

高压直流输电系统稳定性及控制策略研究

谭丽 谭玲 谭勇

重庆志杰实业有限公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i6.6896

[摘要] 随着可再生能源在全球能源结构中的比重不断增加,高压直流输电(HVDC)技术因其远距离和海底传输的优势而越来越受到重视,HVDC系统的稳定性对电力系统的安全和可靠运行至关重要,通过对HVDC系统稳定性问题的深入分析探索了有效的控制策略,旨在提高系统的稳定性和调控能力,通过对现有研究成果的总结和新的研究发现提出了一系列稳定性增强措施和控制策略,对HVDC系统的稳定性提供了新的解决方案。

[关键词] 高压直流输电系统; 稳定性; 控制策略; 可再生能源

Study on the stability and control strategy of HVDC transmission system

Tan Li, Tan Ling, Tan Yong

Chongqing Zhijie Industrial Co., Ltd

[Abstract] With the increasing proportion of renewable energy in the global energy structure, HVDC transmission (HVDC) technology because of its distance and submarine transmission advantages and more attention, the stability of HVDC system is crucial to the safe and reliable operation of power system, through the in-depth analysis of HVDC system stability explored the effective control strategy, aims to improve the stability of the system and regulation ability, through the summary of the existing research results and new research findings put forward a series of stability enhancement measures and control strategy, the stability of HVDC system provides a new solution.

[Key words] HVDC transmission system; stability; control strategy; renewable energy

引言:

高压直流输电技术在全球电力系统中发挥着越来越重要的作用,尤其是在跨区域电力传输和海底电缆输电中,随着输电距离的增加和输电规模的扩大,HVDC系统的稳定性问题日益突出,因此研究HVDC系统的稳定性及其控制策略,对确保电力系统的稳定运行和提高能源利用效率具有重要意义。

一、HVDC系统稳定性概述

(一) HVDC系统稳定性的重要性

在电力系统中高压直流输电(HVDC)技术因其高效的长距离电能传输能力而显得尤为重要,HVDC系统的稳定性是保障电力系统可靠性和安全性的基石,不稳定的HVDC系统可能在电力需求高峰期或面对自然灾害时导致电力供应中断,甚至引发跨区域的大规模停电造成经济损失和社会不安,因此确保HVDC系统在各种操作条件下的稳定运行,是电力工程设计和管理的核心任务之一,对于跨国或跨海的电力交易,稳定性确保了电力市场的稳定供应和经济效益的最大化。

(二) 稳定性影响因素分析

HVDC系统的稳定性受多个因素的影响,这些因素包括但不限于系统的设计配置、运行条件、控制策略和外部环境等,例如系统配置中的换流站布局、线路长度、以及转换器的技术参数等都会对稳定性产生影响,运行条件如负荷变化、电力市场需求波动也是关键影响因素,控制策略的设计和执行效果直接

关系到系统对内部和外部扰动的响应能力。在外部环境方面极端天气事件如风暴、寒潮等自然灾害可能对输电线路造成损害,影响系统稳定性,对这些影响因素的深入分析有助于识别潜在的稳定性风险,为制定有效的预防和应对措施提供科学依据,通过对HVDC系统稳定性的重要性及其影响因素的分析,可以看出确保系统稳定性是电力供应安全的关键,因此对稳定性影响因素的深入理解和有效控制策略的制定与实施,对于提高系统的可靠性和安全性具有重要意义,这不仅需要技术上的创新和优化还需要对电力市场运作、环境变化等宏观因素的深入考量,以实现HVDC系统的高效、稳定和可持续运行。

二、HVDC系统的动态稳定性问题

(一) 动态稳定性的挑战

动态稳定性是高压直流输电系统面临的一大挑战,尤其是在系统遭受突发性扰动时如电缆故障、供需突变等情况,这类扰动可能导致电压和功率的瞬时波动,若控制系统不能迅速有效地响应可能会引起系统的不稳定,严重时甚至导致跨区域的连锁反应,影响电力系统的整体稳定性。因此HVDC系统的控制策略必须具备高度的灵活性和快速的反应能力,以确保在遭遇突发事件时能迅速采取措施,恢复系统稳定,动态稳定性问题的复杂性在于其受多方面因素的影响,包括系统设计、操作模式、控制策略等,随着电力系统对可再生能源的依赖程度不断增加,可再生能源的高度间歇性和不可预测性进一步加剧了

