

# 500 kV 直流电网关键技术与设备研究

汤广福/全球能源互联网研究院



汤广福 高级工程师  
全球能源互联网研究院副院长

**摘要：**针对张北四端环形柔性直流电网架空线应用带来的挑战，确定工程的系统配置方案，研发适用于柔性直流电网的核心装备，并提出相应的试验技术以验证各关键设备性能，满足张北四端直流电网的需求。

**关键词：**可再生能源并网；柔性直流输电；换流阀；断路器

## 0 引言

当前，促进可再生能源的高效开发利用，推动大范围的电力资源优化配置和变革，保障电力可靠供应和提高电网运行的经济性、灵活性，已成为我国电力事业当前和未来发展的重点。随着新一代的柔性直流输电技术发展日趋成熟，其独立功率调节和灵活运行能力，为间歇性的可再生能源并网与消纳提供了安全高效的解决方案。目前，世界范围内投入商业运行的大部分柔性直流输电工程均采用点对点输送方式，工程案例如舟山五端 $\pm 200$  kV/1 000 MW（总容量）工程和厦门 $\pm 320$  kV/1 000 MW（总容量）工程。相较于多条点对点输送方式，直流电网在高压大容量领域中具备更好的可靠性、经济性和灵活性。

随着风电、光伏等可再生能源不断开发，高比例新能源送出和消纳困难。以张北地区为例，为了解决大规模可再生能源安全并网、灵活汇集与送出困难等问题，示范柔性直流电网在多种能源形式之间的互补优化配置、灵活调节控制，以及提供连续稳定、可靠的大规模新能源电力传输网络等方面的技术优势，国网公司在张北地区建设柔性直流电网示范工程。选择在河北省康保、张北建设两个 $\pm 500$  kV送端柔性直流换流站，在河北省丰宁建设的 $\pm 500$  kV柔性直流换流站为调节端，在北京建设一个 $\pm 500$  kV受端柔性直流换流站。针对张北四端环形柔性直流电网架空线应用带来的挑战，亟需确定工程的系统配置方案，研发适用于柔性直流电网的

高压直流电网技术是提升大规模可再生能源并网和消纳能力的有效途径，在全球范围内的能源变革环境下应用需求广泛。

核心装备,并提出相应的试验技术以验证各关键设备性能,满足张北四端直流电网的需求。

## 1 四端直流电网设计

### 1.1 直流电网概况

张北柔性直流电网示范工程采用四端环网,系统配置是带金属回线的双极拓扑结构。如图1所示,在四端柔性直流电网中,张北和康保换流站为送端,用于汇集当地风电;丰宁换流站为调节端,接入当地抽水蓄能,抑制风电波动;北京换流站为受端,用于为北京提供稳定、清洁的电能。当系统正常运行时,张北和康保换流站同时向直流电网注入电能,用于维持整个系统的电压稳定和功率平衡。丰宁和北京换流站根据负荷需求从直流侧接收电能。

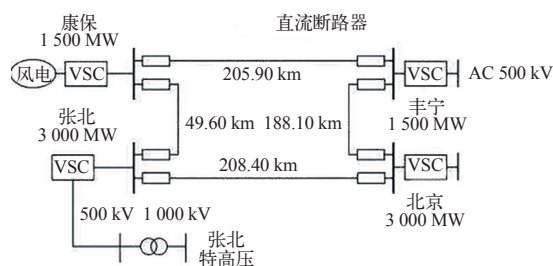


图1 张北四端直流电网设计原理图

### 1.2 系统配置方案

考虑到传输距离和电压等级增长的成本,张北直流电网采用架空线设计,采用架空线将增加直流故障的概率,由于柔性直流输电系统是低阻尼系统,直流故障电流发展速度快,并且由于其无过零点,以致其开断困难。换流器主要由电力电子器件组成,耐流能力有限,故障清除、隔离速度要求高,如不能快速隔离故障,会造成多换流站闭锁,引起直流系统功率中断。为减小直流故障带来的影响,直流电网应能快速清除、隔离故障。

