

电力技术

柔性直流技术在新能源并网中的谐波抑制与稳定性提升研究

张存朝 马鸿义

中国电建集团青海省电力设计院有限公司

【摘要】为解决新能源高比例并网中柔性直流技术面临的稳定性与谐波问题,本文结合“双碳”目标下新能源并网现状,分析柔性直流系统暂态故障冲击、动态波动耦合及谐波次生隐患三大核心问题,暂态故障致风机脱网、动态波动引发电压振荡、谐波耦合诱发谐振均在列。针对性提出暂态稳定强化、动态稳定优化及谐波-稳定协同提升三类策略,故障快速隔离、出力预测前馈控制、换流器调制优化等可落地方法包含其中。工程应用表明,该研究能缩短故障恢复时间、降低电压波动幅度,为新能源柔性直流并网提供技术支撑。

【关键词】柔性直流技术(VSC-HVDC); 新能源并网; 谐波抑制与稳定性提升

Research on Harmonic Suppression and Stability Improvement of Flexible DC Technology in New Energy Grid Integration by
Zhang Cunzhao Ma Hongyi

China Electric Power Construction Group Qinghai Electric Power Design Institute Co., Ltd.

【Abstract】To address the stability and harmonic issues faced by flexible DC technology in high-proportion new energy grid integration, this paper analyzes three core problems under the "dual carbon" goals: transient fault impact, dynamic fluctuation coupling, and harmonic-induced secondary hazards in flexible DC systems. These include wind turbine disconnection caused by transient faults, voltage oscillations induced by dynamic fluctuations, and resonance triggered by harmonic coupling. Three strategies are proposed: transient stability enhancement, dynamic stability optimization, and harmonic-stability coordinated improvement. Practical methods such as rapid fault isolation, output prediction feedforward control, and converter modulation optimization are also included. Engineering applications demonstrate that this research can shorten fault recovery time, reduce voltage fluctuation amplitude, and provide technical support for new energy flexible DC grid integration.

【Key words】Flexible HVDC (VSC-HVDC); Grid Integration of Renewable Energy; Harmonic Suppression and Stability Enhancement

引言

“双碳”目标推动我国清洁能源装机规模大幅提升,风光发电的间歇性、随机性让传统交流并网难以适配,跨区域外送损耗较高,电压稳定性也不足。柔性直流技术凭有功/无功独立控制、快速响应等优势,成为新能源并网核心方案,却面临暂态故障脱网、动态波动振荡及谐波耦合隐患,部分场站曾因谐波问题引发设备故障,因稳定问题导致装机切除。这些问题制约新能源消纳,开展柔性直流技术在新能源并网中的谐波抑制与稳定性提升研究,对保障电网安全、推动能源转型具重要现实意义。

一、柔性直流技术与新能源并网的背景分析

“双碳”目标驱动下,我国清洁能源装机占比超40%,风光发电量占比逾三成,但高比例并网带来显著挑战。风电日

间波动达额定容量60%~80%,光伏午间峰值使电网调节压力增40%,其间歇性、随机性让传统交流并网难适配。并且跨区域外送损耗高且弱电网环境下电压稳定性不足,分布式接入虽能减小传输损耗、就近补偿功率变化,但大规模接入会增大配电网节点数与规划难度^[1]。柔性直流技术(VSC-HVDC)以电压源换流器为核心,借IGBT与PWM实现有功/无功独立控制,毫秒级响应可平抑新能源波动,海上风电、西北光伏外送等场景优势显著。但并网中,新能源逆变器11次、13次开关谐波与MMC换流器低次谐波交叉传播,曾致长庆油田光伏电站谐波畸变率50%,引发设备损坏与保护误动,系统稳定性不足还可能造成场站脱网、频率波动,故谐波抑制与稳定性提升成柔性直流支撑新能源高比例并网的核心命题。

