

风电场集电线路损耗分析与降损措施研究

孙忠江

金寨华西新能源发展有限公司，安徽 六安 237000

DOI:10.61369/EPTSM.2025090005

摘要：风电场集电线路是电能从风机传至升压站的关键通道，其损耗关乎风电场发电效率与经济效益。本文从损耗机理入手，系统剖析了线路电阻损耗、电压降损耗及运行管理损耗的影响因素，如线路长度、导线选型、布局、负载率及运维水平等。结合行业实践，从规划设计、设备选型、运行管理三方面提出降损举措，包括合理规划线路缩短长度、选用低电阻高导电率导线、采用多分段联络布局、动态调整负载分配防过载、加强巡检与绝缘维护等。研究表明，综合应用这些措施，能有效降低集电线路损耗，提升风电场能量转化效率，为风电场经济运行提供参考。

关键词：风电场；集电线路；损耗分析；降损措施

Study on Loss Analysis and Reduction Measures of Wind Farm Collector Line

Sun Zhongjiang

Jinzhai Huaxi New Energy Development Co., LTD. Lu'an, Anhui 237000

Abstract : As the critical transmission channel for power from wind turbines to substations, wind farm collector lines significantly impact overall efficiency and economic performance. This study systematically analyzes the mechanisms of line resistance losses, voltage drop losses, and operational management losses, examining key factors including line length, conductor selection, layout design, load factor, and maintenance practices. Drawing from industry best practices, the paper proposes three-tier mitigation strategies across planning/design, equipment selection, and operational management. These encompass optimized line length reduction, adoption of low-resistance high-conductivity conductors, multi-segment interconnection layouts, dynamic load distribution control, and enhanced inspection protocols with insulation maintenance. The research demonstrates that implementing these integrated measures can effectively reduce collector line losses, improve energy conversion efficiency, and provide actionable insights for optimizing wind farm operations.

Keywords : wind farm; collector line; loss analysis; loss reduction measures

随着我国“双碳”目标的深入推进，风电作为清洁能源体系中的关键支柱，其装机规模正持续快速扩大，在能源结构转型中发挥着不可替代的作用。集电线路作为风电场内部的“电力动脉”，承担着将分散布置的风力发电机组所发电能高效、稳定地汇集并传输至升压站的核心功能，其运行效率直接影响风电场的整体发电效益。然而，当前行业研究更多聚焦于风机本体效率的提升，而对集电线路损耗的关注相对薄弱，尤其在非技术性损耗方面存在明显短板。例如，线路布局不合理导致传输距离过长、运维管理缺失引发设备异常损耗等问题，尚未得到系统性解决^[1]。本文从集电线路损耗的实际成因出发，结合风电场运行特点，探讨系统性降损措施，对提升风电场整体经济性具有重要现实意义。

一、风电场集电线路损耗的主要影响因素

(一) 线路电阻损耗

电阻损耗是集电线路损耗的基础性来源，主要由导线的电阻特性与电流通过时的焦耳效应决定。导线的电阻与其材质、横截面积及长度直接相关——材质导电率越低、横截面积越小、线路总长度越长，电阻值越大，损耗越高。此外，环境温度升高会导

致导线电阻率增大，进一步加剧损耗。风电场中，风机通常分散布置于较大区域，若集电线路布局未优化，可能导致单条线路过长或分支过多，增加不必要的电阻损耗。而且，不同材质的导线在不同的湿度环境下，其表面会形成不同程度的氧化层，这也会在一定程度上增加电阻，进而影响损耗。例如，在潮湿且有一定污染的环境中，铝导线表面容易形成氧化铝薄膜，虽然氧化铝薄膜有一定的绝缘性，但在电流长期作用下，也会对电阻产生微小

作者简介：孙忠江（1992.10-），男，山东烟台人，本科，研究方向：新能源电力行业。

影响，累积起来就会影响整体的损耗情况^[2]。

(二) 电压降损耗

当电流通过集电线路时，线路阻抗会引起电压降低。若电压降超过一定阈值，不仅会影响风机的正常运行效率，还可能导致无功补偿设备频繁动作，间接增加系统损耗。电压降的大小与线路阻抗、负载电流密切相关——负载电流越大、线路阻抗越高，电压降越显著^[3]。同时，线路的电抗与线路的布局方式、导线的相间距离等因素有关。例如，当导线的相间距离较小时，电抗会相对较大，在相同的负载电流下，电压降也会相应增大。另外，风电场中风机的不同时启动和停止，会导致负载电流的波动，这种波动也会对电压降产生影响，使得电压降在一定范围内动态变化，增加了控制的难度。

