

电力系统自动化中柔性直流输电与交流电网的交互影响及协调控制

韩俊

河南中原能建工程有限公司，河南省鹤壁市，458030；

摘要：随着电力行业的快速发展和新能源的大规模接入，电力系统面临着前所未有的挑战。柔性直流输电技术作为一种先进的输电方式，在电力系统自动化中扮演着越来越重要的角色。本文旨在探讨柔性直流输电与交流电网之间的交互影响，并提出相应的协调控制策略。

关键词：电力系统自动化；柔性直流输电；交流电网的交互影响；协调控制

DOI：10.69979/3060-8767.25.10.006

引言

随着全球能源结构的转型和电力市场的逐步开放，电力系统正经历着深刻的变革。柔性直流输电技术，以其灵活的控制特性、高效的能量传输以及对可再生能源的良好适应性，成为了解决电力系统诸多问题的关键技术之一。在电力系统自动化背景下，柔性直流输电与交流电网的交互作用日益复杂，如何理解并优化这一交互过程，确保电力系统的稳定运行，是当前研究的热点和难点。

1 电力系统自动化中柔性直流输电与交流电网的交互影响及协调控制

1.1 柔性直流输电技术概述

1.1.1 柔性直流输电的基本原理

柔性直流输电（VSC-HVDC）基于电压源换流器（VSC）实现交流电与直流电的转换，核心是通过全控型电力电子器件（如 IGBT）的高频开关动作，调控换流器输出电压的幅值与相位，实现功率的灵活传输。其基本工作流程分为整流与逆变两个阶段：整流侧换流器将交流电网的交流电转换为直流电，通过直流输电线路传输至逆变侧；逆变侧换流器再将直流电转换为与受端交流电网同步的交流电，注入受端系统。与传统直流输电相比，柔性直流输电无需交流侧提供换相电压，可独立控制有功功率与无功功率，通过锁相环（PLL）实现与交流电网的同步运行，同时利用直流侧电容维持直流电压稳定，通过脉冲宽度调制（PWM）技术输出接近正弦波的交流电压，降低谐波污染。此外，柔性直流输电可实现多端联网运行，构建复杂的直流输电网络，提升电力系统的供电可靠性与灵活性。

1.1.2 柔性直流输电的主要技术特点

柔性直流输电凭借电力电子器件的全控特性，展现出与传统直流输电截然不同的技术优势，同时也存在一定局限性。其核心特点包括功率控制的独立性与灵活性，可通过调控换流器的有功电流与无功电流分量，实现有功功率与无功功率的解耦控制，既能输送有功功率，又能向交流电网提供动态无功支撑，改善电网电压质量。无换相失败风险是另一显著优势，由于采用全控器件换相，无需依赖交流侧电压，即使交流电网发生故障导致电压跌落，仍能维持换流器稳定运行，提高系统故障穿越能力。谐波含量低，PWM 调制技术使换流器输出电压波形接近正弦波，无需复杂的滤波装置即可满足谐波标准。此外，柔性直流输电的启停控制便捷，可实现无冲击并网，适应新能源机组的间歇性并网需求；支持多端直流系统构建，能连接多个交流电网或新能源场站，优化能源资源配置。但该技术也存在换流器损耗较高（全控器件开关损耗大）、直流侧故障处理难度大（IGBT 无法承受反向电压，需专用故障清除装置）、成本较高（全控器件与控制系统复杂）等局限性。

1.1.3 柔性直流输电与交流电网的交互作用

柔性直流输电与交流电网的交互作用体现在能量交换、动态响应与稳定控制三个层面，两者相互影响、相互制约。能量交换层面，柔性直流输电作为连接送端与受端交流电网的纽带，实现有功功率的定向传输，同时通过无功功率调节参与交流电网的电压控制，当交流电网电压波动时，柔性直流换流器可快速输出或吸收无功功率，支撑电压稳定；反之，交流电网的电压与频率变化也会影响换流器的功率传输能力，如交流电压跌落会导致换流器输出功率降低。动态响应层面，柔性直流换流器的快速响应特性（响应时间通常为毫秒级）会改变交流电网的动态特性，例如在交流电网发生扰动时，

换流器的快速功率调节可抑制电压与频率波动，但也可能因响应过快与交流电网产生动态交互，引发振荡风险。稳定控制层面，柔性直流输电的控制策略与交流电网的稳定控制措施需协同配合，如交流电网的继电保护动作可能导致柔性直流输电的功率骤变，而柔性直流的故障穿越策略也会影响交流电网的故障切除过程，两者的控制协调直接决定系统整体稳定性。

