

# 高压直流断路器单元试验要求与方法

彭兆伟 黄诗洋 宋鹏 李亚美 徐党国 宁琳如

**摘要:** 现有常见直流断路器开断试验方法, 对于更高电压等级直流断路器开断试验都存在试验回路容量、耐压要求难满足的问题。并且, 目前国内外尚无针对直流断路器单元试验相关标准。文中分析并提出直流断路器单元试验的要求与方法, 通过在保证电气应力的前提下采用单元试验替代整机试验, 可以有效降低对试验设备的容量和耐压要求。综合考虑直流断路器拓扑结构复杂多样、基本元件种类繁多的特点, 文中提出直流断路器在型式试验中单元试验的基本要求, 给出快速机械开关、电力电子主开关、避雷器等构成直流断路器的典型基本元件单元试验的单元划分要求, 并以张北柔性直流工程所采用的混合式、机械式、耦合负压式直流断路器为例进行单元试验单元划分。

**关键词:** 高压直流断路器; 单元试验; 型式试验; 张北柔性直流输电工程

## HVDC Circuit Breaker Unit Test Requirements and Methods

Zhaowei PENG, Shiyang HUANG, Peng SONG, Yamei LI, Dangguo XU,  
Linru NING

**Abstract:** The existing DC circuit breaker (DCCB) breaking test methods have high requirements for the test circuit capacity and voltage resistance in the higher voltage level DCCB breaking test, and there is no relevant standard for DCCB unit test at home and abroad. In this paper, the requirements and methods of DCCB unit test are put forward. Using unit test instead of complete machine test to ensure electrical stress, the capacity and withstand voltage requirements of test equipment can be effectively reduced. Considering the characteristics of DCCB as a combination electrical apparatus with complex and diverse topological structure and various basic components, this paper puts forward the basic requirements of DCCB unit test in type test. The unit division

收稿日期:XXXX-XX-XX

修回日期:XXXX-XX-XX

接受日期:XXXX-XX-XX

requirements and cases of unit tests for typical basic components such as ultra fast disconnectors, power electronic switches, and surge arresters are given. And propose the unit for unit test of the hybrid, mechanical and Coupled Negative Voltage DCCB used in the Zhangbei Flexible DC transmission Project.

**Keywords:** HVDC circuit breaker; unit test; type test; Zhangbei flexible DC transmission project

## 0 引言

柔性直流输电技术被广泛应用于风光能源并网<sup>[1]</sup>、孤岛供电<sup>[2-3]</sup>、电网互联<sup>[4-5]</sup>等领域,有传输功率大、降低输电损耗、提高系统稳定性的特点<sup>[6]</sup>,随着直流输电的进一步发展,形成直流电网成为发展趋势。在传统的交流系统中,系统电流是正弦波,每个周期内电流会有两个自然过零点,这时系统内的电感储存的磁能将会完全释放。而对于柔性直流输电系统,系统电流为较为稳定的直流电流,没有自然过零点,且线路中的电感将会储存一部分磁能,此外换流站中桥臂上的电容器也会储存一部分能量,部分能量将产生大电流与过电压。直流系统故障情况,由于直流系统阻抗特性小,故障电流上升率高,将会产生极大故障电流;故障电流能量将会转换为直流断路器中缓冲电容或换流电容器的电场能,即在直流断路器两端产生极高电压变化率  $du/dt$  过电压。对于机械开关,高  $du/dt$  的暂态开断过电压易使触头开距不足、绝缘恢复不够的机械开关产生重击穿,造成开断失败;对于电力电子开关,需通流并换流过电流,耐受产生的过电压,易烧坏或击穿电力电子器件;对于避雷器,需钳位过电压以保护直流断路器,且要消耗系统剩余的能量,这对其热稳定、动稳定都提出极高要求。这都对直流断路器的开断能力提出了要求,并且对直流试验中应力的复现提出了更大的挑战<sup>[7-8]</sup>。这都对直流断路器的开断能力提出了要求,并且对直流试验中应力的复现提出了更大的挑战<sup>[7-8]</sup>。同时直流系统更快的故障电流上升率对直流断路器的开断速度和开断电流的能力提出了很高的要求,直流断路器作为直流系统中重要的保护设备能够快速清除和隔离故障以保障直流系统的安全性和稳定性<sup>[9-10]</sup>,直流电网的形成直流断路器是关键之一<sup>[11-13]</sup>。

为确保高压直流断路器(HVDC CB)能够实现可靠开断, HVDC CB 的开断试验至关重要。高压直流断路器在一次短路电流开断过程中涉及开断大电流、承受持续数毫秒的高电压和耗散大量的能量,要求高压直流断路器具有极强的电流开断能力,也对试验设备的应力复现能力提出了巨大的挑战<sup>[14]</sup>。现有直流开断试验所提供能量有限,无法提供足够能量复现等效电气应力,没有任何单套设备能够为 400 kV 系统电压以上的高压直流断路器提供完整的额定应力<sup>[15]</sup>。

