

新能源场站接入柔性直流系统的交流线路故障识别与保护技术研究

李昭

东北电力大学 吉林省吉林市

【摘要】新能源场站的大规模接入，当前的电力网络中普遍接入柔性直流系统。其作为基于电压源换流器（VSC）的高压直流输电技术，能够对有功功率和无功功率独立控制，在电网中应用有很高的灵活度，对各种电力需求有很好的适应度。然而，新能源场站接入柔性直流系统运行过程中，交流线路故障难以避免。为保证系统安全稳定运行，就要准确识别故障并采用科学有效的保护技术，本论文针对新能源场站接入柔性直流系统的交流线路故障识别与保护技术展开研究。

【关键词】新能源场站；柔性直流系统；交流线路；故障识别；保护技术

【收稿日期】2025年7月16日

【出刊日期】2025年8月15日

【DOI】10.12208/j.jer.20250385

Research on AC line fault identification and protection technology of new energy stations connected to flexible DC system

Zhao Li

Northeast Electric Power University, Jilin City, Jilin Province

【Abstract】With the large-scale integration of new energy stations, flexible DC systems are widely used in the current power network. As a high-voltage direct current transmission technology based on voltage source converter (VSC), it can independently control active power and reactive power, and has high flexibility in application in the power grid, with good adaptability to various power demands. However, during the operation of new energy stations connected to flexible DC systems, AC line failures are difficult to avoid. To ensure the safe and stable operation of the system, it is necessary to accurately identify faults and adopt scientifically effective protection technologies. This paper focuses on the research of fault identification and protection technologies for AC lines connected to flexible DC systems in new energy stations.

【Keywords】New energy station; Flexible DC system; AC line; Fault identification; Protection technology

引言

新能源场站接入柔性直流系统了，其所具备的优势在于可长距离传输电能并接入新能源，因此成为当前电力网络的重要部分。但是，柔性直流系统维持安全运行状态，就要及时处理交流线路故障，快速准确识别故障并采取有效的保护措施是关键^[1]。如果采用传统保护技术，需要面临的问题是故障类型多且系统拓扑复杂。所以，对适用于新能源场站接入柔性直流系统的交流线路进行研究，重点分析故障类别、识别方法以及保护技术具有重要的现实意义。

1 故障类型

1.1 短路故障

柔性直流系统应用模块化多电平换流器（MMC），

其子模块电容发生短路的时候，放电速度非常快刈，因此产生的故障电流在数毫秒内就可以会提升到额定电流的数十倍。如果采用传统串联 RLC 等效模型，对于交流系统电流馈入以及子模块电容动态变化情况不能准确反映出来，因此导致故障电流峰值被低估。

1.2 接地故障

当柔性直流系统发生接地故障，容易发生直流母线电压波动，因此触发 MMC 闭锁阈值，造成大范围停电。新能源场站并网线路产生接地故障，需要对柔直系统低阻尼特性以充分考虑，故障电流衰减速度比较慢。

1.3 断线故障

柔性直流系统运行的过程中产生断线故障，造成

无法持续传输功率，因此导致新能源场站频率越限，或者系统功率无法维持平衡状态，过电压保护被触发。对地电容放电的过程中，电压波动幅度大，就需要考虑线路分布电容的暂态影响。

2 故障识别方法

2.1 电流电压检测

应用电流电压检测方法可识别短路故障和接地故障。

短路故障的识别中，重点检测电流突变率(di/dt)以及电压骤降，柔直系统故障电流受到控制，如果采用传统过流保护方式，则需要配合换流器特性优化阈值；接地故障的识别，则分析零序电流和零序电压，但是，新能源场站的弱馈性导致信号微弱，需要使用精度传感器。

具体的故障识别方法如下：

(1) 故障检测。实施故障检测中，先监测电气量。对交流线路的三相电压电流以及零序分量实时监测，如果检测到异常，就要实施故障判断。主要的异常包括电压突然降低并低于额定值 80%；电流突然增长且已经超过设定阈值；零序电流显著提升（接地故障）。如果电压或者电流的变化率已经超过预设值，或者持续异常超过 10ms，就可以判定为故障。