二、新能源并网中柔性直流技术面临的稳定性问题分析

(一) 暂态稳定性问题

新能源并网中柔性直流系统的暂态稳定性问题,集中爆发在故障冲击场景。光伏阵列发生单相接地短路,故障电流骤增会让柔性直流换流站有功功率 20 至 50 毫秒内下降 30% 至 50%,换流阀过流保护响应延迟超 10 毫秒,易触发闭锁机制;直流线路短路故障时,直流电压 5 毫秒内跌落至额定值 20% 以下,新能源场站低电压穿越能力不足,像风电变流器低电压穿越时长小于 150 毫秒,会引发 30% 以上机组脱网。

(二) 动态稳定性问题

动态稳定性问题源于新能源出力波动与系统控制特性的耦合。风电受阵风影响,功率波动短时变化率达正负 20% 每秒,和柔性直流系统 50 至 100 毫秒控制延迟叠加,会引发电网电压正负 2% 至正负 5% 的周期性振荡;西北弱电网场景下,短路比 1.5 至 2.0 时,光伏出力日内 10% 至 15% 缓慢波动,会让柔性直流换流站无功调节陷入“滞后-超调”循环,导致并网点电压畸变率长期超 3%。

(三) 谐波耦合引发的稳定性次生问题

谐波耦合会加剧柔性直流系统的稳定性隐患。新能源逆变器开关动作产生 11 次、13 次谐波,幅值达额定电流 8% 至 12%,和模块化多电平换流器调制生成的 5 次、7 次谐波在交直流网络交叉传播,使换流站电抗器损耗增加 15% 至 20%,长期运行易引发温升超标,触发过载保护;25 次以上高次谐波还可能与系统电感、电容形成谐振。

三、基于柔性直流技术的新能源并网谐波抑制与稳定性提升方法

(一) 暂态稳定强化策略

1. 故障快速识别与隔离技术应用

在柔性直流换流站部署同步相量测量装置 (PMU),依托其采集换流站交、直流侧的电压与电流信号,再结合换流器的快速开断功能,以此实现故障的电气隔离以及电压阻抗保护^[2]。装置实时采集换流站交流侧和直流侧的电压、电流信号,能把故障识别时间控制在 8 毫秒以内;同时,直流线路两端配置有光纤差动保护系统,一旦检测到短路故障,便会触发换流阀 IGBT 器件的快速关断指令,在 3 毫秒内完成故障线路的隔离,有效防止故障电流扩散至新能源场站。在海上风电场柔性直流并网系统里,运用该技术可将故障切除时间从传统的 50 毫秒大幅缩短至 11 毫秒,显著降低风机脱网的风险。

2. 新能源场站暂态协同控制实施

制定柔性直流系统与新能源场站的暂态支撑协议,在光伏逆变器、风电变流器控制程序内植入暂态支撑模块。柔性直流系统检测到电压跌落,即刻向新能源场站发送有功功率

维持指令,逆变器增大调制比、降低无功功率输出,将低电压穿越时长从 150 毫秒延长至 200 毫秒;换流站配置超级电容储能装置,电压跌落时快速释放有功功率,补偿新能源场站的功率缺额。

3. 直流侧故障柔性保护配置

针对模块化多电平换流器,每个桥臂按 10% 冗余量配置备用子模块 (见图 1)。 ± 800 千伏换流站每个桥臂原有 200 个子模块,额外增加 20 个备用子模块,选用额定电压 2.8kV、电流 2kA 的 IGBT 器件,子模块故障检测单元实时监测子模块电容电压,电容电压偏差超 $\pm 5\%$ 时,触发冗余子模块快速投切指令,借均压控制算法实现功率平衡。直流母线侧安装额定电流 6kA、额定电压 ± 1000 kV 的固态断路器,采用基于 IGBT 的串联拓扑结构,故障时凭固态断路器 2 毫秒分断特性切断故障电流,避免直流电压崩溃。

