

牵引供电系统可调容与再生制动 协同节能研究

课题立项汇报

01 研究背景：电气化铁路节能降耗的双重挑战



源端痛点：变压器低效与高费

牵引负荷具有极强的随机性，新线开通初期常陷入“大马拉小车”的困境，空载损耗居高不下，叠加两部制电价计费模式，造成成本与能耗的双重浪费。



能耗基数庞大：牵引能耗占全国电力消费 1% 以上，年用电量超 500 亿 kWh，节能潜力巨大。



运行效率低下：新线负荷率常低于 30%，变压器长期轻载运行，空载损耗占比显著增加。



电价成本高企：执行两部制电价，基本电费按变压器额定容量计收，导致“低负荷、高电费”。



荷端痛点：制动能量利用率低

列车制动产生的大量再生电能，因缺乏有效的协同吸收机制，绝大多数被制动电阻耗散，即便回馈电网也面临收益低、限制多的困境。



能量潜力巨大：再生制动能量约占牵引总能耗的 15%~30%，是极具价值的绿色能源。

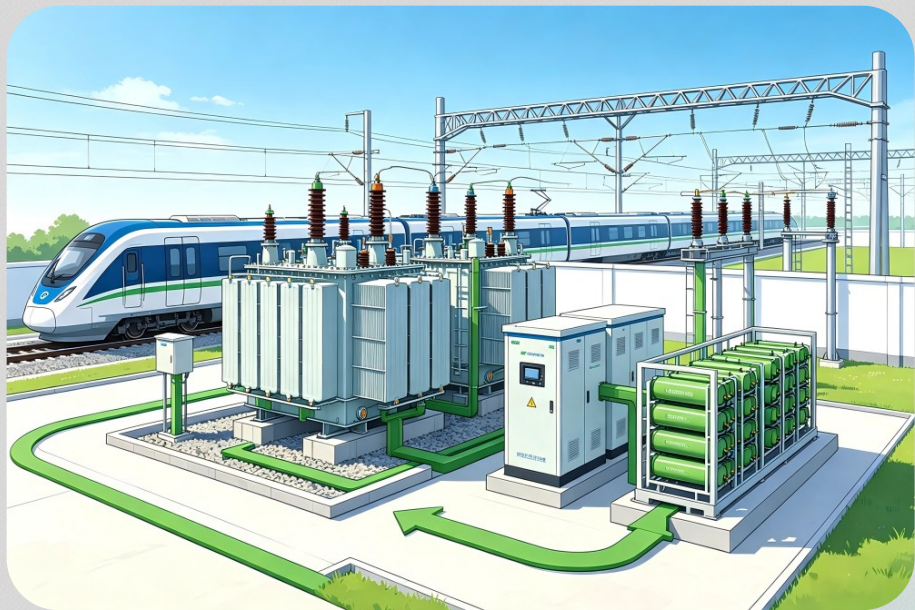


浪费现象普遍：若区间无其他列车处于牵引状态，再生能量无法被吸收，只能回馈电网。



回收利用受限：回馈电网受限于并网标准和电价政策，地面储能技术缺乏与变压器运行的系统级协同。

01 研究意义：“源 - 荷”协同，实现 $1+1>2$ 的综合效益



牵引变压器与储能系统的物理耦合是协同的基础



问题本质：打破“源”与“荷”的优化孤岛

传统模式下，牵引供电的“源端”（变压器）与“荷端”（列车制动回馈）往往独立优化，未能充分挖掘二者互补的能效潜力，导致系统整体运行经济性受限。



协同潜力：双向赋能的增益循环

储能系统削峰填谷，平滑负荷曲线，为变压器调容创造理想工况；而变压器的灵活变容又能降低储能配置容量与充放频次，延长电池寿命，形成“ $1+1>2$ ”的双向优化闭环。



研究目标：全环节的经济与节能双赢

深度融合卷铁芯可调容变压器与再生制动储能技术，通过协同能量管理策略，实现降低变压器空载损耗、节省基本电费支出，同时最大化回收利用制动能量，达成系统级综合效益最优。

02 国内外研究现状：现有技术成果



01 卷铁芯可调容变压器

核心优势：空载损耗降低 25%~40%，空载电流降幅达 70%，硅钢片利用率 100%。
灵活调容：支持 2 级或 3 级容量调节，半容量运行时空载损耗可再降低 75%，完美适配牵引负荷波动特性。



02 再生制动能量回收技术

国内进展：国内在储能配置与能量管理策略上取得突破，飞轮与超级电容技术已工程化应用。
国际前沿：日本、德国在铁路功率调节器 (RPC) 及混合储能集成方面处于领先地位，实现能量高效馈送。

