

论如何提升风电场35kV系统运行可靠性

胡文超, 薛青园*

华润电力蒙东新能源公司, 内蒙古 锡林郭勒盟 026000

DOI:10.61369/EPTSM.2025060011

摘 要 : 随着我国风电装机规模的不断扩大, 风电场运行可靠性对电网的影响日益显著。35kV系统作为风电场内部的关键环节, 其运行稳定性直接关系到整个风电场的可靠性。本文结合多个实际故障案例, 从技术手段、管理方法和优化措施等方面, 系统分析了提升35kV系统运行可靠性的具体方法, 为风电场的运维管理提供了实践参考。

关 键 词 : 风电场; 集电线路; 可靠性; 技术监督

On How to Improve the Operational Reliability of 35kV Systems in Wind Farms

Hu Wenchao, Xue Qingyuan*

China Resources Power Mengdong New Energy Company, Xilingol League, Inner Mongolia 026000

Abstract : With the continuous expansion of wind power installed capacity in China, the impact of wind farm operational reliability on the power grid has become increasingly significant. As a key link within wind farms, the operational stability of the 35kV system is directly related to the reliability of the entire wind farm. Based on multiple actual fault cases, this paper systematically analyzes specific methods to improve the operational reliability of the 35kV system from aspects such as technical means, management methods, and optimization measures, providing practical references for the operation and maintenance management of wind farms.

Keywords : wind farm; collector line; reliability; technical supervision

前言

近年来, 我国风力发电行业保持快速发展, 已成为全球风电装机规模最大的国家之一。在政策支持、技术进步和市场机制的共同推动下, 风电行业正朝着规模化、深远海和智能化方向迈进。然而, 随着风电装机占比的提升, 风电场运行可靠性对电网的影响日益凸显。35kV系统作为风电场内部的核心组成部分, 设备种类繁多、结构复杂, 同时也是故障高发区域。因此, 提升35kV系统的运行稳定性与可靠性, 是保障风电场整体运行可靠性的关键。

本文结合近年来风力发电场35kV系统的典型故障案例, 从母线系统、集电线路系统、无功补偿装置以及保护与自动化装置等方面, 探讨提升系统运行可靠性的技术手段和管理方法, 为风电场的运维工作提供借鉴。

一、35kV母线系统

(一) 案例分析

某风电场投运初期, 连续多次发生35kV母线PT高压熔断器熔断故障, 导致35kV母线电压无法正常监测, 多次被迫停运35kV母线检查更换PT, 造成了大量的电量损失。

故障现象: 升压站两段35kV母线PT一次保险频繁熔断, 共计发生6次故障(两套母线PT一次保险各熔断3次)。根据故障现象及数据分析, 每套PT一次保险两次熔断间隔时间约两周左

右, 每次熔断的相别不固定, 过程均为慢熔(从电压开始跌落到彻底熔断时间从2小时到6小时不等), 且熔断器熔断前大多有倒闸操作^[1]。

原因分析: 经排查, 可能原因包括: ①系统PT二次回路存在多点接地; ②二次回路短路导致保险熔断; ③35kV母线一次消谐装置质量不达标, 影响PT一次回路运行; ④升压站地网接地电阻过大, 干扰PT二次回路负荷分配; ⑤操作过电压引发35kV系统谐振, 产生暂态过电流; ⑥二次负载过大, 导致熔断器额定电流选型不匹配;

作者简介: 胡文超(1986-), 男, 大学本科, 工程师, 研究方向: 主要从事新能源场站运行与维护工作。

通讯作者: 薛青园(1995-), 男, 大学本科, 助理工程师, 研究方向: 主要从事新能源场站运行与维护工作。

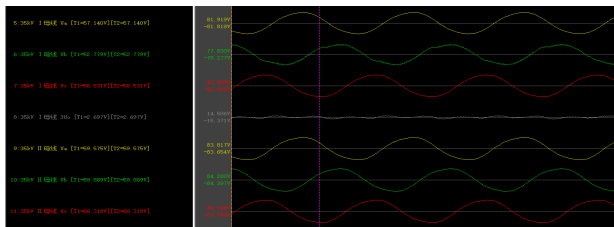


图1 PT保险运行异常初期的故障波形

故障录波显示，从B相波形开始畸变（12:04）到B相无电压（15:48），历时3.5小时，期间波形畸变逐渐加剧。3月10日更换熔断器后，3月12日、4月2日、4月18日仍发生电压突变量启动，但突变波形均在3个周波内恢复正常^[2]。

