



电气化铁路“源-网-车-储”协同供能系统 多源能量调度策略研究

王 跃, 陈 欣, 梅文庆, 胡 亮, 付 刚, 张志学
(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 在“源-网-储-车”一体化供电技术加快推进的背景下, 牵引供电系统在桥臂功率不均、再生能源吸收不足及新能源就地消纳等方面面临突出问题。文章提出一种面向牵引变电所的多源融合能量调度策略, 构建以桥臂功率动态平衡为核心目标的能量流动机制。该策略基于供电臂实时功率状态, 结合光伏发电出力与储能装置充放电能力, 动态调节能量调度装置 (energy dispatching equipment, EDE)、光伏及储能功率输出, 实现桥臂间有功能量的协调流动与均衡分配, 提升系统供电稳定性与能源利用效率。在保障桥臂运行对称的基础上, 进一步利用装置容量冗余, 融合无功实时支撑与主动谐波抑制功能, 提升系统电能质量与供电可靠性。最后通过在某变电所的试验验证表明, 该策略可有效改善桥臂功率分布与供电质量, 提升新能源利用率与再生能源回馈能力, 具备良好的工程应用价值。

关键词: 牵引供电系统; 源-网-车-储; 桥臂功率平衡; 无功补偿; 谐波抑制

中图分类号: U223.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)06-0034-08

0 引言

随着我国轨道交通的快速发展, 牵引供电系统所承载的能源消耗持续增长。据统计, 截至2024年底, 轨道交通年总电能消耗约为1 200亿kW·h, 其中占比约2/3的牵引用电全部依赖公用电网。牵引负荷的高度集中性和动态波动性不仅加剧了对电网运行安全性的冲击, 也使得轨道交通系统在国家“双碳”目标下面临较大的能耗与碳排放压力。

为加快牵引供电系统电源侧绿色转型, 在政策驱动与行业诉求的共同作用下, 推广“源-网-车-储”一体化新型供电技术, 推动新能源接入、再生制动能量就地吸收、储能技术在牵引网中的落地应用更加迫在眉睫。研究适应轨道交通牵引供电特点的新能源接入方式与多源协同调度机制, 已成为实现铁路系统节能降碳与智能运行的关键技术方向^[1]。

已有大量的研究围绕该领域展开了系统探索, 文献[2]系统地总结了轨道交通“网-源-储-车”协同供能系统的架构特征、评估优化、安全运维及协同运行等关键技术, 阐述了协同供能系统的技术组成体系, 为工程实践提供相应参考。

文献[3]研究了一种基于列车负荷与新能源发电预测数据的日前能量优化与调度策略, 能够有效发挥系统的灵活性, 进一步降低牵引变电所的单日运行成本, 提升系统的再生制动能量和新能源消纳能力。文献[4]提出一种铁路友好体系(铁电友好, 网源友好, 车网友好, 自我友好)以协同推进交通领域的低碳转型。文献[5]提出了一种适用于既有分相供电电气化铁路的“源-网-车-储”一体化供电系统结构与运行控制策略, 并基于搭建的仿真模型, 验证了所提方案的有效性。文献[6]研究了“源-网-车-储”一体化协同控制方法, 提出了多目标优化控制模型, 并结合实测负荷数据搭建了仿真模型, 通过算例仿真分析验证了方案的有效

基金项目: 湖南省科技创新计划项目(2023RC3242)

通信作者: 王 跃, 男, 正高级工程师, 博士, 主要研究方向为大功率牵引传动控制, 新能源发电、并网控制; E-mail: wangyue6@csrzc.com

引用格式: 王跃, 陈欣, 梅文庆, 等. 电气化铁路“源-网-车-储”协同供能系统多源能量调度策略研究[J]. 机车电传动, 2025(6): 34-41. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.004.

Citation: WANG Yue, CHEN Xin, MEI Wenqing, et al. Multi-source energy dispatching strategy for "source-network-train-storage" coordinated power supply on electrified railways[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 34-41. DOI: 10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.004.

性。文献[7]提出基于“规则+优化”的电气化铁路站点实时能量管控策略, 可实现新能源就地消纳与再生制动能量高效利用。

在现有电气化铁路牵引供电系统中, 牵引变电所普遍采用 Vv 或 Scott 接线形式的牵引变压器。这类传统连接结构尽管具备工程成熟性, 但在应对复杂牵引负荷特性方面仍存在诸多不足。一方面, 受单相牵引负荷的不对称性影响, 系统易产生较大的负序电流与电压不平衡问题, 影响上级电网的电能质量; 另一方面, 由于两侧供电臂负荷波动剧烈, 供电不均现象普遍存在, 牵引变压器整体容量利用率较低。上述问题在列车密集运行、高比例再生制动能量回馈或新能源接入场景下更为突出, 已成为制约牵引供电系统能效提升与绿色化转型的关键。

针对上述问题, 本文基于“源-网-车-储”协同供电框架, 提出一种以平衡供电为核心目标的多源能量调度策略, 融合光伏、储能与能量调度装置, 实现有

功率在供电臂-光伏-储能之间的动态流动, 缓解供电臂之间供电不均、提升变压器利用效率, 并进一步支撑再生能量的就地消纳与系统电能质量的综合优化。

1 系统组成及主要功能

1.1 系统组成

为实现供电臂功率动态平衡、再生能量高效吸收以及新能源高效接入, 本文采用如图1所示的“源-网-车-储”协同供电系统架构。该架构是一种交流-直流互联架构, 新能源单元与储能单元首先接入同一直流母线, 再经并网变流器统一并入牵引网。并网变流器既可用于优化系统潮流并平衡两臂负荷, 又可用于改善系统中的负序、谐波等电能质量问题^[8]。

