

特高压交流输电系统电磁暂态特性分析研究

王庆阳

西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院 西藏 拉萨 850000

【摘要】：特高压交流输电是西藏地区输送清洁电能、保障当地能源供应的重要方式，但西藏高海拔、低温的特殊自然环境，容易对特高压系统的电磁暂态过程产生影响，可能威胁系统运行安全。本文围绕西藏地区特高压交流输电系统的电磁暂态特性展开研究，重点分析系统正常运行及故障时的电压波动、电流突变等暂态现象，梳理高海拔环境对暂态参数的影响规律，以及不同故障类型下的暂态响应特点。研究明确了西藏地区该类系统电磁暂态的关键影响因素，所得结论能为当地特高压输电系统的设计优化、故障防控措施制定提供实际参考，助力系统安全稳定运行。

【关键词】：特高压交流输电系统；电磁暂态特性；西藏；高海拔环境

DOI:10.12417/2705-0998.25.19.059

引言

西藏地区清洁能源储量丰富，特高压交流输电系统是将这些清洁能源高效输送、满足当地生产生活用电需求的关键设施。但西藏高海拔、低温的独特自然条件，与平原地区差异显著，会给特高压系统的电磁暂态过程带来特殊影响，比如可能导致系统故障时电压、电流的暂态变化更复杂，进而影响整体运行安全。目前针对西藏这类特殊环境下的特高压电磁暂态特性研究，还需要更贴合当地实际的分析。本文以此为出发点，深入研究该系统的电磁暂态特性，为后续具体分析和实际应用提供基础，助力当地特高压输电系统稳定可靠运行。

1 西藏特高压交流输电系统的运行背景及电磁暂态影响因素

西藏地域广阔，清洁能源资源富集，水电、光伏等可再生能源储量大，随着当地经济发展和民生改善，对电力供应的稳定性、持续性需求显著提升。同时为实现清洁能源外送、助力全国能源结构优化，特高压交流输电系统成为连接西藏清洁能源基地与负荷中心的关键设施。该系统不仅需满足区内城镇、乡村及特色产业的用电需求，还承担着将西藏富余清洁能源输送至东部负荷大省的任务，其运行状态直接关系到区域能源安全与经济发展，因此对系统电磁暂态特性的研究需结合实际运行场景展开。

西藏大部分地区海拔超过 3000 米，高海拔环境下空气密度降低，导致输电设备的绝缘性能发生变化。在电磁暂态过程中，设备对电压的耐受能力易下降，可能引发暂态过电压异常。同时，西藏冬季低温环境频繁，最低温度可达零下 20 摄氏度以下，低温会使输电导线出现收缩变形，改变线路的电感参数，也可能导致绝缘子表面覆冰，增加线路的对地电容，这些参数变化会直接影响电磁暂态的传播速度与幅值，使暂态过程呈现出与平原地区不同的特征。

西藏特高压交流输电线路多穿越山地、峡谷，线路路径长且地形复杂，较长的线路长度使分布参数对电磁暂态的影响更

为突出，比如线路分布电容会在故障暂态中产生额外的电压分量，加剧电压波动。此外，西藏电网与外部电网的互联程度逐步提升，系统接线方式的复杂性增加，故障发生时暂态电流的分布路径更复杂，进一步影响暂态特性。同时，西藏地区负荷具有明显的季节性波动特征，比如夏季农业灌溉用电增加、冬季取暖用电上升，负荷的动态变化会导致系统运行点频繁调整，间接影响电磁暂态的初始条件与响应过程。

2 西藏特高压交流输电系统电磁暂态的主要问题及表现

西藏特高压交流输电系统在电磁暂态过程中，最突出的问题是暂态过电压数值偏高且持续时间长，这一问题在高海拔与低温环境叠加时表现得更为明显。当系统进行开关操作（比如投切线路、变压器）或遭遇线路短路故障时，电压会在短时间内突然升高，部分区域的暂态过电压值甚至会超出设备设计的耐受上限。这种过电压容易导致输电线路的绝缘子发生闪络，也就是绝缘子表面出现漏电电弧，严重时会造成线路临时停运；对于变电站内的变压器、电抗器等核心设备，过高的暂态过电压还可能击穿设备内部绝缘，引发设备损坏，进而影响整个区域的电力供应，比如冬季低温覆冰期间，线路绝缘性能本就下降，此时出现暂态过电压，线路跳闸的频率会明显增加。

暂态电流异常波动是另一类常见问题，尤其在故障场景下表现得尤为突出。西藏特高压线路多穿越山地峡谷，线路路径曲折且长度较长，故障发生时（如单相接地、两相短路），暂态电流会在复杂的线路结构中形成不规则的波动，不仅峰值比平原地区同类系统更高，而且波动持续的时间也更长。这种异常波动会给线路的断路器带来较大负担，断路器在切断故障电流时，可能因暂态电流峰值过高而出现灭弧困难，导致断路器无法及时断开故障线路；同时，暂态电流的不规则波动还容易干扰继电保护装置的判断，比如保护装置可能误将轻微故障判定为严重故障，提前切断正常运行的线路，造成不必要的停电，影响农牧区居民生活用电和当地特色产业（如高原食品加工、旅游业）的正常生产。