(2) 故障判断。进行短路故障判断，查看三相电流是否大幅失衡，负序电流是否显著升高；电压对称性是否遭到破坏而零序电流没有显著变化^[2]。

进行接地故障判断，故障相电压接近零，出现非故障相电压升高现象；零序电流达到设定阈值，即超过 20% 额定电流。

即便柔性直流系统有一项重要功能，即通过 MMC 换流器控制方式能够对故障电流快速限制，但是，要求传感器有很高的精度，才能对初始故障特征准确捕捉。

2.2 阻抗测量

处于柔性直流联网场景下，新能源机组提供短路电流能力比较弱，通常为 1.2-1.5 倍额定电流，如果采用传统阻抗圆整定则需要压缩范围。应用正序阻抗测量方法，结合换流站控制响应时间修正动作延时。

具体的测量操作流程如下：

(1) 数据采集。在新能源场站交流出线端部署同步测量单元(PMU)，实时采集三相电压、电流的正序分量。应用小波分析方法将新能源波动滤除而出现信号噪声，将纯净的正序阻抗特征提取出来。

(2) 换流站控制响应特性建模。对柔性直流换流站的控制策略以分析，对其故障响应延迟时间测试，典

型值为 5-20ms。将换流站响应时间与故障电流幅值、控制模式（定功率/定电压）的映射关系建立起来，动态修正因子生成。如下：

$$\Delta T = f(I_{fault}, V_{dc}, P_{ref})$$

其中， I_{fault} 表示故障电流， V_{dc} 表示直流电压， P_{ref} 表示参考功率，通过历史故障数据对回归模型进行训练，将修正量确定下来。

正序阻抗计算与故障的判定中，应用阻抗计算公式，如下：

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1}$$

其中 V_1 表示正序电压； I_1 表示正序电流。

将实测 Z_1 与预设阈值对比，比如，故障故障阻抗下降幅度达到 30%-50%，结合阻抗角变化情况，就可以判断故障所属类型。

进行动作延时自适应修正，延时动态调整，公式如下：

$$T_{act} = T_{base} + \Delta T$$

其中， T_{base} 表示基础保护延时，通常介于 20-30ms； ΔT 表示换流站响应时间修正量。

如果换流站控制响应延迟 15ms，而 T_{act} 需要延长到 35-45ms，就可以防止出现误动的现象。

2.3 行波法

对送出线路上一端点的三相电压和三相电流信息采集，通过监测即可明确线路中的异常。如果发现送出线路上一端点的一相或者多相电压值降低且已经达到预设的电压阈值，就要继续进行后续的故障检测^[3]。

计算该端点处接收的 α 模故障反行波并详细分析、处理，可获得多个瞬间幅值。通过对瞬间幅值进行分析，基于结果对故障点准确定位。

将经过处理所获得的瞬间幅值比较预设瞬间阈值，当两个瞬间幅值已经超瞬时间阈值，对于两个值出现的时间差详细记录，基于时间差将故障点与该端点处的距离计算出来。时间差计算公式如下：

$$\Delta t = |t_M - t_N|$$

基于计算所获得的结果，即可明确故障点是否处于送出线路上。

假设线路长度为 L ，故障点与 M 端之间的距离是 D_M ，与 N 端之间的距离是 D_N ，满足 $L = D_M + D_N$ 。故

障点定位按照如下公式计算：

$$D_M = \frac{1}{2}(L + v \cdot \Delta t) \text{ 或者 } D_N = \frac{1}{2}(L - v \cdot \Delta t)$$

如果故障点处于送出线路上，即可针对性地采取措施消除故障。

2.4 人工智能

(1) 采集数据信息。电气量监测中，实时采集交流线路的三相电压、电流波形（含暂态过程）。同步记录新能源场站的各项参数，诸如输出功率、逆变器状态、直流母线电压等。结合气象数据，包括风速、光照强度等辅助分析发生故障的原因。

(2) 预处理。采用小波降噪、卡尔曼滤波等技术将电磁干扰消除。对电压幅值以及电流幅值归一化处理，将量纲影响消除。基于历史故障记录或者仿真操作所获得的数据，将故障类型标注出来，诸如短路故障或者断线故障等等，明确其所在具体位置。

(3) 提取故障特征。应用深度学习技术自动提取故障信息，主要应用卷积神经网络和长短期记忆网络^[4]。运行卷积神经网络，可直接从原始波形中学习空间特征，包括脉冲模式以及振荡模式等；运行长短期记忆网络能够捕捉到故障前后时序依赖关系，暂态响应识别精度提升。

