张北阿里云数据中心柔性直流输配电系统

阿里数据港张北数据中心是阿里巴巴集团在张北地区云计算基础设施的一个重要基地。数据港所在园区内的用电设备主要包含数据处理服务器、电动汽车和其他用电设备，呈现高耗能和交直流负荷并存的特点。同时，张北地区新能源种类丰富、能源充足，需要探索新型输配电结构，以实现100%清洁能源利用和对数据中心的高效稳定供电。以张北数据中心柔性直流输配电示范工程为例，阐述了基于柔性变电站的直流输配电系统。该系统以柔性变电站为核心建立了交直流混合配电网，实现了新能源以直流电能形式就地消纳与多端口之间不同形式、不同等级的电压高效变换以及交直流负荷的可靠供电。此外，介绍了张北阿里云数据中心柔性直流输配电系统的构成、柔性变电站的组成和基本原理，分析了用于交流负荷供电以及辅助柔性变电站起动的双向DC/AC变流器在系统中的作用及原理，为建设柔性直流输配电系统工程提供参考。

周京华　吴杰伟　陈亚爱/北京市变频技术工程技术研究中心（北方工业大学）
宇文博/华夏天信（北京）智能低碳技术研究院有限公司

周京华/教授

关键词/Keywords
数据中心·
柔性直流输配电·
柔性变电站·
交直流混合配电网·
双向DC/AC变流器·

0　引言

随着社会经济和工业生产的发展，电网的负荷发生了很大的变化。一方面，直流负荷数量激增，出现了交直流并存的特点。由于采用交流电网配电，因此在每个直流用户处均需增设一个整流电源，众多的整流电源投入运行需损耗掉大量电能。另一方面，与传统火力发电不同的是，光伏电站利用太阳能电池阵列作为发电单元产生直流电，在传统的交流输配电系统中，直流电需经逆变成交流电才能并网。由此可见，直流电形式的清洁能源经逆变和升压后并入交流系统，在用户侧通过整流电源提供电能，其中交直流变换浪费了大量能源和设备。对于光伏发电这类具有天然直流属性的新能源发电形式，若能在发电侧实现直流直接升压与输电，在用电侧直接用于直流负荷和逆变应用于交流负荷，一方面可以减少交直流变换环节，另一方面可以提高输电效率，从而降低发电和输电的运营费用，并且能更好地实现能量输送，从而增强新能源的就地消纳[1-3]。柔性直流输电技术是一种基于电压源型换流器的新型直流输电技术，其具有有功、无功独立控制能力，容易实现潮流反转，响应速度快，因此是解决上述问题的最佳方案。目前，国内已建立了多个柔性直流输配电示范项目[4-5]。

阿里巴巴数据港张北数据中心（以下简称“阿里数据港”）是阿里巴巴集团为京津冀地区云计算产业部署的大规模云计算服务基础设施的一个重要组成部分。该数据中心共投资60亿元，占地200亩，内含10万台服务器[6]。数据中心园区分为云计算中心区域和办公区域，负荷总功率为2.5 MW，其中包含单相交流负荷如照明设备、空调等，也包含直流充电桩、服务器等直流负荷，是典型的交直流负荷并存的高耗能负荷中心。为实现清洁能源供电，园区内建筑采用屋顶光伏分布式发电，绿色能源就地消耗，园区外，2.5 MW集中式光伏电站为维持园区电力供应的主要电源。为解决

国家自然科学基金面上项目（51777002）；北京市高水平创新团队建设计划（IDHT20180502）；北方工业大学科技创新工程计划（18XN141）

分布式电源和多元化交直流负荷的高效稳定接入以及协调控制，提供稳定的、高质量的电能，需提出新的供电结构。2018年1月18日，由国网冀北电力有限公司建设运营的世界首个柔性变电站在张北阿里巴巴数据港成功并网运行，意味着我国率先提出的交直流混合配电网技术从理论变为现实[7]，在完成一系列测试和试运行后，于2018年12月26日正式投入商业运行[8]，对未来电力系统的发展具有引领作用。

本文围绕张北交直流混合配电网及柔性变电站示范工程，介绍了包括光伏发电站（直流电能形式的可再生能源）、直流输电、柔性变电站和交直流并存的高耗能负荷中心的系统结构，阐述系统的构成与工作原理，分析柔性直流输配电用户侧DC/AC变流器功能。该系统具有交直流多个电压等级接口，可实现100%清洁能源供电和分布式能源以直流电能形式并入配电网以及“源网荷”一体化调控，为新能源就地消纳与高效传输提供实际工程参考。

