

直流换流站在电力系统中的作用和发展趋势

黄宇杰¹, 席冰清²

1. 国网新疆超高压分公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

2. 国网新疆超高压分公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要： 在工业化进程不断加快的背景下, 使得可再生能源得到了大规模开发利用, 输电系统的发展也向远距离、大容量方向前进。其中直流输电技术的应用能有效解决中长距离电能传输问题, 是未来电力系统的重要发展趋势。针对于这一研究方向, 本文首先对直流换流站概述及对其电力系统中应用现状进行分析, 随后阐述了直流换流站在电力系统中应用的意义, 并针对实际应用中存在的问题提出了相应的优化策略, 同时基于当前应用现状进行发展趋势的分析, 期望能为直流换流站的建设做出贡献。

关键词： 直流换流站; 电力系统; 发展趋势

The Role and Development Trend of Dc Converter Station in Power System

Huang Yujie¹, Xi Bingqing²

1. Xinjiang Ultra-High Pressure Branch of State Network, Urumqi, Xinjiang 830000

2. Xinjiang Ultra-High Pressure Branch of State Network, Urumqi, Xinjiang 830000

Abstract： Under the background of accelerating industrialization process, renewable energy has been developed and utilized on a large scale, and the development of transmission system has also moved in the direction of long-distance and large-capacity. The application of DC transmission technology can effectively solve the problem of medium and long distance power transmission, which is an important development trend of the future power system. In view of this research direction, this paper first summarizes the DC converter station and analyzes its application status in power system, then expounds the significance of the application of DC converter station in power system, and puts forward corresponding optimization strategies for existing problems in practical application, and analyzes the development trend based on the current application status. Hope to contribute to the construction of DC converter station.

Keywords： DC converter station; electric power system; development trend

引言

目前我国能源问题日益突出, 而电能作为一种清洁、高效的能源, 在未来的发展中将起到越来越重要的作用。如何利用好电力资源成为了目前迫切需要解决的问题。与传统的交流输电系统相比, 直流输电系统具有输送容量大、效率高、损耗小等特点, 因而在电力系统中得到广泛应用。直流换流站是整个电力系统运行的核心部分, 其稳定运行决定着整个电力系统的正常运行。因此研究直流换流站在电力系统中的作用和发展趋势具有重要意义。

一、直流换流站概述及在电力系统中应用现状

(一) 直流换流站定义及特点

随着电力电子技术的不断进步, 使得当前各行各业对直流换流站的应用范围正在不断扩大, 它在特别是在可再生能源的大规模接入和远距离输电领域等现代电力系统中, 扮演着越来越重要的角色。直流换流站是电力系统中用于实现交流电与直流电相互转换的设施, 主要由换流器、变压器、控制保护系统以及相关的辅助设备组成。直流换流站的核心是换流器, 在工作中通过电力电子开关器件如晶闸管、IGBT等实现电能的交直流转换。直流换

流站与传统交流输电相比具有高效能量传输、灵活的功率控制、系统稳定性增强、无交流系统同步问题和环境影响小等特点, 且直流输电在长距离输电时具有更低的线路损耗和更高的传输效率, 特别适用于跨海、超高压等特殊场合^[1]。

(二) 电力系统的发展背景

近年来在工业革命的不断推进下, 使得电力系统逐渐成为现代社会不可或缺的基础设施。早在19世纪末时随着托马斯·爱迪生发明了实用的电灯泡, 以及尼古拉·特斯拉和乔治·威斯汀豪斯在交流电和直流电技术上的竞争, 就使得电力系统开始迅速发展。直到20世纪初电力开始被广泛应用于工业生产, 而电力系统从最初的直

流发电逐步过渡到交流发电，交流输电技术因其长距离输电的高效性而成为主流。到了20世纪中叶时，由于大规模的电网建设开始兴起，使得电力系统开始形成覆盖广泛、相互连接的网络。这不仅提高了电力供应的可靠性，也促进了电力资源的优化配置。而到了现在随着可再生能源技术的快速发展，风能、太阳能等清洁能源开始大规模并入电网，电力系统面临着新的挑战和机遇。为了适应这些变化，智能电网技术应运而生，它通过集成先进的信息通信技术，实现了电网的智能化管理，提高了电网的运行效率和可靠性。