HVDC 系统动态稳定性的挑战，因此开发有效的动态稳定性分析和控制方法，对于确保电力系统的稳定和可靠运行具有重要意义。

(二) 动态稳定性改进措施

为了提高 HVDC 系统的动态稳定性必须采取一系列综合措施，优化控制策略是核心，包括采用高效的控制算法如模型预测控制 (MPC)、自适应控制等，这些算法可以根据系统的实时运行状态调整控制参数，提高系统对扰动的响应速度和精度增强系统韧性，通过提升系统的自愈能力和容错能力减少外部扰动对系统稳定性的影响，这可能涉及到系统设计的优化，如增加备用通道、提高关键组件的可靠性等。提高系统响应速度也是提升动态稳定性的关键，这可以通过改进系统的监测和诊断技术，实现对系统状态的实时监控和快速诊断，通过实时数据分析和边缘计算技术可以实现对扰动的快速识别和处理，缩短系统的响应时间，同时加强与其他电力系统元素的协调，如灵活运用储能设施和需求侧管理，也能有效提高系统对动态扰动的适应能力和整体稳定性，提升 HVDC 系统的动态稳定性需要从控制策略、系统设计、技术创新等多个方面综合考虑，通过持续的技术进步和创新以及系统运维策略的优化，可以有效提升 HVDC 系统在面对复杂扰动时的稳定性和可靠性，保障电力系统的安全稳定运行。

三、稳态稳定性控制策略

(一) 稳态稳定性的定义

在高压直流输电系统中稳态稳定性是描述系统在长期运行过程中维持其输出参数 (如电压、功率等) 在正常范围内波动的能力，稳态稳定性直接影响到整个电力系统的运行效率和可靠性，如果 HVDC 系统不能在预定的稳定范围内运行，可能

会引起系统效率的显著下降，严重时甚至会影响到整个电网的稳定运行，如导致频率波动、功率分布不均等问题，因此保障 HVDC 系统的稳态稳定性是实现电力系统高效、可靠运行的基础。

(二) 稳态稳定性优化策略

为了提升 HVDC 系统的稳态稳定性需采取一系列综合性措施，这些措施包括但不限于调整控制参数、优化系统设计、以及采用先进的控制算法，调整控制参数是提升稳态稳定性的直接方法，通过细化调整系统控制策略中的关键参数，如调节转换器的控制模式、优化电力调度策略等，可以有效地提高系统对稳定运行的适应性和灵活性。优化系统设计对于提高稳态稳定性同样重要，这包括对 HVDC 输电线路的布局进行优化以减少输电损耗和提高输电效率；合理配置转换站和相关设备以增强系统的容错能力和可靠性；加强系统的冗余设计，通过设置备用系统和紧急响应机制以应对可能的系统故障。

采用先进的控制算法是提升稳态稳定性的关键技术途径，随着计算技术的发展一些基于人工智能和机器学习的控制算法逐渐被引入 HVDC 系统的稳定性控制中，这些算法能够基于大量的历史数据和实时信息，自动优化控制策略，提高系统对各种运行状况的适应性和响应速度，例如模型预测控制 (MPC) 算法可以根据预测的电网负荷和电力供需情况，动态调整输电功率，以优化系统运行状态，保障稳态稳定性。通过调整控制参数、优化系统设计以及采用先进的控制算法等措施可以有效提升 HVDC 系统的稳态稳定性，从而保障电力系统的高效和可靠运行，这不仅需要技术上的创新还需要综合考虑电力系统运行的复杂性和动态性，以实现更优的稳定性控制效果。