处理措施：①PT二次回路接地在电压转接屏一点接地，将开关柜原有内部接线多余的接地线拆除；②开关柜厂家到场检查PT柜消谐电阻器是否被击穿或有其他失效形式；③通过电能质量监测装置查看结合谐波测试仪确定系统电能质量无异常^[3]；④对母线PT测试伏安特性确定PT性能良好；⑤将两条母线PT一次保险由额定电流0.5A的保险更换为额定电流为1A的保险；

结论：T高压保险的额定电流选型不匹配。0.5A熔断器抗电压冲击能力不足，在经过几次冲击后，性能下降劣化，直至熔断。1A熔断器抗电压冲击能力强，在经过几次冲击后，性能未下降。更换了额定电流为1A的保险后，该风电场再未发生35kV母线PT一次保险再次熔断的情况。经长期盘查观察，35kV母线电压稳定正常，未出现零序电压的较大波动情况^[4]。

此外，封闭式共箱母线受潮易引发局放过热或局部发热，需做好两项防护：①强化封闭母线箱顶部的防雨、防尘措施；②优化底部排水孔洞设计，确保水汽及时排出。

二、集电线路系统

风电场35kV集电线路多采用架空线路设计（受投资成本约束），仅在升压站终端、风机终端、钻越外部线路或道路桥梁处采用电缆连接。由于线路多分布在高山大岭、易受雨雪冰冻、大风、鸟害等自然因素影响，成为35kV系统中故障最高发的部分。历史故障记录显示，集电线路跳闸的主要原因包括雷击、风摆、异物、鸟害、覆冰、避雷器故障、绝缘子及跌落开关失效、引线松脱等^[5]。以下结合案例介绍具体治理方法：

（一）雷击故障治理

某风电场35kV集电线路位于高山大岭之间，所处区域为多雷区，雷击频繁导致线路跳闸，损坏避雷器、瓷绝缘子等设备。



图2 雷击放电

治理措施：①主动防雷：在海拔较高或易遭雷击的区域，参考国网线路杆塔防雷标准，增设适当数量的避雷针接闪器，保护绝缘子免受直击雷侵害；在关键位置安装通流容量较大的避雷器，加速雷电流泄放，同时防范感应雷、绕击雷；

②改善接地：改善集电线路杆塔接地性能，对超过 30Ω 的杆塔，采用外延法、深井法等改造接地装置，辅以接地模块、垂直接地极、降阻剂等材料降低接地电阻。重点改造29基增设接闪器的杆塔，通过增加接地降阻模块、延长接地网敷设长度、更换回填土等方式优化接地性能。^[6]

（二）鸟害治理

某风电场地处内蒙古草原深处，线路区域树木稀少，鸟类常以杆塔为栖息点。大型鸟类落于引下线、跌落开关等部位易造成短路接地；春季鸟类筑巢时，金属丝掉落至风机终端塔引下线、避雷器引线等处，也会引发接地短路跳闸。

治理措施：①差异化处理鸟巢：对不影响运行的鸟巢（如不在导线正上方、非终端塔且架构简单）不予拆除，避免刺激鸟类频繁筑巢；②强化绝缘防护：在易受鸟害的线路部件（如引下线、跌落开关平台）加装绝缘护套，防止鸟类活动引发短路。^[7]

（三）避雷器故障治理

某风电场在雷雨天气中，一集电线路遭雷击导致避雷器损坏击穿，引发单相接地短路，零序一段保护动作跳闸。

治理措施：①严把设备质量关，选用出厂检验合格的避雷器，确保各项参数符合铭牌及说明书要求；②按《DL/T 596-2021 电力设备预防性试验规程》定期开展检测，及时发现潜在缺陷；③若现有避雷器无法满足运行需求，更换为标称放电电流更大、方波通流容量更强的产品；有条件时加装避雷器脱离器，提升线路运行可靠性。

（四）其他常见问题治理

引线脱落：①避雷器导引线采用带开口销的螺栓固定，防止松动；②避雷器接地引线检修时确保螺栓紧固到位，缩短引线长度并在中间用尼龙扎带固定，避免松脱后与导线接触放电；

绝缘子损坏：①外观存在裂纹、缺失的瓷绝缘子立即更换；②年度技术监督中开展零值测试，对绝缘下降的绝缘子及时更换；

风摆及异物：①档距较大的导线处安装相间间隔棒，防止风摆短路；②转角塔跳引线处采用悬垂绝缘子带重锤设计，减少风摆幅度；

覆冰：①导线覆冰采用机器人除冰；②终端塔绝缘子、引下线等结构复杂部位，人工使用除冰器及时除冰，避免覆冰引发闪络。^[8]