目前,模块化多电平技术(MMC)广泛应用于柔性直流输电工程中,子模块拓扑主要包括半桥子模块结构和全桥子模块结构。半桥MMC在闭锁后不能切断故障电流,全桥MMC能切断故障电流。根据不同子模块结构MMC的故障特性,直流电网快速清除、隔离故障,主要有两种技术路线:一是采用直流断路器,跳开故障线路,分断故障电流;二是采用故障自清除换流器,通过换流器闭锁阻断故障电流,配置快速机械开关隔离故障区域。

对比分析了半桥MMC+直流断路器方案与故障自清除换流器(以全桥MMC为例)+直流机械开关的方案,由于故障自清除换流器+直流机械开关方案将导致

“局部故障和全网停运”问题,建议在端对端直流系统中应用;而半桥MMC+直流断路器方案是直流故障清除与隔离的最优方案。推荐张北直流联网工程采用“半桥MMC+直流断路器”系统配置方案,如图2所示。

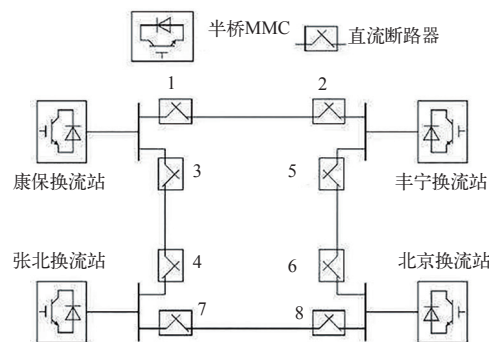


图2 半桥MMC+直流断路器方案

### 1.3 关键设备技术参数

由于张北直流联网工程采用了直流架空线路,因此大大增加了发生暂时性故障的概率。直流电网发生直流双极短路故障时,系统的暂态电流水平最为严重。因此,为了确保整个系统最大程度的安全、可靠持续运行,张北直流联网工程的保护原则为,故障清除前最多有一个换流站因为过电流而闭锁。为满足以上要求,一方面要求换流阀具备一定的故障电流耐受能力,尽可能不发生闭锁;另一方面,直流电网的保护系统应能快速检测与定位直流故障,并且直流断路器在尽可能少的换流器闭锁前切断故障暂态电流。为此,需要明确系统的暂态电流水平,提出对关键设备的技术参数要求。

目前,直流系统保护装置检测和定位直流故障的最短时间为3 ms,该时间也将作为张北直流电网保护系统的基本设计参数。根据已经在舟山五端直流输电系统中投运的直流断路器,其设计的开断时间为3 ms,而张北直流联网工程直流断路器的开断电流能力和开断时间都将在舟山工程的基础上进一步提高。在暂态电流计算时,仍以开断时间为3 ms作为最低要求。因此,从直流侧故障发生到暂态电流下降的总时间为6 ms(保护出口3 ms+直流断路器开断3 ms),这将意味着需要通过比较故障发生后6 ms时的暂态电流和换流器的过电流保护阈值来判断是否需要闭锁换流器。

当直流电网发生极对极短路故障时,所有的换流器将向故障点注入短路电流。直流侧的短路故障电流主要由换流阀子模块电容放电电流和交流系统馈入的短路电流组成。为了限制故障清除期间的暂态电流,需要配置直流电抗器。针对张北直流电网,提出了集中式和分散式两种直流电抗器的配置方案(如图3所示),当线路

发生短路故障时,采用分散式配置,远端换流站的放电回路电抗更大,故障扩散速度更慢,因此张北直流电网可采用分散式来抑制远端换流站的闭锁。

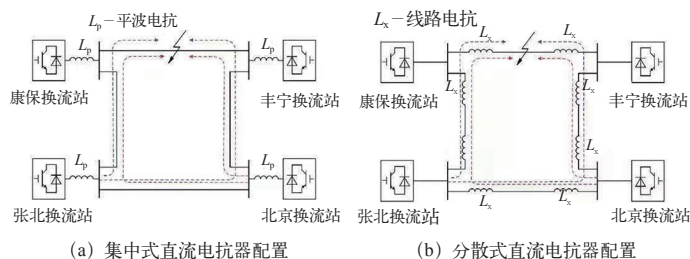


图3 不同的直流电抗器配置方案

在此基础上,通过直流电网暂态电流计算,明确了张北直流联网工程各关键设备技术参数要求。为满足换流站闭锁数目的要求,通过优化张北和康保之间线路配置的直流电抗器,将其取值增加至300 mH,使得直流故障发生6 ms内最多有一个换流站闭锁。此外,考虑一定的裕度,同时考虑到张北直流电网未来将扩展七端,直流断路器的开断能力将不应低于25 kA/3 ms。

