



铁路牵引供电系统的光储优化配置与保护方案研究

邵佳好¹, 付君², 关达², 王永斌², 肖芷涵¹, 李腾¹

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044;

2. 国能新朔铁路有限责任公司 供电分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300)

摘要: 随着低碳铁路的持续发展, 新能源在铁路牵引供电系统中的应用比例不断提高。光伏直接接入牵引供电系统时, 由于光伏出力和牵引负荷均具有波动性, 易导致牵引供电系统薄弱, 引发电能质量下降等问题。针对上述问题, 文章以网损最小为目标, 建立光储优化配置模型, 评估集中式与分布式光储接入对电压的支撑效果与电压波动情况。在此基础上, 建立含光储的27.5 kV牵引供电系统仿真模型, 分析不同光储接入方案对短路电流与负荷电流的影响, 并探讨继电保护在光储接入条件下的整定优化策略, 为铁路牵引供电系统新能源消纳能力的提升与继电保护技术应用提供理论依据。研究表明, 线路中间集中式接入光储时, 在降低网损和提升电压稳定性方面效果最佳, 但两种接入方案均会对继电保护系统产生一定影响, 且集中式相较于分布式接入对保护的影响更小, 因此, 可采用自适应整定的广域保护予以应对。

关键词: 铁路牵引供电系统; 新能源; 储能; 优化配置; 继电保护

中图分类号: U223

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)06-0119-08

0 引言

铁路运输在我国交通体系中占据重要地位。截至2024年底, 我国铁路营业里程达到16.2万km, 其中高速铁路4.8万km, 电气化铁路12.3万km^[1]。我国铁路年总电能消耗超1 000亿kWh, 其中占比超过70%的牵引用电全部依赖公用电网。随着可再生能源利用比例的提升, 铁路沿线光伏及储能技术的接入已成为推动铁路绿色转型的重要途径。可见, 促进新能源与储能接入电气化铁路牵引供电系统, 实现铁路绿色发展已成为推动铁路绿色转型的重要途径^[2-3]。

光储接入会显著改变牵引供电系统的短路电流和负荷电流分布, 进而影响现有继电保护的動作特性。传统的纵联保护、方向距离保护及过流保护均基于固定的故障电流方向、幅值与阻抗特性整定。在光储接

入后, 分布式电源在故障期间的动态输出可能导致短路电流大小、方向判据改变, 阻抗计算出现偏差等现象, 进而导致继电保护的灵敏性、选择性、速动性下降, 甚至出现拒动或误动。

目前, 已有研究在光储优化配置和继电保护适应性改进方面取得一定成果。在容量配置与能量管理层面, 文献[4]针对柔性牵引供电系统容量配置问题, 提出了兼顾短期运行成本与长期投资回报的双层规划模型; 文献[5]针对光伏发电的波动性, 提出了牵引供电系统的鲁棒性控制模型及列生成求解方法。文献[6]考虑光伏出力与牵引负荷的“双波动性”, 基于长短期记忆神经网络构建了牵引负荷预测模型。在继电保护适应性改进层面, 文献[7]提出了基于复合序网络的自适应电流保护和基于电流突变量的故障选相方法, 整定值可随运行方式和故障类型自适应调整; 文献[8-9]针对多光伏接入配电网后的保护问题, 提出了基于区域

基金项目: 国能集团新朔铁路“网-源-储-车”协同供能技术应用研究项目 (GJNY-21-189, GNXS-2021-07)

通信作者: 李腾, 女, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事储能在供电系统中的应用及控制方面的研究; E-mail: liteng@bjtu.edu.cn

引用格式: 邵佳好, 付君, 关达, 等. 铁路牵引供电系统的光储优化配置与保护方案研究[J]. 机车电传动, 2025(6): 119-126.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.205.

Citation: SHAO Jiahao, FU Jun, GUAN Da, et al. Research on optimal PV-storage configuration and protection strategy for railway traction power supply[J]. Electric drive for locomotives, 2025(6): 119-126.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.06.205.

划分的自适应保护策略及方向元件加装方案。在广域保护与协同控制层面,文献[10-13]引入广域测量与通信技术,通过信息交互与集中协调实现保护的协同控制。此外,西南交通大学团队分析了再生制动能量利用系统的运行原理及其对牵引供电系统保护的影响,并基于“故障导向安全”原则提出了相应的保护方案^[14]。

上述研究为光储接入牵引供电系统提供了一定参考,但现有文献多集中于一般电力系统或配电网,但多集中于一般电力系统或配电网,对牵引供电系统中分布式新能源接入的保护适配性研究仍较缺乏。为此,本文针对源荷双重波动引发的电能质量问题以及新能源接入牵引供电系统导致的继电保护失配问题,开展光储优化配置与保护策略研究。首先,建立以网损最小为目标的光储联合优化选址模型,利用MATLAB平台下的YALMIP优化工具箱,并调用底层数值求解器CPLEX对模型进行求解,得到集中式和分布式两种光储接入方案。在此基础上,构建含光储的27.5 kV牵引供电系统仿真模型,评估不同光储接入方案对短路电流与负荷电流分布的影响,并进一步探讨继电保护在光储接入条件下的整定优化策略。