（三）直流换流站技术在电力系统中的应用现状

直流换流站技术在现在的电力系统中应用已经变得越来越广泛和成熟。伴随着国家的大力支持使得可再生能源迅速发展，直流换流站作为连接不同电网和传输长距离电力的关键技术，其重要性日益凸显。目前高压直流输电（HVDC）技术已经成为实现大规模、远距离、低损耗电力传输的首选方案。直流换流站在电力系统中不仅用于连接不同频率的交流电网，还用于实现海底电缆的电力传输，以及在电网互联中发挥重要作用。例如欧洲的北欧电力市场通过直流换流站实现了与中欧电网的互联，有效提高了整个区域的电力供应稳定性和经济性。除此之外直流换流站在孤岛电网和微电网系统中也扮演着重要角色，为这些系统提供了灵活的电力接入和控制手段。随着电力电子技术的不断进步，特别是宽禁带半导体材料的应用使得直流换流站的性能得到了显著提升。直流换电站中新型的换流器如基于IGBT（绝缘栅双极晶体管）和GaN（氮化镓）的换流器的应用，可以在提高换流效率的同时，缩小了设备体积，使得直流换流站更加经济和高效^[2]。

二、直流换流站在电力系统中应用的意义

（一）提高电网传输效率与稳定性

随着全球能源需求的不断增长和可再生能源的大规模接入，使得电力系统运行中的稳定性和数据传输效率的提升显得尤为重要。而直流换流站技术在电力系统中的应用，为解决这些问题提供了有效的技术手段。举例来说高压直流输电技术能够实现远距离、大容量的电能传输，并且在传输中产生的损耗远低于传统的交流输电系统。例如中国建设的“西电东送”工程，通过直流换流站将西部地区的水电和风电输送到东部负荷中心，不仅提高了电网的传输效率，还有效缓解了东部地区的电力紧张状况^[3]。

（二）促进可再生能源的高效整合

工作人员在目前的电力系统运行中，通过直流换流站技术的应用可以促进可再生能源的高效整合。在全球对可持续能源的需求不断增长背景下，使得风能、太阳能等可再生能源的开发和利用变得越来越重要。然而由于这些能源的发电特性与传统化石燃料发电有所不同，使得这些可再生能源通常在开发中具有间歇性和不稳定性，这给电网的稳定运行带来了挑战。但随着直流换流站技术应用得到普及，使得工作人员在电网运行中能够有效地解决这一问题。在电网的运行中通过直流换流站，可再生能源发电可以实现长距离、大容量的电力传输。例如，海上风电场产生的电力可以通过直流输电线路传输到陆地，减少了因距离过长而造成的能量损耗^[4]。

（三）实现跨区域电力资源优化配置

直流换流站技术在电力系统中应用的意义之一，是帮助工作人员实现跨区域电力资源优化配置。例如在中国正在建设的“西电东送”工程中，该项目负责人就是利用直流换流站技术将西部丰富的水电、风电和太阳能发电资源输送到电力需求较大的东部地区。项目复杂人通过安排工作人员建设特高压直流输电线路，来可以有效减少输电过程中的能量损耗，提高输电效率。

（四）支持智能电网技术的发展与应用

如今在电力系统的运行当中，研究人员发现应用直流换流站技术能够实现远距离、大容量的电力传输，这对于连接分散的可再生能源发电基地与负荷中心至关重要。例如相关工作者通过高压直流输电技术在电网系统重点应用，可以将风能和太阳能资源丰富的偏远地区产生的电力高效输送到人口密集的城市地区，从而有效缓解能源分布不均的问题。除此之外直流换流站技术还支持智能电网技术的发展与应用。智能电网技术通过集成先进的信息通信技术、自动化控制技术和电力电子技术，在电力系统的运行中能够实现电网的高效、可靠和安全运行^[5]。

