

风电场柔性直流并网系统故障保护与恢复策略研究

赵映泽

(河北龙源新能源有限公司, 河北 承德 067000)

摘要 本文针对风电场柔性直流并网系统的故障保护与恢复问题,深入剖析了直流侧故障电流骤升、换流器过压过流的产生机理,以及交流侧故障向直流侧传播引发的功率振荡、电压频率偏移等故障特性。系统综述了直流线路纵差保护、行波保护、阻抗保护、直流断路器保护、换流站过压保护、低电压穿越等主流保护技术的应用现状。研究发现,噪声干扰与通信时延会影响故障快速识别与定位精度,同时系统存在保护动作与恢复策略协同性不足等问题。基于此,本文提出基于行波、相量、开关量的多源信息融合故障快速检测方法,结合物理机理与数据驱动算法提升检测鲁棒性;构建站内快速处置、区域协同配合、广域统筹恢复的分层协同控制架构,实现故障选择性隔离、电网柔性拓扑重构与功率平稳重分配。仿真结果表明,所提方法故障检测时长小于5 ms、定位误差低于1%,系统故障恢复时间缩短约30%,可有效提升风电并网运行稳定性与电力输送可靠性。

关键词 风电场柔性直流并网;模块化多电平换流器;多源信息融合检测

中图分类号: TM721

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.20.010

0 引言

随着新能源大规模并网与远距离电力送出需求持续增长,基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的柔性直流并网技术已成为风电场并网的重要技术方案。柔性直流并网系统的故障机理较为复杂,直流侧故障易引发故障电流骤升、换流器承压过流,且交流侧故障会向直流侧耦合传播,给系统故障保护与恢复工作带来极大挑战。当前,直流线路纵差保护、行波保护、阻抗保护、直流断路器保护、换流站过压过流保护、低电压穿越等技术策略虽已取得一定研究进展,但在复杂工况环境下,系统仍存在诸多短板:故障快速识别与定位精度易受噪声干扰与通信时延影响,保护动作与系统恢复策略协同性不足,极易引发保护误动、停电范围扩大等问题。基于此,针对风电场柔性直流并网系统故障保护与恢复策略的研究意义重大。

1 柔性直流系统故障类型与机理分析

1.1 直流侧故障特性

柔性直流系统普遍采用 MMC 拓扑结构,其直流侧典型故障类型包括极间短路、单极接地、电缆绝缘击穿及线路断线等,故障演化过程具备多源激励、多阶

段动态响应的特征。在0 ms~1 ms的超快速故障阶段,子模块电容与电缆分布电容将通过桥臂电感快速放电,导致直流电压瞬时骤降,故障电流以极高的电流变化率快速攀升。该阶段结束后,换流器进入二极管不控整流工作状态,交流侧经变压器与系统电源持续向故障点馈入能量,使故障电流持续上升并形成稳定低阻故障通道。故障电流幅值由直流侧电容、交流侧电源与线路电感共同决定,故障回路路径受双极接线、金属回线、海底回线等接地方式的制约。其中,单极接地故障会引发极间运行失衡与直流电位偏移问题^[1]。故障发生后,行波沿电缆高速传播,线路端部反射与分支节点折射不匹配会造成局部过电压与电流峰值叠加,再叠加护层耦合效应与屏蔽电容的影响,进一步加剧设备暂态冲击应力。不同故障类型的电气特性存在明显差异:在低阻故障工况下,直流电压近似归零、故障电流趋于饱和,故障演化的时间常数主要由桥臂电感与线路电感主导;在高阻故障工况下,直流电压无法完全跌落,系统谐波含量显著升高,同时伴随持续性功率脉动。

1.2 交流侧故障传播特性

风电场柔性直流并网系统交流侧常见故障主要包括三相短路、单相接地、不平衡电压骤降及频率偏移

作者简介:赵映泽(1984-),男,本科,工程师,研究方向:电气工程。

等。故障发生后，换流站并网点交流电压会出现骤降、相角跃变，并通过锁相环（PLL）与电流环耦合作用传入控制系统。控制系统会优先响应无功支撑与电流限幅控制策略，进而导致有功功率输送能力大幅下降^[2]，造成交、直流两侧功率传输失衡。

此时，子模块电容将承担系统瞬态过剩或缺失的能量，引发直流母线电压抬升、跌落及振荡现象。同时，交流侧故障带来的系统三相不平衡会引入负序分量，产生二倍频（ 2ω ）功率脉动；基于交直流功率近似平衡的耦合关系（ $P_{dc} \approx P_{ac}$ ），该功率脉动会进一步诱发直流侧电压、电流产生二次谐波波动。

在弱电网工况下，锁相环与外环控制的动态交互作用，还可能引发系统低频振荡，造成能量在交流侧与直流侧之间反复吞吐、交替传递。若故障程度加剧致使换流器闭锁，MMC 桥臂将切换为二极管导通工作状态，交流侧电源会通过整流通路向直流侧充、释能，极易引发直流侧暂态过电压问题，与电缆原有应力叠加，加剧系统运行风险。而系统并联配置的直流限流装置、子模块去使能策略及直流断路器，可有效改变故障能量的传递方向与波形，抑制故障劣化。

