

输电线路的高电压技术研究应用

余治非

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i3.8787

[摘要] 高电压技术是实现输电线路大容量、长距离、安全稳定输送的关键技术支撑，其技术运用的科学与否，将直接影响到电网的安全稳定和供电质量。相关工作人员需要以高压绝缘理论和过电压抑制理论为基础，围绕高压绝缘理论和过电压抑制理论展开研究，围绕过电压保护、绝缘配合、防污闪、带电作业等关键技术和应用逻辑展开研究，阐明各种技术的参数匹配、设备选型和工艺需求，突出关键技术在线路绝缘损耗、过电压冲击等关键科学问题上的应用，为输电线路高电压技术的标准化和精细化应用提供依据。

[关键词] 输电线路；高电压技术；应用策略

Research and Application of High Voltage Technology for Transmission Lines

Yu Zhifei

China Water Resources and Hydropower Bureau No.11 Engineering Co., Ltd.

[Abstract] High voltage technology is a key technical support for achieving large-capacity, long-distance, safe and stable power transmission. The scientific application of this technology directly impacts the safety, stability, and power supply quality of the grid. Relevant personnel need to base their research on high-voltage insulation theory and overvoltage suppression theory, focusing on key technologies and application logic such as overvoltage protection, insulation coordination, pollution flashover prevention, and live-line work. They should clarify parameter matching, equipment selection, and process requirements for various technologies, emphasizing the application of critical scientific issues like line insulation loss and overvoltage impact. This provides a basis for the standardization and refined application of high voltage technology in transmission lines.

[Key words] transmission line; high voltage technology; application strategy

电力系统向特高压和柔性直流方向发展，电压等级不断提升，工作环境日趋复杂，这对高电压技术的专业性和实操性提出了更高要求。高电压技术以高压绝缘理论、气体放电理论为核心，涉及过电压抑制、绝缘配合和污闪防治等领域，是应对输电线路绝缘击穿、设备损伤和故障频发的重要手段。针对当前输电线路及复杂环境下线路的运行需求，需要优化高电压技术应用策略，明晰其技术实施要点、参数标准和适配准则，对提升输电线路绝缘水平、降低故障发生率、保障电力系统的安全稳定运行都有着重大意义。

一、过电压防护应用策略

(一) 差异化防雷

差异化防雷依据雷击活动规律和线路抗雷特性原理，综合考虑线路雷击日等级、地形条件和导线布局形式，建立分层保护系统，以达到有效防雷和降低成本的目的。需要在已有研究的基础上，通过野外观测，将多雷山地地区、中雷区和少雷区进行现场观测，将雷击防护角度降到15度以内，并采取不等高悬挂的方法降低绕击雷的发生概率。对于土壤电阻率 $\geq 1000 \Omega \cdot m$ 的地区，采用深井接地和铺设降阻剂等工艺，使接地电阻小于 10Ω 。在此基础上，在杆塔基础上增设线路避雷器，加强对绝缘子串网络的保护，以分类实施，实现各分区的耐雷等

级准确地与闪电活动程度相适应，从而达到减少雷击跳闸率的目的^[1]。

(二) 过电压协同限制

过电压协同限制围绕多种过压形成机理展开研究，通过集成金属氧化物避雷器

(MOA)、断路器合闸电阻、并联电抗器等装置，建立多尺度的协调控制系统，以达到对多种过压的精确控制。对于雷击过电压，应选择具有较高储能性能的 MOA，并将剩余电压控制在导线的 80% 以内；针对操作过压问题，通过对断路器合闸电阻进行优选，使其阻值与线路特性阻抗的 1/3 相匹配，并将其控制在 2.5p.u 以内；对于工频过压，采用并联电抗器对其空载长线电容效应进行了补偿，使过压的幅度小于 1.3p.u。

(三) 全链条防护

针对输电线路设计、施工和运行过程中的全链保护问题，以过电压保护原理为基础，进行多个关键环节的闭环连接和控制。在设计时，根据线路电压等级和工作条件，对各种过压振幅进行了分析，从而得出了不同的绝缘水平和防护设备选型参数，并保留 10%-15% 的防护裕度；施工期间，对避雷器的安装工艺和接地装置的施工质量进行了严密的控制，保证 MOA 的安装垂直度误差不超过 3mm，接地引下线电阻不超过 0.5Ω；运行过程中，通过对 MOA 泄漏电流和接地电阻进行在线检测，并对其进行半年一次的预防性测试，对老化设备进行适时替换和保护措施的动态调整，使其与线路全寿命周期紧密结合，从本质上提高防护可靠性。输电线路全链保护及特高压运维关键参数如表 1 所示。