1 光储系统优化配置模型

针对电气化铁路牵引供电系统的运行特点,建立光伏储能联合优化配置模型。该模型以最小化系统网损为主要优化目标,并引入节点电压约束、支路电流约束、光储运行约束等条件,以实现光储系统的经济性与供电可靠性^[15]。

1.1 模型目标

模型以网损最小为目标函数,设 L 为支路集合, R_{ij} 为支路电阻, I_{ij} 为支路电流,目标函数为

$$\min f_{\text{loss}} = \sum_{(i,j) \in L} (R_{ij} I_{ij}^2) \quad (1)$$

1.2 约束条件

1) 各节点电压约束

保证每个节点的电压在允许范围内,防止电压超限,具体如下:

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}, i=1, \dots, 12, U_{\min} = 19 \text{ kV}, U_{\max} = 29 \text{ kV} \quad (2)$$

2) 功率平衡约束

流入节点 i 的所有有功功率之和等于流出节点的所有有功功率之和。如式(3)和式(4)所示,对于节点 i 而言,等式左边包括来自各个支路有功功率 P_{ji} 减去线路损耗 $R_{ji}I_{ji}^2$,再加上光伏出力 $P_{\text{pv},i}$,最后减去节点负荷有功 $P_{L,i}$,等式右边为从节点 i 流向其余节点 j 的支路有

功功率 P_{ij} ,无功功率计算同理。

$$\sum_{j \in \Omega_i^{\text{in}}} (P_{ji} - R_{ji} I_{ji}^2) + P_{\text{pv},i} - P_{L,i} = \sum_{j \in \Omega_i^{\text{out}}} P_{ij}, i=1, \dots, 12 \quad (3)$$

$$\sum_{j \in \Omega_i^{\text{in}}} (Q_{ji} - X_{ji} I_{ji}^2) - Q_{L,i} = \sum_{j \in \Omega_i^{\text{out}}} Q_{ij}, i=1, \dots, 12 \quad (4)$$

式中: Ω_i^{in} 和 Ω_i^{out} 分别表示输入和输出节点 i 的支路集合。

3) 支路电压-功率约束

采用DistFlow模型,基于支路的功率与电压关系的约束,将电压平方、功率流和电流平方关联起来,见式(5)。

$$U_i^2 - U_j^2 + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij}^2 - 2(R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}) = 0, (i,j) \in L \quad (5)$$

4) 二阶锥松弛约束

为保证模型的凸性和可解性,引入支路功率与电流、电压之间的二阶锥约束,具体如下:

$$\left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ I_{ij}^2 - U_j^2 \end{bmatrix} \right\|_2 \leq I_{ij}^2 + U_j^2 \quad (6)$$

5) 光伏输出功率约束

光伏系统的输出功率由选址决策变量与出力曲线共同决定,并受到安装总数约束,最多允许在2个节点处配置光伏单元。光伏的约束条件为

$$P_{\text{pv},i} = u_{\text{pv},i} P_{\text{pv}}(t), \sum_i u_{\text{pv},i} = 6, u_{\text{pv},i} \in \{0, 1\} \quad (7)$$

式中: $u_{\text{pv},i}$ 表示光伏选址决策变量,1表示节点 i 选中安装光伏,0表示不安装; $P_{\text{pv}}(t)$ 表示光伏出力曲线对应功率; $\sum_i u_{\text{pv},i}$ 表示光伏最大安装个数。

1.3 求解算法

在MATLAB/YALMIP环境中构建优化模型,并调用CPLEX求解器进行求解。算法流程如图1所示,主要包括参数输入、模型转化、迭代求解和方案比选4个步骤。最终输出光伏最优接入位置、网络损耗及各节点电压分布,为后续继电保护提供数据基础。

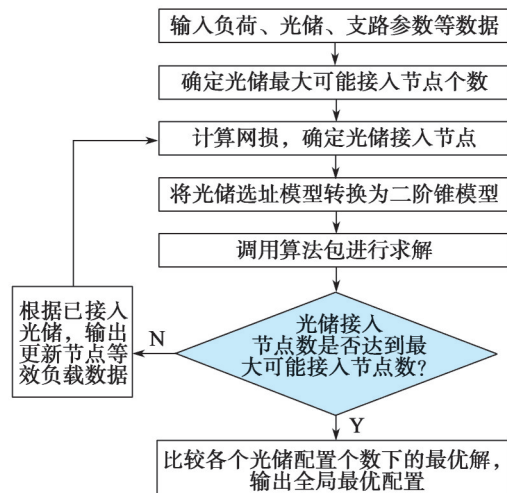


图1 算法流程图

Fig. 1 Solution flowchart

首先输入负荷、光储单元、支路等参数, 确定光储最大可接入节点数; 接着计算网损并选定接入节点, 将选址模型转化为二阶锥模型后调用算法包求解; 随后判断接入节点数是否达到最大接入节点数, 未达到则循环调整接入节点并重新求解, 达标后对比各配置方案, 输出全局最优的光储接入节点配置。

