

水电站电压互感器高压熔断器熔断原因分析

陈 升

云南华电金沙江中游水电开发有限公司梨园发电分公司 云南 丽江 674100

【摘 要】：水电站电压互感器高压熔断器熔断会造成电压测量失准、继电保护误动或拒动，影响厂用电系统与监控系统稳定运行。以熔断现象为切入点，可从一次系统过电压、铁磁谐振、互感器内部绝缘缺陷、二次侧短路或接地、熔断器参数匹配不合理、潮湿凝露及运行维护不到位等方面展开分析。熔断故障通常具有突发性和隐蔽性，单纯更换熔断器难以消除隐患。通过梳理故障特征、运行工况和检测数据，明确熔断诱因之间的关联，有助于提高故障判断准确性，为水电站电压互感器安全运行提供依据。

【关键词】：水电站；电压互感器；高压熔断器；熔断原因；铁磁谐振

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.004

引言

水电站电气系统长期处于高湿度、强电磁扰动和频繁工况变化环境中，电压互感器承担电压测量、计量和保护信号采集任务，高压熔断器则直接关系到一次设备故障隔离效果。运行现场中，熔断器熔断后常表现为电压指示异常、保护装置告警、监控数据波动等现象，表面看似熔断器自身损坏，深层原因却可能隐藏在系统谐振、绝缘下降、二次回路异常或设备选型配合之中。若仅凭经验更换熔芯，故障可能反复出现，甚至扩大为互感器烧损和保护异常。围绕熔断现象背后的电气机理进行分析，能够帮助运行人员抓住故障判断关键点，使正文对各类诱因的展开更具针对性。

1 水电站电压互感器熔断故障表现

1.1 电压指示异常现象

云南地区水电站多分布在山区河谷地带，机组运行受来水变化、负荷调节和厂用电切换影响较大，电压互感器高压熔断器熔断后，最直接的表现便是电压指示失真。运行监盘中可能出现某一相电压突然降低、三相电压不平衡、线电压显示偏差增大等情况，部分测控装置还会出现电压采样中断或显示数值跳变^[1]。此类异常容易被误判为仪表故障或通信采集问题，但结合一次设备状态观察，若系统实际运行未发生明显波动，而电压显示持续异常，则应重点考虑电压互感器一次侧熔断器熔断。电压指示异常不仅影响运行人员对系统状态的判断，还可能造成计量数据偏差和保护判据失准。

1.2 保护与监控告警特征

电压互感器高压熔断器熔断后，保护装置和监控系统通常会同步出现异常信号。云南水电站在汛期或负荷变化较大时，机组启停、线路投切较为频繁，若熔断器因过电流或谐振冲击熔断，保护屏可能发出母线电压异常、电压回路断线、低电压闭锁、同期电压异常等告警。监控后台则可能出现遥测电压突降、三相电压不一致、保护装置通信告警伴随电压量异常等现象。此类告警具有一定关联性，单一信号难以准确判断故障部位，需要结合告警发生时间、相别变化、机组运行方式和开关

操作记录进行比对。若多套装置同时反映同一电压回路异常，高压熔断器熔断便成为重点排查对象。

1.3 熔断故障反复出现情况

在实际运行中，电压互感器高压熔断器更换后再次熔断的情况较为典型，尤其在云南部分潮湿、多雷暴、昼夜温差较大的水电站环境中更容易发生。反复熔断说明故障并非单纯由熔芯老化造成，背后往往存在铁磁谐振、互感器绝缘受潮、一次系统过电压、二次回路接地或熔断器参数选择不匹配等隐患。若检修处理仅停留在更换熔断器层面，未对电压互感器本体、柜内绝缘、二次端子、接地状态和运行方式进行系统核查，故障便可能在相似工况下再次出现。反复熔断不仅增加停电检查次数，还会削弱运行人员对设备可靠性的判断，严重时可能引发互感器烧损或保护误动作。

2 高压熔断器熔断诱因分析

2.1 铁磁谐振引发过电流

云南地区水电站多位于梯级水系中，机组负荷变化频繁且短路电抗较小，电压互感器高压侧在特定运行条件下易产生铁磁谐振。谐振会导致互感器一次回路电流骤增，使熔断器承受超出额定值的冲击电流。谐振幅值与负荷、线路电感、互感器铁心磁导及接地状态密切相关，尤其在干季水流波动大时，更易出现一次侧电压短时升高和脉冲电流叠加^[2]。若运行条件接近谐振点，熔断器的瞬时熔断能力将成为限制因素，轻微异常亦可能触发熔断现象，造成电压测量中断和保护误动作，显示出熔断并非孤立事件，而是系统动态响应的结果。

2.2 互感器绝缘劣化影响

长期运行条件下，云南水电站互感器常处于高湿、季节性凝露以及温度波动较大的环境，绝缘纸、环氧树脂和绕组漆膜容易发生吸湿、老化和局部放电现象。绝缘劣化降低了互感器对瞬态过电压的承受能力，使高压熔断器在雷电或负荷突变等工况下更容易熔断。绝缘薄弱点可能诱发局部放电，进一步加速绝缘恶化，形成电压突升或局部过流，直接冲击熔断器。绝缘状态的隐蔽性使得故障难以提前察觉，熔断器熔断成为系统

