



基于AT供电方式的柔性牵引供电系统 最优配置方案研究

于国旺¹, 薛振华^{1,2}, 牛晓伟²

(1. 国能朔黄铁路有限责任公司, 河北 沧州 062350;

2. 国能运输技术研究院, 北京 100080)

摘要: 随着电气化铁路向高速化、重载化和低碳化方向发展, AT(自耦变压器)供电方式得到广泛应用。然而, 传统牵引供电系统在再生能量利用效率、电压波动抑制、三相不平衡治理及新能源接入适应性方面仍存在明显不足, 制约了系统整体效率与稳定性。文章提出一种基于电力电子变流技术的柔性牵引供电系统方案, 通过在既有AT架构中增设柔性装置, 构建包含馈入馈出系统、隔离变压器、变流器与控制中心的协同结构, 实现能量协调、三相平衡、电压稳定以及再生能量高效回收; 同时建立了以净收益最大化为目标的容量配置模型, 可综合考虑变流器投资成本、电价因素和系统运行年限等条件, 结合差分进化与局部优化方法求解最优方案。仿真与灵敏度分析结果表明, 该方案能够兼顾能效提升与经济性优化, 为柔性牵引供电系统的工程化应用与合理配置提供理论依据和技术支撑。

关键词: 柔性牵引供电系统; 电力电子变流技术; 再生能量利用; 容量配置优化

中图分类号: U223

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)06-0173-07

0 引言

随着我国高速铁路和重载铁路建设的不断推进, 牵引供电系统正面临着更高的性能需求和更复杂的运行条件。AT(自耦变压器)供电方式具备线路结构简洁、供电范围广泛、投资成本较低等优点, 已成为当前电气化铁路中应用最为广泛的供电方式之一。然而, 传统AT供电系统在运行过程中暴露出诸多问题, 包括再生制动能量利用率低、供电臂末端电压不稳定、变压器一次侧三相不平衡、设备容量利用率不足以及光伏、风能等可再生能源接入难等^[1-2]。在“双碳”目标和能源结构转型的驱动下, 构建具备高适应性、高效率与智能化调节能力的柔性牵引供电系统成为铁路供电系统发展的关键方向^[3]。柔性供电系统基于电力电子变流技术, 通过调控电压、电流和功率流向来实现电能的灵活分配与动态补偿, 具备响应速度快、控制精

度高、能量双向流动等显著优势^[4-5]。引入该技术, 有望有效提升牵引供电系统对再生能量的吸收能力, 实现供电电压稳定、负荷三相平衡, 并为可再生能源的大规模接入提供接口支持^[6]。

近年来, 学术界针对柔性牵引供电系统开展了多方面研究。一类研究侧重于通过并联有源滤波器、有源电容器或静止无功补偿装置缓解牵引系统的电压波动与功率质量问题^[7]; 另一类则致力于利用模块化多电平变流器(如MMC)、三电平NPC结构或双向AC/DC变换器实现能量流动的灵活控制和回馈能量的高效利用^[4, 8]。此外, 还有研究在变电所两侧或区间分区所之间布置柔性供电装置, 通过协调控制实现供电臂间的能量融通、电压平衡及系统冗余支持^[3, 9]; 在新能源接入方面, 部分研究提出构建柔性接口结构以引入光伏、风电等清洁能源, 辅助铁路供电系统供需协调和调峰调频^[6, 10]。

尽管在变流器拓扑、控制方法和典型应用方面已

通信作者: 牛晓伟, 男, 主要从事铁路电气化方面的研究; E-mail: 20067868@ceic.com

引用格式: 于国旺, 薛振华, 牛晓伟. 基于AT供电方式的柔性牵引供电系统最优配置方案研究[J]. 机车电传动, 2025(6): 173-179. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.020.

Citation: YU Guowang, XUE Zhenhua, NIU Xiaowei. Research on the optimal configuration scheme of flexible traction power supply system based on AT feeding mode[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 173-179. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.020.