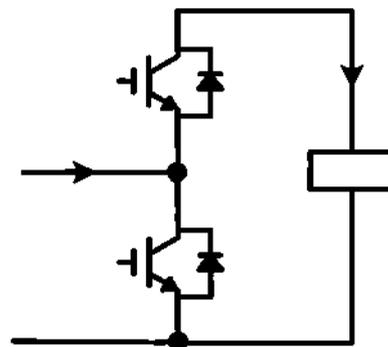


图 1 模块化多电平换流器子模块及冗余配置示意图

(二) 动态稳定优化策略

1. 基于出力预测的前馈控制落地

搭建新能源出力预测平台,整合风电场实时运行、气象及电网负荷数据,采用神经网络模型 Adam 优化器,初始学习率 0.001,迭代 1000 次收敛,经预处理去除噪声与异常值、补充缺失值后,实现 15 分钟至 1 小时短期出力预测,精度超 92%^[3]。为精准计算柔性直流系统的前馈控制指令,引入核心量化公式: $P_0 = P_{re} + \Delta P_{ore} - \Delta P_o$ 。其中, P_0 为柔性直流换流站有功功率调节指令 (单位: MW), P_{re} 为新能源场站 15 分钟后预测出力值 (单位: MW), ΔP_{ore} 为储能装置可补充的有功功率 (单位: MW, 根据储能 SOC 状态动态计算, SOC > 30% 时取额定容量的 80%), ΔP_o 为线路传输损耗 (单位: MW, 按传输功率的 2% 估算)。将该公式嵌入控制程序,控制中心依计算结果提前调整换流站有功功率指令。预测到风电功率 10 分钟内下降 20% 时,经公式计算需预设 15Mvar 无功调节量,抵消功率波动对电压的影响。

2. 弱电网适配控制算法改进

在柔性直流换流站控制策略中引入虚拟阻抗控制模块,实时采集并网点电压、电流信号并同步上传至控制单元,控制单元调用电网等效阻抗计算模型,每 2ms 更新一次短路

比数据；依据预设的“短路比-虚拟阻抗参数映射表”，当短路比在 1.5-3.0 区间变化时，自适应调整虚拟阻抗的电阻与电感分量，短路比 2.0 时虚拟阻抗设为 $0.8\Omega+0.8mH$ ，短路比 1.8 时调整为 $1.0\Omega+0.7mH$ ，确保不同电网强度下系统均具备稳定的功率传输特性。短路比降至 1.5 弱电网临界值时，控制模块自动增大虚拟电阻值，提升系统阻尼特性抑制功率振荡，避免电网支撑能力不足引发的电压波动。将传统固定参数的 PID 控制升级为模糊 PID 控制，构建以电压偏差及偏差变化率为输入的模糊控制器，可结合阻抗重塑原理设计有源阻尼，提升弱电网下系统抗振荡能力^[4]。借预设模糊规则表实时优化比例、积分、微分参数，解决传统 PID 参数适配性局限，把系统动态响应时间从 100 毫秒缩短至 40 毫秒。西北光伏基地弱电网场景应用该优化算法后，电压波形质量得到改善，畸变率从 3.5% 降至 1.8%，完全符合国家电能质量相关标准，保障光伏电力稳定并网输送。

3. 多场站协同稳定控制搭建

构建多新能源场站-柔性直流系统的协同控制网络，采用“中心-子站”分布式控制架构。每个新能源场站设控制子站，集成数据采集与指令执行功能，实时采集场站有功功率、无功功率及并网点电压数据，借 5G 专网与换流站控制中心建双向通信链路，保障通信速率达标且延迟处于较低水平。控制中心部署协同控制服务器，运行模型预测控制算法，每 20 毫秒接收各子站上传的出力数据，构建以“最小化区域电网电压波动”为目标的优化模型。结合各场站功率调节能力设约束条件，为光伏场站、风电场分别匹配合理功率调节范围，求解后向各场站下发差异化功率调节指令，避免多场站波动叠加放大。区域电网应用该网络后，多场站因气象变化同时出现出力波动时，系统稳定裕度提升 30%，电压振荡幅度控制在较小范围，有效保障区域电网供电稳定。