自我保护的直接体现,也反映出环境条件对设备稳定性的重要影响。

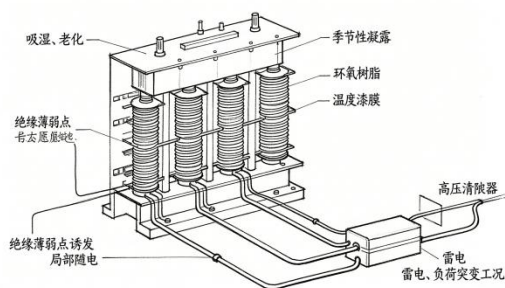


图1 互感器绝缘劣化机理图

2.3 二次回路短路接地因素

电压互感器二次回路在云南水电站环境中容易受到湿度、灰尘及施工接地状况的影响,出现接线松动或局部短路现象。二次回路异常会导致互感器一次回路电流波动,诱发熔断器快速动作。二次侧接地不当或短路会形成回路闭合电流,产生瞬时过流,使熔断器迅速熔断以保护互感器和测控装置。二次回路问题常与一次系统电压异常叠加,形成复杂故障现象,增加熔断事件判定难度。熔断器的动作往往是二次故障对一次回路影响的直接表现,揭示了回路维护和接地管理在水电站安全运行中的关键性。

3 熔断故障现场排查要点

3.1 一次设备运行状态检查

在云南水电站,电压互感器熔断器熔断后,现场排查首先需关注一次设备的运行状态。通过查看母线电压、开关操作记录、机组负荷变化及一次侧电流曲线,可判断熔断是否与过电流、瞬态过电压或谐振有关。设备的实际运行参数应与监控数据对比分析,异常波动、短时峰值及频繁启停都可能是熔断诱因^[3]。对机组启动、停机及负荷调整过程中产生的电压冲击进行模拟复现,有助于识别一次回路中潜在的过流或谐振点。应对互感器一次侧接线和端子紧固情况进行目视和电气检查,确保没有松动、氧化或接触不良的情况。通过对一次设备的系统性检查,能够明确熔断与外部工况或设备自身状态之间的联系,为后续分析提供基础数据。

3.2 二次回路接线隐患排查

二次回路隐患在熔断事件中常常被忽视,而在云南高湿山区水电站中,接线松动、端子氧化或线路受潮均可能导致短路或接地故障,引发一次侧熔断器动作。排查过程中,需要对二次侧每一条回路进行逐一检查,包括互感器测量端子、保护装置输入端子以及连接电缆的绝缘状态和固定情况。借助兆欧表、回路阻抗测试仪等工具,可判定绝缘电阻是否下降或存在潜在漏电路径。注意在潮湿环境中,局部凝露可能在接线端子形成临时导通,引起瞬时过流,导致熔断器动作。对二次回路

逐一核对布线、端子和接地情况,能够排除由接线问题引起的熔断风险,为一次回路异常的判断提供明确依据。

3.3 熔断器参数匹配核对

高压熔断器熔断特性与互感器一次回路电流、系统额定电压及瞬态过流特性密切相关。在云南水电站复杂运行条件下,若熔断器额定电流、动作时间或熔断容量与实际运行工况不匹配,即使设备运行正常,也可能因瞬时过流或谐振冲击而熔断。核对过程中,需要对熔断器型号、额定电压、电流特性及温度系数进行逐项比对,确保选型与互感器一次回路特性相符。对熔断器安装位置及接线方式进行检查,避免存在串联、并联不合理或端子接触不良等问题。通过参数核对与现场测试结合,可判断熔断是否属于器件容量不足、选择偏差或安装缺陷,从而为熔断原因分析提供精确依据,并减少重复熔断风险。

4 电压互感器故障控制措施

4.1 抑制铁磁谐振风险

云南水电站受地形分布、线路结构和机组运行方式影响,电压互感器在空载母线、单相接地、开关投切及负荷突变等条件下容易出现铁磁谐振。控制此类风险,需结合站内一次系统接线方式、互感器励磁特性和中性点运行状态进行判断,避免电压互感器长期处于易激发谐振的运行区间。现场可通过配置消谐装置、优化接地方式、调整运行方式等措施降低过电压和过电流冲击^[4]。对于曾出现熔断器熔断的电压互感器,应重点记录熔断前后的负荷变化、开关动作、母线电压波动及相电压异常情况,判断是否存在谐振触发条件。运行中还应加强对电压波形、零序电压和谐波分量的监测,及时识别非正常振荡。