三、无功补偿装置

（一）SVG雷击损坏故障

2024年6月27日，某风电场35kV系统遭雷击导致集电线路跳闸，雷电反击至SVG控制柜，造成多器件损坏。

分析过程：①#2 SVG功率控制柜中，24V开关电源模块、

PLC控制器、SVG主控板、3块分相通讯控制板明显损坏；②排查发现，柜内24V开关电源模块接地端子、#2SVG主控板、公共端接地引线均未接地；③柜内220VDC控制电源无防雷浪涌保护器等防雷设计。^[9]

结论：雷击浪涌通过主接地网反击侵入二次供电电源，经开关电源串入控制系统及PLC；浪涌通过二次电源线释放时，导致各供电部件不同程度损坏，具体串扰路径示意图如下所示。

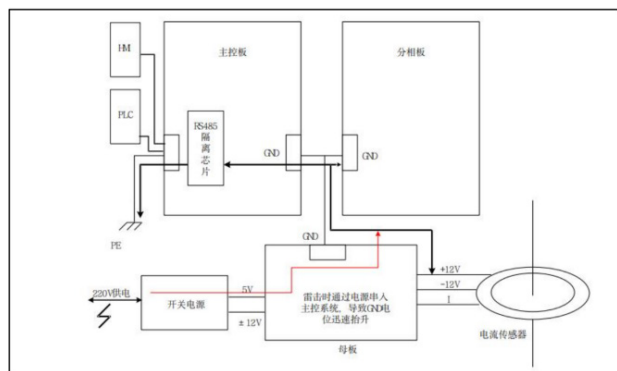


图3 串扰路径

处理措施：更换SVG控制柜内损坏的元器件；利用停电机会在直流电源进线处加装防雷模块，强化二次供电电源的雷击浪涌防护。^[10]

（二）SVG过压跳闸故障

2025年6月12日，某风电场#6风机线316开关因零序过流Ⅰ段动作跳闸，5秒后35kV #1 SVG 031开关跳闸。

分析过程：①SVG本体无元件损坏，链节通讯故障因母排失压触发，合闸后恢复正常；②水冷系统及功率模块测试无异常；③巡视发现#6风机线E19铁塔A相避雷器因雷击击穿接地；

结论：①雷雨天气中，雷击导致A相避雷器损坏接地，35kV I母A相电压降低，B、C相电压升高并叠加雷电波峰；②B、C相高电压瞬时涌入#1SVG，导致两相直流总电压平均值过压；③因SVG链节IGBT直流侧电容无法短时间释放过电压，6秒后触发“单相直流总电压平均值超限跳闸”，导致#1SVG本体跳闸并联跳031开关。

处理措施：①立即更换损坏的避雷器，并检查附近杆塔避雷器状态；②每年雷雨季节前，委托专业单位检测线路杆塔防雷设施，处理接地电阻不合格及隐患设施；③年度预防性试验中，按《DL/T 593电气设备预防性试验规程》对35kV线路避雷器开展检测，及时更换泄流值不合格产品。

（三）SVG故障原因总结

SVG常见故障原因包括冷却系统失电、高温、灰尘堆积、雷击、功率模块故障、连接变压器故障等。日常运维需重点关注：①冷却系统电源（取自站用电400V母线）稳定性，避免倒闸或失电导致跳闸；②SVG室（舱）内温度控制，确保空调正常运行，防止模块高温告警；③年度检修中检测功率模块、连接变压器状态，清理舱内灰尘。

四、保护及自动化装置

（一）保护拒动与越级跳闸故障

2025年6月12日，某风电场遭雷击，35kV #2母线所带开关全部跳闸。

事件经过：①05时09分32秒，#6风电线路321间隔保护整组启动，6毫秒后零序过流Ⅰ段保护动作，跳开321开关；②10毫秒后，#2接地变832间隔保护整组启动，607毫秒后零流Ⅰ段1时限保护动作，跳开832开关，并联动跳35kV #2母线上所有开关（322、323等）；③现场巡视及集电线路绝缘遥测均未发现明显异常；④排查发现，#9风电线路电流异常，保护装置定值区号设置错误（定值单为1区，实际为2区）；⑤发现#9风电线路SJ-013杆塔A相避雷器伞裙击穿、破损。

原因分析：

1）#6风电线路跳闸：雷暴天气中，感应雷电导致#6风电线路A相电流突变，三相不平衡产生零序电流（最大0.747A），触发零序过流Ⅰ段保护动作。故障时35kV #2母线上电压瞬时值异常升高（A相183.013V、B相234.167V、C相150.79V），印证了雷电干扰的影响。