1.4 仿真分析

以海勒斯壕南线牵引供电系统为研究对象进行仿真分析, 系统结构如图2所示。系统采用27.5 kV交流牵引供电方式, 运行模式为上下行线并联的复线结构, 机车沿上行线运行。系统等值线路参数为: 单位长度阻抗 $Z_{\text{th}}=0.54\angle 65^{\circ}\ \Omega/\text{km}$, 全长30 km, 对应等值电阻 $R_{\text{th}}=6.85\ \Omega$, 等值电抗 $X_{\text{th}}=14.68\ \Omega$ 。为便于分析, 将线路划分为5段, 每段长6 km。机车牵引负荷为10 MW, 机车从线路末端(节点6)向首端(节点1)运行。

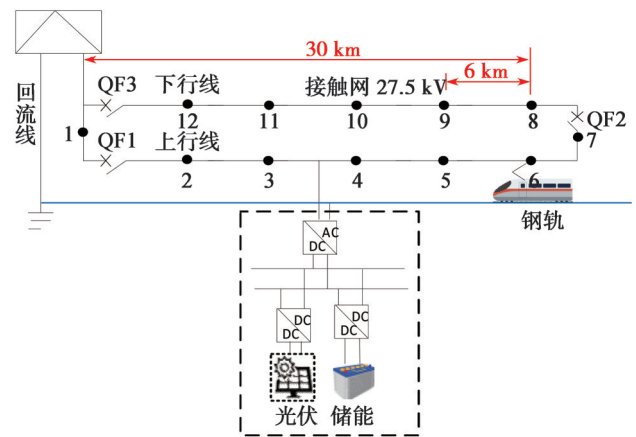


图2 牵引供电系统模型
Fig. 2 Model of traction power supply system

为比较不同光储配置方案对系统的影响, 设计两种接入方式。方案一为集中接入1个10 MW的光储单元; 方案二为接入2个5 MW的光储单元。

1) 不同光储方案下的网损对比

图3和图4分别给出了集中式与分布式接入光储时, 不同节点接入位置下的网损变化情况。当采用集中式接入时, 系统网损随光储接入节点位置变化而波动。由图3可知, 当光储接入节点4时, 网损最低, 为1 137 kW, 相较于未接光储显著降低。这是由于光储位于线路中部时, 可以在机车整个运行区间内发挥较好的“就近供电”作用。当机车位于光储下游时, 光储直接供电, 减少电流经过的线路段距离; 当机车位于光储上游时, 光储与首端电源协同供电, 降低首端电流输出, 实现整体网损的最小化。

对于分布式接入方式, 图4表明2个5 MW光储分别接入节点2和节点5时, 系统网损最小, 仅为923 kW。此时两处光储形成分段供电, 节点5光储在机车靠近末端时承担主要负荷, 而当机车靠近首端时, 节

点2光储与首端协同供电, 构成接力式供电结构, 显著优化了功率分配路径, 进一步降低网损。

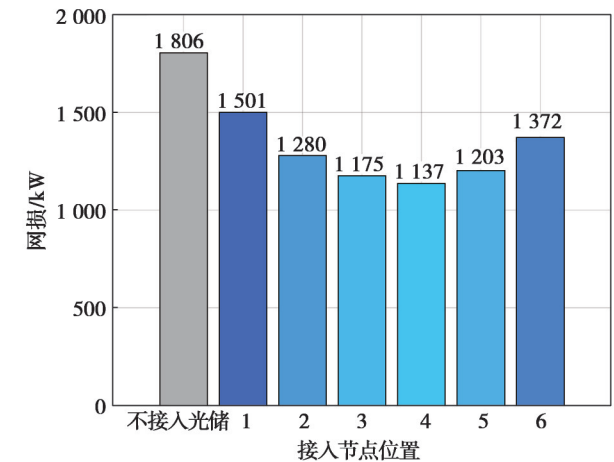


图3 集中式接入光储时网损对比
Fig. 3 Comparison of transmission losses under centralized PV-storage integration

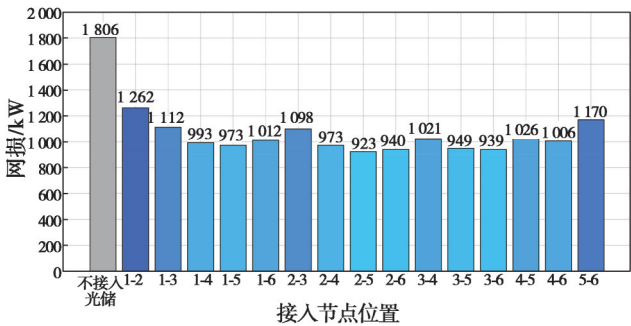


图4 分布式接入光储时网损对比
Fig. 4 Comparison of transmission losses under distributed PV-storage integration

不同方案下最优光储接入位置与容量分配如表1所示。

表1 不同方案下光储接入位置与接入容量

Table 1 PV-storage integration locations and capacities by option

光储方案	光储位置	单个光储容量/MW
未接入光储	-	-
集中式接入	节点4	10
分布式接入	节点2, 节点5	5

2) 不同方案下的电压分布与支撑效果分析

分析机车在不同位置(节点1~节点6)时上行线系统节点电压的变化规律, 图5~图7分别展示了未接光储、集中接入和分布接入3种情形下的节点电压分布。

由图5可见, 在未接光储时, 机车运行至末端后系统电压明显下降; 而图6、图7表明, 光储接入后整体电压水平显著抬升, 体现了光储对电压的支撑作用。此外, 线路末端电压呈现上升趋势, 这是由于牵引所采用复线结构供电时, 机车位于上行线运行, 该处线路电压相对较低, 而另一条线路电压较高, 部分功率