(4) 建立人工智能模型。建立故障分类模型和定位模型，结合使用图神经网络进行拓扑结构分析。使用粒子群算法（PSO）对定位搜索路径以优化，提升效率。

(5) 故障识别。部署轻量化 AI 模型至边缘计算设备，响应速度快，可达到毫秒级。

将实时数据流深入，故障概率以及类型分类结果就会自动输出。

(6) 定位优化。融合多端测量数据，应用智能算法即可将故障距离计算出来。结合系统拓扑校核定位结果，确保故障判断准确无误。

3 保护技术

3.1 过电流保护

过电流保护中，进行整定计算时采用电磁暂态仿真工具，比如 PSCAD 或者 RTDS，对各种运行工况下的故障发生过程精准建模，才是对新能源机组的控制逻辑充分考虑，诸如电流限幅、锁相环动态等，所获得的故障电流波形数据真实可靠^[5]。结合稳态短路计算方法，从综合的角度对不同位置、不同类型故障下的最小短路电流水平以评估，基于此设定启动阈值、动作时限以及返回系数，保证保护的灵敏度提高且具有选择性。

3.2 差动保护

此为先进建模基础上结合信号处理技术的新型差动保护方案。这种方法的应用，就是将故障前后电气量的变化量提取出来，即故障分量（ ΔI ），将差动方程建立起来，公式如下：

$$\sum \Delta I = I_{\text{末端}} \Delta I - I_{\text{首端}} \Delta I \approx 0$$

考虑到故障分量仅仅局限于故障发生瞬间产生，不会受到负荷潮流、系统振荡或者运行方式变化的影响，使得保护抗干扰能力提升，动作可靠。

3.3 距离保护

距离保护是通过测量故障回路的电压与电流比值对故障距离估算。然而，新能源密集接入的柔性直流系统中，这种方法就会面临挑战。采用大规模电磁暂态仿真确定各类典型运行方式下的最大助增系数和最小助增系数，据此对距离元件的定值曲线修正。具体而言，就是在 PSCAD 平台中搭建一个模型，其中涵盖风机、光伏、柔直换流器以及控制系统，将风速光照条件、开机组合以及故障类型设置好，对阻抗轨迹变化规律全面扫描。之后，以“局部服从全局”的原则，确保最不利情况下的灵敏度，必要情况下还可将速动性要求放宽^[6]。

3.4 方向保护

柔性直流系统中，换流站具备主动调节无功功率、维持电压稳定的能力，当发生故障的时候，电气量相位会偏移。方向元件设计的时候，与柔直系统的控制逻辑模型深度耦合，保证各种运行状态下都能够将故障前后的相量关系准确还原^[7-8]。

4 结束语

通过研究明确，新能源场站接入柔性直流系统，对交流线路故障准确识别并采取必要的保护技术是维护系统安全可靠运行的关键。当前较为常见的故障包括短路故障、接地故障、断线故障，选择合适的识别方法并采取保护技术措施，以为新能源场站的健康运行提供保障。

参考文献

- [1] 沈菲.柔性直流输电线路故障识别与测距技术分析[J].中国高新科技, 2023(20):12-14.
- [2] 陈臣鹏.基于深度学习的特高压多端混合直流输电线路故障区域诊断[D].昆明理工大学, 2023.
- [3] 余越,王聪博,沙兆义,等.基于矩阵突变特征的风电经柔直送出交流线路保护[J].中国电机工程学报, 2023, 43

- (14): 41-49.
- [4] 戴志辉,刘雪燕,刘自强,等.基于电流故障分量的柔直配电线路纵联保护原理[J].高电压技术,2021 (5) :84-93.
- [5] 李传西,黄金海,田培涛,等.基于 MMC 的多端柔性直流线路超高速保护关键技术研究[J].电测与仪表,2020, 57(2): 57-61,94.
- [6] 刘海金,李斌,温伟杰,等.柔性直流系统的线路保护关键技术与展望[J].电网技术,2021,45(09):3463-3477.D
- [7] 马瑞辰.新能源场站接入柔性直流系统的交流线路故障

识别与保护技术研究[D].北京市:华北电力大学(北京),2023.

- [8] 刘婷.考虑新能源接入的多端柔直系统故障识别与定位方法研究[D].陕西省:西北农林科技大学,2024.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

