

柔性直流输电技术在光伏中的应用

孙建东

国能亿利能源有限责任公司电厂 内蒙古 自治区 014300

摘要: 柔性直流输电技术以电压源换流器为核心,在功率控制、电网适应性等方面优势显著,在集中式光伏基地并网、分布式光伏配网接入、光伏-储能协同系统、跨区域光伏电力输送等场景应用广泛。但该技术存在换流站控制策略、直流侧故障处理、系统惯量与稳定性、经济性与成本控制等关键问题。可通过优化控制策略、创新故障处理技术、提升惯量支撑与稳定性、加强成本控制与技术升级等策略加以解决,以推动其更好地服务于光伏领域。

关键词: 柔性直流输电; 技术; 光伏中的应用

引言: 在全球能源转型浪潮下,光伏能源大规模开发利用成为趋势,但其间歇性、波动性以及远距离输送等问题,给电网稳定运行与高效消纳带来挑战。柔性直流输电技术以电压源换流器为核心,凭借有功无功独立调节、电网适应性强等优势,为光伏发展提供了关键支撑,在集中式光伏基地并网、分布式光伏配网接入、光伏-储能协同以及跨区域光伏电力输送等场景广泛应用。然而,该技术在光伏应用中仍面临换流站控制策略、直流侧故障处理、系统惯量与稳定性及经济性等关键问题。为此,需针对性地提出优化策略,以推动其更好地服务于光伏领域。

1 柔性直流输电技术的核心原理与特性

柔性直流输电技术以电压源换流器(VSC)作为核心枢纽,借助全控型电力电子器件,如绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的高频开关动作,实现直流电能与交流电能的高效转换。(1)其基本原理在于,换流器运用脉宽调制(PWM)技术,生成幅值和相位均可精确控制的可控交流电压。通过精细调节电压的幅值与相位,实现与交流系统之间灵活的功率交换。同时,换流站配备的先进控制系统,能够对有功功率和无功功率进行独立调节。有功功率的调节通过控制直流电压来实现,无功功率的调节则用于控制交流电压,从而精准满足不同运行场景下的多样化需求。(2)与传统直流输电(LCC-HVDC)相比,柔性直流输电技术具备显著优势。在功率控制方面,它极为灵活,可对有功、无功功率进行独立且快速的调节,响应时间通常在几十毫秒内,能迅速平抑光伏出力的波动,保障电网稳定。在电网适应性上,它无需依赖交流系统提供换相电压,可直接接入光伏等弱惯量电源,有效解决了传统技术“无法并网弱电网”的难题。在电能质量方面,PWM调制技术生成的交

流波形更接近正弦波,谐波含量低,无需配备大量滤波装置,简化了系统结构,降低了成本。在故障处理能力上,换流器可快速限制故障电流,配合直流断路器,能实现故障的快速隔离,极大提升了系统运行的稳定性与可靠性,为现代电力系统的安全、高效运行提供了有力支撑^[1]。

2 柔性直流输电技术在光伏中的典型应用场景

2.1 集中式光伏基地并网

大型集中式光伏基地规模宏大,装机容量往往达到百万千瓦级甚至更高。而且,这些基地大多选址于电网相对薄弱的偏远地区。若采用传统交流并网方式,会引发一系列问题,其中电压稳定问题尤为突出,严重影响光伏电力的可靠输送与高效利用。柔性直流输电技术为解决这一难题提供了理想方案。它采用“光伏基地-柔性直流换流站-交流主网”的独特拓扑结构,实现了光伏电力的高效并网。在这一结构中,柔性直流换流站发挥着关键作用。(1)它具备快速响应能力,能敏锐捕捉光伏出力的波动情况,通过精准调节无功功率,确保并网点电压始终保持稳定,为光伏电力的稳定输出创造良好条件。(2)柔性直流输电技术支持构建多端系统,能够连接多个光伏基地。这样一来,不同基地的功率可以得到有效汇总与协调分配,大大提升了整体并网的可靠性。以沙漠光伏基地为例,柔性直流输电系统可将分散的光伏电站出力集中起来,通过单条直流线路长距离输送至远方的负荷中心,避免了多条交流线路重复建设带来的资源浪费和施工难题,具有显著的经济与环境效益。