本节重点介绍系统中的电能变换装置: EDE 能量调度装置、储能装置与光伏装置。

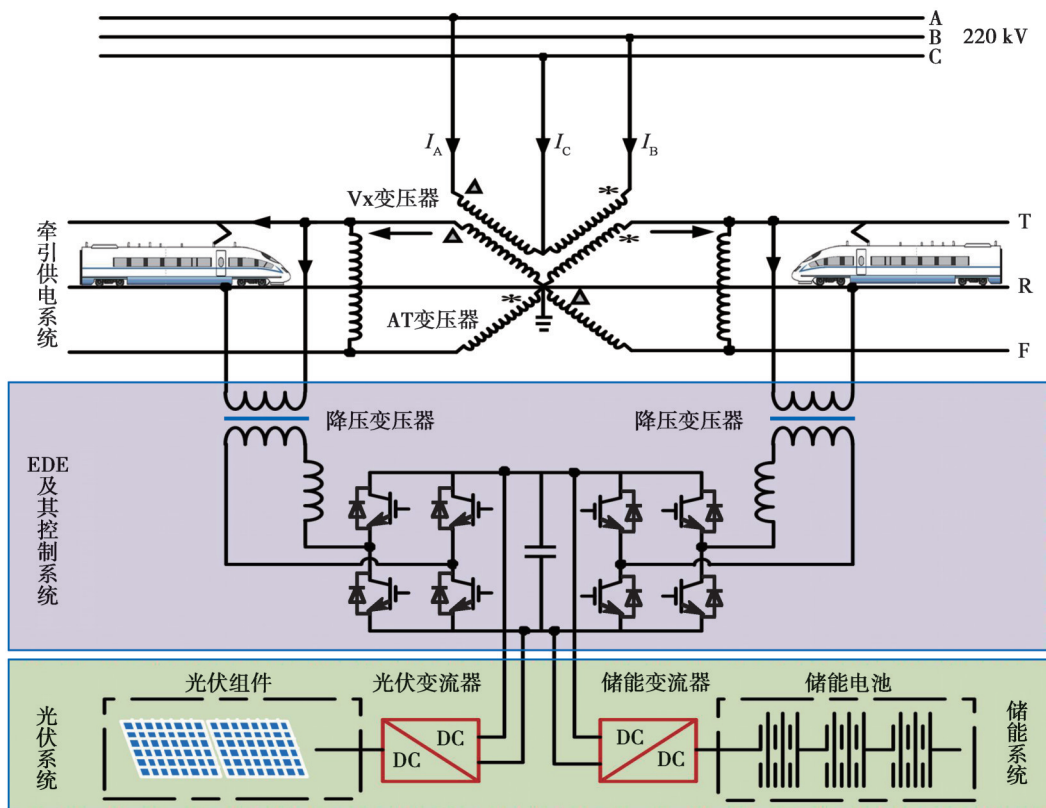


图1 “源-网-车-储”协同供电系统架构图

Fig. 1 Architecture of "source-network-train-storage" coordinated power supply system

EDE 能量调度装置: 装置由多重化的交-直-交拓扑变流器构成, 变流器可实现能量双向流动、功率因数可控和直流稳压等功能^[9]; 装置作为“源-网-车-储”协同供电系统能源枢纽, 为光伏装置和储能装置提供直流端口, 为装置两侧牵引供电臂提供能量交互通道, 实现多个环节间的能量交互, 完成功率融通及电能质量综合治理功能。

储能装置: 装置主要由储能 DC/DC 变流器和储能

电池构成, 储能变流器输入端接 EDE 变流器中间直流环节, 输出端接储能电池。其功能是将新能源发电或列车再生制动能量存储到储能介质中, 待列车牵引时将储存的能量释放到牵引网供列车使用, 以应对牵引负荷与光伏出力的时空不匹配问题, 提升系统再生制动能量利用率与新能源消纳水平。

光伏装置: 主要由 DC/DC 变流器和光伏组件构成, 光伏变流器输入端接光伏组件, 输出端接 EDE 变流器

中间直流环节。其功能是将铁路沿线光伏阵列的电能转化为直流电，然后集中通过 EDE 装置的中间直流端口注入牵引网，实现牵引供电系统的绿色供能，提升系统的新能源就地消纳能力。

由 EDE 能量调度装置、储能装置、光伏装置构建共直流母线的“源-网-车-储”协同供电系统架构，在实现储能、新能源可靠及高效接入的同时，兼顾牵引供电系统的电能质量治理及供电品质提升，形成多目标变电所协同供电系统。

1.2 主要功能

在上述系统结构基础上，为实现供电臂功率平衡运行、再生能量充分利用与新能源就地消纳等多目标运行需求，本文构建了一种融合供电臂平衡供电控制、无功补偿调节及主动谐波抑制策略的多源融合的功能体系，如表 1 所示。具体分析如下：

①平衡供电功率功能：根据供电臂功率状态，结合光伏出力和储能系统状态，动态调节能量调度装置、光伏与储能的功率流向，在供电臂之间构建功率流转路径，引导有功功率在光伏、储能及供电臂之间有序流动，从而实现牵引变压器两侧供电臂功率的动态均衡，再生能量充分利用，并促进新能源的就地消纳。