有大量研究,但现有成果多集中于单一功能的柔性设备,缺乏面向 AT 供电结构的系统化解解决方案。现有文献中尚未形成涵盖结构设计、控制逻辑、运行模式与部署策略的完整模型,对于多种柔性系统方案在适应性、可实现性和经济性方面的比较也明显不足,难以以为实际工程部署提供有效参考;同时,已有研究较少关注柔性装置的容量配置问题,而这直接关系到再生能量吸收能力与系统投资成本的平衡。基于此,本文结合 AT 供电结构特点,提出一种基于电力电子变流技术的柔性牵引供电系统总体方案。系统通过在牵引变电所两侧及分区所间布置柔性供电装置,分别适配 55 kV 与 27.5 kV 等级,实现对变压器一次侧负荷的动态平衡、再生能量的深度利用以及新能源的高效集成。通过建立以净收益最大化为目标的容量配置模型,结合全局与局部优化方法确定变流器的最优容量方案,从而在能效提升与成本控制之间实现最佳平衡。

1 柔性牵引供电系统构成与部署方案

本文将在既有 AT 供电架构基础上引入电力电子变流与协调控制单元,构建柔性牵引供电系统。柔性牵引供电系统主要由馈入馈出系统、隔离变压器、功率变流器以及能量管理与控制中心 4 部分组成,如图 1 所示。

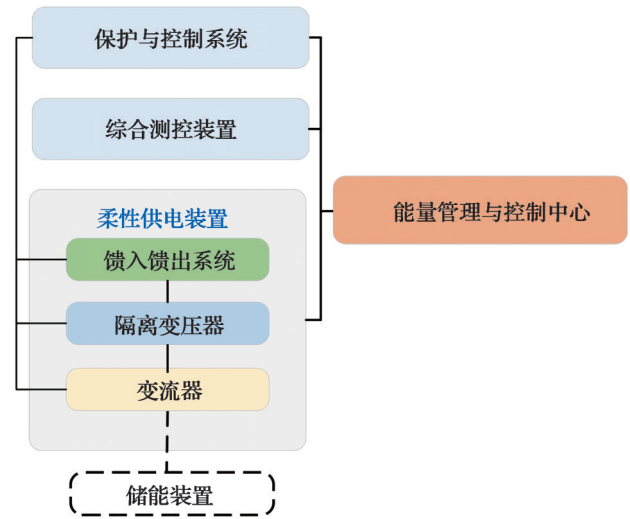


图 1 柔性牵引供电系统构成图

Fig. 1 Composition diagram of flexible traction power supply system

馈入馈出系统负责实现柔性供电装置与既有 27.5 kV 或 55 kV 牵引供电网的安全接入,通常配置隔离开关、断路器、电流互感器和避雷器等一次侧设备,用于完成并网切换、故障隔离与检修维护。隔离变压器负责电气隔离、电压匹配和接口耦合,是柔性装置与牵引网之间的关键连接环节。功率变流器负责完成交-直-交或多端口能量变换,并结合储能接口实现再生能

量吸收、回馈与时序调节。能量管理与控制中心根据列车牵引/制动状态、供电臂电压、电网功率波动情况以及储能荷电状态,对系统运行模式与功率指令进行统一协调。

从功能需求看,柔性牵引供电系统应同时满足以下目标:一是提高再生制动能量利用率,降低能量回馈受限带来的浪费;二是抑制供电臂电压波动,增强末端供电质量;三是改善变电所一次侧三相不平衡问题,提升上级电网适应性;四是兼顾既有 AT 系统接口兼容性、工程可实施性及后续扩展能力。基于此目标,进一步围绕器件、部署位置和配置方案进行比较分析。

1.1 柔性变流与隔离接口的选择

对于同一 AT 供电场景,不同变流器拓扑和不同隔离变压器形式会直接影响系统复杂度、控制难度、设备成本以及工程部署方式。因此,柔性牵引供电系统设计的核心是变流装置与隔离接口的合理组合。

1.1.1 三相隔离变压器配置

本文采用由两台单相变压器构成的 V/V 接线形式实现三相隔离供电。相较于传统 Y/y 或 Δ/y 接线,该方案结构紧凑、布置灵活,更适合牵引供电系统中负载不完全对称、安装空间受限的应用环境。变压器低压侧可进一步分为分裂多绕组和单绕组两类:分裂多绕组形式有利于多支路功率分配、运行方式切换和电压电流灵活调节,适用于工况变化较大、功能耦合较强的场景;单绕组形式则具有结构简单、制造与维护难度较低、噪声较小和功率均流控制更易实现等优点,更符合工程应用中对可靠性和经济性的要求。两类接口形式分别如图 2 和图 3 所示。