## 2 设备研制

### 2.1 换流阀研制

张北直流输电系统换流阀采用的双极半桥MMC拓扑结构,其基本功能单元为子模块。每个换流器由三相换流单元组成,每个相单元包含两个阀桥臂,由相同个数的子模块串联组成。单个功率子模块单元拓扑由两个全控型器件IGBT和一个电容器组成。子模块的投入和切出是通过控制IGBT来实现的。因此,桥臂电压等于所有投入的子模块单元电压值之和。换流器的直流电压值由上下桥臂电压叠加得到,通过改变投入的子模块个数,从而得到所需的交流电压。

IGBT是换流阀的核心半导体部件,额定工作电压由子模块的电容电压纹波、器件的故障率、直流电容金属膜的制造水平以及子模块自身保护决定。考虑以上因素、换流阀系统的应用现状、工作可靠性以及性价比,子模块的额定工作电压设定为2.2 kV。

基于换流阀的结构,每个桥臂包含两个双联四层的阀塔。每层包含六个阀模块,每个阀模块包括六个子模块。根据模块化及标准化原则,阀模块设计成标准单元。根据电压等级,恰当选择级联换流阀模块个数以满足系统要求并提升其通用性。考虑每个子模块的额定工作电压、可靠性及操作条件,张北直流联网工程每个桥臂采用264个子模块,包括20个冗余子模块。换流阀阀塔有阀模块、支撑结构、连接母排、水冷管线、均压结

构、光纤以及辅助支撑部分。考虑了空气绝缘,MMC换流阀总体上采用支撑阀塔结构,而子模块采用悬挂结构。 $\pm 500$  kV 柔直换流阀样机如图4所示。



图4 500 kV柔直换流阀样机

$\pm 500$  kV 柔直换流阀的主要参数为:额定电压为535 kV;额定容量为3 000 MW;开关冲击耐受电压为1 175 kV;雷电冲击耐受电压为1 425 kV;100 ms 暂态耐受电流为32 kA;抗震能力为9.0级。

由于换流阀在五个100 ms周期内能够承受最高32 kA的电压,前述直流断路器的20 kA/3 ms的分断能力不会导致换流阀的损坏或故障。

张北直流输电系统换流阀基控制器(VBC)采用分层分布式架构。通过总体电流控制单元,实现环流抑制策略和电压参考波调制等功能,再通过各电压分段控制单元,实现电压平衡策略、子模块投切决策以及点对点子模块控制等功能。同时,通过独立的基于网络共享式微秒级监视系统实现子模块全态在线监测。控制周期和保护周期可达50  $\mu$ s,并灵活可分,保护周期可以根据保护需求缩至20~30  $\mu$ s,可以很好地实现分桥臂闭锁等保护策略。以往工程对于换流阀的保护主要集中在低压穿越方面,达到保护定值,六桥臂闭锁,系统停运。

张北直流联网工程采用架空线传输,在运行中会产生较多无需停运的暂态干扰,这对于柔直换流阀的持续运行能力提出了严峻考验,阀基控制器采用分桥臂闭锁策略,对各桥臂电流进行实时微秒级监控,一旦触发保护定值动作,直接对该桥臂发送闭锁命令,使六桥臂能够独立闭锁,而整个系统依旧运行,不影响功率的传输。整个闭锁延迟时间控制在百微秒内,电流恢复正常水平,直接单桥臂解锁,既保护了换流阀设备,还可以使系统持续运行不受影响,确保整个直流电网的功率传输稳定可靠。

### 2.2 模块级联混合式直流断路器研制

张北直流联网工程设计为对称双极系统,采用半桥式多级变流器拓扑结构和架空线路进行电力传输。直流

断路器配置在传输线两端，以便快速清除由雷击引起临时故障，并实现快速重合。鉴与此，直流断路器拓扑具备以下特点：较强的分断能力；更好的均压效果。超高速机械开关无弧分断；快速的重合闸能力；模块设计更易于扩展。