②无功动态补偿功能：在满足供电臂功率均衡与设备容量约束的前提下，实时检测牵引供电臂的无功功率需求，并分配剩余容量用于无功功率补偿，以提升电压支撑能力、降低线路功率因数波动，实现供电臂的电能质量双优化。

③网压谐波抑制功能：对牵引网电压信号进行采样与频谱分析，当检测到特征谐波与变频器的开关频率存在频率重叠或耦合风险时，主动避让谐波频带，降低变频器开关操作对牵引系统谐波影响从而降低谐波激励可能性，保障供电系统运行稳定性。

由以上三者共同构建的多源融合能量调度控制机制，不仅可以提升再生能量吸收与新能源利用能力，还能改善系统电能质量与供电品质，为变电所实现多目标协同运行提供技术支撑。

表 1 多源融合的功能体系

Table 1 Functional architecture for multi-source integration

功能	作用
平衡供电功能	实现两侧供电臂有功功率的动态均衡
无功实时补偿功能	提升供电臂的电能质量
网压谐波抑制功能	保障供电系统运行稳定性

2 多源能量调度及控制策略

本文所构建的多源能量调度策略是以平衡供电为核心，兼顾无功补偿和网压谐波抑制；首先实时检测

供电臂功率，综合光伏发电出力、储能系统的充放电能力与状态，以两供电臂功率平衡为目标规划各装置能量流路径，并计算各个运行目标所需的有功功率指令；然后结合 EDE 装置剩余容量，根据供电臂实际无功情况，以变电所无功功率等于 0 为目标，计算 EDE 装置所需的无功功率指令。对牵引网压进行频谱分析，结合各装置开关频率开展网压谐波治理风险评估，若存在风险则动态调整装置的开关频率，进行网压谐波主动抑制。

2.1 平衡供电控制

“源-网-车-储”供电系统中各环节间的有功功率关系如图 2 所示（忽略各个环节的损耗），通过公式可表示如下：

$$\left. \begin{aligned} P_{T\alpha} + P_{T\beta} &= P_{L\alpha} + P_{L\beta} - P_{PVES} \\ P_{PVES} &= P_{PV} + P_{ES} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $P_{T\alpha}$ 和 $P_{T\beta}$ 分别为牵引变压器二次侧 α 臂和 β 臂的输出功率，即电网输出功率； $P_{L\alpha}$ 和 $P_{L\beta}$ 分别为两端供电臂的负荷功率； P_{ES} 为储能装置充/放电功率，主要为存储的光伏发电功率与再生制动功率； P_{PV} 为光伏输出功率； P_{PVES} 为光储装置的输入/输出功率，由储能功率和光伏输出功率构成，是牵引供电系统与外部电网功率减少交互的部分。

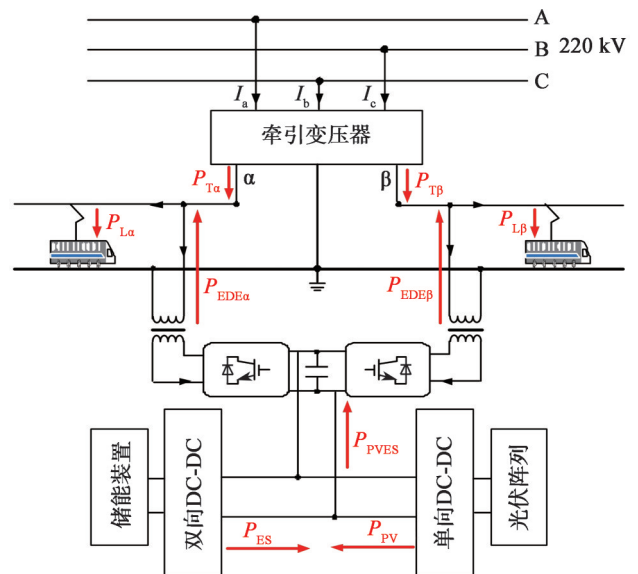


图 2 “源-网-车-储”供电系统中各环节的有功功率关系图

Fig. 2 Active power flow among components of "source-network-train-storage" power supply system

“源-网-车-储”供电系统中，光伏发电功率、再生制动功率、储能装置功率通过 EDE 装置转移利用，被线路负荷实时消纳。因此电网功率、牵引网的负荷功率、EDE 装置输出功率关系如下：

$$\left. \begin{aligned} P_{L\alpha} &= P_{T\alpha} + P_{EDE\alpha} \\ P_{L\beta} &= P_{T\beta} + P_{EDE\beta} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $P_{E\text{DE}\alpha}$ 和 $P_{E\text{DE}\beta}$ 分别为EDE装置两端的输出功率。

牵引网负荷功率由电网功率与EDE装置共同承担。通过特定的能量调度策略调节EDE装置的两端输出功率, 便可实现两牵引供电臂之间的有功功率融通、再生能量充分利用与新能源就地吸纳等, 为后续无功补偿提供调度空间。