本研究旨在解决直流断路器开断试验中所面临的容量和耐压方面的挑战，为直流断路器的可靠性评估提供解决途径。

## 1 直流断路器试验现状

### 1.1 现有直流断路器试验标准

截至目前，高压直流断路器在国际上还未形成统一的标准，仅有交流开关设备的IEC标准(IEC 62271-1: 2017, IEC 62271-100: 2021)和轨道交通直流开关设备的IEC标准(IEC 61992-1: 2014, IEC 61992-2: 2014)可供参考。CIGRE的A3B4.34(2014—2017)工作组总结了高压直流断路器技术和相关的试验经验，并在2017年发布了683号技术手册《先进高压直流开关设备的技术要求和规范》，对高压直流断路器的术语进行了预标准化的命名；另外CIGRE JWG B4A3.80(2019—2022)工作组旨在提出高压直流断路器的试验要求。同时，IEC成立了WG 64工作组旨在为直流断路器制定标准，制定了IEC TS 62271-313: 2025直流断路器标准。

国内已发布的高压直流断路器标准有NB/T 42107—2017《高压直流断路器》和GB/T 38328—2019《柔性直流系统用高压直流断路器的共用技术要求》，其中GB/T 38328—2019中对于直流断路器的型式试验项目见表1，但并没有给出具体试验方案。

表1 直流断路器的型式试验项目

Table 1 Type test items for DC circuit breakers

序号	型式试验项目	试品
1	绝缘试验	整机
2	无线电干扰试验	整机
3	主回路电阻的测量	主通流支路装备
4	最大持续运行电流试验	主通流支路装备
5	短时耐受电流试验	主通流支路装备
6	防护等级验证	元件
7	密封试验	元件
8	电磁兼容性(EMC)试验	元件
9	常温下的机械操作试验	机械开断装置(如有)
10	端子静负载试验	元件
11	关合和开断试验	整机
12	真空灭弧室的X射线试验程序	真空灭弧室(如有)
13	抗震试验	整机
14	通信一致性测试	控制设备
15	冷却设备试验	冷却设备(如有)

## 1.2 现有开断试验方法

开断试验是直流断路器试验中最难复现的<sup>[15]</sup>，开断试验需要复现足够电流上升率  $di/dt$  的电流、开断后足够的电压应力以及提供足够的能量既验证直流断路器能量耗散功，同时也是保证直流断路器开断过程断路器端电压的必要条件，因为直流断路器开断过程的暂态开断电压 TIV 正是由避雷器耗散能量时的残压。由于测试设备容量的限制，这3点要求很难在试验中全部满足。所以找到一种降低测试设备容量要求的测试方法十分关键。

目前直流断路器试验方法可分为3类：充电电容器法、交流短路发电机法、合成回路法<sup>[16-18]</sup>。

充电电容器法原理是基于  $LC$  振荡。充电电容器法波形图见图1，将电容器预充电至特定电压后，与串联电抗器形成  $LC$  低频振荡回路，一般要求直流断路器故障中和时间  $t_{FN}$  小于  $1/4$  振荡周期以模拟上升的故障电流，故障电流上升速率  $di/dt$  由电容器、电容器充电电压与电抗器共同确定。

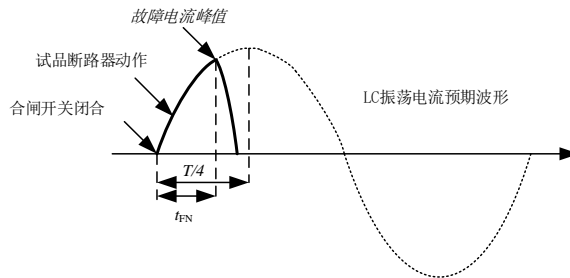


图1 充电电容器法波形图

Fig. 1 Waveform diagram of charging capacitor method

充电电容器法所需设备少、操作简单是最常用的直流断路器开断试验方式。但当被试品为更高电压等级的直流断路器时，充电电容器法所需电容器容值极大，电容器体积与造价不具可行性。文[19]中以500 kV混合式直流断路器开断试验的仿真为例，电容器组容量3.5 mF，额定电压500 kV，电容器组成本估算约3.6亿元，试验成本极高；文[20]以535 kV负压耦合式断路器开断试验中，电容器组额定容量1 mF，额定电压121 kV，电容器塔价格同样不菲。

交流短路发电机法是利用交流冲击发电机(容量需求较大)或交流电网(容量需求较小)作为试验电源，并配合变压器、整流器等设备产生低频电流模拟直流故障电流，调整电阻器与电抗器控制故障电流上升率，见图2。

短路发电机法同样面临容量不足问题。在对ABB的350 kV混合式直流断路器的20 kA短路电流开断试验中<sup>[21]</sup>，TIV持续时间不足，TIV保持了约1.5 ms。为解决