4.2 加强绝缘状态检测

云南部分水电站位于河谷、库区和高湿山区,空气湿度大、昼夜温差明显,电压互感器柜内易出现凝露、积尘和绝缘表面污秽,绝缘性能下降后会增加局部放电和泄漏电流风险。故障控制中,应将绝缘状态检测作为重点内容,对互感器本体、一次接线端子、熔断器底座、柜内支撑绝缘体和二次端子排进行定期检查。检测手段可包括绝缘电阻测试、介质损耗测量、红外测温、局部放电检测和外观检查等,尤其要关注雨季、汛期和长时间停运后重新投运前的绝缘变化。对于发现受潮、裂纹、放电痕迹或绝缘电阻下降的设备,应及时处理隐患,防止轻微绝缘缺陷发展为相间或对地故障。绝缘检测数据还应形成连续记录,通过数值变化趋势判断设备劣化程度,避免仅凭单次检测结果作出判断,从而提高熔断故障预防的准确性。

4.3 优化熔断器选型配合

高压熔断器承担电压互感器一次侧短路保护任务,选型是否合理直接影响熔断动作的准确性。云南水电站运行环境复杂,机组启停、线路投切、雷电冲击和谐振过电压均可能造成瞬时电流变化,若熔断器额定电压、额定电流、开断容量和时

间电流特性与电压互感器不匹配,便可能出现误熔断或保护不足。优化选型时,应结合互感器容量、励磁涌流、系统短路容量、安装位置 and 实际运行方式进行校核,避免简单套用通用规格。对于频繁熔断的回路,还需核查熔断器底座接触情况、熔芯质量、安装紧固程度及同型号替换一致性,防止因接触发热或参数偏差诱发熔断。熔断器与互感器、保护装置之间应形成合理配合关系,既能在内部故障时快速切除,又不因短时扰动轻易动作,从而提高电压互感器回路运行可靠性。

5 运行维护质量提升路径

5.1 完善周期性巡视内容

云南水电站受山区湿热气候、雨季持续时间较长和昼夜温差变化影响,电压互感器及高压熔断器的运行状态容易受到环境因素干扰。周期性巡视不能只停留在外观查看层面,应将电压指示变化、熔断器底座温升、柜内凝露、绝缘件积尘、端子松动、放电痕迹和异味异响等内容纳入固定检查项目^[5]。巡视过程中还需关注汛期高负荷运行、机组频繁启停、雷雨天气后的设备状态变化,发现电压异常波动或相间不平衡时,应及时核对测控数据与现场表计,避免小缺陷发展为熔断故障。通过细化巡视内容,能够使运行人员更早发现互感器回路中的隐蔽隐患,减少高压熔断器突发熔断带来的运行风险。

5.2 建立故障记录分析机制

高压熔断器熔断具有突发性和重复性,单次故障处理若缺少完整记录,后续判断容易停留在经验层面。云南水电站在运行维护中应建立熔断故障记录分析机制,将故障发生时间、天

气情况、机组负荷、开关操作、母线电压变化、告警信息、熔断相别、熔芯状态和处理过程进行统一归档。通过对多次熔断事件进行对比,可以发现故障与汛期潮湿、雷电冲击、负荷突变或特定运行方式之间的关联。记录内容还应与绝缘检测、二次回路检查和熔断器选型核对结果结合起来分析,避免仅凭更换熔芯判断故障已消除。持续积累故障数据,有助于形成更准确的故障判断依据,提高运行维护工作的针对性。

5.3 提高异常判断处置能力

电压互感器高压熔断器熔断往往伴随电压显示异常、保护告警和监控数据波动,若现场判断不及时,可能影响机组运行和保护装置可靠性。云南水电站运行人员需要熟悉电压互感器一次回路、二次回路和保护装置之间的联系,能够根据告警类型、相电压变化、负荷工况和设备状态快速判断异常来源。处置过程中应避免盲目恢复送电或反复更换熔断器,而应结合一次设备检查、二次回路测量、绝缘状态测试和熔断器参数核对逐项确认。针对雨季、雷暴、机组启停等特殊工况,还需提前掌握可能出现的异常特征。判断能力和处置流程相结合,可降低故障扩大风险,提升电压互感器回路运行稳定性。

6 结语

水电站电压互感器高压熔断器熔断与铁磁谐振、绝缘劣化、二次回路异常及选型配合不当密切相关。云南水电站运行环境复杂,故障判断需结合电压指示、保护告警、现场检查和运行记录综合分析。加强巡视检测、完善故障记录、提升异常处置能力,可有效减少重复熔断,保障电压互感器回路稳定运行。

参考文献:

- [1] 王韵珩.面向复杂工况的电压互感器校验仪自动检定方法[J].电气技术与经济,2025,(12):387-389.
- [2] 贾鹏鹏,周文凯,王井顺,等.电磁式电压互感器层间绝缘铁磁谐振放电研究[J].绝缘材料,2025,58(12):104-111.
- [3] 季杰,黄建琼.大型水电站发变组及厂用电典型电气故障分析[J].电力安全技术,2025,27(8):74-78.
- [4] 林放.某水电站电压互感器极性问题分析与探讨[J].小水电,2023,(5):67-70.
- [5] 林天.水电站防雷设计方案仿真与防护措施研究[D].南京邮电大学,2021.