2 柔性直流输电与交流电网的交互影响分析

2.1 交互影响的理论模型

构建柔性直流输电与交流电网交互影响的理论模型，是量化分析两者相互作用的基础，需涵盖换流器模型、交流电网模型及接口模型的耦合。换流器数学模型基于开关函数理论与 Park 变换，将三相换流器等效为 $d-q$ 旋转坐标系下的线性模型，描述换流器输入输出电压、电流与功率之间的关系，同时纳入 PLL 模型、PWM 调制模型与直流电容模型，反映换流器的动态响应特性。交流电网模型采用节点电压法或潮流计算模型，将交流电网等效为含同步发电机、负荷、线路阻抗的网络模型，同步发电机采用二阶或三阶动态模型，考虑励磁系统与调速系统的影响；负荷模型采用恒功率、恒电流或恒阻抗模型，或更复杂的动态负荷模型，反映负荷的电压与频率特性。接口耦合模型是关键，通过换流器交流侧母线将换流器模型与交流电网模型连接，定义接口处的电压、电流、功率等交互变量，建立两者的动态耦合方程，同时考虑换流器控制策略与交流电网控制措施的相互作用，形成完整的交互影响理论模型。该模型可通过状态空间法表示，用于分析系统的稳定性与动态响应。

2.2 交互影响的关键参数与因素

柔性直流输电与交流电网的交互影响由一系列关键参数与因素决定，这些参数与因素的变化直接改变交互作用的强度与方向。换流器侧关键参数包括控制模式（定有功功率/定直流电压、定无功功率/定交流电压），不同控制模式下换流器对交流电网的响应特性差异显著，例如定交流电压控制模式下的无功支撑能力强于定无功功率模式；控制参数（如 PI 调节器的比例系数、积分时间、PLL 的带宽）影响换流器的响应速度与稳定性，参数整定不当易引发交互振荡；额定容量与电流限制决定换流器的最大功率传输与无功调节能力，限制值过低会削弱对交流电网的支撑作用。交流电网侧关键参数包括系统惯量，惯量过低时，换流器的快速功率变化易引发频率波动；短路比（SCR）反映交流电网的强弱，弱电网（低 SCR）下换流器与电网的交互作用更强，易

出现稳定性问题；同步发电机励磁与调速参数影响交流电网的电压与频率调节能力，与换流器控制参数需匹配协调。此外，传输功率水平、故障类型与位置也是重要影响因素，大功率传输与近换流器故障会加剧交互影响的强度。

2.3 交互影响的仿真分析与实验验证

仿真分析与实验验证是验证交互影响理论模型、量化分析影响程度的重要手段。仿真分析主要基于电力系统仿真软件（如 PSCAD/EMTDC、BPA、PSASP），构建柔性直流与交流电网的详细仿真模型，模拟不同工况下的交互过程：稳态仿真用于分析正常运行时换流器对交流电网电压、功率分布的影响；动态仿真用于研究负荷波动、新能源出力变化时的系统动态响应；暂态仿真用于模拟短路、换流器故障等暂态过程，分析交互影响对系统暂态稳定的作用。通过仿真可获取电压、电流、功率、频率等参数的变化曲线，量化评估不同关键参数对交互影响的敏感性。实验验证则通过硬件在环（HIL）实验平台或小型物理实验系统实现：HIL 实验将换流器控制器硬件与仿真模型连接，真实模拟控制器与虚拟电网的交互，验证控制策略的有效性；物理实验系统采用小型 VSC 换流器与模拟交流电网（含同步发电机、负荷），重现交互影响现象，验证仿真结果的准确性。仿真与实验的结合，可全面揭示柔性直流与交流电网的交互机制，为协调控制策略设计提供依据。

3 协调控制策略研究

3.1 柔性直流输电控制策略

柔性直流输电控制策略的优化需聚焦与交流电网的协同适配，提升系统整体稳定性与运行性能。控制模式自适应切换策略是核心，根据交流电网运行状态（如强弱程度、故障情况）自动调整换流器控制模式：在强电网中采用定有功功率-定无功功率控制，保证功率传输精度；在弱电网中切换至定有功功率-定交流电压控制，增强电压支撑；在交流电网频率波动时，临时切换至虚拟惯量控制，提供频率支撑。控制参数自整定优化通过自适应控制算法（如模糊控制、神经网络），根据交流电网短路比、传输功率等运行参数的变化，实时调整 PI 调节器与 PLL 参数，避免参数失配引发的振荡问题。故障穿越控制策略优化方面，在交流电网故障时，换流器通过限制最大电流、利用直流侧储能（如超级电容）维持直流电压稳定，同时优先保证无功功率输出，支撑电网电压恢复；故障清除后，采用平滑功率恢复策略，避免功率突变对交流电网造成二次冲击。此外，多