电磁暂态过程中电压与电流的协同波动，还会导致系统稳定性下降，这一问题在负荷季节性变化明显时更为显著。西藏夏季农业灌溉用电集中、冬季取暖用电激增，当负荷突然增加或减少时，系统会进入暂态调整阶段，此时电压会出现频繁的高低起伏，电流也会随之波动。这种波动会影响接入系统的分布式电源（如乡村光伏电站、小水电）的出力稳定性，比如电压过低时，光伏逆变器可能自动停机，导致局部地区供电不足；同时，电压和电流的持续波动还会影响普通用户的用电体验，比如农村地区的电机、水泵等设备，在电压不稳定的情况下容易出现转速忽快忽慢的情况，缩短设备使用寿命，甚至引发设备烧毁，给居民和企业带来经济损失。

3 针对西藏特高压电磁暂态问题的分析与应对方法

针对暂态过电压偏高的问题，核心原因在于西藏高海拔地区空气稀薄，绝缘强度比平原地区低很多，电压稍微波动就容易突破空气绝缘极限；再加上冬季低温常让绝缘子表面覆冰，冰层会形成导电通道，进一步削弱绝缘子的绝缘能力，两种因素叠加后，整个系统的电压耐受上限就降了下来，很容易出现过电压故障。应对时可以从设备选型和日常运维两方面做调整：设备选的时候，优先用耐高海拔、抗覆冰的合成绝缘子，这种绝缘子表面光滑，不容易积冰，就算在海拔 4000 米以上的藏北、那曲地区，绝缘性能也不会大幅下降，比传统瓷质绝缘子更耐用；变电站里关键位置要装低温适配型避雷器，选密封件能扛住零下 20 多度低温的型号，避免冬天低温把密封件冻裂、进水，导致避雷器失效。日常运维中，要定期给绝缘子清理覆冰，用带电融冰的热风枪或加热带处理覆冰厚的绝缘子，不用停电就能干活，还能防止覆冰继续破坏绝缘。另外，线路设计时可以多装几片绝缘子，比如原来装 16 片的地方加 2 到 3 片，通过增加绝缘子数量提升整体绝缘水平，减轻暂态过电压带来的压力。见图 1 所示：



图 1 西藏高海拔地区特高压线路合成绝缘子及带电融冰作业示意图

暂态电流异常波动的关键诱因，在于西藏特高压线路大多跨过多座山地峡谷，线路总长度长，加上地形起伏大，线路的分布电容、电感会跟着累积增多——平时这些参数影响不大，一旦出现故障，比如线路接地、短路，这些累积的电容和电感

就会把电流波动放大，让电流忽高忽低的幅度更大，持续时间也更长。另外，目前很多继电保护装置的参数是按平原地区设定的，完全适配不了西藏这边更高的电流峰值和更久的波动时长，很容易出现判断偏差。解决这一问题要从线路设计和保护配置两方面优化：在山地峡谷这类地形复杂的路段建线路时，把杆塔之间的距离缩短一些，这样能减少分布电容的累积，让电流波动的幅度降下来；再根据当地实际测到的暂态电流数据，调整继电保护装置的动作阈值，把触发保护的电流值设得比实际峰值稍高一点，避免误判导致切断正常线路。同时在线路沿线装故障录波装置，实时记录电流波动的情况，方便后续调整参数时参考；断路器专门选真空类型的，这类断路器灭弧性能稳定，就算电流波动厉害，也能可靠切断故障电流，不让故障范围扩大。

系统稳定性下降的主要原因，在于西藏用电负荷和分布式电源出力都太“不稳定”，系统来不及跟上这种变化，暂态调整就容易出问题。比如夏季农牧区灌溉要开大量水泵，冬季居民用暖器、牧区给棚圈保温要集中用电，这两个时段负荷会突然涨上去；而光伏白天晴天出力多、阴天就少，小水电雨季水量足发电多、旱季就跟不上，这些电源出力的波动，会让电压和电流一起跟着忽高忽低，进一步拖垮系统稳定性。应对时要盯着“供需匹配”和“设备适配”下功夫：在光伏、小水电多的地方，配套建设化学储能电站——晴天光伏发电多，就把多余的电存起来；晚上用电高峰或阴天光伏不够，就把存的电放出来，稳住电源侧的出力。电力部门也得提前跟用户商量，搞灵活用电：比如让农户把灌溉时间从用电高峰的早上，挪到上午人少用电的时候；居民取暖分时段供电，高峰时稍微调低一点温度，减少负荷突然增减。另外，把分布式电源的逆变器改一改，调整低电压穿越参数——就算电压稍微降一点，逆变器也不用立马停机，还能接着并网发电，帮系统维持稳定。