会通过联络通道由电压较高的一侧向电压较低的一侧倒送,形成复线间的功率反送效应,使机车下游及末端节点的电压得到一定抬升。

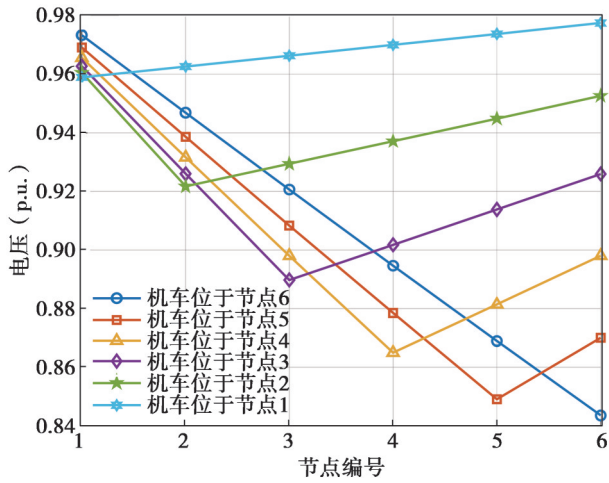


图5 机车位于不同位置时各节点电压变化(无光储)

Fig. 5 Voltage variations at nodes for different locomotive positions (without PV-storage integration)

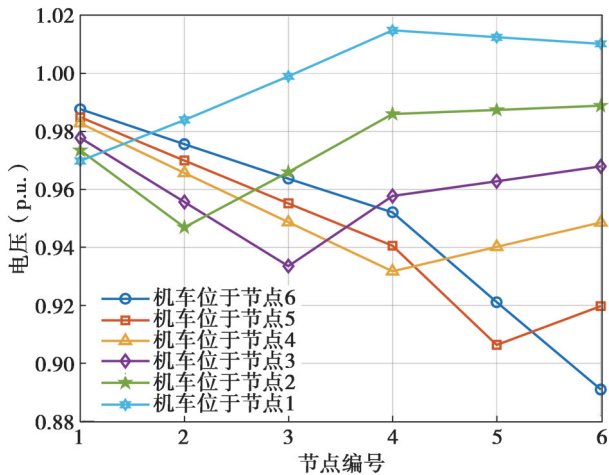


图6 机车位于不同位置时各节点电压变化(集中接入光储)

Fig. 6 Voltage variations at nodes for different locomotive positions (with centralized PV-storage integration)

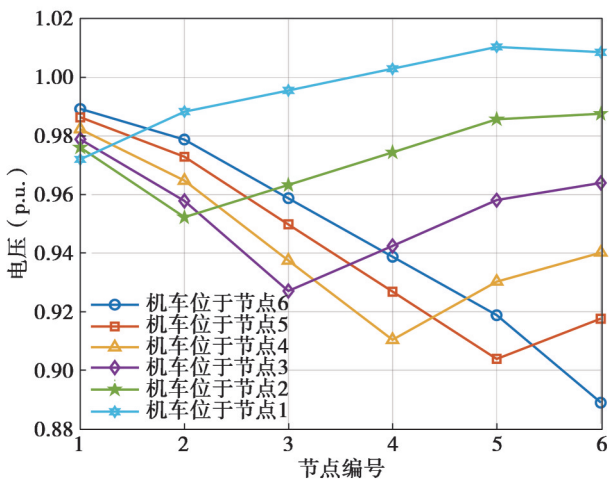


图7 机车位于不同位置时各节点电压变化(分布接入光储)

Fig. 7 Voltage variations at nodes for different locomotive positions (with distributed PV-storage integration)

为了更直观地比较不同方案下光储对电压的支撑作用,进一步计算各节点的平均电压,如图8所示。结果表明,两种光储接入方式均可有效提升节点电压,其中集中式接入提升幅度更大。

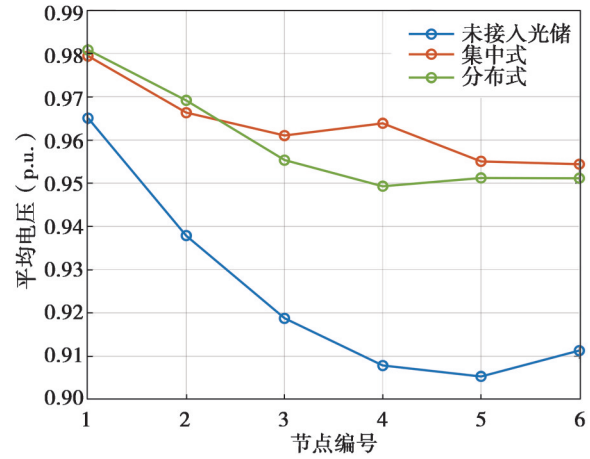


图8 各节点平均电压

Fig. 8 Average voltage at nodes

3) 电压灵敏度分析

为了评估光储接入对牵引供电系统电压波动的抑制效果,本文计算了不同光伏接入方案下各节点电压灵敏度的标准差。计算公式如下:

电压灵敏度的平均值 $\bar{U}_{SEN}$ 为

$$\bar{U}_{SEN} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_i - \bar{U}}{\bar{U}} \times 100\% \right) \quad (8)$$