短路路发电机法容量不足的问题，KEMA 实验室采用分部试验方法，对被试断路器进行两次试验，分别保障额定短路电流(TF100)与保障 TIV 持续时间(TDT)。

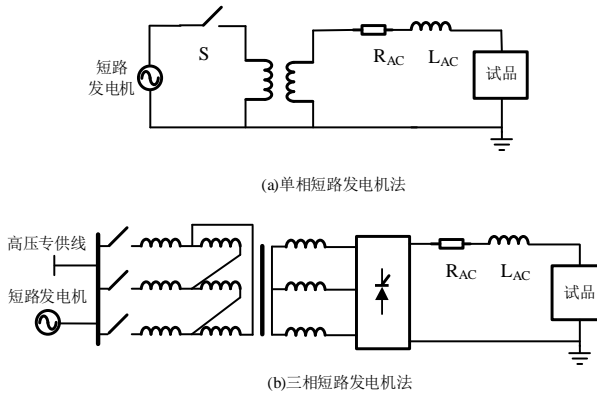


图2 短路发电机法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of short circuit generator method

合成回路法是利用合成回路中电流源与电压源分别提供电流应力与电压应力，从而减小设备容量要求，且合成试验回路原则上适用于多种高压直流断路器。西安交通大学提出了基于两电平电压源的直流断路器合成试验方法<sup>[17-18,22]</sup>，由电流源提供短路电流和电压上升阶段的TIV，由两电平电压源提供短路电流清除阶段的TIV和电流开断后直流系统电压，由辅助断路器AB隔离电流源和试品，合成回路可保证开断试验的高等效性。但当被试断路器电压等级进一步提高，测试设备耐压要求合成回路也无法复现整机对应电气应力。

上述3种试验方法试验高电压等级直流断路器时，均面临极高的容量、耐压要求。单元试验在保证提供充足电气应力前提下既能降低试验设备容量需求又能降低设备耐压要求，对于更高电压等级直流断路器的开断性能验证有重要工程意义。

### 1.3 单元试验现状

KEMA 实验室 Belda 在提出单元试验概念，并提出4种高压直流断路器模块化的拓扑结构见图3。模块化设计不一定是独立模块的串联，各拓扑结构存在不同优劣。对于图3(a)、(b)所示模块化设计，在模块试验时不能确保模块耐受额定电压，因为存在模块额定电压为整机电压；图3(c)每条支路都由模块化设计，但模块不一定独立，电流应力在不同电流分支的模块下不同；图3(d)为一种真正的模块化设计。2020年8月，KEMA 实验室在 PROMOTioN 项目中对额定电压 80 kV 和 12 kA 峰值开断电流的 VARC DCCB 单元进行单元试验。测试的 VARC DCCB 单元由3个

模块组成。320 kV 或 500 kV DCCB 可由多个该 80 kV VARC DCCB 模块串联而成<sup>[23]</sup>。国内学者在测试整机 200 kV 混合式高压直流断路器之前，对 50 kV 和 100 kV 单元模块进行测试<sup>[24]</sup>。

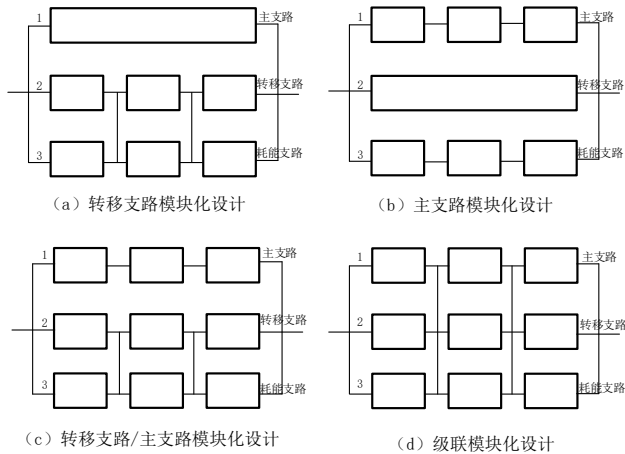


图3 直流断路器单元设计拓扑分类图

Fig. 3 DC breaker unit design topology classification diagram

## 2 单元试验要求

目前关于直流断路器型式试验中单元试验的相关标准条例国内外还未出现，仅有交流断路器的单元试验标准作为参考，但由于交流断路器开断机理与直流断路器完全不同，相应试验要求有所不同。但总体要求方向与交流断路器单元试验一致，即若能够证明单元测试能够再现的应力等于或高于相关单元的整体测试时的应力，并且在制造商的同意下，单元测试可以作为完成该单元高压直流断路器测试的可接受替代方案。

直接给出通用的单元试验方案是不现实的，因为直流断路器本身的拓扑结构与设备器件还在处于快速发展阶段，不同类型直流断路器拓扑结构相差甚远。本小节将阐述单元试验通用单元模块的一般选择规则，在任何按照该规则拟议的单元测试方案中，设计值都应该涵盖制造商所提供相关单元的最恶劣应力。此外，进行单元测试还需要满足以下基本条件：

- 1)单元试验的测试电压应基于在整机短接串联冗余单元后，同时考虑均压装置因生产误差所导致的单元间电压分布不均，单元模块所耐受的最大电压；
- 2)如果被试断路器设计有两个以上的串联测试单元，用于验证开关能力的最小测试单元数量应至少为两个；

