3876.
- LI Xin, LU Jingtao, HUANG Wenxun. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system for long steep slope of high-speed railway under green electric traction scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(10): 3865-3876.
- [11] 高锋阳, 宋志翔, 高建宁, 等. 计及光伏和储能接入的牵引供电系统能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 745-757.
- GAO Fengyang, SONG Zhixiang, GAO Jianning, et al. Energy management strategies for traction power systems with PV and energy storage access[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2024, 39(3): 745-757.
- [12] 陈维荣, 王小雨, 韩莹, 等. 基于RPC的光储接入牵引供电系统协调控制方法[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(1): 1-10.
- CHEN Weirong, WANG Xiaoyu, HAN Ying, et al. Coordinated control method of photovoltaic and battery system connected to traction power supply system based on railway power conditioner[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2024, 59(1): 1-10.
- [13] 廉静如, 戴朝华, 姚志刚, 等. 基于跨相式单相逆变器的牵引供电光伏储能系统多层解耦控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(4): 1477-1487.
- LIAN Jingru, DAI Chaohua, YAO Zhigang, et al. Multi-layer optimal control strategy for traction photovoltaic and energy storage system based on interphase bridging inverter-railway energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1477-1487.
- [14] 廉静如, 戴朝华, 姚志刚, 等. 基于跨相式-背靠背混合结构的铁路牵引光伏储能系统及其优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(9): 3519-3529.
- LIAN Jingru, DAI Chaohua, YAO Zhigang, et al. Railway traction photovoltaic energy storage system based on a hybrid structure of interphase-bridging and back-to-back inverters and its optimization control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(9): 3519-3529.
- [15] 高艺宁, 胡海涛, 葛银波, 等. 电气化铁路沿线光伏分布式并网方案及其电气特性研究[J]. 电工技术学报, 2025, 40(21): 7062-7075.
- GAO Yining, HU Haitao, GE Yinbo, et al. Research on distributed photovoltaic integration scheme along electrified railways and its electrical characteristics[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2025, 40(21): 7062-7075.
- [16] CHENG P, KONG H W, WU C, et al. Integrated configuration and control strategy for PV generation in railway traction power supply systems[J]. CSEE journal of power and energy systems, 2022, 8(6): 1603-1612.
- [17] FAN Y Q, LI Y, WEI F Y, et al. Research on the integration of strip PV along the electrified railways into AC traction substation[C]//IEEE. 2025 IEEE 16th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Nanjing: IEEE, 2025: 1-6.

Research on multi-mode coordinated power scheduler for PV-storage integrated railway traction power supply systems

BI Jingbin¹, WEI Fangyi², LI Yan², FANG Xiaochun²

(1. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266114, China;

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

Abstract: To promote low-carbon development of railway traction power supply and maximize utilization of renewable energy resources along railway routes and regenerative braking energy, this paper proposes a coordinated power scheduler topology for railway traction power supply systems with multi-mode integration. The aim is to achieve efficient and coordinated scheduling of electric energy supplied in different modes. First, this paper summarizes existing architectures for integrating photovoltaic (PV) – storage facilities into railway traction power supply systems. These architectures are categorized based on voltage standards at access ports, and compared from the perspectives of application characteristics and scenarios. Next, the operating mechanisms of the proposed multi-mode coordinated power scheduler are detailed, focusing on a multi-port power balancing mechanism and hierarchical control strategy, which enable flexible interconnection of AC/DC hybrid energy sources. Finally, based on the design parameters of a 1 MW prototype, simulations were carried out using MATLAB. Results demonstrate that the coordinated power scheduler support both low-voltage DC and high-voltage AC connections to traction power supply systems, and maintains total harmonic distortion (THD) of the connected traction networks below 3%, significantly enhancing power quality and energy consumption efficiency.

Keywords: railway traction power supply system; photovoltaic (PV); energy storage; multilevel converter; topology