电压灵敏度的标准差 $\sigma_{U_{SEN}}$ 为

$$\sigma_{U_{SEN}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_{SENi} - \bar{U}_{SEN})^2} \quad (9)$$

式中: U_{SEN} 表示某一时刻 i 的电压灵敏度; $\bar{U}_{SEN}$ 表示灵敏度平均值; U_i 表示某一时刻 i 的电压幅值; $\bar{U}$ 表示节点电压一段时间的平均值; $\sigma_{U_{SEN}}$ 表示电压灵敏度标准差; n 为一段时间内采样点的个数。

机车位于线路末端时不同光储接入方案下电压灵敏度标准差如图9所示。电压灵敏度标准差越小,线路各节点电压越稳定,反之,节点电压波动越大。结果表明,未接光储的电压灵敏度标准差最大,系统电压波动显著;引入光储后,电压波动明显减小。其中,集中式方案的灵敏度标准差最低,电压稳定性最佳。

4) 机车制动工况下电压支撑能力分析

为进一步验证光储优化配置方案在不同运行工况下的适应性,分析机车制动对系统电压的影响。铁路牵引系统中,机车在再生制动过程中会产生再生能量,可能引起牵引网电压升高,若超出允许范围将影响系统安全运行。

为评估光储系统集中接入节点4后对电压的支撑与抑制效果,基于海勒斯壕南牵引供电系统模型,结合实测制动功率(4.78 MW),仿真了机车在不同位置

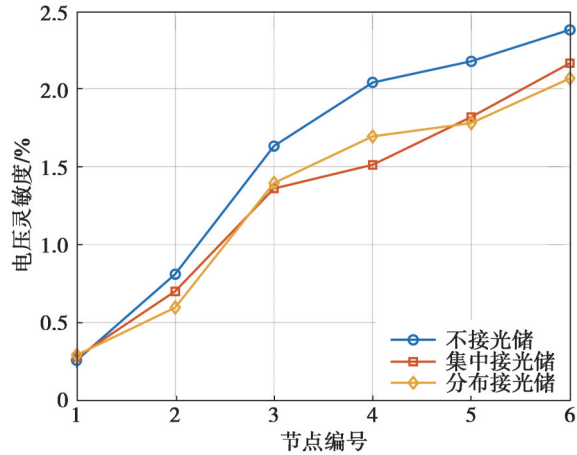


图9 机车位于线路末端时不同光储接入方案下电压灵敏度的标准差

Fig. 9 Standard deviation of voltage sensitivity for locomotive position at terminal under different PV-storage integration options

(节点1~节点6)制动时系统各节点的电压变化情况。

仿真结果如图10所示, 机车在不同位置进行制动时, 光伏与储能系统可协同调节功率流动, 从而有效抑制电压抬升, 系统各节点电压始终维持在1.09 p.u. 以下, 未出现电压超越上限现象。

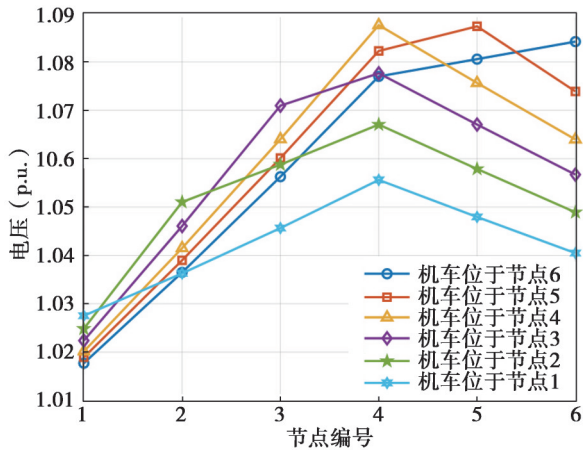


图10 机车位于不同位置时各节点电压变化

Fig. 10 Voltage variations at nodes for different locomotive positions

综上所述, 集中式接在节点4的光储配置方案在降低网损与电压支撑方面成效显著, 然而, 光储接入也会改变短路电流与负荷电流的分布, 给继电保护带来新的挑战。因此, 评估不同配置方案对保护系统的影响, 并对保护适配性进行深入研究, 是保障系统安全可靠运行的关键。

2 光储接入对牵引供电系统保护的影响分析

光储系统的接入在改善电能质量的同时, 也会影响继电保护装置的灵敏性与选择性。本章基于上述两

种光储配置方案, 分析其对上、下游保护的影响, 并通过仿真验证提出的分析结论。

2.1 光储接入对短路电流的影响

牵引供电系统的典型保护配置如图11和图12所示。系统主保护为速断保护和过流保护两类, 其中上游变电所馈线采用电流速断保护, 下游分区所馈线采用过流保护^[16]。