2.2 分布式光伏配网接入

分布式光伏大多接入10kV及以下的配网系统,然而其出力具有较大的随机性和波动性。这种不稳定的出力特性容易引发一系列问题,比如导致配网电压超出正常

范围,出现电压越限的情况,还会使潮流方向发生反向改变,严重影响配网的稳定运行和供电质量。(1)柔性直流输电技术,特别是低压柔性直流技术,为解决这些问题提供了有效的途径,堪称分布式光伏的“接入缓冲器”。它借助小型化换流站,实现了光伏与配网的灵活且可靠的连接。在实际应用过程中,换流站能够敏锐感知配网电压的变化,依据实时情况精准调节光伏输出的无功功率,从而有效抑制电压波动,确保配网电压稳定在合理区间。(2)当光伏出力超过本地负荷需求时,柔性直流线路能够发挥重要作用,将多余的电力输送至邻近的负荷区域或者主网,实现分布式光伏的就地消纳以及跨区域的合理调配,大大减少了“弃光”现象的发生。此外,柔性直流系统还具备出色的谐波隔离能力,能够阻止光伏侧产生的谐波进入配网,进一步提升配网的电能质量,保障电力系统的安全稳定运行。

2.3 光伏-储能协同系统

光伏能源虽清洁环保,但出力具有明显的间歇性,这给其大规模应用带来了挑战。而光伏与储能的协同运行,无疑是解决这一问题的有效良方,在此过程中,柔性直流输电技术扮演着至关重要的“控制中枢”角色。

(1)在“光伏-储能-柔性直流”这一紧密协作的系统中,换流站如同智能大脑,时刻保持敏锐“感知”。它通过实时采集光伏出力的详细数据,精准把控储能系统的充放电节奏。当阳光充足、光伏出力过剩时,换流站迅速发出指令,让储能系统开启充电模式,将多余的电能储存起来;而当光照不足、光伏出力无法满足需求时,换流站又及时指挥储能系统放电,弥补电力缺口,从而有效平抑光伏出力的波动,使整个系统的输出功率更加稳定可靠。(2)柔性直流系统还具备强大的整合能力,它能将光伏-储能联合系统整合为一个可控电源,无缝接入主网。并且能够根据主网的实际需求,灵活调节输出功率,显著提升新能源在电网中的接纳能力。以海岛光伏系统为例,柔性直流与储能的完美结合,让海岛具备了“离网运行”的能力,为海岛居民提供了稳定、持续的电力供应。

2.4 跨区域光伏电力输送

在光伏能源大规模开发利用的当下,跨区域光伏电力输送成为关键环节。(1)当光伏基地与负荷中心相距甚远,通常超过500公里时,传统交流输电方式暴露出诸多弊端。线路损耗大,使得大量电力在传输过程中白白浪费;稳定性差,难以保障电力持续、可靠供应,这极大地限制了光伏能源的有效利用。(2)而柔性直流输电技术凭借独特优势,成为跨区域光伏电力输送的理想之

选。其输电效率高达90%以上,能大幅减少电力在传输中的损耗,让更多光伏电力送达负荷中心。而且,它的输送容量不受同步运行限制,可灵活适应不同规模的电力输送需求。(3)通过精心构建点对点或多端柔性直流输电工程,西部丰富的光伏基地电力能够直接、高效地输送至东部负荷中心,有力推动“西电东送”新能源通道建设。不仅如此,柔性直流系统还具备强大的协同能力,可实现多能源的联合输送。例如,将光伏与风电、水电等能源整合,通过同一直流线路输送,既能充分发挥不同能源的优势,又能提升能源输送的经济性,降低输送成本,还能增强输送的灵活性,根据实际需求灵活调整能源输送比例,为能源的高效利用和可持续发展提供坚实支撑^[2]。

3 柔性直流输电技术在光伏应用中的关键问题

3.1 换流站控制策略优化

光伏出力的随机性要求柔性直流换流站具备更高的控制精度与响应速度。当前存在的主要问题是:传统控制策略(如定直流电压控制、定有功功率控制)在面对光伏出力骤升骤降(如云层遮挡)时,易出现直流电压波动过大,甚至系统失稳;多端柔性直流系统中,多换流站之间的协调控制难度大,易出现功率分配不均。此外,当光伏侧发生故障时,换流站的故障穿越策略若不合理,可能导致系统解列,影响光伏并网安全。

3.2 直流侧故障处理

柔性直流输电系统的直流侧故障(如直流线路短路)是影响光伏并网可靠性的关键风险。由于全控型器件的通态电阻小,故障时易产生较大的短路电流,而传统直流断路器成本高、体积大,尤其是在高压大容量系统中,故障隔离难度大。若故障处理不及时,可能导致换流器损坏,进而引发光伏电站大规模脱网。此外,直流侧故障后的系统恢复策略也需优化,以缩短停电时间,减少经济损失。