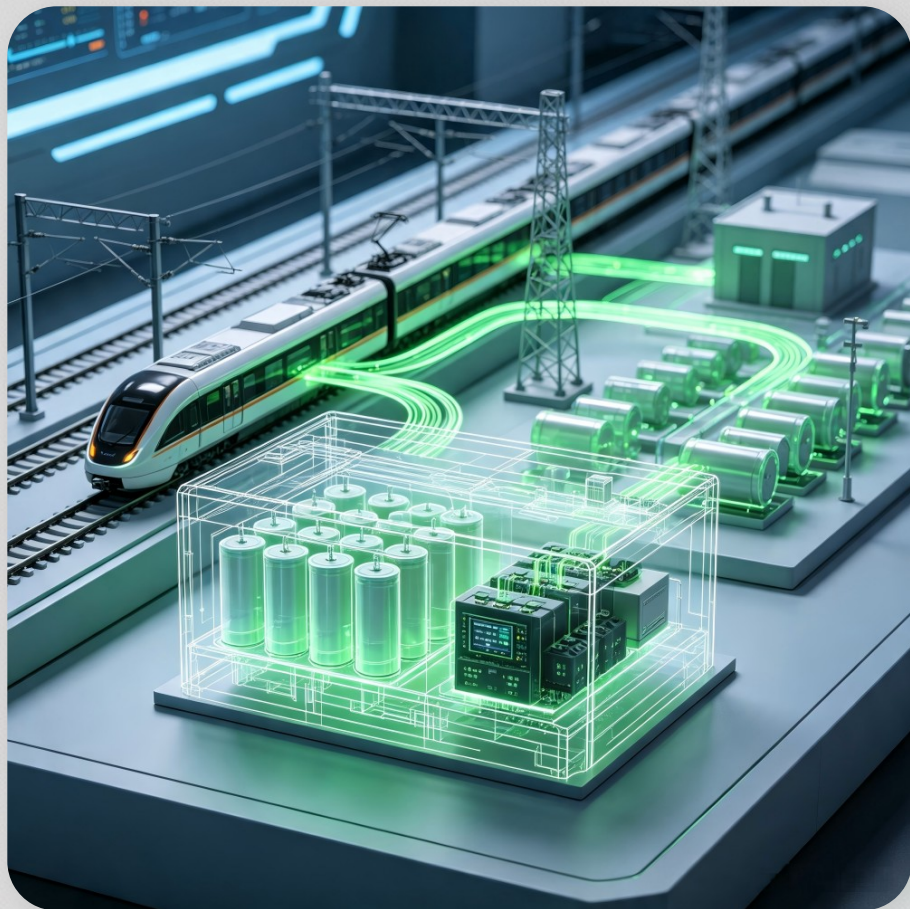
03 电价机制与降本增效潜力

两部制电价优化：
针对基本电费按“容量 / 需量”计收的规则，利用调容技术动态匹配变压器容量与实际负荷，从根本上规避容量电费的无效支出，优化用电成本结构。

显著的节费效果：
实际案例测算显示，单座牵引变电站应用可调容技术后，月均节省基本电费可达 31.2 万至 44.2 万元，全生命周期经济效益显著。

绿色发展契合：
该技术路线符合国家“双碳”战略及绿色铁路建设导向，不仅能降低运营成本，还能减少电网无功损耗，具备极高的推广价值。

02 国内外研究现状：现状评价与研究空白



01 / 现有研究的局限与痛点

- 研究割裂：变压器调容与储能技术多独立开展，缺乏系统级协同架构与能量管理策略。
- 目标偏差：未充分纳入“两部制电价”政策约束，节能效果无法有效转化为经济收益。
- 缺乏统筹：缺少面向牵引供电全系统的能效提升综合优化模型，难以实现全局最优。

02 / 本课题的核心创新与切入点

- 协同融合：构建“调容变压器 + 储能系统”的联合运行架构，实现双向互动。
- 价值重构：建立含电价约束的多目标优化模型，实现技术可行性与经济最优性的统一。

03 研究目标与内容

总体研究目标

建立可调容变压器与再生制动储能系统协同运行的架构模型与能量管理策略，通过仿真验证与经济性评估，形成一套可工程推广的集成化技术方案，旨在提升牵引供电系统能效，降低运营成本，为电气化铁路的绿色低碳、经济高效运营提供坚实的理论支撑与技术路径。