3)如果单元间的距离小到足以使单元间电流电磁力不可忽略,则应使用具有等效形状的导体复现通过其电流路径;

4)只有在单元试验和整机试验的机械空载特性相同的情况下,才能接受中断装置的单元试验。如果在不同单元间使用共同的操作机构,则应调整被测单元的操作机构,如通过添加虚拟负载使被测断路器单元的行程特性的包络为整机直流断路器的 $0\%\sim\pm 10\%$ 内。

一般的,直流断路器由机械开关、电力电子开关、能量耗散器件组成,各类设备在单元试验中要求有所不同,以下小节针对不同器件工作特点阐述该器件单元试验方法与要求。

## 2.1 直流断路器机械开关

直流断路器机械开关在进行单元试验时最重要的是需已知试验单元同一性与型式试验中静态、动态均压。试验单元同一性即机械开关的形状尺寸与操作性能相同,且额定操作压力与额定电压下合闸操作或分闸操作触头最早动作与最晚动作的时间间隔不超过串联模块平均合闸时间或平均分闸时间的 $10\%$ ;单元试验电压由单元电压分布确定,单元电压分布通过型式试验中静态、动态均压确定,若机械开关配有并联电阻器,应在暂态中断电压(TIV)等效频率下静态计算或测量电压分布。具体的,直流断路器机械开关可分为3类:

1)机械开关模块为独立操作单元组成且灭弧介质独立。此情况下,可采用单元试验,但应同时考虑电流与电弧所产生电动力的影响;

2)机械开关模块为独立操作单元组成但灭弧介质相互连通。此情况下,仅当机械开关工作在无弧分断工作状态时可采用单元试验;

3)机械开关模块为非独立操作单元组成。此情况下,单元试验仅当单台机械开关与整机机械开关机械空载特性相同时才可采用单元试验。

## 2.2 电力电子开关

由于单个电力电子器件耐压通常较低,故高压直流断路器中大量电力电子开关串并联连接,在型式试验中大量电力电子器件的一致性重要的考核项目,所以单元试验中对电力电子开关阀数有相应要求,型式试验中电力电子器件单元试验最小阀数对于电力电子设备的子模块见表2。此外,单元试验可在单元试验应力等于或高于整机试验时的应力时进行。

## 2.3 能量耗散器件

能量耗散支路的器件一般采用金属氧化物避雷器(MOSA),当在机械开关与电

力电子开关配合阻断电流后，MOSA 单元需耗散储存在直流系统中的电抗器的大量能量，该过程与高压交流相比，高压直流断路器的避雷器能量耗散能力要求更高，因此避雷器通常设计为多级多柱 MOSA 阀片结构<sup>[25]</sup>，且其能量耗散性能需在型式试验中重点验证。然而，在实际工况下电流断开后，避雷器需消耗兆焦级的能量，试验容量要求极高，需配合单元试验或分部试验满足容量需求。

表2 单元试验电力电子器件阀数参考

Table 2 Unit test power electronic device valve level reference

每个电子阀组所含阀数	单元试验阀数
1 ~ 50	全部电子阀组
51 ~ 250	50
≥251	20%

在型式试验中，若避雷器为多级多柱相同阀片组结构，通过减少避雷器阀片数验证 MOSA 能量耗散能力，可有效降低试验容量要求。一般的 MOSA 设计结构见图 4，可分为组合设计与模块设计<sup>[26]</sup>。图 4(a)所示的是避雷器组合设计拓扑示意图，组合设计下机械开关动作时间不同或动作故障情况也不会出现机械开关单元间均压不平衡问题，但该设计下进行单元试验时需要闭合非单元试验机械开关、人工短接线短接非单元试验单元或拆解 MOSA 为对应单元实验等级；图 4(c)为模块化设计示意图，MOSA 与每个机械开关并联，该设计下对机械开关动作一致性要求高，但利于直流断路器扩展更高电压等级，单元试验操作方便，只需闭合非单元试验机械开关即可。

## 2.4 机械式直流断路器单元试验单元划分案例

基于机械式直流断路器典型拓扑结构，小节阐述单元试验单元划分方案便于单元试验概念理解。机械式直流断路器按拓扑结构分类可分为：模块设计与组合设计。图 5(a)为模块设计机械式直流断路器，每个模块均由一台相同的快速机械开关、避雷器以及振荡模块组成，由于避雷器抑制暂态中断电压，电压应力均匀分布在各单元间，单元试验测试电压可降为整机试验的 1/4，单元试验开断电流与整机试验一致；图 5(b)为组合设计机械式直流断路器电路拓扑简图，快速机械开关、振荡模块、合闸开关等设备直接串联再组合，组合设计拓扑结构中无法直接找出单元模块，且组合设计的直流断路器直接重新组合成单元模块一般不可接受，需要制造商、测试实验室与用户间达成协议，单元试验每个元件从整机断路器中取出。