(三) 谐波抑制与稳定性协同提升策略

1. 柔性直流换流器调制策略优化

对模块化多电平换流器的脉冲宽度调制策略做系统性改进，重点采用多目标优化的模型预测控制方法。构建控制目标函数时，科学分配功率跟踪精度与谐波抑制的权重占比，确保二者协同优化；实时采集换流器交流侧电流信号，运用快速傅里叶变换算法计算不同调制信号下的谐波含量，筛选出兼顾功率控制与谐波抑制的最优调制方案，将 5 次、

7 次谐波含量从额定电流的 8% 降至 3% 以下。增加换流器电平数，把子模块数量从 200 个提升至 250 个，利用多电平叠加效应进一步削弱高次谐波幅值。

2. 谐波-稳定协同控制体系构建

为实现谐波抑制与系统稳定的协同管控，专项开发谐波-稳定协同控制平台，硬件采用工业级控制主机与高精度数据采集模块，软件核心植入双目标优化算法。粒子群优化算法以“ $THD < 2\%$ 、 $\Delta U < \pm 2\%$ ”为双目标，粒子维度 3 (D、K、C)，种群规模 50、迭代 100 次；惯性权重 0.9 线性降至 0.4，学习因子 $c_1=c_2=2$ ，通过适应度函数 $F = 0.6 \times THD + 0.4 \times |\Delta U|$ 筛选最优粒子，最终收敛至 $D=0.35$ 、 $K=1.2$ 、 $C=80\%$ ，此时 $THD=1.7\%$ 、 $\Delta U = \pm 1.3\%$ ，满足优化要求。基于历史运行数据与故障案例，建立谐波与稳定性关联模型，平台检测到谐波含量超预设阈值时，自动触发稳定控制参数调整机制，修正阻尼系数与调节增益，避免谐波诱发系统振荡。该平台在工业园区新能源并网系统应用后，有效降低谐波对稳定的影响，保障园区新能源的可靠消纳。

3. 动态滤波与稳定监测联动实施

在柔性直流换流站交流侧配置协同式有源滤波器，其控制单元与换流站稳定监测系统实时交互数据，采用穿芯式传感器非接触隔离采样、高阻态采样技术，不改变原电路状态，保障数据采集稳定与原系统安全。稳定监测系统分析电压电流信号，判断系统稳定状态，接近稳定边界时，向有源滤波器发送增强滤波指令，增大高次谐波补偿量；滤波器中植入自适应滤波算法，依谐波频率变化动态调整滤波参数，实现 20-50 次谐波补偿。

结语

本文围绕柔性直流技术支撑新能源并网的核心痛点，系统分析暂态、动态及谐波耦合三类稳定性问题，提出针对性解决策略，借工程案例验证效果。暂态强化策略可缩短故障处理时间，动态优化策略能平抑出力波动，协同提升策略兼顾谐波抑制与稳定控制，降低风机脱网率、电压波动及设备损耗。后续可探索 AI 算法在控制策略中的深度应用，优化多场景适配性，为更高比例新能源并网提供更高效技术方案，助力新型电力系统构建。

参考文献

- [1] 李海明, 姜超, 闫宇, 等. 分布式新能源大规模接入对配电网影响及应对[J]. 农村电工, 2022, 30 (02): 28-29.
- [2] 孙佳怡. 基于新能源并网的柔性直流输电控制技术[J]. 电子技术与软件工程, 2022, (19): 130-133.
- [3] 蔡旭, 郭子腾, 宗皓翔, 等. 新能源发电并网装备技术发展综述[J]. 高电压技术, 2025, 51 (08): 3972-3991.
- [4] 唐晓磊, 张海瀛, 刘天骄, 等. 可持续发展战略下风电新能源发展与并网技术[J]. 中国信息界, 2025, (08): 26-28.