表 1 高压直流输电系统稳定性及控制策略研究总结

研究领域	关键问题	解决措施	期望效果
动态稳定性问题	系统遭遇突发性扰动 (如电缆故障、供需突变) 时的不稳定性问题	采用高效控制算法 (如模型预测控制、自适应控制) 调整控制参数	提高系统对扰动的响应速度和精度，恢复系统稳定
稳态稳定性优化	长期运行过程中输出参数的稳定性问题	优化系统设计，采用先进控制算法 (如基于人工智能的算法)	维持系统输出参数在正常范围内波动，提高运行效率和可靠性
控制系统设计	需要实时监测和应对电网负荷波动及外部环境变化	利用高度灵活和快速响应的控制策略，预留足够的可扩展性和兼容性	保持系统的稳定运行，确保输电效率和安全性
先进控制策略应用	提升系统稳定性和运行效率的需求	应用模型预测控制 (MPC)、自适应控制和人工智能技术	增强系统的自适应能力和响应速度，提高操作效率
面向可再生能源的系统优化	可再生能源的间歇性和不确定性对系统稳定性的影响	开发适应可再生能源波动的高效、智能控制策略和系统设计优化	整合可再生能源，保障电力供应的稳定性

四、HVDC 系统控制策略研究

(一) 控制系统设计的重要性

控制系统的设计和实施在确保高压直流输电 (HVDC) 系统稳定运行中的作用不可小觑，精确和高效的控制策略是实现这一目标的关键，它不仅需要实时监测和应对电网负荷的波动及外部环境的变化，还要能够在极端或非正常操作条件下保持系统的稳定性，这要求控制系统具备高度的灵活性和快速的响应

能力，能够在短时间内识别和适应电网状态的变化，确保输电效率和安全性。在设计控制系统时除了要考虑系统本身的特性和运行需求外，还需深入理解其与电网其他部分的相互作用，这种全面的视角有助于优化控制策略，使之能够在不同的电网运行情况下，如负荷突增、能源供给波动等，保持 HVDC 系统的高效稳定输出，考虑到电力系统的不断发展和技术进步，控制系统的设计还必须预留足够的可扩展性和兼容性以适应未

来技术的整合，这不仅意味着要采用标准化的通讯协议和模块化的设计理念还要考虑到新兴技术，如人工智能和大数据分析在 HVDC 控制系统中的应用潜力。

高质量的控制系统设计是实现 HVDC 系统长期稳定运行的基石，它直接关系到电力系统的整体可靠性和效率，通过采用先进的控制理论和技术，结合系统工程的方法和思维，可以确保控制系统在面对电网负荷波动和外部环境变化时的高效应对能力，同时随着电力系统向更加智能化、自动化的方向发展，控制系统的设计和优化将持续成为 HVDC 系统稳定性研究和应用中的一个重要领域，对推动电力行业的技术进步和可持续发展具有深远的影响。

(二) 先进控制策略的应用

随着计算技术和自动控制理论的不断进步，一系列先进控制策略被提出并应用于 HVDC 系统中，以提升其稳定性和运行效率，其中模型预测控制 (MPC) 和自适应控制算法因其出色的预测能力和自适应性，成为提升系统稳定性的重要工具。模型预测控制 (MPC) 通过建立系统的数学模型，预测未来一段时间内的系统运行状态，根据预测结果实时调整控制策略以最优优化系统性能。这种方法能够有效应对电网负荷变化和外部扰动，保证系统的稳定运行，MPC 特别适用于处理多变量、多约束的控制问题，使其在 HVDC 系统控制中显示出强大的潜力，

自适应控制算法能够根据系统运行中的实时数据调整控制参数，以适应系统特性的变化或外部环境的影响，这种控制策略对于应对系统模型不确定性和外部扰动具有显著的优势，能够提高系统的鲁棒性和可靠性。

人工智能技术如深度学习和强化学习也开始被应用于 HVDC 系统的控制策略中，这些技术能够处理大量的数据，学习系统的动态行为，自动生成优化的控制策略，进一步提高系统的自适应能力和响应速度，先进的控制策略的应用极大地提升了 HVDC 系统的稳定性和效率，未来随着技术的不断发展和新算法的出现，HVDC 系统的控制策略将更加智能化、高效化，为电力系统的稳定和可持续发展提供坚实的技术支持。