三、当前直流换流站在电力系统中应用挑战及优化策略

（一）设备可靠性与寿命问题

在如今的直流换流站中技术应用中，设备的可靠性与寿命是确保整个电力系统稳定运行的关键因素。在实际工作中由于直流换流站中使用的是高压直流设备，由于长期高压工作环境会导致这些设备的可靠性与寿命出现问题。例如换流阀由大量的半导体器件组成，任何一个器件的故障都可能导致整个换流阀甚至整个换流站的故障。此外，由于直流输电系统中不存在自然过零点，因此故障清除和恢复时间较长，对设备的可靠性要求更高。针对这一现状，相关工作人员需要在设备选型时选择经过长期运行验证的成熟技术，并在关键设备上通过采用冗余设计提高系统的整体可靠性。例如可以通过采用双阀组并联设计，该设计及时工作中一组设备发生故障，但另一组仍可保证系统正常运行。

（二）电磁兼容性问题

电磁兼容性是指设备或系统在其电磁环境中能正常工作，同时不对该环境中的任何设备产生不可接受的电磁干扰。该问题在在直流换流站中的产生往往是由于大功率电力电子设备的使用导致的。这些干扰可能来源于换流器的开关动作、电缆的高频传输以及接地系统的设计等。

研究人员为了解决这些问题，可以在直流换电站技术应用时设计合理的接地系统。研究人员在具体实施中通过采用多点接地和等电位连接的设计思路，可以在电力系统的应用中减少地环路

的形成，从而达到降低地环干扰的目的^[6]。

（三）系统控制与保护的复杂性

随着直流换流站在电力系统中的广泛应用，系统控制与保护的复杂性也日益凸显。工作人员直流换流站技术在电力系统的应用中，由于直流输电系统本身不具有自然的电流过零点，这使得在故障发生时电流的切断变得更为困难。所以就要求工作人员在电力系

统设计时，换流站的控制系统必须具备极高的响应速度和精确性，以确保在各种运行条件下都能维持系统的稳定性和可靠性。工作人员在具体实施中开采用如模型预测控制和自适应控制策略，这些算法能够实时调整控制参数，以适应电网的动态变化。除此之外工作人员还可以通过集成更多的传感器和智能设备，来实现对换流站运行状态的实时监控，从而提高故障检测和隔离的效率。

（四）经济性与环境影响

当前，全球正面临能源转型和环境保护的双重压力，这使得直流换流站在电力系统中的应用面临诸多机遇与挑战。在机遇方面是随着可再生能源的大力发展，直流输电因其高效、长距离传输的优势而得到广泛应用。而另一挑战层面指的是直流换流站的建设和运行对环境的影响以及经济性问题也日益凸显。具体而言在现在的直流换流站的建设和运行中，在使用化石燃料发电的背景下其会产生一定的碳排放。除此之外换流站运行中产生的电磁场和噪音污染也是不容忽视的环境问题。针对于此这些问题的优化策略之一是推动换流站的绿色能源配套，如太阳能和风能，以减少对化石燃料的依赖。与此同时相关单位还可以采用先进的电磁兼容技术和噪音控制措施，降低对周围环境的影响^[7]。

四、直流换流站的发展趋势

（一）向更高电压等级发展

在未来直流换流站的发展趋势将显著地向更高电压等级发展。在随着全球能源需求的不断增长和可再生能源大规模接入的时代背景下，使得高压直流输电技术因其高效、长距离传输的优势而变得越来越重要。例如中国在建设特高压直流输电工程方面取得了显著成就，如“一带一路”倡议下的中巴经济走廊，其中就包括了高压直流输电项目。举例来说未来可能会出现1200千伏特甚至更高电压等级的直流换流站。这些换流站将能够更有效地将风能、太阳能等可再生能源从偏远地区传输到负荷中心。例如一个位于沙漠中的大规模太阳能发电场，通过1200千伏特的直流换流站，可以将电力传输至数百公里外的城市而且损耗极低。

（二）向更大容量和更远距离发展

基于当前的经济环境与工业发展方向，使得直流换流站正朝着更大容量和更远距离的方向发展。例如中国正在建设的“特高压直流输电工程”就是这一趋势的典型代表。这些工程建设后可以将西部和北部的风能、太阳能资源高效传输到东部和南部的负荷中心，传输距离超过1000公里且输送容量达到12GW以上。而在国际的直流换流站发展趋势上也与国内相同，例如上欧洲的“北欧电力联网项目连接了挪威的水力发电站和德国的负荷中心，实现了约500公里的超长距离直流输电，输送容量为1400MW。