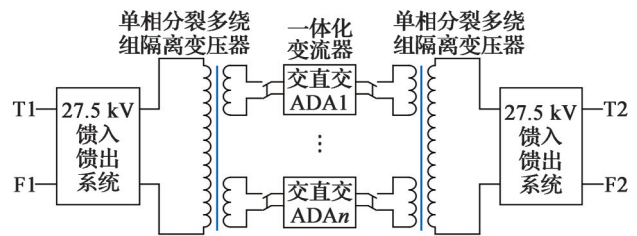


图 2 隔离变压器低压侧分裂多绕组方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of low-voltage side split multi-winding configuration of isolation transformer

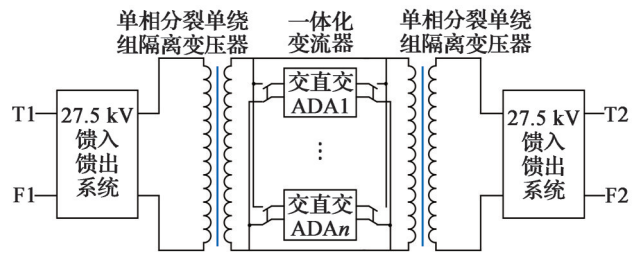


图 3 隔离变压器低压侧单绕组方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of low-voltage side single-winding configuration of isolation transformer

1.1.2 功率变流器结构

交-直-交变流器(ADA)可由单相隔离变压器、AC/DC整流级、直流母线、DC/AC逆变级以及DC/DC储能接口构成,适用于局部电压支撑、单侧功率补偿和再生能量吸收。该类结构模块化程度高,便于按需部署于T线或F线一侧,尤其适合单侧补偿或局部能量

调节场景,其基本单元结构如图4所示。
三相三桥臂变流器(PBD)则更适用于站级综合治理。该结构可对三相电压和电流进行独立调节,具备有功/无功协调控制、三相平衡治理及谐波抑制等功能,更适合部署于牵引变电所等需要兼顾能量调节与电能质量改善的场合。该结构的典型拓扑如图5所示。