2 风电场柔性直流并网系统保护现状

2.1 直流线路保护策略

风电场柔性直流（VSC-HVDC）线路保护以“快速、选择性、可靠”为核心运行目标，构建主备协同的多判据保护体系。工程中通常采用双端电流纵差保护作为主保护，通过光纤同步传输线路两端的高采样率直流电流数据，依托差流与制动系数完成故障判别，具备优异的区内故障选择能力，保护动作时间稳定在 $2\text{ ms} \sim 5\text{ ms}$ ，是目前海上柔直电缆线路的主流主保护配置方案。

为进一步提升保护首跳可靠性，系统配套部署基于行波原理的超高速保护与故障定位技术。该技术依托故障初始电流行波的首波特征，通过双端测距或单端特征识别方式，实现毫秒级的故障判别与精准定位，同时可作为电流纵差保护的加速辅助判据，大幅提升故障响应速度。

区段化分区保护与多装置协同配合是柔性直流保护的核心技术特征。多站柔性直流系统依托直流断路器（DCCB）实现故障的选择性精准切除，不同类型断路器性能各有优劣：混合式断路器融合功率电子旁路与机械主断结构，可在 $3\text{ ms} \sim 5\text{ ms}$ 内完成故障开断，并有效约束故障能量扩散；固态式断路器动作速度更快，但运行损耗相对偏高；机械式断路器损耗更低，通过整合限流电抗、快速隔离开关与金属氧化物避雷器（MOV）能量吸收支路，形成完备的故障处置能力^[3]。

2.2 换流站保护策略

风电场柔性直流换流站保护以快速抑制故障能量、保障阀侧与直流母线安全为核心目标，构建“装置级—站级—系统级”分层配合的保护架构。装置级保护覆盖 MMC 子模块与桥臂回路，包含子模块电容过压、欠压，器件过流、过温，桥臂电流速断与差动保护、桥臂电感 dt 限值控制及子模块旁路策略；阀侧配置避雷器（MOV）与匝间过压监测装置，规避暂态能量集中导致的器件失效问题。站级保护依托直流母线及极间差动保护，结合母线分段与金属回线实现选择性故障切除，可快速隔离极间短路与极地接地故障。

直流故障处置过程中，优先执行换流器阻断操作，再投入直流能量吸收支路耗散过剩能量，通过限流电抗与直流断路器（DCCB）协同配合，实现毫秒级故障切除与故障能量约束。交流侧保护涵盖变压器差动、母线差动、过压保护及空分断路器联跳功能，配合低电压穿越（LVRT）与电流限幅控制，保障交流系统平稳稳定。控制层面通过引入 PLL 弱化、负序抑制及直流电压优先策略，降低故障耦合引发的二次冲击。在多端柔直场景中，各换流站依托直流下垂控制与主从切换机制，实现电压功率的平稳接管与合理均分。

3 故障保护与恢复存在的问题

3.1 故障快速识别与定位精度不足

柔性直流系统保护需满足毫秒级响应要求，但现有检测测距链路在设备、算法、通信层面存在瓶颈，易造成故障识别滞后、定位偏差。海缆高电容与频率相关参数会导致行波传播衰减、色散，出现首波边沿钝化、反射波重叠现象，单双端行波测距易受波速误差、分段接头及支路失配影响，显著增大定位误差。温湿度与载流工况变化会引发介电常数、电阻率漂移，难以长期保证波速与阻抗阈值精度；纵差保护高度依赖高精度时钟同步与对称通信，光纤链路不对称、GPS 失锁会降低保护灵敏度，引发保护误判。

在测量传感层面，直流电流带宽与动态范围受限，易造成超高速暂态信号被滤波、饱和；霍尔元件与分流器的温漂、零漂会抬高噪声基底，导致高阶导数、斜率类判据易发生误动。换流器阻断、子模块去使能及直流断路器动作，会改变故障等效电路与波形特征，造成固定模板识别算法适配失效。弱电网下 PLL 失稳叠加负序、二次谐波脉动，易使交流侧扰动误判为直流故障。高阻接地、护层绝缘劣化及间歇性弧光故障信号幅值低、间断性强，传统电流阈值与方向元件灵敏度不足；预充电投入、电容投切与雷击干扰产生的大幅暂态，易与真实故障特征混淆。

3.2 保护动作与系统恢复的协调性欠缺

风电场柔性直流并网系统的故障保护与系统恢复并非独立过程，而是紧密耦合的动态整体。当前相关研究与工程实践中，二者在时序配合、控制逻辑、运行目标三个方面存在显著协调短板，严重制约了故障后系统安全、快速、稳定恢复。