（三）智能化与数字化技术的融合

在以前的电力系统设计中，直流换流站作为重要的组成部分依赖于传统的控制和保护技术。这些传统技术虽然稳定可靠，但因操作复杂与维护成本高的原因已经跟不上时代发展需求。之后的换电站技术随着计算机技术发展开始引入了初步的自动化控制，但整体上仍处于相对原始的阶段。现在直流换流站的随着智

能化与数字化技术的融合，可以实现对电网运行状态的实时监控和智能分析。这些技术的应用显著提高了换流站的运行效率和可靠性，同时降低了运维成本。而在不远的未来，相信直流换流站的发展趋势将进一步向全面智能化和数字化迈进。预计会出现更加先进的自适应控制技术，这些技术能够使换流站根据电网的实时需求自动调整运行参数，实现最优的能源分配和利用^[8]。

（四）环境友好型设计与可持续发展

随着科技的进步和环保意识的增强，相信在不远的未来，直流换流站的发展将更加注重环境友好型设计与可持续发展。例如在未来预计新型的直流换流站将采用更高效的能量转换技术，通过高效能源转换技术来实现减少能源损耗的目的。与此同时预计环保材料也将被大量应用于建设中，以此来进一步降低直流换流站因建设于运行对环境的影响。除此之外还预计设计中会融入更多的智能化元素，如自动监测系统来实时调整运行状态。相信在不远的未来，换流站的建设将更加注重与自然环境的和谐共处，如采用绿色屋顶设计，利用自然通风和散热从而减少能源消耗和温室气体排放^[9]。

五、结语

综上所述，如今的直流换流站在电力系统中应用正面临着前所未有的发展机遇与挑战。随着技术的不断进步和对高效、环保能源需求的日益增长，直流换流站正朝着更高电压等级、更大容量、更远距离传输等方向发展。直流换流站的这些进步不仅能帮助工作人员提升电力系统运行中的稳定性和可靠性，还能在有效降低环境影响的同时推动能源可持续发展。然而随着直流换流站技术的不断演进，相关工作者也必须面对系统控制与保护的复杂性增加以及环境影响等挑战。所以相关研究者必须未来的发展中不断优化控制策略，提高换流站的智能化水平来实现技术进步与环境保护的双赢。

参考文献

[1]谭威, 汤曼丽, 孔志达. 高压直流换流站阀厅双层屏蔽巡视走道应用研究[J]. 南方能源建设, 2022, 9(S2): 79-83.DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.013.

[2]王亚琦, 李琳, 崔建业, 等. 直流滤波电容器心子振动机理及特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(06): 1-10.DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2022.06.001.

[3]段根月, 苏靖武, 朱文杰. 换流站年度检修方式及直流设备预防性试验方法[J]. 电气技术与经济, 2022, (06): 174-177.

[4]刘雨佳, 何柏娜, 吴硕, 等. 双辅支路抑制 HVDC 换流站直流侧故障方案[J]. 东北电力技术, 2022, 43(12): 26-30.

[5]王文洪, 刘国兵, 张承周, 等. 不平衡工况柔性直流输电控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2022, 56(12): 107-111.

[6]张前楸. 交直流换流站的火灾报警系统设计与实现[J]. 电子技术, 2022, 51(12): 64-66.

[7]张军, 樊培培. 以提升直流可用率为导向的换流站检修业务精益化管理[J]. 企业管理, 2022, (S2): 16-17.

[8]周鹏杰, 甘伟扬, 李宣. 调相机与换流站交流滤波器的协调控制措施[C]//2022年江西省电机工程学会年会论文集. 国网江西超高压公司, 2022: 3.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.064463.

[9]汪文帅, 张新天, 卢涛, 等. 常规两端500kV高压直流输电系统主结构及参数设计[C]//中国电力技术市场协会. 2022年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集. 华能澜沧江水电股份有限公司小湾水电厂, 2022: 7.DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.044222.