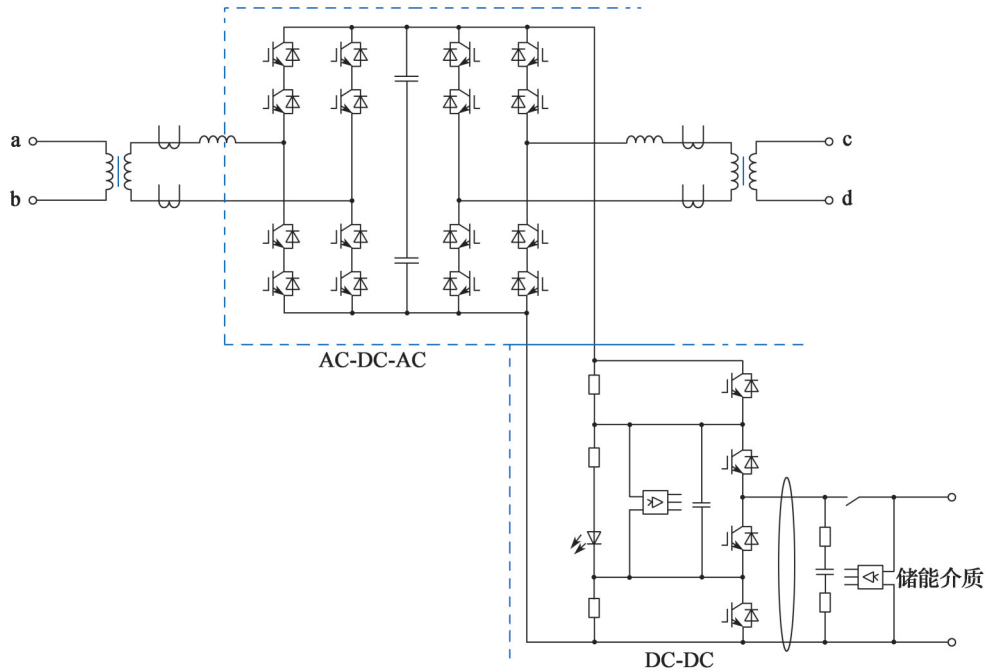


图4 交-直-交变流器(ADA)单元结构图
Fig. 4 Structure diagram of AC-DC-AC converter (ADA) unit

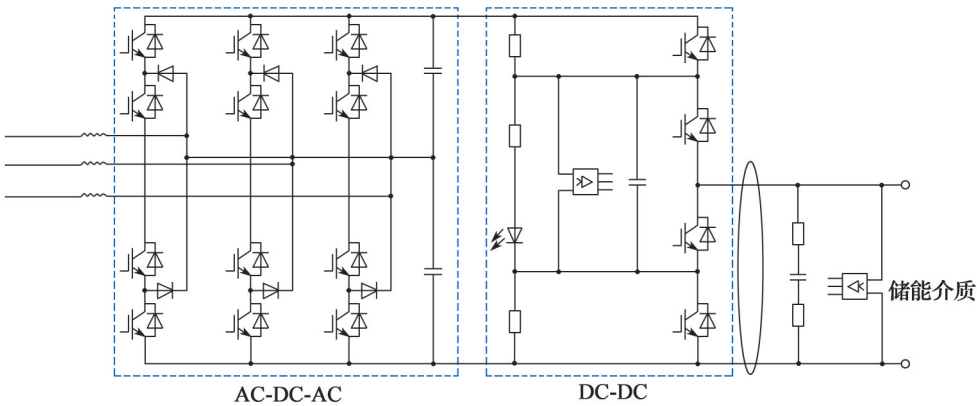


图5 三相三桥臂变流器(PBD)
Fig. 5 Three-phase three-leg converter (PBD)

总体而言,ADA更适合单侧、局部、模块化的柔性补偿任务,而PBD更适合站级、三相协同、功能复合型的柔性治理任务。

1.2 部署位置与电压等级配置方案分析

结合AT供电系统的实际运行特点,柔性装置根据部署位置可分为牵引变电所部署和分区所部署两类。牵引变电所是系统的主要部署场景,其功能重点在于再生制动能量的深度吸收与利用、站内多端口功率协调以及一次侧三相不平衡治理,因此更适合采用三相

协同能力较强的变流方案。分区所部署则偏向于区间潮流调节与局部电压支撑,通常以单侧补偿为主,工程目标更聚焦于两变电所之间的功率交换和供电臂电压改善。
从电压等级看,柔性装置可接入55 kV侧,也可接入2×27.5 kV侧。55 kV方案接入层级较高,结构相对集中,适用于站级统一治理;2×27.5 kV方案则更贴近AT供电系统的T线与F线接口,能够更直接地参与供电臂间功率调节和再生能量分配,在与既有AT架构的协同和工程适配性方面具有明显优势。

进一步考虑相数形式时，单相方案结构适合局部补偿或单侧控制；三相方案控制和实现更为复杂，在三相平衡治理、综合功率调节和系统稳定性提升方面更具优势。因此，对于以牵引变电所为核心部署位置、同时追求能量回收与电能质量提升的应用场景，三相方案通常更具研究与工程价值。

1.3 最优配置方案研究

本文从变流器桥臂规模、控制难度、设备成本、变压器制造复杂度、馈入馈出配置需求以及整体性能等方面，对接入 55 kV 与接入 2×27.5 kV 两类方案在单相/三相、分裂绕组/单绕组条件下的组合进行综合比选。比选结果如表 1 所示。

由表 1 可知，若仅从局部补偿角度考虑，单相方案具备一定的结构简洁性；但在牵引变电所场景下，三相方案在系统协同调节能力方面更具优势。进一步比较隔离变压器形式可知，单绕组方案在制造复杂度、噪声控制和工程实现方面整体优于分裂绕组方案，更适合作为工程落地的优选接口形式。