单元试验参数的计算实例并比较单元试验与整机试验参数见表 3，单元试验开断电流与整机试验保持一致，谐振模块中电容器、电抗器、电容器充电电压均与单

元拆分系数 $n$ 相关，均压系数 $k_i$ 为人工注入电流频率下计算或测量得到。

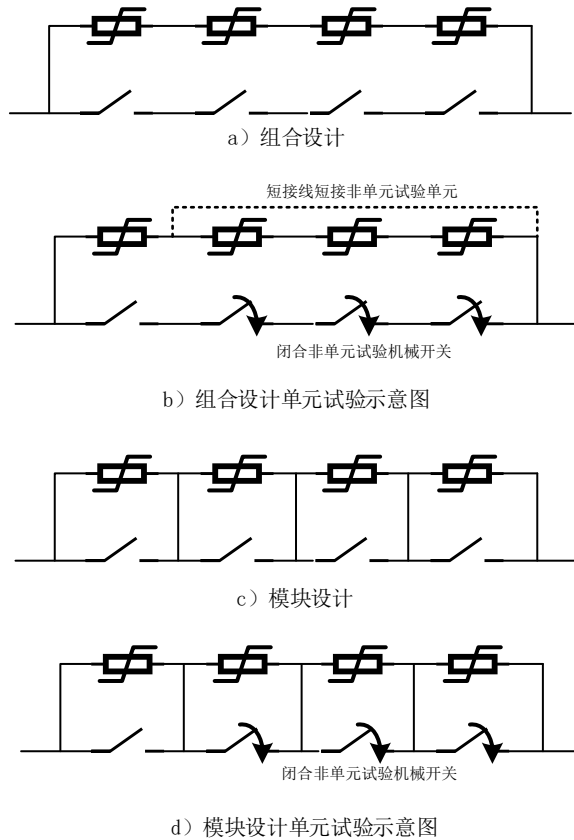


图4 MOSA 典型设计结构

Fig.4 Typical design of MOSA

### 3 张北柔直工程直流断路器单元试验方案

#### 3.1 张北工程开断试验现状

目前张北工程直流断路器开断能力验证是通过型式试验中开断试验、现场人工短路接地故障试验与单个组件逐级性能检测进行。

在型式试验中已完成的开断试验是基于 $LC$ 谐振充电电容器法，对500 kV混合式直流断路器进行“O-C-O”试验，但TIV持续时间1 ms，不能严格考核避雷器能量耗散能力。

人工短路接地故障试验<sup>[27-30]</sup>能解决试验回路能量不足问题，能最大程度复现真实故障下直流断路器所耐受的电气应力，但人工短路故障试验缺乏灵活性，测试参

数严格限于被测系统。此外，人工短路故障试验必须提前做出必要的安排，以确保对相互连接的交流系统的干扰降到最低。且可用于测试的时间也是有限的。协调不同地点变流器的运行使这种测试方法非常不便。

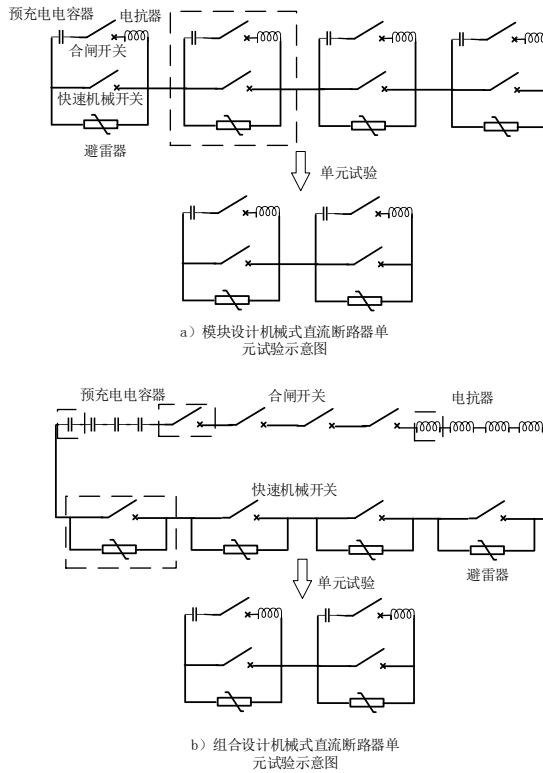


图5 机械式直流断路器单元试验示意图

Fig.5 Schematic diagram of mechanical DC circuit breaker unit test

表3 机械式直流断路器单元试验参数计算实例

Table 3 Calculation example of mechanical DCCB unit test parameters

试验条件		整机试验	单元试验
断路器参数	试验电压	$\underline{U}_i$	$k_t U_i / n$
	快速机械开关数量	$n$	1
	分断电流	$I_{scd}$	$I_{scd}$
	电容器预充电电压	$\underline{U}_{cp}$	$k_r U_{cp} / n$
	电容器( $C_p$ )	$X$	$nX / k_r$
	电抗器( $L_p$ )	$Y$	$k_r Y / n$
试验要求相关参数	谐振频率	$1 / (2\pi\sqrt{XY})$	
	谐振电流峰值	$\sqrt{(X/Y)*U_{cp}}$	
	暂态开断电压变化率 $du/dt$	$I_{scd} / nX$	$k_r I_{scd} / nX$