端柔性直流系统需采用功率协调分配控制,根据各换流站的容量与交流电网需求,优化有功功率分配,实现系统整体运行最优。

3.2 交流电网稳定控制策略

交流电网稳定控制策略的优化需考虑柔性直流的存在,实现两者的协同稳定。同步发电机励磁与调速系统协调优化是关键,通过调整励磁系统的 PID 参数,提升同步发电机的动态无功响应速度,与柔性直流的无功调节形成互补,避免无功调节冲突;优化调速系统的死区与调节速率,使其与柔性直流的虚拟惯量控制协同配合,共同平抑频率波动。柔性负荷控制策略通过引导可调节负荷(如工业负荷、电动汽车充电桩)的功率变化,配合柔性直流的功率传输,平抑交流电网的负荷波动:当柔性直流传输功率过剩时,增加柔性负荷用电;当功率不足时,削减柔性负荷,减轻交流电网的平衡压力。继电保护与安全自动装置协调方面,调整交流电网继电保护的動作时限与定值,避免因保护误动导致柔性直流功率骤变;配置专门的稳定控制装置,在系统发生严重扰动时,协调切除部分负荷或机组,配合柔性直流的功率调节,防止系统失稳。此外,通过优化交流电网的网络结构,提升短路比,可降低对柔性直流控制策略的依赖,增强系统鲁棒性。

3.3 柔性直流与交流电网的协同控制策略

柔性直流与交流电网的协同控制策略旨在打破两者独立控制的局限,实现全局优化。基于信息共享的协同决策机制是基础,通过电力系统广域测量系统(WAMS)或高速通信网络,实现柔性直流换流器与交流电网控制中心、同步发电机、无功补偿设备之间的实时信息交互,共享电压、频率、功率等关键运行参数,为协同决策提供数据支撑。多目标优化协同控制通过建立以电压稳定裕度最大、频率波动最小、功率损耗最低为目标的优化模型,采用智能优化算法(如粒子群优化、遗传算法)求解最优控制指令,协调柔性直流的功率调节、同步发电机的励磁与调速、无功补偿设备的投切,实现多控制手段的协同动作。例如,当交流电网电压跌落时,协同控制指令同时触发柔性直流增加无功输出、同步发电机强励磁、SVC 投入,快速恢复电压稳定。分层协同控制架构将控制分为本地层、区域层与全局层:本地层负责换流器与邻近设备的快速控制;区域层协调区域内柔性直流与交流电网的控制;全局层实现跨区域的整体优化,确保不同层级控制的协调一致,提升系统应对复杂扰动

的能力。

3.4 基于广域测量的协调控制实现

基于广域测量系统(WAMS)的协调控制,通过实时获取全系统运行数据,实现柔性直流与交流电网的精准协同控制。广域状态监测与评估是前提,WAMS 通过同步相量测量单元(PMU)采集各节点的电压相量、电流相量与频率数据,利用数据处理与分析技术评估系统的稳定性状态(如电压稳定裕度、功角稳定裕度),识别潜在的不稳定风险。广域控制指令生成与下发通过控制中心的决策系统,根据广域状态评估结果,生成针对柔性直流换流器、同步发电机、无功补偿设备的协调控制指令,通过高速通信网络(如光纤通信)下发至各控制终端,确保指令传输延迟控制在数十毫秒以内。闭环反馈控制机制将控制后的系统状态数据通过 PMU 反馈至控制中心,动态调整控制指令,实现“监测-评估-决策-控制-反馈”的闭环优化。此外,为应对通信延迟与数据丢包问题,需采用预测控制与鲁棒控制技术,基于历史数据预测系统未来状态,提前生成控制指令,同时增强控制策略对数据传输异常的容错能力,确保广域协调控制的可靠性与有效性。

4 结语

综上所述,柔性直流输电与交流电网的交互影响及协调控制是电力系统自动化领域的重要课题。柔性直流输电以其独特的优势,在电网中发挥着日益重要的作用,但其与交流电网的交互作用也带来了诸多挑战。通过深入分析交互影响的理论模型、关键参数与因素,以及仿真分析与实验验证,我们得以全面理解两者之间的相互作用机制。在此基础上,提出的协调控制策略,旨在优化柔性直流输电的控制性能,同时提升交流电网的稳定性,实现两者的协同运行。

参考文献

- [1]任敬国,李可军,张春辉,等.基于直流电压-有功功率特性的 VSC-MTDC 协调控制策略[J].电力系统自动化,2025,39(11):8-15.
- [2]季一润,袁志昌,赵剑锋,等.一种适用于柔性直流配电网的电压控制策略[J].中国电机工程学报,2023,36(2):335-341.
- [3]罗永捷,李耀华,王平,等.多端柔性直流输电系统直流电压自适应下垂控制策略研究[J].中国电机工程学报,2022,35(10):1-11.