01 协同架构设计

- 净负荷建模：构建牵引变电所净负荷计算模型，量化牵引负荷与再生制动回馈功率的动态耦合关系，解析能量流动特性。
- 系统拓扑搭建：设计可调容变压器与地面储能系统的电气连接架构，明确设备接口规范与通信交互逻辑。
- 调控效果分析：仿真分析储能充放电对牵引网净负荷的削峰填谷效果，验证其对电压质量的调节与改善作用。

02 协同能量管理策略研究

- 多目标优化模型：建立以“年度综合电费最小化”和“再生制动能量利用率最大化”为核心的双目标优化模型。
- 计费策略适配：研发容量法与需量法计费模式的动态选择机制，根据负荷特性优化电费支出结构。
- 智能调度算法：开发基于短期负荷预测的储能充放电计划与变压器容量档位自适应切换算法，实现系统智能调控。

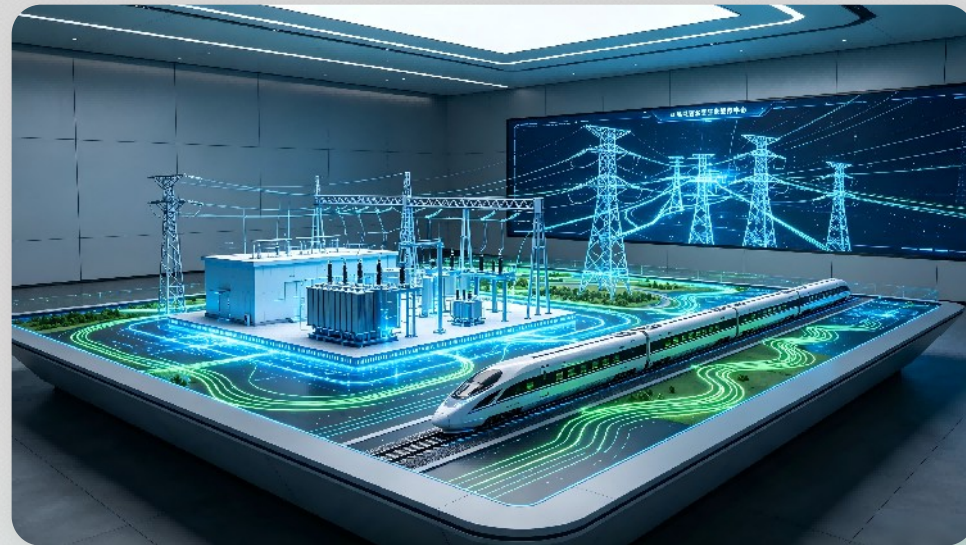
03 研究目标与内容

03 变压器切换控制与热特性研究

- 剖析调容切换的电磁暂态机理，设计同步切换控制与限流保护策略，抑制涌流与过电压风险。
- 构建变压器暂态热路模型，量化过载工况下热点温升规律及反复切换对绝缘热老化的累积影响。
- 制定储能系统动态功率补偿方案，平滑容量切换过程，确保供电连续性与电能质量稳定。

04 协同节能仿真验证与经济性评估

- 搭建“源 - 储 - 荷”协同仿真平台，集成高精度设备模型与真实电网运行参数。
- 量化评估方案在降低空载损耗、提升再生能源利用率及节约基本电费方面的经济效益。
- 开展“仅调容、仅储能、协同控制”多场景对比分析，验证策略的节能增效优势。