综合电压等级、变流器拓扑和接口形式后，2×27.5 kV 三相单绕组方案在系统性能、设备复杂度、总体造价和工程适配性之间取得了较好的平衡：一方面，其三相结构能够兼顾能量回收、三相平衡治理与综合功率调节；另一方面，2×27.5 kV 接口更贴合 AT 供电系统的实际结构，便于实现 T 线与 F 线之间的功率协调；同时，单绕组隔离变压器也有利于降低制造和控制难度。基于上述分析，本文将 2×27.5 kV 三相单绕组方案确定为后续容量优化研究的目标拓扑。

2 变流器最优容量配置

针对 2×27.5 kV 三相单绕组方案，本文进一步将容量配置问题抽象为一个净收益最大化的优化模型，以量化不同方案下的经济性差异，为工程部署提供决策依据。系统的收益主要来源于再生能量的吸收与利用，而成本则包括固定投资以及随容量规模线性增长的设备成本。两者之差即为净收益，其优化目标可表示为式(1)所示。

表 1 柔性供电装置配置方案比选

Table 1 Comparison and selection of configuration schemes for flexible power supply devices

项目	55 kV 方案	55 kV 方案	55 kV 方案	55 kV 方案	2×27.5 kV 方案	2×27.5 kV 方案	2×27.5 kV 方案	2×27.5 kV 方案
相数	单相	单相	三相	三相	单相	单相	三相	三相
低压侧形式	分裂绕组	单绕组	分裂绕组	单绕组	分裂绕组	单绕组	分裂绕组	单绕组
变流器桥臂数量/个	4	4	3	3	8	8	6	6
变流器控制难度	易	难	易	难	易	难	难	难
变流器成本	高	高	中等	中等	最高	最高	中等	中等
变压器制造难度	难	易	难	易	难	易	难	易
变压器温升	相当	相当	相当	相当	相当	相当	相当	相当
变压器噪声	高	低	高	低	高	低	高	低
变压器成本	高	中等	中等	低	高	高	中等	低
27.5 kV 双极断路器数量/台	2	2	2	2	0	0	0	0
27.5 kV 双极隔离开关数量/台	2	2	2	2	0	0	0	0
27.5 kV 单极断路器数量/台	0	0	0	0	4	4	4	4
27.5 kV 单极隔离开关数量/台	0	0	0	0	4	4	4	4
馈入馈出总成本	中等	中等	中等	中等	高	高	低	低
整体开发难度	难	易	难	中等	难	易	中等	难
整体性能	差	好	差	好	差	好	差	好
整体造价	中等	中等	中等	低	高	高	中等	低

$$\text{Profit}(x_1, x_2) = \text{Revenue}(x_1, x_2) - \text{Cost}(x_1, x_2) \quad (1)$$

式中：Profit(·)、Revenue(·)、Cost(·) 分别为利润函数、收益函数、成本函数； x_1 、 x_2 分别为牵引变电所两侧配置的变流器容量。

收益函数由能量回收量与电价共同决定，可表示为

$$\text{Revenue}(x_1, x_2) = E_{\text{recycle}}(x_1, x_2) \cdot \text{Price} \quad (2)$$

式中： $E_{\text{recycle}}(x_1, x_2)$ 为运行周期内的累计能量回收量，可通过仿真获得；Price 为用电单位价格。

成本函数由固定成本与容量投资构成，可表示为

$$\text{Cost}(x_1, x_2) = C_{\text{fixed}} + C_{\text{MW}} \cdot (x_1 + x_2) \quad (3)$$

式中： C_{fixed} 为固定成本； C_{MW} 为单位边际成本。

模型需满足以下约束条件：

- ① 容量 x_i 需满足 $x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}$ ，确保容量配置的工程可行性（ $x_i^{\min}$ 与 $x_i^{\max}$ 分别为变流器容量的下限与上限， $i = 1, 2$ ）。
- ② 传输功率 $P_{\text{transfer}}(t) \leq \eta \cdot x_i$ ，保证瞬时传输功率不超过容量上限并考虑能量效率（ η 为传输效率）。

③ 功率差阈值 $P_{re} \leq |P_{source}(t) - P_{sink}(t)|$, 避免无效的小功率交换; (P_{source} 为源侧功率, P_{sink} 为负荷侧功率)。

在求解方法上, 本文采用差分进化算法 (Differential Evolution, DE) 进行全局优化。差分进化算法通过随机差分变异与交叉操作生成新的候选解, 并通过选择机制保留净收益更优的解。