1 柔性交直流输配电系统

图1为张北交直流混合配电网及柔性变电站示范工程结构示意图。示范工程包含了典型的交流负载与直流负载并存的数据云中心和典型的直流电源光伏电站，采用直流输电形式，柔性变电站作为能量调控枢纽，结合当地110 kV交流电网形成了交直流混合配电网[9]。图1中，电能由功率为2.5 MW的光伏电站发出，经直流升压至±10 kV后传输至柔性变电站。柔性变电站具备四个端口，分别是直流750 V/5 MW、交流380 V/2.5 MV·A、交流10 kV/5 MV·A和直流±10 kV/5 MW[9]，由于采用了全控型器件，潮流可以在各端口间双向流动，为实现配电网中电能的灵活分配提供了可能。柔性变电站的直流端口750 V直流母线经DC/DC接入了1.5 MW超级电容储能设备，实现了直流母线电压的瞬间支撑，提高了系统故障穿越能力和稳定性。数据中心负荷总功率为2.5 MW。对于直流负荷需要在直流端口750 V直流母线接入DC/DC设备提供所需电压；对于交流负荷则需要接入DC/AC变流器提供离网工频电压。该示范工程实现了集中式光伏发电采用直流升压接入配电系统、多端口灵活接入分布式电源、交直流负荷，形成了以纯粹直流电能形式由清洁能源至直流负荷的输送过程。以下分析系统结构各组成部分，主要包括光伏电站、DC/DC变换器、柔性变电站和DC/AC双向变流器等部分。

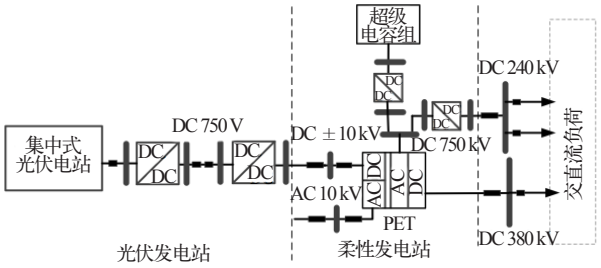

图1 张北交直流配电网结构示意图

1.1 光伏电站和DC/DC变换器

为满足阿里数据港高能耗和绿色无污染的需求，2.5 MW集中式光伏电站被建立在距离阿里数据港数公里外的农田中。这种集中式农光互补发电站形式采用架空的高支架，不打桩，不破坏地表层结构，不影响农用地的正常使用。

光伏发电站通过DC/DC变换器升压至±10 kV后经电缆传输至柔性变电站，实现了兆瓦级集中式光伏电站以直流形式送出并入直流配电网，省去了传统逆变环节，改变了新能源的消纳方式。

由于单级式DC/DC变换器很难满足高升压比的要求[10]，各个光伏发电单元一般经过两级升压。文献[11]中，升压DC/DC变换器采用如图2所示的两级式结构，第一级升压采用含有MPPT控制模式的Boost变换器，以提高光伏发电的效率，第二级升压环节采用单相全桥整流+高频变压器+单相不控整流结构的全桥直流变压器，同时实现电气隔离。在本示范工程中，光伏发电站采用Boost变换器将太阳能光伏阵列的输出电压升至750 V，为满足最终输出电压达到±10 kV，第二级以图2为基本模块，采用输入并联、输出串联的方式，其具体DC/DC变换器拓扑结构如图3所示。