在时序配合上，保护速动性与恢复渐进性存在固有矛盾。现有直流故障保护依靠闭锁、降压、断路器跳闸等毫秒级操作快速隔离故障、防护设备，但后续换流站解锁、功率回升、机组重启等恢复流程需秒至分钟级调控^[4]。因缺乏统一时序框架与协同指令，易出现恢复时序错位问题，引发故障复现、设备反复受冲击等隐患。

在控制逻辑上，保护与恢复系统采用独立架构，信息交互与协同能力不足。保护仅依托本地电气量阈值判别故障，而恢复工作需结合电网工况、风电出力等多源信息全局决策。信息共享与协同判别机制的缺失，易造成故障隔离范围过度、黑启动困难、功率振荡等问题，难以实现最小故障隔离、最优系统恢复的运行目标。

4 故障保护与恢复优化策略

4.1 基于多源信息融合的快速故障检测方法

针对风电场柔直系统毫秒级保护需求，搭建“多源感知—特征提取—自适应融合—快速决策—精确定位”一体化检测架构。多源感知环节引入多端高带宽电压、电流及其导数、MMC臂电流、子模块电容电压、母线MOV能量、DCCB线圈电流、海缆护层电流分布式振动信号，以及交流侧PMU相量与负序分量，实现跨频段、跨设备的事件全覆盖捕获；依托PTP时间同步、本地恒温晶振保压及Savitzky-Golay与VMD小波去噪算法，提取具备强抗噪性的暂态特征。特征提取层面，依托行波首波到达时标、极性及峰值完成方向判别与双端测距，基于自适应反射测量实现海缆波速在线估计；融合直流电压塌陷率、臂电流斜率与子模块电压不平衡特征，辨识低阻、高阻及接地故障类型；结合交流侧 2ω 功率脉动与PLL状态区分交流侧扰动。融合决策采用证据理论与置信度评估，实现特征级与决策级并行研判，通信受限场景下可降级为单端混合阈值策略；通过异常值剔除与阀阻断、DCCB状态一致性校验，规避控制介入引发的保护误判。

4.2 分层协同的保护与恢复控制架构

搭建“站内快速—区域协调—广域恢复”分层协同体系，实现故障的选择性隔离、能量约束与电网有

序再接入。站内快速层以毫秒级响应为目标，核心包含换流器阻断与电流限幅、母线差动及直流电压优先控制；依托直流断路器(DCCB)、限流电抗与制动支路实现能量约束；通过子模块去使能与受控预充电的安全流程，基于边缘计算平台构建“故障察觉—阻断实施—能量吸收—绝缘评估—缓升重并网”的事件驱动状态机，并借助本地联锁保障阀臂、母线与DCCB动作的一致性与选择性。

广域恢复层聚焦跨系统安全快速复原，基于统一对时体系(GPSPTP+本地守时)与事件时间戳，制定直流母线缓升、阀控解锁、风电机组功率斜坡与桨距无功协同的再并网序列，设置速率限值与涌流约束，规避再并网二次冲击。引入海缆护层电流、绝缘电阻、DCCB状态、子模块温升、MOV能量等健康评估与准入判据，满足条件方可重新投运。通过广域协调优化功率重分配与潮流路径，规避端口过载与功率振荡问题^[5]。

5 结束语

本文针对风电场柔性直流并网系统故障保护与恢复问题，开展从原理解析、现状评估、问题剖析到方案构建的闭环研究。针对直流侧高幅快速故障电流与交流侧耦合传播特性，本文提出基于多源信息融合的快速检测方法与分层协同保护恢复架构，实现毫秒级故障识别、选择性隔离与有序重投，缩短停电时长、降低弃风损失与二次扰动，有效提升系统韧性与供电可靠性。该策略在复杂工况与通信时延场景下具备良好鲁棒性，工程适用性与推广价值突出。未来将面向多端柔直、混合交直流及海上风电场景，深化直流断路器协同、广域时同步与网络安全防护技术落地，结合数字孪生与硬件在环验证，构建自适应、可扩展的故障保护恢复体系，为高比例新能源安全高效并网提供支撑。

参考文献:

- [1] 郑秀娟,田云峰,吴林林,等.新能源与柔性直流换流站间模式谐振与迁移概率评估方法[J].电力系统自动化,2026,50(06):201-212.
- [2] 张少华.高压柔性直流输电系统故障穿越控制策略研究[J].科技资讯,2025,23(24):99-101.
- [3] 王琦,丁芮,成硕,等.基于盈余功率分配的海上风电经柔直送出系统故障穿越策略[J].电力系统保护与控制,2025,53(24):165-175.
- [4] 顾文,郑超航,杨宏宇,等.海上风电场经交流海缆并网谐波谐振放大分析[J].现代电力,2024,41(02):380-391.
- [5] 季柯,阳岳希,周啸,等.柔性直流输电工程振荡案例分析与抑制技术[J].电气工程学报,2025,20(03):116-135.