表 1 输电线路全链保护及特高压运维关键参数表

环节分类	关键技术/工作内容	专业参数要求
全链保护 (设计-施工-运行)	设计阶段-绝缘与防护参数确定	防护裕度：10%-15%；基于线路电压等级、工作条件分析过压振幅
	施工阶段-避雷器与接地装置管控	MOA 安装垂直度误差≤3mm；接地引下线电阻≤0.5Ω
	运行阶段-设备监测与维护	MOA 泄漏电流、接地电阻在线检测；预防性测试周期：半年 1 次
特高压运维规范	巡检方式与周期	巡检方式：无人机巡检+人工巡检；无人机巡检周期≤7 天
	故障定位与预警	定位精度≤50m；预警响应时间≤1 小时；技术手段：在线监测数据+巡检数据+大数据分析
	巡检检测项目	重点检测：绝缘子破损、导线异常等隐患

二、绝缘配合应用策略

(一) 按电压等级与环境定制绝缘方案

根据不同的电压等级和工作环境，制定不同的绝缘方案，依据不同的线路电压等级、环境污染程度和海拔，准确地制定不同的绝缘配置，保证其与工作环境相匹配。1000kV 特高压输电系统中，选择额定雷电冲击耐受电压≥1800kV 且单串绝缘子片数不低于 32 个的绝缘子；在高原地区，按照海拔每升高 100m 绝缘强度降低 1% 的原则，将绝缘子片数量提高 5%-10%；针对重污区，如当量盐密度大于 0.1mg/cm²，选择爬距大于 31mm/kV 的防污型绝缘子，并通过优化绝缘子串布置，减少伞裙桥接^[2]。

(二) 安全性与经济性平衡的绝缘裕度设计

安全性与经济性平衡的绝缘裕度设计工作在开展的过程中，通过对不同类型过电压在不同工况下的最大值进行分析，并与绝缘材料的老化速度相关联，提出相应的绝缘裕度，重点区域，如跨越段、枢纽段，采用 1.2-1.3 倍的绝缘裕度，一般区段采用 1.1 倍裕度，以防止因过度绝缘而导致的经济损失。通过对绝缘裕度的分类和选择，在保证线路安全性的基础上，尽量减少建设与运维成本，达到技术经济性平衡。

(三) 全寿命周期绝缘状态评估与迭代优化

利用红外测温、局部放电等手段对绝缘子、绝缘涂层进行实时监测，构建绝缘寿命评价模型，并结合环境腐蚀、电场等

影响，对绝缘性能衰减趋势。对于绝缘指标降低到预警值的设备，应立即采取绝缘修复、设备更换的办法；同时，通过对其进行技术发展，并通过对其进行全生命周期动态评估与优化，最终实现其绝缘系统始终处于最佳运行状态，从而达到提高其设备使用寿命的目的。

三、防污闪应用策略

(一) 区域污区地图动态更新与绝缘改造

根据污秽监测技术和污区划分准则，精确把握污区污染的演变规律，有目的地进行隔热提升。通过在沿线设置污染监测点，实现等值盐密、灰密等参量的在线获取，并按污秽程度调整污区等级，并对污染区域的分级。对重度污区的区段进行绝缘改建，用复合绝缘子替代普通绝缘子，增大绝缘子的爬距，并对其绝缘子喷镀防污涂层；针对污秽变化频繁的区段，进行可更换式防污涂层，以方便后续维修；通过动态更新与精准改造，实现绝缘配置总能适应地区污染环境，从根源上遏制污闪故障发生。

(二) 新材料、智能监测、状态检修联动

通过新材料、智能监控、状态检修联动的方式，集成新型防污材料、智能监控技术和视情维修技术，建立精确的防污闪烁防控系统。选择具有强憎水性和耐老化性能的 PRTV 防污涂层，其憎水迁移性可维持 5 年，并能降低其表面积污；通过

绝缘子表面泄采用泄漏电流在线监测装置，实现了对绝缘子表面泄漏电流的实时监控，并自动发出告警信号。

(三) 带电治理和停电治理联合的运维模式

对于闪隐患轻微污闪隐患，应采取带电水冲洗技术，并选择高压纯水冲洗设备进行清洗，并将冲洗压力控制在0.3-0.5MPa以内，以防止对绝缘子表面涂层造成破坏；针对绝缘子老化和涂层破损等严重隐患，采取了停电检修的方法，对绝缘子进行了集中更换和重新喷涂防污涂层的处理。制定出清晰的治理标准，对轻微隐患带电治理率不小于90%，对严重隐患停电治理合格率为100%，使两者相结合，既能有效地消除闪络事故，又能最大程度地缩短停电时间，保证供电可靠性^[3]。