五、未来发展方向

(一) 技术创新与系统集成

随着全球对于能源效率和可持续发展的需求不断增长，高压直流输电系统 (HVDC) 的稳定性和控制策略成为了电力系统研究的热点，电力电子技术和自动控制技术的进步，尤其是功率半导体技术的创新，正在开辟 HVDC 系统设计和应用的新篇章，宽带隙半导体材料，如碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN)，因其能够在更高电压和温度下运行，同时具有更高的效率和更快的开关速度，为 HVDC 系统的能效提升和成本降低提供了可能。这些材料的应用加上功率电子设备的集成化和模块化设计，不仅使得 HVDC 系统更加可靠和高效，也显著提升了系统的经济性和部署灵活性，在控制技术方面随着人工智能和机器学习的快速发展，基于这些技术的自适应控制策略正变得日益重要，这些先进的控制算法能够根据实时数据和历史经验自动调整控制策略，以最佳方式响应电网的动态变化和潜在扰动，这种智能化控制不仅提高了 HVDC 系统的操作效率和稳定性还增强了系统对未知变化的适应能力，保证了电力供应的连续性和可靠性。

信息通信技术 (ICT) 的进步为 HVDC 系统与电网其他部分的高效协同提供了强大的技术支持，通过高速、可靠的通信网络 HVDC 系统能够实时接收电网状态信息，与电网的其他组成部分进行实时交互，实现资源的优化配置和电力的高效管理，这种系统级的集成不仅提升了电力系统的运行效率还有助于提高电网的整体稳定性和抗风险能力。电力电子技术和自动控制技术的发展，特别是功率半导体技术的创新和基于人工智能的控制策略的应用，预示着 HVDC 系统稳定性和控制策略研究的新发展阶段，这些技术的进步不仅将提升 HVDC 系统的性能和可靠性，还将促进电力系统的整体优化和智能化管理，为实现更加高效、可持续的电力系统运行奠定坚实的基础。

(二) 面向可再生能源的系统优化

面对全球能源结构转型和气候变化的双重挑战，未来 HVDC 系统的稳定性研究将更加重视与可再生能源的融合问题，可再生能源如风能和太阳能，其产能具有明显的间歇性和不确定性，这对电力系统的稳定性和可靠性提出了新的要求，未来的 HVDC 系统需要具备更强的适应能力和灵活性，以有效地整合可再生能源，保障电力供应的稳定性，为此需要开发更为高效和智能的控制策略，优化 HVDC 系统的设计和运行，以适应可再生能源的波动性。这包括利用大数据和人工智能技术进行精准的能源预测，优化电力调度和输电策略，减少可再生能源的弃电量，同时通过增强 HVDC 系统与储能设备的集成，可以进一步提升系统对可再生能源波动的调节能力，增强电力系统的稳定性和供电可靠性，技术创新和系统集成将推动 HVDC 系统稳定性和控制策略的发展，而面向可再生能源的系统优化将成为未来研究的重要方向，通过不断的技术进步和创新未来的 HVDC 系统将能够更加高效、智能地支撑全球电力系统的可持续发展。

结束语：

本文对高压直流输电系统稳定性及控制策略进行了深入研究，提出了一系列针对性的解决方案和改进措施，随着电力系统的不断发展和技术的不断进步，HVDC 系统的稳定性问题将得到有效解决，为全球电力系统的可靠性和效率提供强有力的支持，未来随着新技术的应用和可再生能源的广泛集成，HVDC 系统的稳定性和控制策略将面临新的挑战 and 机遇，需要持续的研究和探索。

[参考文献]

- [1] 辛业春, 张嘉新, 江守其等. 提升特高压直流系统送端频率稳定性的协调控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5089-5097.
- [2] 杨书颖. 含串补的高压直流输电系统稳定性及振荡抑制策略研究[D]. 重庆大学, 2022.
- [3] 黎炳坤. 多端混合高压直流输电系统控制参数与控制策略研究[D]. 华南理工大学, 2021.
- [4] 钱子伟. 高压直流输电系统换相失败下送端风电场暂态电压控制策略研究[D]. 南京师范大学, 2021.
- [5] 常怡然, 吴方劫, 何师等. 应用在高压直流输电系统中的混合型有源滤波器稳定性分析及控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(02): 75-82.