以牵引变压器二次侧 α 臂和 β 臂输出功率相等为目标, 先进行供电臂之间功率融通, 在此基础上再利用新能源光伏、储能为牵引负荷供能。具体来说就是: 实时检测两臂功率大小与流动方向, 并划定重载侧与轻载侧, 在EDE两端口设定功率目标值, 通过EDE装置从轻载侧吸收能量并将其转移至重载侧, 同时根据光伏发电与储能系统的充放电能力, 以最大功率输出为目标平均分配光储装置在EDE两端口的功率, 以实现两供电臂平衡供电。因此牵引变压器两供电臂功率的动态均衡控制方法可通过公式表示如下:

$$\left. \begin{aligned} P_{T\alpha} &= P_{T\beta} \\ P_{E\text{DE}\alpha}^* &= P_{T\alpha} - \frac{P_{T\alpha} + P_{T\beta}}{2} - \frac{P_{P\text{VES}}}{2} \\ P_{E\text{DE}\beta}^* &= P_{T\beta} - \frac{P_{T\alpha} + P_{T\beta}}{2} - \frac{P_{P\text{VES}}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $P_{E\text{DE}\alpha}^*$ 和 $P_{E\text{DE}\beta}^*$ 分别为EDE装置两侧的输出有功功率目标值。

该目标值中既包含两供电臂之间需要转移的功率, 又包含光储装置需要吸收/释放的能量。控制的目标是根据两桥臂当前有功功率差值、光伏系统出力以及储能状态, 实时调整EDE装置两侧的有功功率目标指令。

$P_{P\text{VES}}$ 是光储装置的输入功率还是输出功率, 一方面取决于装置本身工作状态, 另一方面还由能量调度策略决定。将两供电臂牵引负荷作为一个整体, 在光储装置输出/输入情况下, 可分为牵引供电模式、回馈供电模式和空载模式。在牵引供电模式下, $P_{P\text{VES}}$ 应输出有功功率, 用于线路负荷实时消纳; 在回馈供电模式下, $P_{P\text{VES}}$ 应输入有功功率, 用于将线路多余的再生制动功率进行存储; 在空载模式下, $P_{P\text{VES}}$ 为0, 光储装置作为整体, 不对外输出功率。此外, 再生制动能量优先由线路上的牵引列车消纳, 制动能量仍有富余时则由储能单元进行存储, 如此可避免储能频繁充放电以及能量的浪费。

2.2 无功动态补偿控制策略

在供电臂功率动态平衡的基础上, 系统需进一步对两侧供电臂的无功功率进行识别与调节, 以提升电压支撑能力, 优化系统功率因数, 实现牵引供电系统的无功优化。

根据EDE装置两端容量及当前有功功率输出情况, 计算无功功率限值, 计算公式如式(4)。

$$\left. \begin{aligned} Q_{E\text{DE}\alpha\text{Limit}} &= \sqrt{S_E^2 - P_{E\text{DE}\alpha}^2} \\ Q_{E\text{DE}\beta\text{Limit}} &= \sqrt{S_E^2 - P_{E\text{DE}\beta}^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: S_E 为EDE装置单侧总容量; $Q_{E\text{DE}\alpha\text{Limit}}$ 和 $Q_{E\text{DE}\beta\text{Limit}}$ 分别为EDE装置两侧的无功功率输出最大值, 该值动态变化且受有功功率输出影响。

由于光储装置的存在, EDE装置输出侧的 $P_{E\text{DE}\alpha}^*$ 和 $P_{E\text{DE}\beta}^*$ 有功功率数值不相等, 造成EDE装置输出侧无功输出能力不同。因此, 无功补偿策略将变电所两个供电臂无功功率作为整体进行考虑, 先采集供电臂的无功功率, 以整体为零作为当前所需的补偿目标, 根据供电臂无功大小、无功功率限值等约束条件, EDE装置按照两侧由输出有功功率较轻一侧承担更多无功调节任务的原则, 设定EDE装置两侧应承担的无功调节目标值。因此, EDE装置输出无功功率的计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} Q_T &= Q_{T\alpha} + Q_{T\beta} \\ Q_{E\text{DE}\alpha}^* &= \min\{Q_{E\text{DE}\alpha\text{Limit}}, Q_T - Q_{E\text{DE}\beta\text{Limit}}\} \\ Q_{E\text{DE}\beta}^* &= \min\{Q_{E\text{DE}\beta\text{Limit}}, Q_T - Q_{E\text{DE}\alpha\text{Limit}}\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: Q_T 为变电所两供电臂输出的无功功率之和; $Q_{T\alpha}$ 、 $Q_{T\beta}$ 分别为 α 侧和 β 侧供电臂的无功功率; $Q_{E\text{DE}\alpha}^*$ 、 $Q_{E\text{DE}\beta}^*$ 分别为EDE装置两侧的输出无功功率目标值。

通过这样的无功补偿策略, 系统能够在不影响主有功调度的前提下, 最大化地利用装置的容量余量进行无功补偿, 提升电能质量水平。

2.3 网压谐波抑制策略

本策略的核心思路如图3所示。首先对牵引网电压 V_{S2} 进行实时在线采样, 滤除电压基波以获取谐波瞬时值并进一步计算谐波有效值; 然后针对频率进行自适应调整, 当谐波有效值超过阈值时, 对谐波进行FFT分析获取最大谐波数值对应的最大谐波频率 f_{hmax} , 并与EDE装置的变流器等效开关频率 f_s 对比, 若最大谐波频率小于系统等效开关频率, 则需进一步提升开关频率; 若最大谐波频率大于系统等效开关频率, 则需适当降低开关频率。动态调整装置的开关频率, 可避开谐波共振频段, 从源头上降低由频率耦合引发的谐波放大风险, 增强系统运行的稳定性。