对每个个体 $x_i = (x_{i1}, x_{i2})$, 其变异向量 v_i 由下式给出:

$$v_i = x_{r1} + F \cdot (x_{r2} - x_{r3}) \quad (4)$$

式中: x_{r1} 、 x_{r2} 、 x_{r3} 为随机选择的不同个体; F 为变异因子。

交叉操作用于在当前解与变异解之间生成试验向量 u_i , 具体如下:

$$u_i = \begin{cases} v_i, & \text{if rand}(d) < CR \text{ or } d = j_{rand} \\ x_i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\text{rand}(d)$ 为交叉概率。

最后, 通过选择操作更新个体 $x_i^{(g+1)}$, 具体如下:

$$x_i^{(g+1)} = \begin{cases} u_i, & \text{if Profit}(u_i) > \text{Profit}(x_i) \\ x_i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

该过程不断迭代直至达到终止条件。考虑到目标函数中的仿真计算可能存在非光滑性的问题, 本文在差分进化获得全局解后, 进一步采用 L-BFGS-B 算法进行局部优化, 以提升解的收敛精度。最终得到最优容量配置 (x_1^*, x_2^*) , 该配置能够在满足约束条件的前提下, 实现系统运行周期内的净收益最大化。

3 仿真试验

3.1 数据集及仿真条件

仿真数据集来源于3个牵引变电所的实测运行数据, 形式为按“秒”采样一天的三相有功功率序列。该数据集完整记录了牵引与再生工况下的功率波动, 涵盖牵引负荷爬坡、制动能量回馈以及日内功率变化等典型特征, 能够真实反映铁路供电系统的动态运行状态。基于此数据集, 优化算法能够准确评估不同容量配置方案对能量回收效率、电压稳定性与整体经济性的影响。

本文的最优容量配置研究基于 MATLAB/Simulink 与 Python 联合仿真平台开展。系统设备包括在牵引变电所两侧布置的交-直-交变流器 (ADA)、三相三桥臂变流器 (PBD) 以及 DC-DC 接口与储能单元, 以实现能量的双向调节与再生能量的深度利用。整体模型由机车负载模型、牵引网模型、变流器模型与控制器4部分构成。其中, 机车负载模型用于描述牵引与制动工况下的功率需求; 牵引网模型体现供电线路及自耦变压器的电气特性; 变流器模型反映柔性装置的功率变换能力; 控制器模块实现电压稳定、功率分配及再生

能量调度。容量寻优过程通过 Python 调用差分进化算法实现, 电气系统仿真由 Simulink 负责, 两者通过联合接口形成“电气模型-优化算法”的闭环求解平台。

在收益模型设定中, 系统的净收益由能量利用收益与投资成本两部分构成。能量收益来源于柔性牵引供电装置提升的再生能量吸收量, 其经济价值通过与单位电价相乘计算得到, 单位电价取 0.7 元/(kW·h)。投资成本主要包括两部分^[10]: 随容量线性增加的变流器购置成本 (单价为每兆瓦 150 万元) 与用于覆盖设备安装、维护及相关配套支出的固定成本 (记为 n 元)。系统使用年限设定为 10 年, 因此净收益的计算综合考虑了在整个生命周期内累计的能量收益与投资支出, 该算法可为容量配置的经济性评估提供定量依据。

3.2 差分进化采样点分布

图6展示了差分进化全局搜索在容量空间中的采样结果及其对应净收益分布。横轴与纵轴分别为两台变流器的容量 x_1 与 x_2 。由图6可以看出, 采样点在边界内均匀分布, 表明本文算法对解空间进行了充分探索; 颜色由浅至深对应收益由低到高, 图6整体呈现出以中等偏高容量区 (约 5~7 MW) 为中心的高收益“热点”。图6中红色星标标注了本轮搜索获得的最优解 (6.26, 5.92), 其邻域内点的收益同样较高, 说明最优解具有一定的局部稳定性。相比之下, 容量极小或极大的区域收益显著降低, 反映了容量不足导致的能量转移受限与容量过大带来的投资成本上升之间的权衡关系。该图验证了“近似均衡, 适度放大”的容量配置策略更有利于在约束条件下获得更高净收益。

