

高压直流输电系统换相失败机理及预防控制方法

乔彦彤

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司柳州局 广西柳州 545000

摘要: 高压直流 (HVDC) 输电系统是现代电力系统中的一个重要部分, 其输电容量大, 损耗小, 控制灵活, 对长距离输电以及大规模电力联网起到了至关重要的作用。但由于 HVDC 系统的规模越来越大、复杂性越来越高, 稳定性、可靠性等问题日益突出。在 HVDC 系统中, 换相失败 (Commutation Failure) 是一种频繁出现且极为严重的故障形式, 它有可能引发系统电压的波动、功率的中断, 甚至可能导致设备的损坏。因此深入研究换相失败机理, 提出有效防治措施, 对于确保 HVDC 系统安全运行至关重要, 文章就此展开了探讨。

关键词: 高压直流输电系统; 换相失败; 预防控制

引言

换相失败是指 HVDC 系统工作时由于交流电压的暂降和相位偏移等扰动因素的影响, 使换流阀不能正常地完成换相工作, 造成直流电流的临时中断或者逆流的现象。换相失败不但影响 HVDC 的稳定, 而且有可能引起连锁反应而影响到整个电力系统正常工作。特别是大功率, 高电压等级 HVDC 系统换相失败风险愈加凸显, 急需采取有效预防控制策略。

一、高压直流输电系统概述

高压直流输电系统 (HVDC) 采用直流电的方式进行电力传输, 这种技术在长途、大容量的电力传输以及异步电网的连接中都有广泛的应用。它的核心组件由换流站, 直流输电线路和换相设备等组成。换流站内交流电经整流器转换成直流电, 直流电经逆变器又转换成交流电从而达到电能的输送与接受。换相是换流器在运行过程中将电流从一个阀组转移至另一个阀组的关键操作, 这一过程依赖于交流电网电压的零点和换流器内部的阀电压差。换相失败一般出现在逆变器上, 可能造成直流系统不能正常换相而引发电网严重不稳定。该过程涉及多种参数的综合作用, 如换流器的短路比 (Short Circuit Ratio, SCR)、直流电压、电流波形、系统阻抗以及触发角等。当短路比小于 2.0 时, 系统易出现换相失败现象, 该现象会明显降低系统稳定性以及换流器性能。HVDC 系统在运行过程中需要精准控制与优化上述参数, 避免因换相失败而造成系统扰动及可能造成经济损失。由于高压直流输电系统具备高效、稳定以及在多变环境中的

适应能力, 它逐步崭露头角, 成为现代电力网络中不可或缺的一部分。

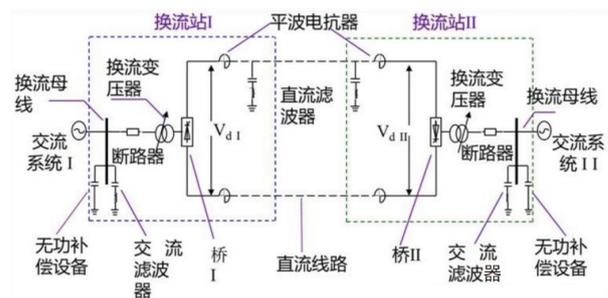


图1 高压直流输电系统示意图

二、换相失败的机理分析

在高压直流输电系统中, 换相失败被视为一种频繁且严重的故障, 它主要在逆变器端出现。正常换相时, 电流依次经过阀组换相后, 电压由一相位逐步向下一相位传递。但出现换相失败后逆变器不能完成期望电流换流造成旧阀组电流持续流动和新阀组不能顺利连接。这一现象一般体现在逆变器直流电压骤降、交流侧电压失真、电流剧烈波动等方面, 继而诱发系统失稳。

换相失败机理和很多因素有密切关系, 主要表现为系统电压过低或者电压波动超过换流器运行范围。在交流系统电压过低, 不能提供足够反向电压来完成换相后, 电流不能平稳地由一阀组传递至另一阀组而造成换相故障。此外, 换流器的触发角和导通角的控制不当、交流系统的短路比 (SCR) 偏低、系统阻抗的变化以及外部扰动 (如雷击或短路故障) 等因素, 还影响了换相过程稳定性, 加大了换相失败几率。

换相失败也会诱发较多系统故障。当换相不成功时,

直流电压不断降低可能会使系统自动启动保护机制并使换流器关断,从而进一步增加系统不稳定程度。另外换相不成功也会给交流侧电网带来不利影响,引起电压闪变和功率波动,甚至会在较大范围内诱发电力系统故障。了解换相失败机理,采取有效防治措施,对确保高压直流输电系统安全平稳运行具有重要意义。