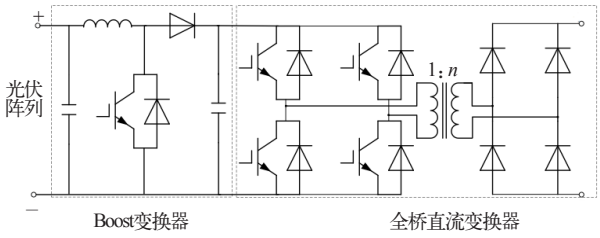

图2 两级式DC/DC变换器拓扑结构示意图

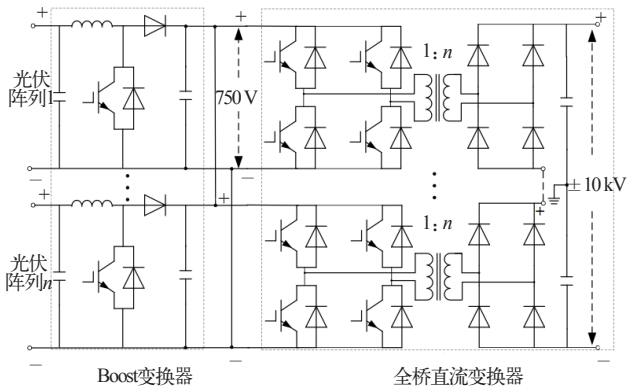

图3 输入并联输出串联全桥直流变换器拓扑结构示意图

1.2 柔性变电站

国网冀北电力有限公司经济技术研究院提出了以柔性变电站为核心的交直流配电网技术[9]。图4所示为柔性变电站结构，其具有多个端口，中压交流10 kV连接大电网，中压直流±10 kV接入集中式光伏发电站，低压直流750 V母线可以灵活接入储能和分布式新能源等电源，也可以经过直流变换器接入各种电压等级的直流负荷或经逆变成工频交流电为交流用户供电，其智能化潮流控制能实现电能在不同电压等级的交、直流端口间“按需分配”，从而实现绿色能源优先供电，自主选择能量流向选择、可再生能源就地消耗或并网，同时保障重要负荷的供电可靠性。

柔性变电站结合了电力电子技术和变电站技术，作为能量传输节点，可完成主动分配潮流、无功调控和电压调节等功能，成为能量调控的智能枢纽。在配电网中，柔性变电站提高了负荷与电网以及分布式电源的互动能力，可实现分布式电源高效接入，协调控制分布式电源与交直流负荷间的能量流动，能快速隔离故障，为用户提供高质量电能。

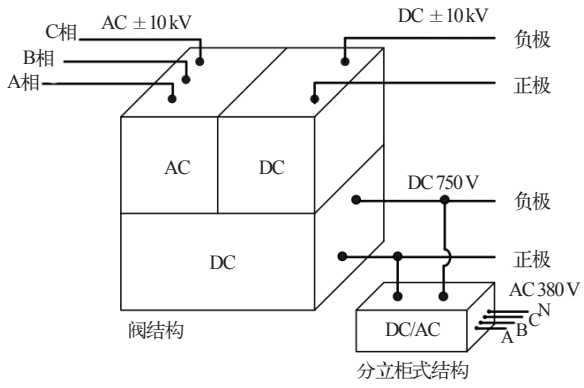

图4 柔性变电站结构示意图

柔性变电站采用交直流电力电子变压器（Power Electric Transformer，PET），其显著特点是集中/低压、交直流多端接口、潮流柔性管控、无功补偿、多形态能源灵活接入、直流故障隔离及故障限流等功能于一体，实现了多功能一体化设计，节约了变电站用地。PET按照拓扑结构大致可以分为三类：交流/交流结构、交流/直流/直流结构以及交流/直流－直流/交流结构[12]。示范工程中，柔性变电站采用的是基于模块化多电平的交流/直流－直流/交流结构型PET。以单相为例，文献[13]提出一种拓扑，如图5所示。其结构分为输入级（中压交流/中压直流）、隔离级（中压直流/低压直流）和输出级（低压直流/低压交流）。

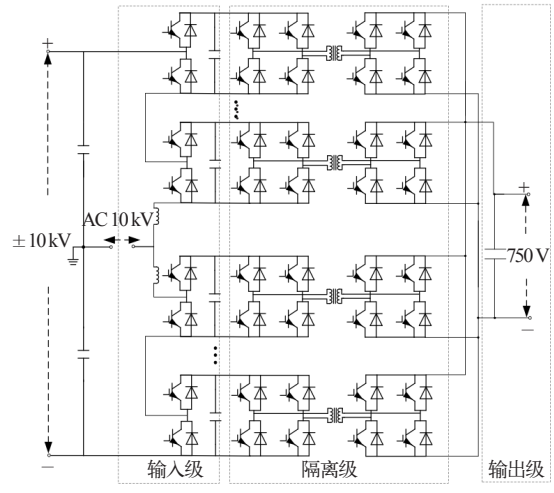

图5 PET拓扑结构示意图

示范工程中，输入级采用箝位双子模块（Clamping Double Sub-Module，CDSM）的模块

化多电平变流器(Modular Multi-level Converter，MMC)结构，运行中CDSM模块将交流10 kV转换为直流±10 kV。直流侧故障是柔性直流工程中的一种严重故障，当直流侧发生故障时，主电路中全控型器件的反并联二极管具有续流作用，容易形成故障电流的通路，故障电流无法靠换流器动作清除[14]。要消除直流侧故障通常可以选择在直流端采用高压直流断路器断开故障发生点，但直流断路器存在价格昂贵、无法熄弧和响应时间长等缺点。由于CDSM模块具有闭锁箝位功能，多功能PET输入级采用的基于CDSM模块的模块化多电平换流器，使得变流器本身能取代直流断路器实现直流故障电流自清除[15]。