3.3 系统惯量与稳定性

光伏系统属于弱惯量电源,缺乏传统同步发电机的转动惯量支撑,而柔性直流换流站本身也不提供惯量,导致“光伏-柔性直流”系统的整体惯量较低。当系统受到扰动(如负荷突变、故障)时,频率稳定性差,易出现频率波动甚至失稳。如何通过控制策略(如虚拟惯量控制)为系统提供惯量支撑,提升整体稳定性,是当前亟待解决的问题^[1]。

3.4 经济性与成本控制

柔性直流输电系统的初期投资成本较高,主要体现在换流站设备(IGBT模块、换流阀、控制系统)和直流

输电线路。在光伏应用中，尤其是中小型光伏项目，高成本导致投资回报周期长，限制了技术的普及。此外，换流站的运行损耗（主要是器件开关损耗）也需控制，以提升系统的整体经济性。

4 柔性直流输电技术在光伏应用中的优化策略

4.1 控制策略优化

为有效应对光伏出力波动，需对控制策略进行深度优化。一方面，开发“预测-控制”协同策略，借助基于机器学习算法的光伏出力预测模型，提前精准预判出力变化情况。换流站控制系统依据预测结果迅速进行预调节，极大提升了对出力波动的响应速度。另一方面，在多端系统里采用分布式控制策略，各换流站之间通过高效信息交互，实现功率的自主合理分配，降低对中心控制器的依赖程度。此外，还要优化故障穿越策略，一旦光伏侧出现故障，换流站能及时做出反应，通过暂时降低有功功率、增加无功支撑，维持系统稳定运行，避免系统解列，保障电力供应的连续性。

4.2 故障处理技术创新

为提升柔性直流输电在光伏应用中的故障处理能力，需开展技术创新，研发低成本、高可靠性的直流故障处理技术。（1）运用模块化多电平换流器（MMC）的子模块冗余设计。当直流侧出现故障，可迅速闭锁部分子模块，有效限制故障电流，防止故障扩大。（2）开发混合型直流断路器，它融合机械开关与电力电子开关的优势，能实现故障的快速隔离，响应时间小于5毫秒，且在保障性能的同时降低成本。其三，采用直流熔断器与换流器协调配合的方案，此方案尤其适用于中低压柔性直流光伏系统，可提升故障处理的经济性，保障系统稳定运行。

4.3 惯量支撑与稳定性提升

为提升含光伏的柔性直流输电系统稳定性，需在惯量支撑方面进行创新。（1）借助控制策略为系统注入虚拟惯量。在换流站控制系统中嵌入虚拟惯量控制算法，它能依据系统频率变化率，精准调节有功功率输出，模拟同步发电机的惯量特性，有效抑制频率波动，让系统运行更平稳。（2）结合储能系统的快速响应优势。当系统频率出现异常时，储能装置通过柔性直流系统迅速进

行充放电，及时提供瞬时功率支撑，增强系统应对频率变化的能力。此外，优化光伏逆变器与柔性直流换流器的协同控制，实现二者惯量互补，进一步筑牢系统稳定运行的根基^[4]。

4.4 成本控制与技术升级

为提升柔性直流输电技术应用于光伏领域的经济性，需在成本控制与技术升级上发力。在降低成本方面，加大研发力度，攻克高压大容量IGBT芯片技术，提升换流阀功率密度，减少所需器件数量，从源头降低硬件成本。采用新型直流输电拓扑，像模块化多电平换流器，能简化系统结构，降低滤波装置成本。推动换流站设备标准化、模块化设计，实现批量生产，缩短建设周期，节省建设成本。在技术升级上，优化运行方式，依据光伏出力实时调节换流器运行状态，降低运行损耗，让系统在高效运行的同时，进一步提升经济性，增强市场竞争力。

结束语

柔性直流输电技术为光伏的大规模、高效、稳定应用开辟了新路径，在集中式并网、分布式接入、光伏-储能协同及跨区域输送等场景成效显著。然而，其在换流站控制、直流侧故障处理、系统惯量与稳定性以及经济性等方面仍面临挑战。不过，通过控制策略优化、故障处理技术创新、惯量支撑与稳定性提升以及成本控制与技术升级等一系列优化策略，可有效应对这些问题。未来，随着技术的持续进步与创新，柔性直流输电技术有望在光伏领域发挥更大作用，推动光伏产业向更高质量、更可持续方向发展，助力全球能源转型与绿色低碳目标的实现。

参考文献

- [1]吴康,任丽霜,李大伟.柔性直流输电技术的现状与展望[J].电工技术,2023(13):115-119.
- [2]饶宏,周月宾,李巍巍等.柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J].电力系统自动化,2023,47(01):1-11.
- [3]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.
- [4]张和阳.模块化多电平换流器在柔性直流输电技术中的应用[J].中阿科技论坛(中英文),2021(9):104-107.