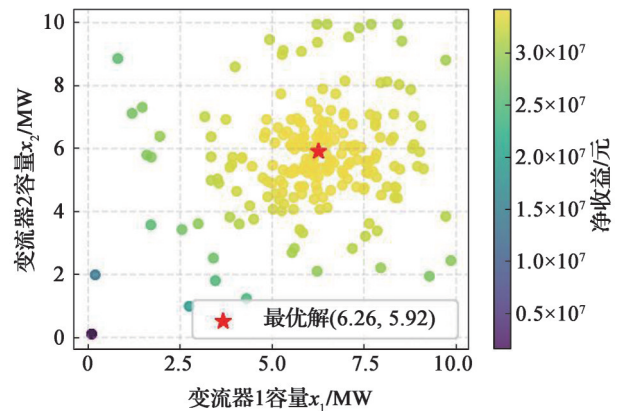


图6 搜索采样点的净收益分布

Fig. 6 Net benefit distribution of search sampling points

3.3 容量配置灵敏度分析与优化结果验证

为进一步验证最优解的合理性, 本文对两台变流器的容量进行了灵敏度分析。图7(a)展示了变流器 x_1 的容量恒为 6.26 MW 的条件下, 随着变流器2容量的增加, 系统净收益先逐渐提升, 并在接近 6.00 MW 时达到峰值, 随后略有下降。图7(b)展示了在变流器 x_2 的

容量恒为 5.92 MW 的条件下, 随着变流器 x_1 容量的增加, 系统净收益同样先升后降, 且最佳区间也出现在 6.00 MW 附近。图 7(a)与图 7(b)两图灵敏度曲线的结果一致, 表明两台变流器在 6 MW 左右的容量匹配能够带来最优的经济效益, 从而进一步验证了差分进化寻优结果的有效性。

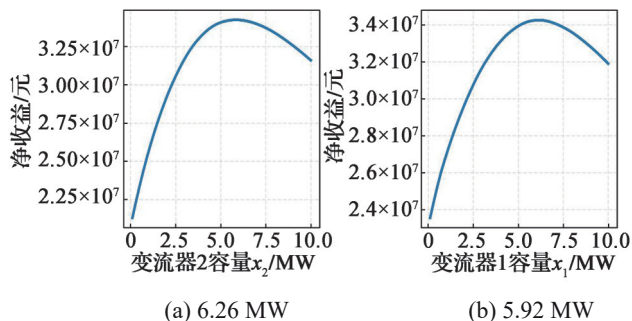


图 7 固定单边容量的最优值敏感性分析

Fig. 7 Optimal value sensitivity analysis of fixed single-side capacity

总体来看, 试验结果揭示了容量配置对系统净收益的非线性影响规律。适度的容量配置能够显著提升能量回收和经济效益, 而过小或过大的容量配置都会降低整体性能。因此, 在工程实践中应优先考虑接近最优区间的容量配置方案, 并结合冗余度和运行安全性进行综合权衡。

4 结束语

本文针对传统 AT 供电系统在电压波动、三相不平衡、再生能量利用率低及新能源接入受限等方面的不足, 提出一种基于电力电子变流技术的柔性牵引供电系统方案。通过引入交-直-交变流器 (ADA)、三相三桥臂变流器 (PBD) 以及 DC-DC 接口与储能装置, 形成多种适配于 55 kV 与 27.5 kV 系统的柔性拓扑结构, 可在牵引变电所与分区所差异化部署。本文研究比较了不同绕组结构、不同系统电压等级及拓扑形式下的实现复杂度、控制策略与经济性, 结果表明, 三相单绕组结构的 2×27.5 kV 柔性供电方案在稳定性、调节能力、成本控制和工程适配性方面更具优势。基于此, 本文建立了基于净收益最大化的容量配置模型, 并结合全局与局部优化方法确定了变流器的合理配置区间, 进一步提升了系统的能效与经济性。总体而言, 所提出的柔性牵引供电系统能够有效改善电压稳定性与能量调度灵活性, 提升再生能量利用水平, 为构建高可靠性、高效率 and 新能源友好的现代铁路牵引供电体系提供了理论依据和工程参考。

参考文献:

[1] SUN P, LI K, LI Y F, et al. DC voltage control for MMC-

based railway power supply integrated with renewable generation[J]. IET renewable power generation, 2021, 14(13): 3679-3689.