(三) 运行管理损耗

除物理特性导致的损耗外，运行管理不当也是重要因素。例如，部分风电场因运维计划缺失，长期未对线路绝缘层老化、接头松动等问题进行检测修复，导致漏电或接触电阻增大；负载分配不均可能使部分线路长期处于过载状态，进一步增加损耗；此外，集电线路的保护定值设置不合理，可能导致故障时无法及时切除异常线路，延长高损耗运行时间。另外，运维人员的专业水平和责任心也对运行管理损耗有重要影响。如果运维人员对设备的性能和运行状况了解不足，在进行巡检和维护时可能会遗漏一些潜在的问题。而且，如果运维人员缺乏责任心，不按照规定的时间和标准进行巡检和维护工作，也会导致线路故障和损耗的增加。同时，风电场的运行管理规章制度是否完善，执行是否严格，也关系到运行管理损耗的控制。例如，如果没有明确的设备检修周期和质量标准，就可能导致设备维护不到位，从而增加损耗^[4]。

二、风电场集电线路的降损措施

(一) 规划设计优化：从源头降低损耗潜力

合理的规划设计是降低集电线路损耗的基础。首先，应结合风电场地形与风机分布，优化集电线路的整体布局——优先采用“辐射状+局部环网”的混合结构，在减少线路总长度的同时提升供电可靠性。在规划布局时，要充分考虑地形地貌对线路长度的影响，尽量选择直线距离较短的路径，避免因地形起伏而增加不必要的线路长度^[5]。例如，对于山地风电场，要合理规划线路的走向，避开陡峭的山坡和不稳定的地质区域，以减少线路的曲折程度。其次，科学划分集电线路的分段与联络关系，通过多分段联络设计，可在故障时快速隔离异常段，确保非故障段正常运行，减少因停电检修或故障导致的额外损耗。在划分分段时，要根据线路的长度、负载分布等因素进行合理划分，确保每个分段的负载相对均衡。最后，根据风机容量与预期负载电流，合理确定线路的路径走向，避免迂回或重复敷设，从源头缩短电能传输距离。同时，在规划路径时，要考虑未来的扩建需求，预留一定的空间，避免因后期扩建而破坏原有的优化布局。

(二) 设备选型改进：提升线路传输效率

导线是集电线路的核心载体，其选型直接影响电阻损耗与电

压降。优先选用高导电率的导线材料，在相同截面积下可显著降低电阻值。在选择导线材料时，要对不同材料的导电率、机械性能、耐腐蚀性等进行综合比较，选择最适合风电场环境的导线。例如，对于沿海风电场，要考虑导线的耐腐蚀性，选择具有良好抗腐蚀性能的导线材料。根据风机最大负载电流，合理增大导线横截面积，虽会增加初期投资，但可长期降低电阻损耗。在确定导线横截面积时，要进行详细的计算和分析，考虑未来负载增长的可能性，适当留有一定的裕度。对于长距离或高负载线路，可考虑采用分裂导线或绝缘导线，进一步提升传输效率。分裂导线的采用可以降低线路的电抗，从而减少电压降，但同时也会增加一定的建设成本和维护难度。绝缘导线可以有效减少外界环境对线路的影响，如树木、鸟类等对线路的干扰，但绝缘导线的散热性能相对较差，需要进行合理的设计和选型。此外，合理配置无功补偿装置，可补偿感性负载引起的无功电流，间接降低线路的有功损耗。无功补偿装置的配置要根据线路的无功需求进行精确计算，确保补偿效果最佳，同时要定期对无功补偿装置进行维护和检测，保证其正常运行^[6]。

(三) 运行管理强化：动态控制损耗增量

运行阶段的精细化管理是降损措施落地的关键。

一是建立动态负载监测系统，实时采集各线路的电流、电压数据，通过智能分析识别过载或轻载线路，动态调整风机的并网分组，避免局部线路长期过载运行。动态负载监测系统要具备高精度的数据采集和快速的分析处理能力，能够及时准确地发现线路的负载异常情况。同时，要根据监测数据建立合理的负载分配模型，实现风机的科学分组和调度^[7]。

二是加强线路的日常巡检与维护，重点检查绝缘层破损、接头氧化、金具松动等问题，并定期清理线路周边可能引发短路的异物。巡检人员要具备专业的技能和丰富的经验，能够及时发现线路的潜在问题。在巡检过程中，要详细记录线路的运行状况和存在的问题，为后续的维护和改进提供依据^[8]。

三是优化运维计划，根据季节特性调整重点——夏季高温时增加电阻监测频率，冬季大风期加强防风偏检查。在不同的季节，要根据线路的运行特点和环境变化，制定相应的运维计划。例如，在夏季高温时，要对线路的散热情况进行重点检查，确保线路的温度在合理范围内。

四是完善保护定值管理，根据线路实际参数动态调整过流、过压保护阈值，确保故障时能快速切除异常线路，减少高损耗运行时间。保护定值的调整要基于线路的实际运行数据和故障分析结果，确保保护装置能够在故障发生时准确动作，同时避免误动作^[9]。此外，要加强对运维人员的培训和管理，提高运维人员的专业水平和责任心，确保运行管理措施的有效执行。