隔离级DC/DC变换器采用串联输入形式降低器件承担的电压，并联输出形式增大整体输出功率，从而减少每个单元的功率[16]，其功能是把±10 kV直流电压转换为低压侧直流750 V，高频变压器采用三相共铁心拓扑，消除交直流变换产生的二倍频波动，降低设备的体积和造价。

对于输出级，根据负载的情况，可在750 V直流母线上接入DC/DC变换器和DC/AC变换器实现交直流混合配电，直流电压等级选择了750 V和240 V，交流为380 V[17]，为用户提供了可自主选择的电源接口。

2 DC/AC双向变流器

DC/AC双向变流器作为输出级要实现为配电网内交流负荷供配电功能，同时还应具有并网功能和整流功能，其中园区供电要求电能具有高电压质量和强供电可靠性[18-19]；并网功能可以实现低压侧380 V并网；整流功能是该项目特殊要求，由于柔性变电站采用了低压侧直流起动方式，故需在起动时由DC/AC起动整流功能为直流电容充电，进而解锁MMC。

DC/AC双向变流器采用多变流器并联Z型接地变压器结构组成的三相四线制设备[20]。如图6所示，变流器由四台单机容量为630 kV·A的三相三线制两电平变流器并联组成2.5 MV·A变流器，各台逆变器采用*LC*滤波器；变流器交流出线端并联接入250 kV·A/380 V的Z型接地变压器，中性线N由Z型接地变压器的接地点引出，以支持变流器在离网运行时对单相负荷的供电。

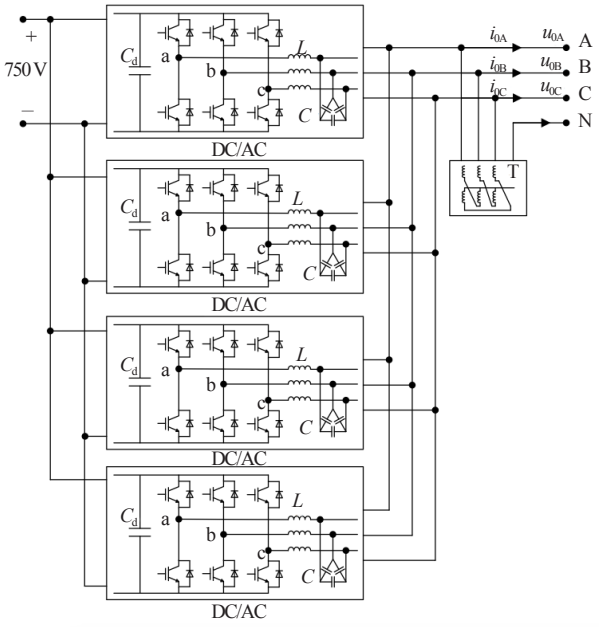

图6 DC/AC双向变流器设备拓扑结构示意图

DC/AC变流器作为交流负荷与配电网的接口，由于负载多为单相逆变非线性负载，针对不平衡负载造成的逆变器输出电压不平衡以及非线性负载引起的输出电压畸变问题，DC/AC变流器采用了基于矢量比例积分的复合控制策略，抑制了电压不平衡和谐波畸变。为了实现供电可靠性，预防负荷处发生短路故障而使DC/AC变换器停机造成大面积停电现象，设计了一种主动限流控制策略，在监测进入故障模式后，主动跌落电压，同时维持电流上升，待负荷侧发生过电流保护后，即恢复正常供电。该控制策略保证了DC/AC能够穿越负荷故障并实现了不间断供电，提高了供电可靠性。

在通信方面，DC/AC设备具有本地/远程控制模式，正常运行时采用MODBUS_RTU方式与后台通信，接受后台实时监测和在线控制，为实现交直流配电网的智能化提供了可能。