2）#2接地变跳闸：①保护装置动作正确（动作值0.517A）；②保护电流端子排（11D1-11D4）被短封，导致保护装置及故障录波无保护电流；③接地变零序电流取自高压侧，不符合《DL/T 1631-2016并网风电场继电保护配置及整定技术规范》第5.8.7条“应取自接地变中性点零序电流互感器”的要求。

3）#9风电线路异常：①故障前三相电流平衡（A相0.104kA、B相0.105kA、C相0.105kA），故障后A相降至0.048kA，三相不平衡电流0.056kA，与接地变零序电流（0.055kA）基本一致，判定为A相接地；②#9风电线路保护装置定值区在2区（零序过流1段定值4A，控制字未投入），故障电流未达定值，导致保护拒动；③故障电流长时间存在，引发#2接地变保护越级动作。

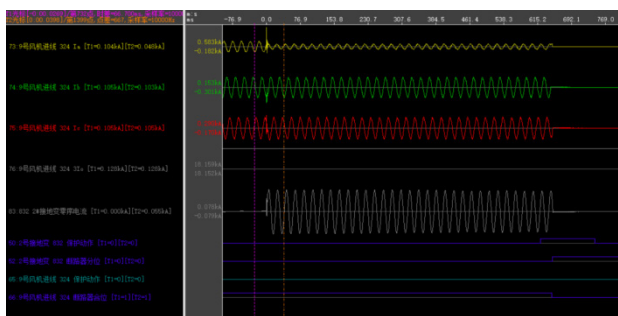


图4 故障录波波形

结论：①#9风电线路A相避雷器故障接地，因保护装置定值区设置错误（2区），保护拒动；②#2接地变保护正确动作，联跳逻辑正常；③存在故障录波通道损坏（#9风电线路零序电流未录波）、保护CT短封、定值区设置错误等问题。

处理措施：①开展全站定值核查，确保与定值单一致，同步检查二次接线、保护压板缺陷；②组织运维人员学习继电保护装置操作，结合备用装置及说明书开展实操培训；③规范继电保护

设备操作：非专业人员禁止操作，专业人员工作时需1人操作1人监护，密码操作需向厂家确认，并将要求纳入管理制度；④校验#2母线所带间隔保护装置，年度预防性试验按规程开展继电保护校验；⑤年度试验中检测35kV线路避雷器，更换不合格产品；⑥排查故障录波通道与配置，年度试验中开展录波校验。

五、结论

风力发电场35kV系统是一个较为复杂的系统，若想提升系统

的运行可靠性，首先对照电气设备预防性试验规程、风电场运行规程、检修规程、以及各类技术标准，结合以往的经验教训对系统内母线系统、集电线路系统、无功补偿或接地变系统、保护及自动化装置等所有设备进行系统科学的维护保养，例行开展充分的技术监督工作。其次，要不断培养运维人员的技术能力水平，开展各类培训和技术比武，使人员不断增进对所维护设备的熟悉程度。

参考文献

-
- [1] 郑晶晶, 杨勇, 邢延东, 梁福波. 风电场35kV系统优化设计及稳定运行技术探讨 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29 (5): 21-25.
 - [2] 国家能源局. 电力设备预防性试验规程: DL/T 596-2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
 - [3] 国家能源局. 并网风电场继电保护配置及整定技术规范: DL/T 1631-2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
 - [4] 国家能源局. 风力风电场运行规程: DL/T 666-2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
 - [5] 文玉玲, 晁勤, 吐尔逊·依布拉克. 风电场对电网继电保护的影响 [J]. 电网技术, 2008, (14): 15-18.
 - [6] 席晶, 李海燕, 孔庆东. 风电场投切对地区电网电压的影响 [J]. 电网技术, 2008, (10): 58-62.
 - [7] 戴慧珠, 王伟胜, 迟永宁. 风电场接入电力系统研究的新进展 (英文)[J]. 电网技术, 2007, (20): 16-23.
 - [8] 周丽霞, 尹忠东, 郑立. 配网PT铁磁谐振机理与抑制的试验研究 [J]. 电工技术学报, 2007, (05): 153-158.
 - [9] 李渝, 范高锋, 李庆, 等. 达坂城风电接入系统对新疆电网电能质量的影响 [J]. 电网技术, 2007, (06): 88-92.
 - [10] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 风电对电力系统运行的价值分析 [J]. 电网技术, 2002, (05): 10-14.