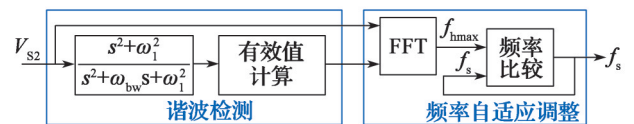


图3 网压谐波抑制策略框图

Fig. 3 Block diagram of network voltage harmonic suppression strategy

多源能量调度策略以牵引变压器供电臂功率状态为核心调度依据, 结合光伏发电功率、储能状态与装

置容量约束, 动态协调3类功率的输出路径, 实现多源联合运行下的功率分配与电能质量优化控制。

调度策略流程图如图4所示。基于实时采集的相关系统装置的电压、电流、储能荷电状态等模拟量数据, 根据多源能量调度策略进行相关计算。首先针对平衡供电功率, 结合供电臂功率状态、光伏功率、储能装置荷电状态计算出EDE装置 α 侧和 β 侧有功功率指令, 并结合对应电压计算出有功电流参考值 $i_{PEDE\alpha}^*$ 和 $i_{PEDE\beta}^*$; 然后根据EDE装置输出的有功功率指令, 计算出无功功率限制值, 并考虑实际线路无功功率情况计算出EDE装置 α 侧和 β 侧无功功率输出指令, 再结合对应电压计算出无功电流参考值 $i_{QEDE\alpha}^*$ 和 $i_{QEDE\beta}^*$; 最后是发挥网压谐波主动抑制功能, 实时采集装置两供电臂网压并计算网压谐波有效值 $u_{T\alpha HarRMS}$ 和 $u_{T\beta HarRMS}$, 当两供电臂网压谐波超过阈值 $u_{Threshold}$ 时, 动态调整对应供电臂的装置开关频率 $f_{EDE\alpha}$ 和 $f_{EDE\beta}$ 。

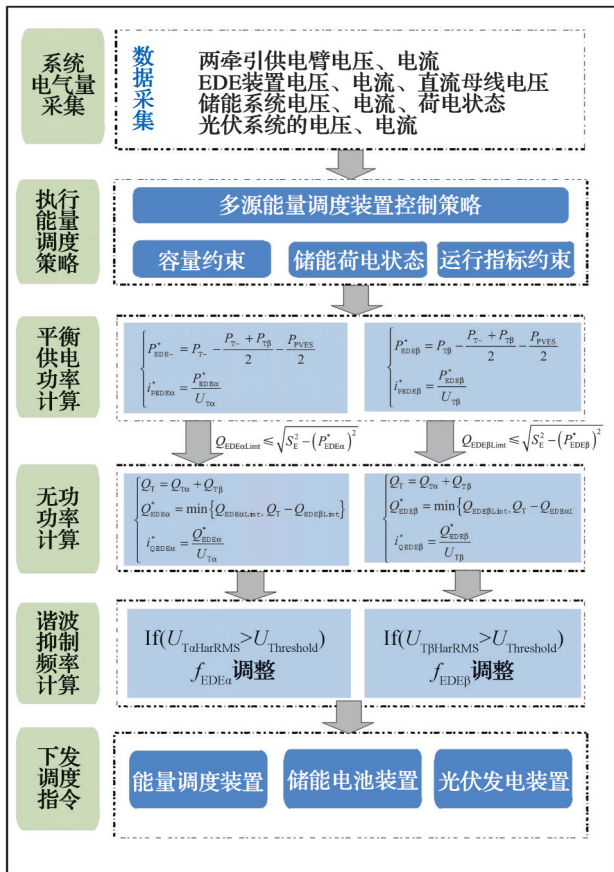


图4 多源能量调度策略流程图

Fig. 4 Flowchart of the multi-source energy dispatching strategy

2.4 多源能量调度装置控制策略

图1所示的“源-网-车-储”协同供电系统是有公共直流母线的多端口系统。要实现系统的稳定工作, 需要一个端口控制直流母线电压、维持系统能量平衡, 其余端口输出功率完成相应的潮流调度任务。基于此, 本文采用如图5所示的多源能量调度装置, EDE装置的背靠背变流器两侧均采用包含电压外环与电流内环

的双闭环控制结构^[10], 外环和内环共同稳定直流母线电压, 同时根据下发的补偿电流参考值, 控制EDE装置与两个供电臂进行有功、无功双向按需转移, 实现平衡供电与无功补偿。光伏储能装置根据下发的功率参考值控制其充放电, 实现再生能量充分利用与新能源的就地消纳。

3 试验验证

为了验证本文所提的多源能量调度策略的有效性和可行性, 在某变电所“源-网-车-储”供电系统上进行高压试验验证。试验时, 根据变电所供电臂实际负荷, 执行本文所述的多源能量调度策略。试验得到牵引供电臂、EDE装置、光储装置的输出功率运行曲线图如图6所示, 图6中第1个小图, 红色曲线为 α 臂输出功率, 蓝色曲线为 β 臂输出功率; 图6中第2个小图, 红色曲线为EDE装置 α 侧输出功率, 蓝色曲线为EDE装置 β 侧输出功率; 图6中第3个小图, 紫色曲线为光储装置输出功率。

试验全过程持续370 s左右, 分为3个阶段。在31 s前(进行能量调度前)两供电臂有功功率存在明显差异, 最大偏差接近10 MW。根据两供电臂的功率情况进行划分可知, α 臂所在侧为轻载侧, β 臂所在侧为重载侧。