单个组件逐级性能检测是通过快速机械开关、半导体器件(IGBT、IEGT、IGCT等)、避雷器阀等设备进行抽样性能验证,以张北四端柔直工程年检项目为例,包含:包括主通流回路(含机械开关)电阻测试、转移支路半导体器件测试(100%)、主支路IGBT逐级功能测试(50%)、转移支路IGBT逐级功能测试(50%)、后台分合闸功能试验等单个器件性能测试,检测项目繁多,抽检覆盖率低,检测工长期长,检测成本大,且未能检查高压直流断路器的整机动作性能。

### 3.2 张北工程单元试验方案

参考张北柔直工程直流断路器设计冻结书对混合式、机械式、耦合负压式直流断路器进行模块统计见图6,图6(a)为混合式直流断路器拓扑结构,包括主支路、转移支路、耗能支路,其中主支路由十断口串联机械开关与6级并联7级串联的双向IGBT组成(包含2级串联冗余),转移支路由10个电力电子开关子模块单元组成,子模块单元采用二极管全桥结构,桥臂为32级串联二极管,转移支路电力电子开关IGBT为32级双并联结构,耗能支路由避雷器组成,10级避雷器组分别并联在10级转移支路子模块两端,每级避雷器组由40柱10级避雷器阀片构成;图6(b)为机械式直流断路器,由主支路、转移支路、主缓冲回路、耗能支路4条支路并联,其中主支路为12级快速机械断口,转移支路由5组转移支路振荡模块组成,每组子模块由储能电容、振荡电感以及IGCT模块串联,充电电容、功能系统并联,主缓冲支路由5组缓冲电容器、缓冲电容并联电阻及限流电阻组成,耗能支路由12级避雷器阀组分别并联在机械开关两端构成;图6(c)为耦合负压式直流断路器拓扑结构,由主支路、转移支路、耗能支路三支路并联而成,其中主支路由8断口快速机械开关串联而成,转移支路由电力电子主开关与耦合负压回路串联组成,转移支路电力电子主开关由5组子模块组成,每组子模块由64级二极管全桥结构双并联IGBT构成,耦合负压回路由预充电电容器、触发电容回路放电的晶闸管SCR、反并联二极管以及紧耦合变压器构成,耗能支路由5组避雷器子模块组成,4组避雷器与转移支路电力电子主开关子模块分别并联,1组避雷器并联在与余下1组转移支路电力电子子模块与耦合负压回路两端。

张北工程所采用的混合式直流断路器为模块设计,去除冗余模块后,直流断路器可视为10组50 kV单元模块,根据第2节中单元试验基本条件2)单元试验单元为2组50 kV单元模块,即2台机械开关、2组主支路电力电子开关、2组转移支路电力电子开关、2组避雷器,在单元试验过程中其余机械开关保持合闸状态,其余主支路电力电子开关旁路开关保持合闸使主支路电力电子开关短接,其余转移支路电力电子开关保持导通;机械式直流断路器的主缓冲支路与转移支路设备呈组合设

计，无法直接进行单元拆分，在制造商、测试实验室同意情况下短路线处理后才可单元试验，单元试验单元为 100 kV 模块，即 2 台机械开关、1 级转移支路振荡模块、1 级主缓冲支路模块、2 组避雷器，在单元试验过程中其余机械开关保持合闸，转移支路与主缓冲支路的其余 4/5 模块需短路线短接处理；耦合负压式直流断路器既不是单元设计也不是组合设计，仅含一组耦合负压回路无法与 5 级转移支路电力电子开关、5 级避雷器单元划分适配，若单元划分为 2 级机械开关、1 级转移支路电力电子开关、1 级耦合负压回路、1 级避雷器，则单极转移支路电力电子开关将耐受原 5 级转移支路电力电子开关所耐受的耦合负压回路中紧耦合变压器原边电压，即单元试验所受电气应力大于整机试验电气应力但不大于设计值。上述三类直流断路器划分方案汇总见表 4，实际试验均需取得设备制造商同意。

## 4 结语

高压直流断路器试验存在试验设备容量、耐压要求高的难题，单元试验在保证电气应力的前提下采用单元试验替代整机试验可有效缓解容量不足、耐压不够的问题，文中给出直流断路器单元试验的基本要求与方法；同时给出直流断路器各元件单元试验对应要求；以机械式直流断路器为例给出组合式、单元式设计下单元试验单元划分方案与相关参数；最后以张北柔直工程所采用的 3 类直流断路器作为试验对象，统计各类直流断路器拓扑构成，给出单元试验单元划分案例。为后续直流断路器型式试验中单元试验的相关标准提供指导意义。