为了减少断路器的占地面积，其核心部件包括超高速机械开关、半导体器件和避雷器等都被集中安装在一个500 kV高电位支撑平台上。由于该支撑平台采用特有框架结构设计，其抗地震性能可达里氏9.0级。

为满足张北直流电网对断路器的需求，断路器参数：额定电压为535 kV；额定电流为3 kA；分断时间（不包括故障清除时间） $\leq 3$  ms；分断电流 $\geq 25$  kA；开路下断路器耐绝缘电压能力 $\geq 800$  kV；重合闸时间 $\leq 300$  ms。图5为500 kV直流断路器样机。



图5 500 kV直流断路器样机

### 3 试验技术

#### 3.1 换流阀试验技术

针对模块化多电平换流器内部包含大量的子模块，电压等级高、容量大，难以将完整的换流器作为试验对象的特点，设计了等比例缩小的运行试验拓扑，将若干个子模块串联而成的阀段（阀组件）作为试验对象进行各项试验，并在试验中等效复现换流阀在实际工况下的电压、电流和热应力。

IEC 62501中规定了柔性直流换流阀的常规型式试验项目，主要包括运行试验、短路电流试验、IGBT 过电流关断试验、电磁兼容测试试验以及绝缘试验。

在上述试验项目中，运行试验的目的是为了检测换流阀对最严苛的可重复的电压、电流应力的耐受能力和阀体与阀控设备的配合逻辑的正确性。运行试验主要包含了以下试验项目：最大电流连续运行试验、最大暂态过负荷运行试验、最小直流电压试验。其中，最大电流连续运行试验需要在试验中等效复现换流阀在额定工况

下的电压、电流和热应力；最大暂态过负荷运行试验是为了考核换流阀的短时过负荷耐受能力；最小直流电压试验是为了验证子模块中自取能电源从直流电容器取能回路的正确性。根据 IEC 62501 中的相关要求，运行试验应能等效复现换流阀在实际运行工况下的各种应力参数，包括电压与电流应力、水流量及进出口温度、电力电子开关器件结温、IGBT 开关频率、调制策略及其他必要的控制策略等。一般地，最大电流连续运行试验需考虑1.05倍的安全系数且试验时间 $\geq 30$  min，而最小直流电压试验需考虑 0.95 倍的安全系数且持续时间 $\geq 10$  min。

图6为等比例缩小的换流阀运行试验拓扑。

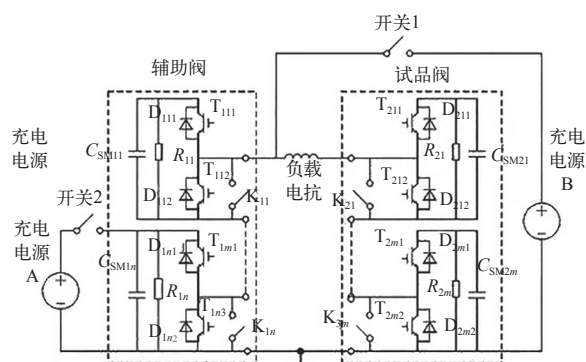


图6 换流阀运行试验拓扑

#### 3.2 高压断路器试验技术

高压直流断路器工作原理和使用条件与传统交流断路器完全不同，与中低压直流断路器也差别极大。迄今为止，高压直流断路器电气试验尚未形成国际、国家标准。本文根据工程实践，设计了相应的谐振电源试验电路拓扑（如图7所示），通过模拟真实柔性直流电网系统故障暂态特性，验证直流断路器的各项性能。

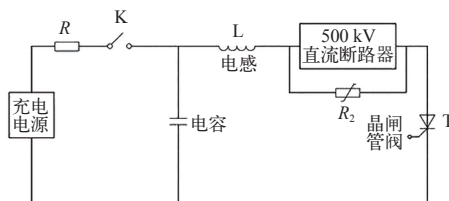


图7 直流断路器分断试验拓扑

### 4 结束语

高压直流电网技术是提升大规模可再生能源并网和消纳能力的有效途径，在全球范围内的能源变革环境下应用需求广泛。英国、美国等都提出了柔性直流电网的规划建设，张北直流联网工程的系统设计、设备研发和试验技术将推进该技术在全球范围内的推广应用。EA