①第一阶段: 在第31 s时EDE装置开始功率转移, 将 α 臂的有功功率转移至 β 臂, α 臂由0 MW上升至5 MW左右, β 臂由10 MW下降至5 MW左右, 实现 α 臂和 β 臂有功功率基本相等, 整个过程 α 臂和 β 臂始终保持功率平衡(期间供电功率从7 MW跌落到2 MW); EDE装置两侧输出的有功功率大小相等, 方向相反; 在该阶段, 根据两桥臂负荷整体功率情况, 考虑光伏发电功率与储能荷电状态等, 系统仅通过EDE装置执行平衡供电控制, α 臂和 β 臂共同为 β 臂线路负荷提供所需能量。

②第二阶段: 在315 s后光储装置开始输出有功功率, 并通过EDE装置将有功功率提供给 β 臂的线路负荷, 光储装置最大功率输出近5 MW; 由图6可知, 由于光储装置的供能, α 臂和 β 臂输出功率从7 MW降至5 MW左右; 在该阶段, 根据两桥臂负荷整体功率情况, 考虑光伏发电功率与储能荷电状态等, 系统通过EDE装置和光储装置共同执行平衡供电控制, α 臂、 β 臂及光储装置协同为 β 臂线路负荷供能, 在充分利用可再生能源与新能源发电的同时有效降低了电网供能。

③第三阶段: 在351 s后, 供电臂负荷需求减小, 系统仅通过光储装置承担两供电臂平衡供电所需功率, 且光储装置输出功率随供电臂负荷需求动态调整。

综合分析试验结果, 根据两桥臂负荷整体功率情况, 结合光伏发电功率与储能荷电状态, 能量调度的

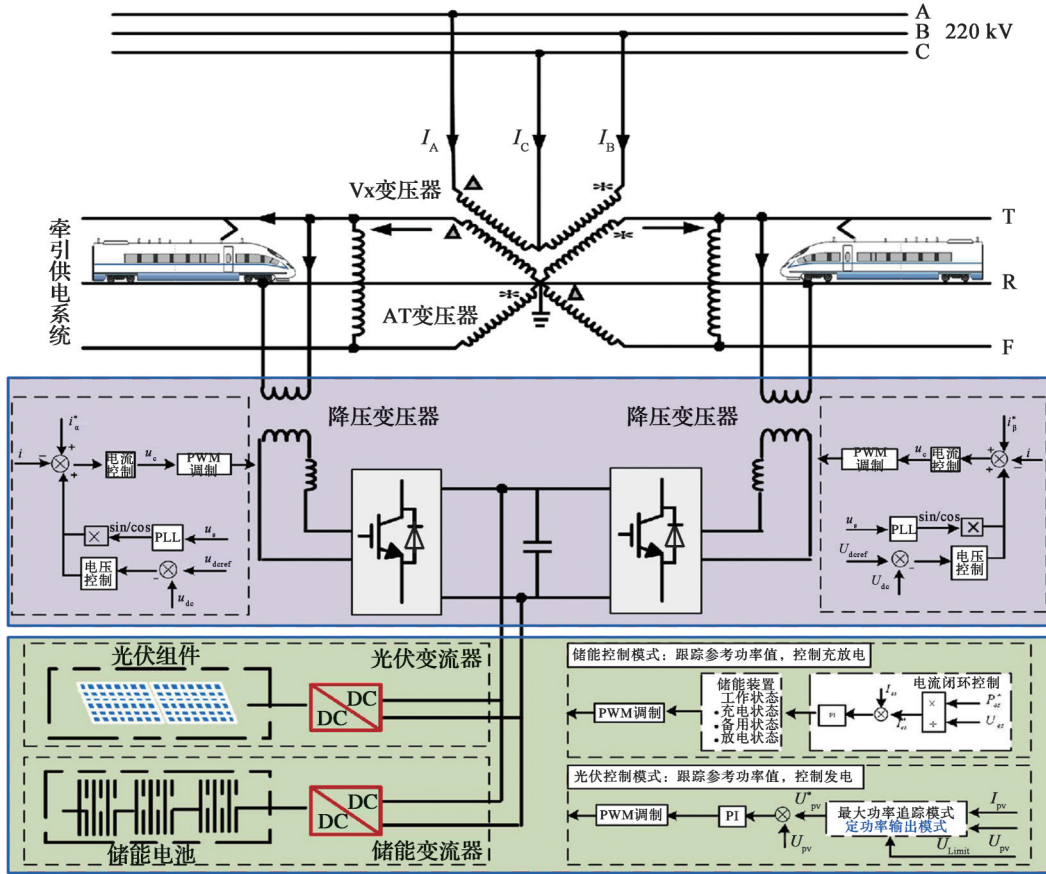


图5 多源能量调度装置控制策略框图

Fig. 5 Block diagram of control strategy for multi-source energy dispatcher

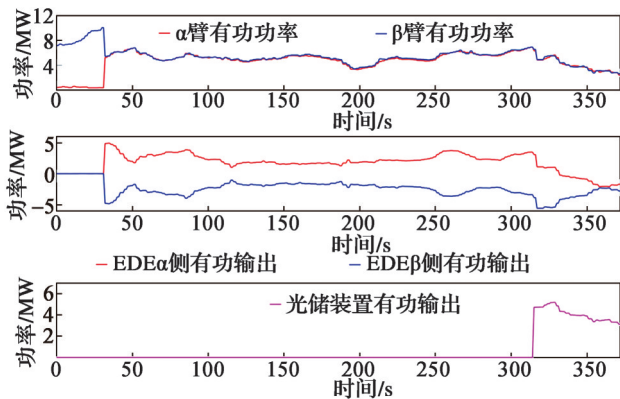


图6 多源能量调度策略的有功功率运行曲线

Fig. 6 Active power operating curves under the multi-source energy dispatching strategy