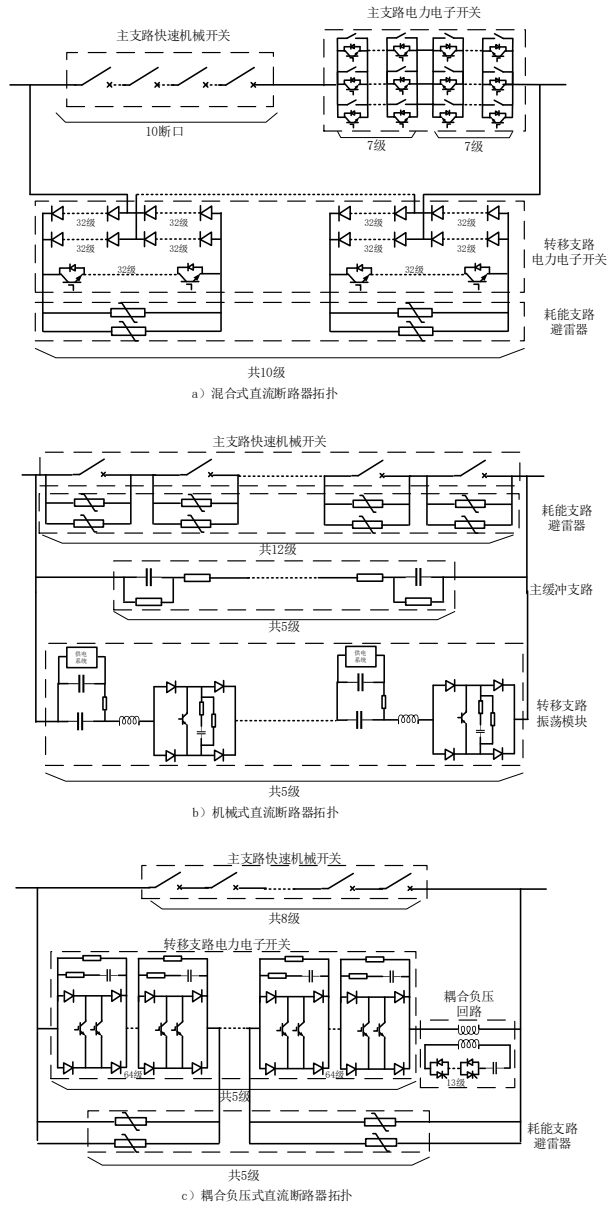


图6 张北工程直流断路器电路拓扑

Fig.6 Circuit topology of DC circuit breaker in Zhangbei project

表4 张北工程直流断路器单元试验方案统计

Table 4 Statistics of DC circuit breaker unit test scheme in Zhangbei project

部位	混合式		机械式		耦合负压式	
	整机试验	单元试验	整机试验	单元试验	整机试验	单元试验
主支路机械开关	10	2	12(2冗余)	2	8	2
主支路电力电子开关	7(2冗余)	1	—	—	—	—
转移支路电力电子开关	10	2	5	1	5	1
耦合负压回路	—	—	—	—	1	1
主缓冲支路	—	—	5	1	—	—
耗能支路	10	2	12(2冗余)	2	5	1

参考文献

[1] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北500 kV 直流电网关键技术与设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2097-2106.  
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.

[2] 杨柳, 黎小林, 许树楷, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统集成设计方案[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 63-67.  
YANG Liu, LI Xiaolin, XU Shukai, et al. The integrated system design scheme of nan' ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 63-67.

[3] 常浩, 厉璇, 马玉龙, 等. 舟山多端柔性直流输电工程直流系统放电特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 9-15.  
CHANG Hao, LI Xuan, MA Yulong, et al. Discharge characteristics of DC system in Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 9-15.

[4] 袁志昌, 郭佩乾, 刘国伟, 等. 新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1473-1488.  
YUAN Zhichang, GUO Peiqian, LIU Guowei, et al. Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1473-1488.

[5] 林湘宁, 胡仙清, 童宁, 等. 具备高灵敏性与速动性的柔性直流输电系统纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 130-139.  
LIN Xiangning, HU Xianqing, TONG Ning, et al. A pilot protection scheme for an VSC-MTDC system with high sensitivity and rapidity[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 130-139.

[6] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.  
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of flexible