三、换相失败的预防措施

(一) 改进换流站设计

为了预防高压直流输电系统的换相失败,优化换流站的设计显得尤为关键,其核心目标是增强设备的稳定性并改进换相过程中的控制手段。对换流阀进行强化设计可提高换流阀对过电压及电流冲击的承受能力,进而提升系统整体稳定性。使用高耐压等级换流阀和对换流阀进行散热优化设计能有效降低阀门在高温高压环境中故障率。另外,对换相电抗器进行调节其电感值、设计较优滤波器组等参数配置能够有效地抑制高频谐波,减小系统换相不成功几率。

(二) 优化系统运行

合理选择运行方式及参数调整可显著减少换相失败风险,增强系统稳定性。优化换流器触发角、导通角等参数是实际工作中的关键,它们直接关系到电流换相时能否平稳进行。通过对触发角的动态调整,能够保证系统运行状态发生变化时换相需要的电压裕度以避免因电压不足而造成换相失败。另外对运行方式进行优化包括对换流站功率进行合理配置,调整直流电压等级。高直流电压一般有利于强化系统电压支撑能力和提高换流器工作可靠性,同时恰当地分配功率可均衡系统负载分布并缓解单一换流站压力。

当系统阻抗变化及外部扰动经常发生时,采用实时监控及快速响应机制可对运行参数进行有效地调节,使得系统时刻保持最佳运行。在现代的高压直流输电系统中,利用先进的监控和控制系统,我们可以实时地分析电压和电流的变化,及时地警告可能出现的运行异常,并利用自动控制技术对系统参数进行优化和调整。综合应用上述技术手段,使系统在复杂环境及工况中稳定运行,降低了换相失败的可能性。通过优化系统运行,不但提高高压直流输电效率及安全性,而且为实现大规模电力传输及电网互联等提供更可靠技术保障。

四、换相失败的控制方法

(一) 基于模型预测的控制方法

基于模型预测的控制方法(Model Predictive Control,

MPC)在高压直流输电系统中广泛应用于预防换相失败的场景,具有高效的实时优化能力和对系统动态特性的强适应性。MPC的核心思想是运用系统的数学模型来预测未来一段时期的系统行为,并在此基础上解决一个优化问题,目的是找到最优的控制输入,以确保系统在受到约束的情况下能够达到预定的性能指标。针对高压直流输电系统,将MPC应用于换流器触发角、直流电压、换相过程等方面,实现动态调节与控制。

换流器的触发角(α)是影响换相过程的关键参数之一,通过MPC,系统能够实时预测触发角的变化对换相成功率的影响。在控制过程中,MPC算法利用高压直流系统的数学模型,对未来时刻的电压和电流波形进行预测。考虑到换流器的状态方程,通常用离散时间状态空间模型来描述,形式为 $x(k+1)=A \cdot x(k)+B \cdot u(k)$,其中 $x(k)$ 为系统状态向量, $u(k)$ 为控制输入向量, A 和 B 为系统矩阵。在预测过程中,MPC通过滚动优化的方法,在每个采样时刻解决优化问题,以确定当前时刻的最优控制输入 $u(k)$ 。目标是 minimized 未来的换相失败风险,通常以系统偏差(如电压偏差、电流偏差)和控制动作的增量为目标函数,如:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} (|V_{dc}(k+i|k) - V_{dc,ref}|^2 + \lambda |u(k+i|k) - u(k+i-1|k)|^2)$$

其中 $V_{dc}(k+i|k)$ 为预测的直流电压, $V_{dc,ref}$ 为参考电压, λ 是控制增量的权重系数, N_p 为预测时域长度。通过不断迭代和调整控制输入,系统可以保持在一个较为理想的状态,避免电压不足或过冲导致的换相失败。

除了触发角的优化控制,MPC还可以通过动态调整直流电压和换流阀的工作状态来预防换相失败。系统在运行过程中,直流电压的变化直接影响换相电压的裕度,因此MPC通过实时预测电压波动的趋势,并提前做出调节,以确保换相电压裕度始终处于一个安全的范围内。当检测到电压裕度接近临界值时,MPC会通过优化换流器的运行模式或调整电力传输的功率,来稳定电压,减少系统压力。MPC的这种前瞻性控制不仅能预防换相失败,还能提高系统的整体效率和稳定性。

此外,在高压直流输电系统中,MPC还能有效处理系统的约束问题。例如,换流器的触发角和直流电压都受到物理约束和设备极限的限制。MPC可以在求解优化问题时,将这些约束条件纳入考虑,如触发角 $\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}$ 以及电压限制 $V_{dc,min} \leq V_{dc} \leq V_{dc,max}$ 由此保证了控制输入不超出装置安全范围。这种以约束为基础的优