四、带电作业应用策略

(一) 标准化作业流程与安全管控体系

在对标准化作业流程与安全管控体系进行规范化的基础上，以带电工作的安全原理和工作准则为基础，对工作的整个过程进行了详细的技术规定和安全防范措施，保证了工作的安全性和品质。制订规范的作业指导书，明确等电位、中间电位和地电位三种工作模式的工作程序。在工作之前，要对员工进行安全技术交底和风险评价，在工作过程中，要采取绝缘屏蔽、电位隔离等手段，在工作结束之后，还要对设备的状况进行检查，对作业人员资质进行严格的控制，同时，还需要对所有的工作人员进行高压带电作业专项培训与考核，以保证整个工作过程的安全可控、规范有序。

(二) 智能化工具与机器人作业推广

通过使用智能设备和机器人来代替传统的人工操作，提高带电作业的安全性、准确性和效率。可以在设备上安装红外测温和高清摄像模块的绝缘操作机器人，可以对绝缘子进行检测，对导线进行修复，保证了其工作的准确性，可以保证±1毫米的工作精度，从而降低了工人的高空作业的危险。利用便携式局部放电检测仪、绝缘子憎水性测试仪等智能化绝缘检测工具，在运行中对设备进行在线监测，提高隐患识别的准确性^[4]。

(三) 不停电消缺提升供电可靠性

为解决输电线路中普遍存在的绝缘子破损、断股和金具松动等问题，采取了带电更换和带电检修的方法，使故障消除与供电同时进行。建立故障分类处置准则，对重大缺陷进行有效的带电消除，对一般缺陷进行有效消除，达到减少故障的目的，提高电力系统的供电可靠性。同时要建立缺陷台账，剖析缺陷产生规律，实现故障的有效控制与维护，从根源上防止故障的发生，进而提高供电稳定性。

五、特高压技术应用策略

(一) 规模化工程落地与国产化装备应用

面向我国特高压关键技术的关键问题，推进特高压项目的大规模施工和国产设备的自主化，提高我国的自主控制能力。

在特高压输电电路上，大力发展特高压绝缘子、断路器等国产化装备，实现特高压复合绝缘子和断路器的机械强度 $\geq 300\text{kN}$ ，断裂强度合格率100%；在特高压技术线路中，将采用国产换流阀和平波电抗器，使其具有额定电流 $\geq 4\text{kA}$ ，以适应大容量输电的需要。

(二) 跨区域电网互联与清洁能源消纳

利用超高压输电线路将风电和光伏等清洁能源从西北和华北地区直接送往华东和华南等地区，传输效率达到95%以上，可有效缓解能源资源与电力需求错位问题。通过对特高压线路的操作参数进行合理设计，引入柔性直流输电技术，增强电网调节能力，达到精确的清洁能源出力的精准匹配，降低弃风、弃光等问题。基于实现跨区域电网互联，促进我国电力资源的合理分配，促进清洁能源的大规模发展，促进我国电力系统向清洁低碳方向发展。

(三) 运维体系标准化与智能化升级

研究建立超高压输电系统运行维护规范，明确巡检周期、检测项目及技术要求，采取无人机巡检联合人工巡检的方法，无人机巡检周期 ≤ 7 天，对绝缘子破损、导线异常等隐患进行检测。需要整合在线监测数据、巡检数据，结合大数据分析技术，对其进行精确的定位和智能报警，使其定位精度 $\leq 50\text{m}$ ，预警响应时间 ≤ 1 小时，从而保证特高压输电线路长期安全稳定运行。

六、结束语

综上所述，高电压技术是特高压输电及复杂环境下线路的安全可靠运行的重要基础，其精细化和专业化程度将直接影响电网的输电效率和安全性。针对过电压保护、绝缘配合等技术，对具体技术参数、设备选型、工艺要求等方面进行了深入地研究，优化了该技术的应用策略与实操性，突出了高压技术在电力系统中的重要地位。而且，在新型电力系统不断升级的背景下，高电压技术需进一步与智能化、数字化技术相结合，不断进行创新与优化，完善技术应用体系，提高技术的自主控制能力，为促进国家能源结构转型和高质量发展提供强有力技术支持。

[参考文献]

- [1]李立涅，罗兵，董旭柱，等. 高电压技术发展现状及展望[J].高电压技术，2025，51(08)：3682-3720.
- [2]李振筱. 高电压设备绝缘老化及状态检修技术应用[J].大众标准化，2025，(16)：148-150.
- [3]李奇超，伍弘，杨凯，等. 超高压线路绝缘架空地线感应电压及其影响因素研究[J].电工电气，2020，(08)：17-21.
- [4]胡金殿，王恒康，赵宇欣，等. 输电线路杆塔接地电阻对线路反击跳闸率影响研究[J].四川电力技术，2019，42(06)：14-18.