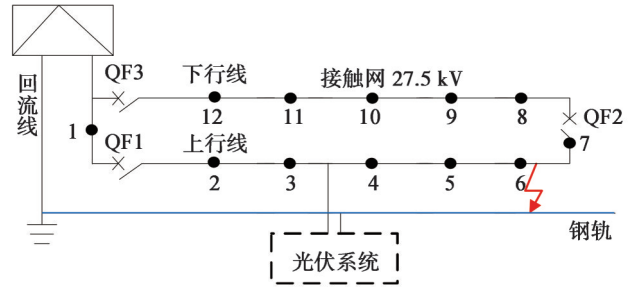


图11 变电所牵引馈线保护

Fig. 11 Protection of traction feeder at the substation

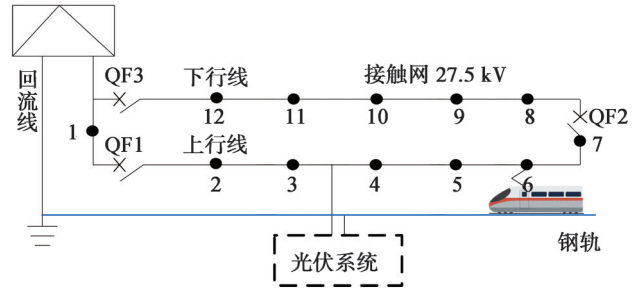


图12 分区所牵引馈线保护

Fig. 12 Protection of traction feeder at sectioning post

2.1.1 对上游保护的影响

上游馈线断路器QF1采用电流速断保护, 其整定计算为

$$I_{QF1_ACT} = K_{REL} I_{k,max} \quad (10)$$

式中: I_{QF1_ACT} 为电流速断保护的動作电流; $I_{k,max}$ 为分区所短路时的最大短路电流; K_{REL} 为可靠系数, $K_{REL} = 1.2$ 。

当牵引网末端发生短路时, 位于光储上游的保护QF1所测得的短路电流主要由电网侧提供。光储系统会提供一部分短路电流, 导致上级保护接收到的电流值小于实际故障电流, 即

$$I_{QF1} = I_{grid} < I_k = I_{grid} + I_{pv} + I_{ESS} \quad (11)$$

式中: I_{QF1} 为实际流过上游断路器的电流值; I_{grid} 为电网流过断路器的电流值; I_k 为分区所短路时的短路电流; I_{pv} 为光伏提供的短路电流; I_{ESS} 为储能提供的短路电流。

在此情况下, 测量值 I_{QF1} 低于整定值 I_{QF1_ACT} , 保护装置灵敏系数下降, 严重时可能造成保护拒动。

2.1.2 对下游保护的影响

当被保护线路末端最小短路电流为流过牵引网馈线最大负荷电流的 2.11 倍以上时, 可以采用过电流保护, 因此, 分区所馈线断路器 QF2 采用过电流保护, 整定原则为

$$I_{QF2_ACT} = \frac{K_{REL}}{K_R} I_{L_max} \quad (12)$$

式中: I_{QF2_ACT} 为过电流保护的動作电流; I_{L_max} 为牵引网馈线最大负荷电流; K_{REL} 为可靠系数, $K_{REL}=1.2$; K_R 为返回系数, $K_R=0.85$ 。

当光储接入后, 部分负荷电流由光储承担, 使馈线潮流分布发生改变, 可能会导致下游保护动作提前或灵敏度增大。

2.2 仿真验证

为验证上述分析结论, 本文基于海勒斯壕南牵引供电系统建立了仿真模型。对比不同光储方案上、下游保护的短路电流与负荷电流分布。

2.2.1 不同光储方案接入下对上游保护的影响

图 13 为 3 种方案下上游保护 QF1 检测到的短路电流。从图 13 可以看到, 未接光储时短路电流为 993.0 A, 集中式光储接入后短路电流降至 671.0 A, 分布式光储接入时减小为 620.9 A。

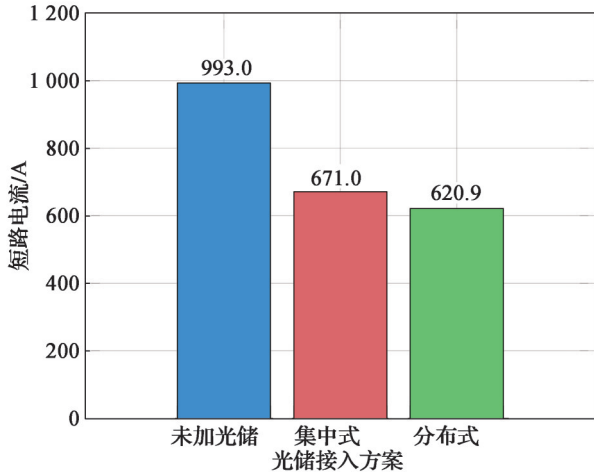


图 13 不同光储接入方案下对上游保护短路电流的影响

Fig. 13 Impact of PV-storage integration options on upstream short-circuit current protection

整定电流计算见式(13)。根据式(13)可知, 光储接入后上游保护测得的短路电流均低于整定电流, 导致保护灵敏性下降, 存在拒动风险, 且分布式方案影响更为显著。

$$I_{QF1_ACT} = K_{REL} I_{k,max} = 1.2 \times 993 = 1191.6 \text{ A} \quad (13)$$

2.2.2 不同光储方案接入下对下游保护的影响

如图 14 所示, 当未接光储时, 机车位于线路末端负荷电流最大, 为 165.4 A, 对应整定电流为

$$I_{QF2_ACT} = \frac{K_{REL}}{K_R} I_{L_max} = \frac{1.2}{0.85} \times 165.4 = 233.5 \text{ A} \quad (14)$$