全过程经历了3个阶段: 由EDE装置单独执行平衡供电控制、EDE装置和光储装置共同执行平衡供电控制、光储装置完全承担两供电臂平衡供电所需功率。整个过程功率切换平滑无异常, 证明基于本文提出的多源能量调度策略的平衡供电控制方法是可行的和有效的。

EDE装置在进行有功功率转移的基础上, 利用剩余容量进行无功补偿的情况如图7所示。由试验结果可知, 大部分过程中变电所整体无功功率维持在0.3 Mvar左右(本文中无功负值代表感性无功, 无功正值代表容性无功), 数值突变主要是由线路负载变化造成的,

但EDE装置能快速调节使无功功率回落至0.3 Mvar, 因此该策略具备良好的无功补偿能力。

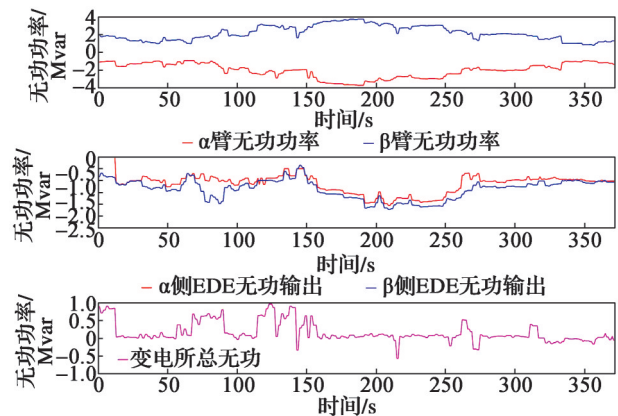


图7 多源能量调度策略的无功功率运行曲线图

Fig. 7 Reactive power operating curves under the multi-source energy dispatching strategy

网压谐波抑制数据如图8~图10所示。这几个图中, 3 000 Hz谐波的最大值达111 V(网压峰值仅为1 317 V), 电压谐波含有量达8%, 电压总谐波畸变率达到18.44%, 说明此时EDE装置的变流器开关频率处于电网谐波共振频段。此时, EDE装置检测到线路网压谐波较大, 触发网压谐波抑制功能, 及时调整变流器开关频率, 使得THD从频率切换前的18.44%降低到

6.77%，3 000 Hz谐波数值降低至5 V以下。试验说明系统通过网压谐波抑制功能成功避开电网谐波共振频段，网压谐波情况得到明显改善。

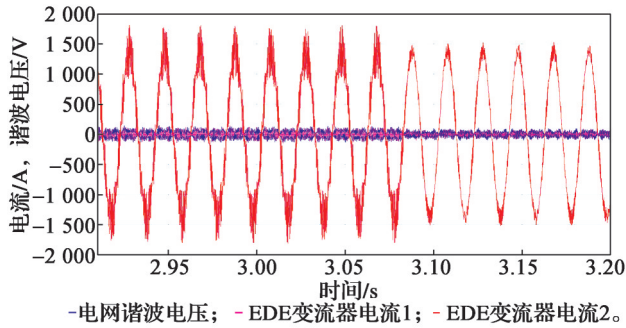


图8 网压谐波抑制效果图

Fig. 8 Effect of grid voltage harmonic suppression

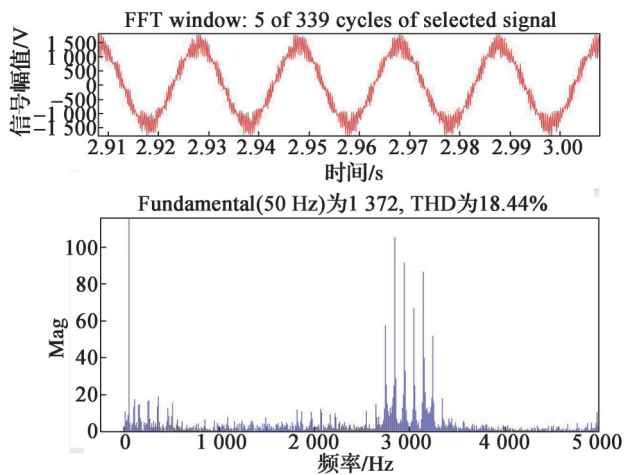


图9 优化前网压谐波频谱图

Fig. 9 Grid voltage harmonic spectrum before optimization

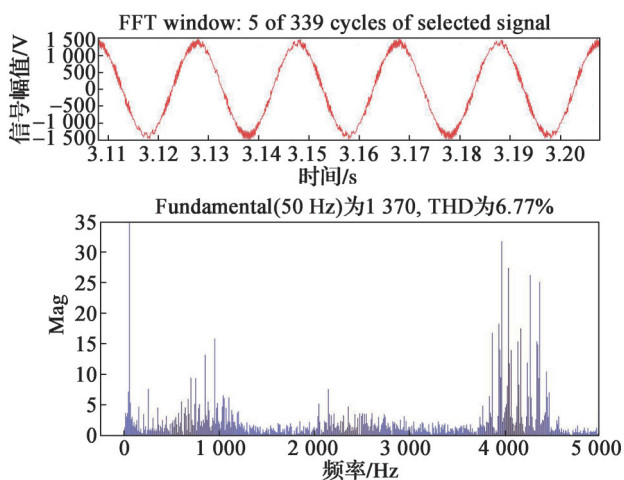


图10 优化后网压谐波频谱图

Fig. 10 Grid voltage harmonic spectrum after optimization

4 结束语

本文针对面向“源-网-车-储”协同供电系统的牵引变电所构型，提出了一种以供电臂平衡供电控制为核心，融合无功实时补偿与网压主动谐波抑制机制的多源能量调度策略。在保障供电臂功率对称的同时，