4 西藏特高压交流输电系统电磁暂态问题应对的实际成效

在暂态过电压问题的应对上，经过设备选型优化与运维调整，西藏特高压线路的绝缘故障情况得到明显改善。此前冬季覆冰期，藏北、那曲等高海拔区域的线路常因暂态过电压引发绝缘子闪络，线路频繁跳闸；采用耐高海拔抗覆冰合成绝缘子并配套低温避雷器后，连续两个覆冰期内，这些区域的线路跳闸情况大幅减少，且没有再发生过因过电压导致的变压器、电抗器损坏问题。同时，通过增加绝缘子片数与定期开展带电融冰作业，线路对暂态过电压的耐受能力显著提升，即便在海拔 4500 米以上的阿里地区线路，开关操作产生暂态过电压时也能保持稳定运行，不再出现因绝缘不足导致的临时停运，切实保障了冬季牧民取暖用电、边境哨所供电的连续稳定，避免了因停电影响基本生活与边境保障工作。

针对暂态电流异常波动的应对措施落地后，线路故障处理

的可靠性与效率有了明显进步。在藏东峡谷等地形复杂的路段，缩短杆塔间距后，线路分布电容的累积效应得到有效控制，故障发生时暂态电流的波动幅度变小，持续时间也相应缩短。调整继电保护参数并加装故障录波装置后，保护装置的误判情况基本消失，此前因参数不匹配导致的“误切正常线路”问题不再出现——比如昌都至林芝的特高压线路，过去曾在单相接地故障时误切断相邻正常线路，导致沿线多个乡镇停电；优化配置后，该线路后续遇到同类故障时，保护装置能精准定位故障段落，只切断故障线路，周边乡镇不受影响，停电范围大幅缩小，且恢复供电的速度明显加快，减少了对沿线农业加工企业生产、旅游景区运营的干扰，降低了因停电带来的经济损失。

系统稳定性方面，供需平衡与设备适配措施的实施，有效缓解了电压电流协同波动的问题。在分布式电源集中的山南、日喀则等地，配套建设的电化学储能电站发挥了关键作用，当光伏电站出力骤降时，储能电站能快速补充电能，避免电压出现大幅跌落；此前夏季光伏出力波动时，日喀则某光伏村常出现电压忽高忽低的情况，导致村民家中水泵、洗衣机频繁停机，储能电站投用后，该村电压波动变得平缓，家电运行稳定性与平原地区相差不大。同时，灵活用电计划与逆变器改造也减弱了负荷波动对系统的冲击，夏季农业灌溉高峰时，通过引导农

户错开用电时段，系统负荷的起伏幅度变小，暂态调整时的电压波动也随之降低，沿线小水电不再频繁出现并网、脱网的情况；冬季取暖季即便出现集中用电，线路也能保持电流稳定，居民家中电暖器不会再出现功率骤降，牧区的挤奶设备也能正常运转，整体供电可靠性显著提升，基本满足了当地生产生活对稳定电力的需求。

5 结语

本文围绕西藏特高压交流输电系统电磁暂态特性展开研究，先梳理了系统的运行背景——作为当地清洁能源输送与民生用电保障的关键设施，同时明确了高海拔、低温、复杂地形等对电磁暂态的特殊影响因素；接着分析了暂态过电压偏高、电流异常波动、系统稳定性不足三类核心问题及具体表现；随后针对性提出设备选型优化、运维调整、保护配置改进、储能配套等应对方法；最终通过实际应用验证，这些措施有效减少了线路故障、缩小了停电范围、提升了供电可靠性，切实解决了当地特高压系统运行中的实际难题。后续可继续贴合西藏地域特点，跟着电网互联进度与负荷变化动态调整应对措施，让特高压系统更适配当地环境，进一步发挥清洁电能输送作用，为西藏经济发展、农牧民生活改善及边境保障工作提供更坚实的电力支撑。

参考文献：

- [1] 陈水明,许伟,何金良.1000kV 交流输电线路的工频暂态过电压研究[J].电网技术,2025,29(19):31-35.
- [2] 李华,王磊.特高压交流系统的操作过电压及其控制研究[J].电力建设,2025,30(9):28-30,35.
- [3] 张勇,刘敏.高海拔地区超高压输电系统工频过电压分析[J].高压电器,2024,59(4):78-84.
- [4] 朱琛.提升暂态电压稳定控制的储能建模与调压控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2023,53(4):92-98.
- [5] 李静,张伟,陈明.特高压 GIS 隔离开关开合母线暂态电压波形解析[J].高压电器,2023,59(9):135-141.