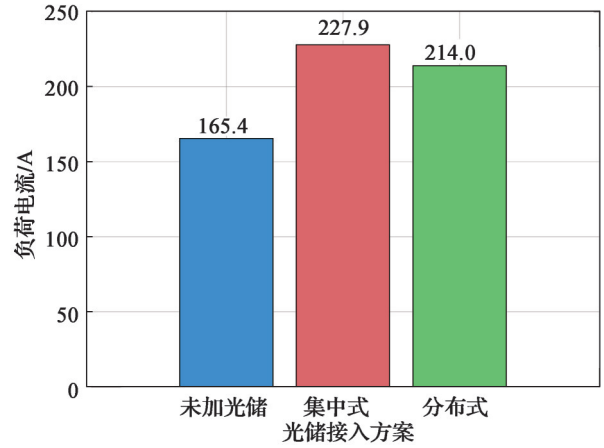


图 14 不同光储接入方案下对下游保护负荷电流的影响

Fig. 14 Impact of PV-storage integration options on downstream load current protection

引入光储后, 集中式与分布式方案检测到的负荷电流分别为 227.9 A 与 214.0 A, 均高于原系统负荷电流, 增加了保护误动风险。

综上, 光储接入导致上游保护灵敏度降低, 严重时可能会造成拒动, 而下游保护灵敏度增大, 可能会造成保护提前动作。因此, 为保证保护可靠动作, 需进行自适应整定与协调优化。

2.3 继电保护优化方案

在传统牵引网的继电保护中, 变电所速断保护与分区所过流保护均基于固定整定值。然而光储接入后, 短路电流与负荷电流大小受光伏与储能出力影响, 呈现动态变化, 且机车负荷位置是移动的, 且幅值大小具有冲击性和波动性, 无法继续采用固定整定值。此外, 传统继电保护装置仅依赖局部量测信息, 难以准确反映系统整体运行状态, 易导致保护拒动、误动及动作配合失衡。基于现有研究成果, 本文采用一种基于自适应整定的广域保护方案^[17-18]。

该方案通过引入广域测量系统和通信网络, 根据电力系统多点信息, 对故障进行快速、可靠、精确的切除, 实现不同保护装置间的实时信息交互与集中协调。此外, 中央协调单元通过采集上下行电流, 结合光储出力数据与机车移动位置和功率, 实时计算故障时的短路电流分布及负荷电流水平, 对速断与过流保护的定值进行动态调整, 并通过通信网络下发至对应保护装置, 保证上下游保护间的动作配合。

该方案构建了一个具备灵敏、可靠、速动特性的自适应保护体系, 有效解决了传统固定定值保护在新能源接入后面临的灵敏性下降、选择性配合困难等问题, 避免新能源出力波动及机车负荷移动对保护配合关系造成的破坏, 为牵引供电系统在高比例新能源接入下的安全稳定运行提供了保障。

3 结论

本文针对铁路牵引供电系统电能质量问题, 以及新能源接入背景下面临的继电保护适应性问题, 提出了光储优化配置方案, 探讨了继电保护优化方案, 并通过仿真验证了其有效性。主要结论如下:

①建立了以网损最小为目标的光储联合优化配置模型, 并综合考虑节点电压、电流及光储运行等约束条件, 对不同光伏接入场景进行仿真求解。结果表明, 光伏集中式接入铁路线中部在降低线路损耗和提升电压稳定性方面效果最优。

②光储接入改变了牵引供电系统的短路电流分布和负荷电流水平, 可能导致上游保护灵敏度下降甚至拒动, 下游保护出现误动风险。尤其在光储高渗透率条件下, 传统定值保护难以保证灵敏性、速动性和选择性。

③针对光储接入后保护系统面临的灵敏度下降、误动、拒动风险等问题, 可采用基于实时计算的动态整定方法, 并结合广域测量与通信技术, 实现保护信息的交互与定值的动态下发。该方案将传统过流保护的离线计算整定值转换为在线实时计算整定值^[19], 有助于提升保护系统在不同运行方式下的协调性、速动性与可靠性, 为铁路牵引供电系统在新能源接入下的保护适配提供参考方向。

参考文献:

- [1] 国家铁路局. 2024年铁路统计公报[R]. 北京: 国家铁路局, 2025.
State Railway Administration. 2024 Railway statistical bulletin[R]. Beijing: State Railway Administration, 2025.
- [2] 贾利民, 程鹏, 张哲, 等. “双碳”目标下轨道交通与能源融合发展路径和策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 173-183.
JIA Limin, CHENG Peng, ZHANG Zhe, et al. Integrated development of rail transit and energies in China: development paths and strategies[J]. Strategic study of CAE, 2022, 24(3): 173-183.
- [3] 胡田飞, 刘济华, 李天峰, 等. 铁路与新能源融合发展现状及展望[J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 122-132.
HU Tianfei, LIU Jihua, LI Tianfeng, et al. Current status and prospect of the integration of railway and new energy[J]. Strategic study of CAE, 2023, 25(2): 122-132.
- [4] 杨健维, 冯素华, 郭惠斌, 等. 多变电所互联牵引供电系统光储容量优化配置[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(6): 1537-1549.
YANG Jianwei, FENG Suhua, GUO Huibin, et al. Optimal configuration of photovoltaic and hybrid energy storage system capacity in multi-substation interconnected traction