仿真验证平台

依托专业电力系统仿真软件，构建高保真的数字孪生环境，复现复杂电网工况，为协同控制策略的可行性、稳定性与经济性提供科学的量化验证与数据支撑。

04 拟解决的关键问题

01

协同能量管理的多目标优化

需在两部制电价约束下，兼顾变压器容量切换与储能充放电策略的同步优化。

核心难点：多时间尺度（日前 - 实时）与多目标（成本、能效、寿命）高度耦合，求解空间复杂，传统算法难以兼顾精度与速度。

02

设备间的动态协调控制

储能充放电改变净负荷触发调容，而变压器切换的暂态过程又会影响储能运行，二者存在强动态耦合。

核心难点：需设计抗干扰的协调控制逻辑，避免控制冲突，确保切换过程的平滑过渡与系统运行的绝对安全。

03

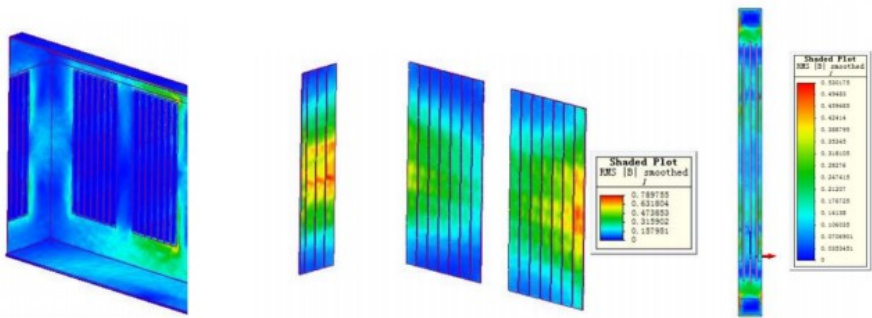
两部制电价下的联合决策

变压器调容优化容量电费，储能削峰降低需量电费，两种策略需在复杂的经济性博弈中寻找平衡点。

核心难点：需建立高精度的电费测算模型，基于实时工况动态选择最优计费方式，实现经济成本的最小化。

研究意义：解决上述关键问题，将为铁路的经济高效运行提供理论支撑与技术保障，推动牵引负荷与电价机制的深度融合。

05 技术路线与方法



油箱漏磁分布

磁屏蔽漏磁分布

拉板漏磁分布

本研究采用“理论分析—建模仿真—策略开发—实证评估”的递进式技术路线，通过四个阶段的闭环推进，构建多时空尺度的协同优化体系，实现从机理研究到工程应用的无缝衔接，确保方案的科学性与落地性。

01 基础数据与特性分析

采集牵引负荷、列车运行图及线路拓扑数据，量化分析负荷波动规律与再生制动能量的时空分布特征，为模型构建夯实数据基础。

02 架构设计与仿真建模

建立变压器、储能系统及列车群的精细化数学模型，搭建“源 - 储 - 荷”多主体协同仿真平台，复现真实电网的动态运行场景。

03 能量管理策略优化

构建以节能效益最大化为目标的多目标优化模型，开发日前经济调度与实时协调控制的双层策略，实现能量的梯级高效利用。

04 平台验证与综合评估

搭建硬件在环验证平台，开展全工况运行测试，量化评估系统的节能效果、运行稳定性及投资回报周期，形成可推广的应用方案。

06 创新点



01 理论创新

提出“源 - 储 - 荷”协同节能新架构

将可调容变压器、再生制动储能与牵引负荷有机融合，突破各环节独立运行的局限，构建三位一体的协同架构，实现能量的梯级利用与系统层面的高效调度。



02 方法创新

构建面向两部制电价的能量管理策略

以两部制电价为核心约束条件，建立多目标优化模型，联动调节变压器容量与储能充放电策略，在保障供电可靠性的前提下，最大化系统的综合经济效益。



03 技术创新

形成可工程推广的协同控制技术方

案
研发强耦合系统的动态协调控制算法，解决多设备联合运行的稳定性难题，形成具备自主知识产权的成套技术方案，为工程化落地提供可靠的技术支撑。

07 预期成果

01 协同节能技术研究报告

成果形式：研究报告 | 产出数量：1 份，针对可调容变压器与再生制动储能协同节能的技术分析与总结

02 变压器智能切换控制方法

成果形式：专利 | 产出数量：1 ~ 2 项，实现卷铁芯超过载可调容变压器的平滑切换

03 协同节能与电价优化论文

成果形式：论文 | 产出数量：1 ~ 2 篇，在高水平学术刊物发表研究成果，提升学术影响力

08 经济效益评估：核心经济效益分析

01 降低基本电费效益

年节约 **558 ~ 1016** 万元 / 座

采用可调容方案动态匹配负荷，大幅削减基本电费支出；超容与三级调容组合方案在低负荷期，单站月省电费超 44 万元，降幅达 53.1%。

02 降低空载损耗效益

综合损耗降低 **25% ~ 75%**

卷铁芯技术使空载损耗降低 25% 以上，半容量运行模式再降约 75% 损耗；以一座常规牵引变电所（主变 63MVA）为例，卷铁芯 + 调容协同后单台主变年降低空载损耗约 19 万 ~ 31 万 kWh，折合减 CO₂ 约 115 ~ 190 吨。