[2] LI T, SHI Y B. Application of MMC-RPC in high-speed railway traction power supply system based on energy storage[J]. Applied sciences, 2022, 12(19): 10009.

[3] 林云志. 轨道交通柔性牵引供电技术现状及发展综述[J]. 电气化铁道, 2023, 34(4): 1-7.

LIN Yunzhi. Current status and development review of flexible traction power supply technology in rail transit[J]. Electric railway, 2023, 34(4): 1-7.

[4] 刘芸江, 胡海涛, 杨孝伟, 等. 24 kV 柔性直流牵引供电系统潮流计算方法与供电特性分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2323-2334.

LIU Yunjiang, HU Haitao, YANG Xiaowei, et al. Power flow calculation method and power distribution characteristics analysis of 24 kV flexible direct current traction power system[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2023, 38(9): 2323-2334.

[5] NISHAD D K, TIWARI A N, KHALID S, et al. Power quality solutions for rail transport using AI-based unified power quality conditioners[J]. Discover applied sciences, 2024, 6(12): 651.

[6] YING Y C, LIU Q J, WU M L, et al. Online energy management strategy of the flexible smart traction power supply system[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2023, 9(1): 981-994.

[7] 白雄雄. 铁路牵引供电系统中的无功补偿与谐波治理研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(6): 11-15.

BAI Xiongiong. Research on reactive power compensation and harmonic control in railway traction power supply system[J]. Power capacitor & reactive power compensation, 2022, 43(6): 11-15.

[8] 郑琼林, 杨晓峰, 吴命利, 等. 轨道交通牵引供电系统技术进展与思考[J]. 电气工程学报, 2025, 20(4): 399-428.

ZHENG Qionglin, YANG Xiaofeng, WU Mingli, et al. Advances and reflections on rail transit traction power supply system technology[J]. Journal of electrical engineering, 2025, 20(4): 399-428.

[9] LIAN J R, DAI C H, YAO Z G, et al. A star-connected railway energy router and its control strategy for new energy integration into AC traction substation[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2025, 40(1): 371-381.

[10] 李瑶, 刘辉, 曾令雄, 等. 接入可再生能源的多端口铁路功率调节器[J]. 电力电子技术, 2021, 55(8): 71-74.

LI Yao, LIU Hui, ZENG Lingxiong, et al. Multi-port railway power conditioner with access to renewable energy[J]. Power electronics, 2021, 55(8): 71-74.

Research on the optimal configuration scheme of flexible traction power supply system based on AT feeding mode

YU Guowang¹, XUE Zhenhua^{1,2}, NIU Xiaowei²

- (1. Guoneng Shuohuang Railway Co., Ltd., Cangzhou, Hebei 062350, China;
- 2. Guoneng Transportation Technology Research Institute, Beijing 100080, China)

Abstract: With the rapid development of electrified railways toward high-speed, heavy-haul, and low-carbon operation, the auto-transformer (AT) feeding mode has been widely applied. However, traditional traction power supply systems still suffer from low regenerative energy utilization efficiency, voltage fluctuations, three-phase imbalance, and limited renewable energy integration capacity, thus restricting the efficiency and stability of traction power supply systems. This paper proposes a flexible traction power supply system based on power electronic converter technology. Flexible devices are introduced into the existing AT framework to establish a collaborative architecture consisting of a feed-in/feed-out system, isolation transformers, converters, and a control center to achieve energy coordination, three-phase balance, voltage stabilization, and efficient recovery of regenerative energy. Furthermore, a capacity configuration model aiming at maximizing net profit is developed to comprehensively consider converter investment cost, electricity price, and system operational lifespan. The optimal configuration is determined through differential evolution and local optimization. Simulation and sensitivity analyses demonstrate that the optimal configuration can simultaneously improve energy efficiency and economic performance, providing theoretical basis and technical support for the engineering application and rational configuration of flexible traction power supply systems.

Keywords: flexible traction power supply system; power electronic converter technology; regenerative energy utilization; capacity configuration optimization