化方法使MPC对复杂工况及外部扰动具有更大的响应能力及安全性。

总之，在高压直流输电系统动态建模与实时优化的基础上，采用模型预测控制方法可以有效地防止换相失败问题。其通过对控制输入进行预测与优化，保证系统在电网复杂情况下仍能保持平稳运行，既提高换流器换相成功率又加强系统整体安全可靠。MPC技术的运用为高压直流输电系统在当代电力传输场景中的稳健运作提供了坚实的技术基础。

（二）基于自适应控制的预防策略

基于自适应控制的预防策略在高压直流输电系统中发挥了关键作用，尤其在应对系统参数不确定性和动态变化时具有显著优势。自适应控制通过实时监测系统运行状态，根据系统参数的变化自动调整控制策略，使得系统能够在不同工况下维持稳定运行，有效预防换相失败。自适应控制的核心是能够在线识别系统参数，并据此调整控制器的参数，以确保控制系统在动态环境中的鲁棒性和适应性。

在高压直流输电系统中，换流器的触发角（ α ）和导通角（ γ ）直接影响换相过程的稳定性。传统的控制方法基于固定的系统参数，难以应对实际运行中由于负载变化、网络故障或其他扰动引起的参数波动。自适应控制通过实时识别这些波动，动态调整触发角和导通角，从而提高换相成功率。自适应控制策略通常采用基于Lyapunov稳定性理论的自适应算法，通过构造一个Lyapunov函数 $V(x)$ ，并设计控制律 $u(t)$ 使得系统的Lyapunov函数满足 $\dot{V}(x) \leq 0$ ，从而保证系统的稳定性。具体而言，假设系统的状态方程为 $\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u$ ，控制输入为 $u = -K \cdot x$ 其中 K 是反馈增益矩阵。通过在线调整 K ，使得系统能够在动态环境中自适应地维持稳定。

自适应控制也可与在线参数估计技术相结合来进一步提高换相过程可靠性。通过采用最小二乘法或递归最小二乘法（RLS）等技术，可以实时地估算系统的核心参数，例如系统的阻抗和电流的变化率，并根据这些估计数据来实时调整控制器的增益和参数设置。该方法能在系统参数急剧变化情况下快速调节控制策略以避免换相失败。例如，递归最小二乘法通过最小化误差函数

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N \lambda^{N-k} [y(k) - \phi^T(k) \cdot \theta(k)]^2$$

，其中 λ 为遗忘因子， $\theta(k)$ 为参数估计向量， $\phi(k)$ 为输入信号向量，在线更新系统的参数估计值 $\theta(k+1)$ ，并据此调整控制律。

另外自适应控制可以应对外界扰动如电网故障等突发事件等。该方法中，自适应控制对系统状态的变化进行快速探测，及时对控制输入进行调节，保证系统能快速回复至稳定状态。在处理高压直流输电系统时，自适应控制技术可以与扰动观测器或扩展状态观测器（ESO）相结合，以实时补偿系统中未建模的动态或外界扰动，进而提高系统的鲁棒性。扩展状态观测器通过实时估计系统的未建模动态部分 $f(x, t)$ ，并将其反馈到控制器中进行补偿，使得控制系统能够在复杂工况下维持稳定。

结束语

综上所述，要想保证高压直流输电系统的安全运行，就必须要有全面的技术手段和管理措施，不断对其进行研究与优化才能保证电力系统能够在复杂多样的情况下正常工作，为可持续发展能源目标提供扎实支撑。

参考文献

- [1] 夏海涛, 周小平, 陈斌超, 等. 抑制高压直流输电系统换相失败的可控串联电阻[J]. 电网技术, 2023.
- [2] 高凯, 屈海涛, 任茂鑫, 等. 基于可控电压源的高压直流输电换相失败抑制技术[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 49-57.
- [3] 鲍玉莹, 朱灿, 金天然, 等. 分层接入特高压直流输电系统抑制连续换相失败协调策略[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2023, 28(2): 22-29.
- [4] 张朝峰, 张伟晨, 饶宇飞, 等. 一种抑制多馈入特高压直流换相失败的投旁通控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 10.
- [5] 杨宇辰. 多端混合直流输电线路保护与故障恢复技术研究[D]. 北京交通大学, 2022.
- [6] 赵晓龙, 陈卓, 田霄, 等. 高压直流输电系统抑制连续换相失败的策略研究[J]. 电测与仪表, 2022(004): 059.