3 结束语

围绕张北柔性变电站示范工程，阐述了阿里数据港柔性直流输配电系统，以光伏电站、直流输电、柔性变电站和交直流负荷并存的负荷中心

为线索，依次介绍了光伏电站直流升压至中压±10 kV的DC/DC变换器拓扑结构，柔性变电站的核心设备多功能一体化设计的PET组成，并分析了用于交流负荷供电以及辅助柔性变电站起动的双向变流器在系统中的作用及原理。该系统为直流电能形式的新能源消纳提供了新的模式，即不经过逆变环节直接并入直流配电网。以柔性变电站取代传统变电站，利用其中柔性设备可以动态调节有功，提供无功支撑，打破了原有配电系统只能通过负荷被动分配潮流的模式和单一配电模式，柔性变电站的低压侧能提供交流380 V、直流750 V和240 V等电压形式，服务器等直流负荷可直接选择直流供电。柔性变电站低压侧直流母线可以灵活接入储能、分布式电源和交直流负荷，进一步可实现主动配电网以及即插即用电源接口，也会成为能源路由器的重要组成部分。

参考文献

[1] 周孝信，鲁宗相，刘应梅，等．中国未来电网的发展模式和关键技术[J]．中国电机工程学报，2014，34(29)：4999-5008．

[2] 张祖平．新能源、新技术、新负荷驱动直流配电网发展—直流配电技术的发展前景[J]．供用电，2014(7)：14-19．

[3] 马钊，周孝信，尚宇炜，等．未来配电系统形态及发展趋势[J]．中国电机工程学报，2015，35(6)：1289-1298．

[4] 彭小俊，郝宝泉，张海涛．贵州配电网柔性直流输电示范工程[J]．电气技术，2014(10)：36-41．

[5] 刘国伟，赵宇明，袁志昌，等．深圳柔性直流配电示范工程技术方案研究[J]．南方电网技术，2016，10(4)：1-7．

[6] 郭凯．阿里数据港张北数据中心开建将服务京津冀云计算产业[EB/OL]．(2015-06-08)[2015-06-09]．http://hebei.hebnews.cn/2015-06/09/content_4829139．htm．

[7] 赵雅君．工程丨世界首个柔性变电站成功并网运行[EB/OL]．(2018-01-18)[2018-01-23]．http://www.cpnn.com.cn/zdyw/201801/t20180123_1047017.html?from=timeline&isappinstalled=0．

[8] 世界首创柔性交直流配电网科技示范工程正式投运[EB/OL]．(2018-12-26)[2018-12-26]．http://www.sohu.com/a/284594102_505833

[9] 傅守强，高杨，陈翔宇，等．基于柔性变电站的交直流配电网技术研究与工程实践[J]．电力建设，2018(5)：46-55．

[10] 房绪鹏，闫鹏，赵珂，等．高增益DC-DC变换器在光伏系统中的应用研究[J]．现代电子技术，2018，41(3)：141-145．

[11] 刘国海，吴犇，金科，等．光伏发电系统中高升压比DC-DC变换器[J]．南京航空航天大学学报，2012，44(1)：25-31．

[12] 李子欣，高范强，赵聪，等．电力电子变压器技术研究综述[J]．中国电机工程学报，2018，38(5)：1274-1289．

[13] 李子欣，王平，楚遵方，等．面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J]．电网技术，2013，37(9)：2592-2601．

[14] 薛英林，徐政．C-MMC直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]．中国电机工程学报，2013，33(21)：63-70．

[15] 张爱萍，陆振纲，宋洁莹，等．应用于交直流配电网的电力电子变压器[J]．电力建设，2017，38(6)：66-72．

[16] 安峰，王嵩，杨柯欣．输入串联输出并联双有源全桥DC-DC变换器多模块优化功率平衡控制方法[J]．电工技术学报，2018，33(16)：3732-3742．

[17] 李红军，姜世公，王云飞，等．柔性直流配电网电压等级选择与数据中心工程设计实践[J]．电力建设，2016，37(5)：138-145．

[18] 庞斌．浅析提高配网线路电压质量及供电可靠性[J]．中国高新技术企业，2016(25)：35-36．

[19] 刘爱华，王双虎，梁顺，等．工业园区主动配电网关键技术研究及应用[J]．供用电技术，2017，34(7)：21-27．

[20] 杜翼，朱克平，尹瑞，等．基于分布式电源的直流配电网建模与仿真[J]．电力建设，2014，35(7)：13-19．

(收稿日期：2018－12－20)EA