03 再生制动能量回收

能量利用率提升至 **70% ~ 85%**

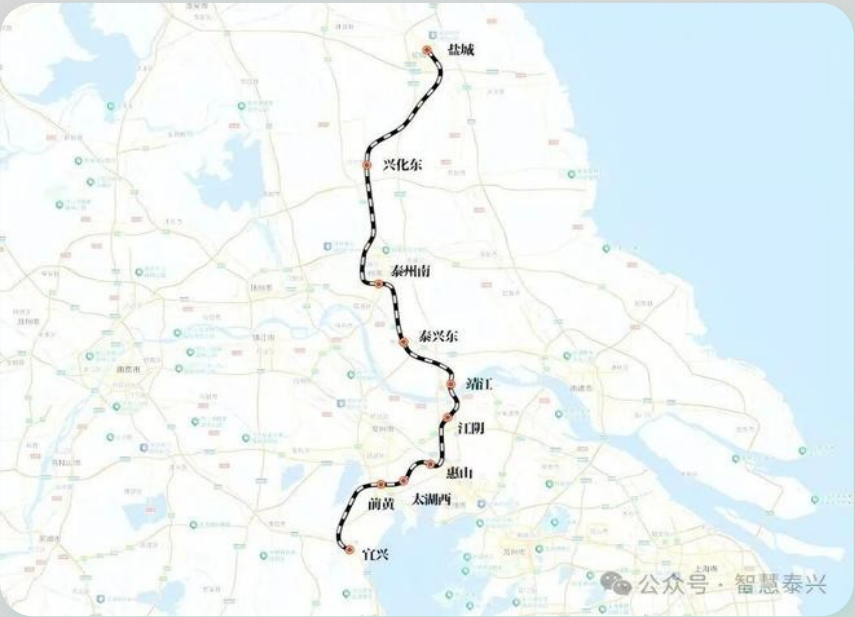
突破传统 30%-50% 的回收瓶颈，实现制动能量的高效再利用；单座牵引变电所年回收电能可达 30 万至 80 万 kWh，显著提升能源利用效率。

04 延缓增容投资效益

资产全寿命周期成本显著优化

通过储能削峰填谷与变压器短时过载能力的协同作用，有效延缓牵引变电所增容改造的时间节点，减少基础设施重复建设投入，降低长期运维成本。

08 经济效益评估：以盐宜铁路为例的测算



图示：盐宜铁路线路走向示意

盐宜铁路盐宜铁路位于江苏省境内，呈南北走向。线路北起盐城市，向南经兴化，行经泰州市及下辖泰兴，于靖江穿越长江天堑后进入苏南，经无锡市江阴、惠山和常州市南部，终至宜兴，正线全长 311.388km。全线新建光华村、施家舍、靖江、惠山 4 座牵引变电所，安装容量为光华村 2×（ 31.5+31.5 ）MVA、施家舍 2×（ 31.5+31.5 ）MVA、靖江 2×（ 40+31.5 ）MVA、惠山 2×（ 31.5+40 ）MVA

⚡ 年基准电费

8,393 万元 / 年

基于 4 座牵引所、269MVA 计费容量的容量法基准测算。

💰 年综合节约

2233+ 万元 / 年

覆盖基本电费、空载损耗及再生制动收益，效益显著。

🕒 投资回收期

2 ~ 4 年

具备极短的回报周期，技术方案经济可行性高。

01 基本电费压降

按 25%~45% 的节约比例，预计年减少支出 **2098-3777 万元**，为主要节能收益来源，直接降低运营成本。

02 空载损耗优化

通过设备与系统优化，年减少空载损耗约 **75-125 万元**，提升供电效率，减少不必要的能源浪费。

03 再生制动收益

利用列车制动能量回馈电网，预计年产生收益 **60-160 万元**，实现变废为宝，挖掘能源利用价值。

09 社会效益评估



本项目在实现显著节能降碳的同时，构建了更安全可靠的供电体系。其技术成果填补了行业空白，为相关政策落地提供了坚实的技术保障，具有广泛的社会示范效应与长期价值。



助力“双碳”目标

有效降低牵引供电系统能耗。以盐宜铁路为例，全线 4 所 8 台主变采用卷铁芯技术仅此一项即可年降空载损耗约 80 万 ~ 130 万 kWh，折合节约标准煤约 100 ~ 160 吨、减 CO₂ 约 500 ~ 800 吨，推动绿色交通发展。



提升供电可靠性

增强变压器 1.3 倍长期过载能力，配合储能系统的短时功率支撑，有效解决供电瓶颈，大幅提升铁路供电系统的稳定性与电能质量。



技术创新与示范

提出原创性的技术解决方案，填补了国内外相关领域的研究空白，为行业技术升级提供了新的理论依据与实践方向，起到良好的示范引领作用。



支撑电价改革落地

为两部制电价政策在电气化铁路领域的实施提供关键技术支撑，助力优化铁路运营成本结构，推动行业电价机制的市场化与科学化改革。

感谢聆听！

敬请各位专家批评指正