三、降损措施的综合效益分析

综合应用上述降损措施，不仅能够显著降低风电场集电线路的损耗率，更能多个层面带来深远且积极的综合效益。

从经济效益维度深入剖析，降低集电线路损耗具有直接而显

著的经济价值。损耗的减少意味着在能源传输过程中浪费的电能大幅降低，风电场的实际发电效率得以实质性提升。这直接反映在发电量的增加上，进而为风电场带来更为可观的发电收益，增强其在能源市场中的竞争力^[10]。同时，在项目初期，虽然优化设备选型和进行科学合理的规划设计需要投入一定的资金，但从长远视角审视，这一策略极具经济性。优质的设备选型能够降低设备在运行过程中的故障率，减少维修次数和维修成本；合理的规划设计有助于提高整个风电场的运行效率，降低后期的运维成本。而且，高品质的设备往往具有更长的使用寿命，能够减少设备更换的频率和成本，实现全生命周期内的成本优化。

从环境效益层面考量，减少集电线路损耗对于环境保护意义重大。能源在传输过程中的损耗，本质上也是一种能源的浪费，而能源生产往往伴随着碳排放。降低损耗就相当于减少了能源生产过程中的碳排放量，这与我国积极推进的“双碳”目标高度契合，有助于减缓全球气候变暖的趋势，为构建绿色、低碳的生态环境贡献力量。

此外，通过提升风电场的运行可靠性和稳定性，还能带来可观的社会效益。运行可靠性和稳定性的提高，能够有效减少因故障停机而导致的经济损失，保障风电场的持续稳定供电。同时，也能降低对电网的冲击和影响，确保电网的安全稳定运行，为社会提供更加优质、可靠的电力服务，促进经济社会的可持续发展。

四、结论

风电场集电线路损耗作为影响风电场整体经济性的关键因素，其有效控制对于提升风电场运营效益、降低度电成本具有至

关重要的意义。集电线路作为连接风电机组与升压站的核心环节，承担着将分散风能汇集并输送至电网的重要任务，但线路电阻、传输距离、运维质量等因素导致的能量损耗，直接削弱了风电场的发电效率和经济效益。因此，集电线路损耗的控制需贯穿规划设计、设备选型、运行管理全流程，通过多维度协同发力实现降损目标。

在规划设计阶段，优化线路布局是降低传输损耗的基础。通过科学规划集电线路路径，缩短风电机组至升压站的传输距离，可显著减少线路电阻损耗。同时，结合地形地貌和风电场布局特点，采用环形或辐射状拓扑结构，避免线路迂回和交叉，进一步提升传输效率。在设备选型环节，优选高导电率导线是降低电阻损耗的核心措施。相较于普通铝绞线，钢芯铝绞线或铝合金导线具有更低的电阻率和更高的载流能力，可有效减少线路发热和能量损耗。

运行管理阶段，强化运维质量是减少异常损耗的关键。通过定期巡检、红外测温、局部放电检测等手段，及时发现并处理线路接头松动、绝缘子污损、树障等隐患，避免因设备故障引发额外损耗。同时，建立集电线路健康档案，利用大数据分析技术挖掘损耗规律，为运维决策提供数据支撑。

未来，随着智能电网技术的深入推广，数字孪生、在线监测等数字化手段将为集电线路损耗控制注入新动能。通过构建集电线路数字孪生模型，模拟不同工况下的损耗特性，可实现损耗的精准预测；结合物联网传感器实时采集线路电流、电压、温度等参数，动态调控无功补偿装置和运行方式，可实现损耗的动态优化，为风电场高效运行提供更强技术保障。

参考文献

- [1] 龙德海.降低感城风电场综合损耗的探讨 [J].中国高新技术企业,2013,(13):130-131.
- [2] 时靖博.有效降低风电场35kV集电线路跳闸率技术探析 [J].电力设备管理,2024,(24):135-137.
- [3] 郭鹏,刘文颖,但扬清,等.大规模风电接入电网的无功协调降损方法 [J].系统仿真学报,2017,29(01):190-199.
- [4] 田栋栋.风电场输变电系统中的损耗分析及节能对策研究 [J].节能,2024,43(11):42-44.
- [5] 郭鹏.风电集群接入电网的荷—网—源协调降损控制方法研究 [D].华北电力大学(北京),2017.
- [6] 丁旺,魏立明.基于风功率预测对风电场并网稳定性影响分析 [J].日用电器,2020,(05):32-35.
- [7] 许晓艳,石文辉,李岩春,等.风电场集中接入对区域电网的影响分析 [J].中国电力,2009,42(01):93-97.
- [8] 林少鹏.风电场集电线路保护研究与孤网运行状态分析 [D].昆明理工大学,2021.
- [9] 党向东.风电场集电线路故障原因分析及预控措施 [J].电工技术,2023,(04):30-32.
- [10] 吴益航.风电场集电线路保护配合优化策略探析 [J].中国战略新兴产业,2024,(32):91-93.