充分利用装置冗余能力对牵引系统进行实时无功支撑与网压主动谐波治理，提升了电能质量与供电品质。该策略在某变电所的“源-网-车-储”协同供电系统上成功实现应用，说明该方案具备工程可实现性。

参考文献：

- [1] 国家铁路局网站. 国家铁路局、国家发展改革委、生态环境部、交通运输部、国铁集团联合印发《推动铁路行业低碳发展实施方案》[J]. 铁道技术监督, 2024, 52(2): 12.
Website of the National Railway Administration. National Railway Administration, National Development and Reform Commission, Ministry of Ecology and Environment, Ministry of Transport, and China State Railway Group Co., Ltd. jointly issued *implementation plan for promoting low-carbon development in the railway industry*[J]. Railway quality control, 2024, 52(2): 12.
- [2] 高仕斌, 罗嘉明, 陈维荣, 等. 轨道交通“网-源-储-车”协同供能技术体系[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(5): 959-979.
GAO Shibin, LUO Jiaming, CHEN Weirong, et al. Rail transit "network-source-storage-vehicle" collaborative energy supply technology system[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2024, 59(5): 959-979.
- [3] 廖海朱, 胡海涛, 黄毅, 等. 电气化铁路“源-网-车-储”协同供能系统日前能量优化与调度策略[J]. 机车电传动, 2022(3): 1-9.
LIAO Haizhu, HU Haitao, HUANG Yi, et al. Day-ahead energy optimization and scheduling strategy of "source-network-train-storage" coordinated power supply system for electrified railways[J]. Electric drive for locomotives, 2022 (3): 1-9.
- [4] 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): 7892-7911.
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): 7892-7911.
- [5] 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.
- [6] 周萌, 于龙, 王子龙. “双碳”目标下电气化铁路源网车储关键技术研究[J]. 电力电子技术, 2024, 58(7): 80-85.
ZHOU Meng, YU Long, WANG Zilong. Research on key technologies of source-network-vehicle-storage integration for electrified railways under the goal of "Double Carbon" [J]. Power electronics, 2024, 58(7): 80-85.

- [7] 李俊豪, 涂春鸣, 王鑫, 等. 基于“规则+优化”的电气化铁路站点实时能量管控策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(11): 3339-3352.
LI Junhao, TU Chunming, WANG Xin, et al. Real-time energy management strategy for electrified railroad stations based on "rules+optimization"[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2024, 39(11): 3339-3352.
- [8] HU S J, LI S, LI Y, et al. A balance transformer-integrated RPF for railway power system PQ improvement with low-design capacity[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2018, 65(4): 2925-2934.
- [9] 陈欣, 王跃, 付刚, 等. 适用铁路能量调度装置的三电平中点平衡控制策略研究[J]. 机车电传动, 2025(1): 162-174.
CHEN Xin, WANG Yue, FU Gang, et al. Research on control strategy for neutral-point balance in three-level configurations for railway energy dispatching equipment[J]. Electric drive for locomotives, 2025(1): 162-174.
- [10] 王跃, 付刚, 胡景瑜, 等. 高速动车组四象限双闭环控制参数设计与稳定性分析[J]. 机车电传动, 2020(2): 26-30.
WANG Yue, FU Gang, HU Jingyu, et al. Parameter design and stability analysis of double-loop control for high-speed EMU 4QS-converter[J]. Electric drive for locomotives, 2020(2): 26-30.

Multi-source energy dispatching strategy for "source-network-train-storage" coordinated power supply on electrified railways

WANG Yue, CHEN Xin, MEI Wenqing, HU Liang, FU Gang, ZHANG Zhixue

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Accelerated deployment of "source-network-train-storage" integrated power supply technology exposes critical challenges in traction power supply systems, such as unbalanced bridge-arm power distribution, limited regenerative energy absorption, and low local consumption of renewable energy. To address these issues, this paper proposes a multi-source integration energy dispatching strategy for traction substations, aimed to establish an energy flow mechanism focused on dynamically balancing bridge-arm power. The proposed strategy monitors real-time feeding section power and dynamically adjusts outputs from energy dispatching equipment (EDE), photovoltaic (PV) generation, and energy storage systems (ESS) according to PV availability and ESS charge/discharge capacity. This coordinates active power flow and equalizes distribution among the bridge arms, thereby improving system supply stability and energy utilization efficiency. Beyond balancing bridge arm operation, the strategy utilizes redundant capacity within the system and incorporates real-time reactive power support and active harmonic suppression to further improve system power quality and supply reliability. Experimental validation at a traction substation demonstrates that the proposed method effectively improves bridge-arm power distribution and power quality, enhances renewable energy utilization and regenerative braking energy recovery, and exhibits strong engineering applicability and scalability.

Keywords: traction power supply system; source-network-train-storage; bridge-arm power balancing; reactive power compensation; harmonic suppression