- power supply system[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2025, 60(6): 1537-1549.
- [5] 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.
- [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] 王钦. 适用于多个分布式电源配电网电流保护的研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
WANG Qin. Research on current protection for multiple distributed generation distribution networks[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023.
- [8] 张猛, 邱惠, 赵一萌, 等. 含多光伏配电网的分区域三段式电流保护方案[J]. 自动化与仪表, 2025, 40(4): 11-15.
ZHANG Meng, QIU Hui, ZHAO Yimeng, et al. Partitioned three-stage current protection scheme of distribution network with multi-photovoltaic connections[J]. Automation & instrumentation, 2025, 40(4): 11-15.
- [9] 陈茜, 白晶, 陈小月, 等. 分布式光伏并网对配电网的影响综述[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(27): 11491-11504.
CHEN Qian, BAI Jing, CHEN Xiaoyue, et al. Review of the impact of distributed PV grid integration on the power grid[J]. Science technology and engineering, 2024, 24(27): 11491-11504.
- [10] 齐子杰, 刘强, 瞿汉飞. 继电保护技术在智能电网建设中的应用[J]. 自动化应用, 2024, 65(增刊1): 312-314.
QI Zijie, LIU Qiang, QU Hanfei. Application of relay protection technology in smart grid construction[J]. Automation application, 2024, 65(Suppl 1): 312-314.
- [11] 李昊洋. 智能电网中继电保护技术的应用发展[J]. 智能城市, 2025, 11(5): 62-66.
LI Haoyang. Application and development of relay protection technology in smart grid[J]. Intelligent city, 2025, 11(5): 62-66.
- [12] 刘贺江, 董翠霞. 牵引供电系统中的广域保护综述[J]. 电气化铁道, 2019, 30(5): 24-26.
LIU Hejiang, DONG Cuixia. Overview of wide area protection in traction power supply system[J]. Electric railway, 2019, 30(5): 24-26.
- [13] 程彩红. 高速铁路牵引变电所继电保护方案优化研究[J]. 中国铁路, 2021(4): 85-91.
CHENG Caihong. Research on optimization of relay protection scheme at high speed railway traction substations[J]. Chinese railways, 2021(4): 85-91.
- [14] 杨凯, 胡海涛, 陈俊宇, 等. 电气化铁路再生制动能量利用系统保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9523-9534.

- YANG Kai, HU Haitao, CHEN Junyu, et al. Research on protection scheme of regenerative braking energy utilization system of electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9523-9534.
- [15] 熊正勇, 陈天华, 杜磊, 等. 基于改进灵敏度分析的有源配电网智能软开关优化配置[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 129-137.
- XIONG Zhengyong, CHEN Tianhua, DU Lei, et al. Optimal allocation of soft open point in active distribution network based on improved sensitivity analysis[J]. Automation of electric power systems, 2021, 45(8): 129-137.
- [16] 王永. 牵引供电系统在长期过负荷状态下的策略分析[J]. 铁道工程学报, 2012(5): 54-57.
- WANG Yong. Analysis of tactics about traction power supply system in long-term overload state[J]. Journal of railway engineering society, 2012(5): 54-57.
- [17] 王希. 广域自适应保护新原理的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- WANG Xi. Research on new principles of wide area adaptive protection[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [18] 张迪. 广域自适应保护在微网中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- ZHANG Di. Applied research of wide-area adaptive protection in microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [19] 张迪, 陈晶, 翟明岳. 自适应保护在微网中的应用研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(35): 9495-9499.
- ZHANG Di, CHEN Jing, ZHAI Mingyue. The research of adaptive protection in micro-grid[J]. Science technology and engineering, 2012, 12(35): 9495-9499.

Research on optimal PV-storage configuration and protection strategy for railway traction power supply

SHAO Jiahao¹, FU Jun², GUAN Da², WANG Yongbin², XIAO Zhihan¹, LI Teng¹

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Power Supply Branch of CHN ENERGY Xinshuo Railway Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300, China)

Abstract: With ongoing low-carbon efforts in the railway sector, renewable generation is increasingly being integrated into railway traction power supply systems. However, direct connection of photovoltaic (PV) generation can weaken the traction power supply systems and degrades power quality, due to fluctuations inherent in both PV output and traction loads. This study addresses these challenges by developing a PV-storage optimal configuration model that minimizes transmission losses and by evaluating centralized and distributed integration options to investigate their voltage support capability and induced fluctuation characteristics. A PV-storage integrated 27.5 kV traction power supply system was then modeled to analyze the impacts of the two integration options on short-circuit currents and load currents. Additionally, an optimization strategy for relay protection settings under PV-storage integration was explored to establish a theoretical basis for improving renewable energy consumption capability and applying relay protection techniques in railway traction power supply systems. Results indicate that midway centralized integration delivers better performance in reducing transmission losses and improving voltage stability. Both centralized and distributed configurations, however, affect the relay protection system, with the centralized option producing smaller impacts. Consequently, wide-area protection with adaptive settings is recommended to ensure safe and reliable operation under PV-storage integration.

Keywords: railway traction power supply system; renewable energy; energy storage; optimal configuration; relay protection