- direct current transmission engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [7] ASPLUND G, BARKER C, BAUR U, et al. CIGRE TB 533-Working group B4. 52-HVDC grid feasibility study[C]//CIGRE Session. Paris: CIGRE, 2013: 56-65.
- [8] 吴亚楠, 吕铮, 贺之渊, 等. 基于架空线的直流电网保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3726-3733.
- WU Yanan, LYU Zheng, HE Zhiyuan, et al. Study on the protection strategies of HVDC grid for overhead line application[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3726-3733.
- [9] 张烁, 邹贵彬, 魏秀燕, 等. 多端口直流断路器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4502-4515.
- ZHANG Shuo, ZOU Guibin, WEI Xiuyan, et al. A review of research on multi-port DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4502-4515.
- [10] 王灿, 杜船, 徐杰雄. 中高压直流断路器拓扑综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 187-199.
- WANG Can, DU Chuan, XU Jiexiong. Review of topologies for medium-and high-voltage DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 187-199.
- [11] SMEETS R, KERTÉSZ V, YANUSHKEVICH A. Modelling and experimental verification of DC current interruption phenomena and associated test-circuits[C]//CIGRE 2014 Session. Paris: CIGRE, 2014: A3-114.
- [12] 史宗谦, 贾申利. 高压直流断路器研究综述[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 1-9.
- SHI Zongqian, JIA Shenli. Research on high-voltage direct current circuit breaker: A review[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 1-9.
- [13] 班建, 高享想, 黄实, 等. 直流断路器电流开断试验技术与试验回路[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 167-172.
- BAN Jian, GAO Xiangxiang, HUANG Shi, et al. Current breaking test technology and circuit of DC circuit-breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 167-172.
- [14] des Grands Réseaux Électriques. Joint Working Group B A B C I. Technical requirements and specifications of state-of-the-art HVDC switching equipment[M]. Paris: CIGRÉ, 2017.
- [15] BELDA N A, PLET C A, SMEETS R P P. Full-power test of HVDC circuit-breakers with AC short-circuit generators operated at low power frequency[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 1843-1852.
- [16] BELDA N A, SMEETS R P P. Test circuits for HVDC circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 285-293.
- [17] XIU S, LONG Z, QIN K, et al. Synthetic test circuit with two-level voltage source for HVDC circuit breakers[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2023, 17(8): 1857-1869.
- [18] JIA Shenli, TANG Qiang, XIU Shixin, et al. Current interruption tests of HVDC circuit-breakers: Requirements, methods and a testing case[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2022, 16(14): 2939-2946.
- [19] ZHAO Shuzhen, ZHANG Jinxiang, LI Zhendong, et al. Research on short-circuit test of 500

- kV hybrid HVDC circuit breaker[C]//2017 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA). [S.l.]: IEEE, 2017: 126-130.
- [20] 张 猛, 赵 杨, 王国金, 等. 535 kV 耦合负压式直流断路器短路电流开断试验研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2451-2458.  
ZHANG Meng, ZHAO Yang, WANG Guojin, et al. Research on short-circuit current breaking test of 535 kV DC circuit breakers based on coupled negative voltage commutation[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(8): 2451-2458.
- [21] Anon. D10.7: Full Test Setup and Documentation[EB/OL]. 2025-10-13. [https://www.promotion-offshore.net/results/deliverables/.
- [22] 贾申利, 修士新, 龙志松, 等. 一种两电平电压源的直流断路器合成试验回路及方法: 202011435858.2[P]. 2021-04-09.  
JIAN Shenli, XIU Shixin, LONG Zhisong, et al. DC circuit breaker synthesis test loop and method of two-level voltage source: 202011435858.2[P]. 2021-04-09.
- [23] ÄNGQUIST L, NEE S, MODEER T, et al. Design and test of VSC assisted resonant current (VARC) DC circuit breaker[C]//15th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2019). [S.l.]: IET, 2019: 1-6.
- [24] TANG G F, WEI X G, ZHOU W D, et al. Research and development of a full-bridge cascaded hybrid HVDC breaker for VSC-HVDC applications[C]//CIGRE Session. Paris: CIGRE, 2016: A3-A117.
- [25] HINRICHSSEN V. Metal-oxide surge arresters in high-voltage power systems[M]. 3rd ed. Erlangen, Germany: Siemens AG, 2012.
- [26] TOKOYODA S, INAGAKI T, SADAKUNI H, et al. Development and testing of EHV mechanical DC circuit breaker[C]//2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST). [S.l.]: IEEE, 2019: 329-334.
- [27] TANG G, ZHOU W, HE Z, et al. Development of 500 kV modular cascaded hybrid HVDC breaker for DC grid applications[C]//CIGRE 2018 Session.Paris: CIGRE, 2018: 1-15.
- [28] VITHAYATHIL J J, COURTS A L, PETERSON W G, et al. HVDC circuit breaker development and field tests[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104(10): 2692-2705.
- [29] LEISHI Xiao, CHAO Sheng, QIFU Lu. Research on Short-Circuit test and simulation of CSG first mechanical HVDC circuit breaker in VSC-HVDC[C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). [S.l.]: IEEE, 2018: 2764-2769.
- [30] HOFMANN G A, LABARBERA G L, REED N E, et al. Field test of HVDC circuit breaker: Load break and fault clearing on the Pacific intertie[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(3): 829-838.

## 作者简介

彭兆伟(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事直流断路器试验技术研究(E-mail: peng.

zhaowei@jibei.sgcc.com.cn)。

黄诗洋(1996—)，男，硕士，工程师，从事直流断路器检测技术研究(E-mail: huang.shiyang@jibei.sgcc.com.cn)。

宋鹏(1982—)，男，博士，教授级高级工程师，从事电力电子设备检测技术研究(E-mail: song.p@jibei.sgcc.com.cn)。

李亚美(1989—)，男，硕士，工程师，从事开关类设备试验技术研究(E-mail: li.yamei.a@jibei.sgcc.com.cn)。

徐党国(1974—)，男，硕士，正高级工程师，从事开关类设备检测技术研究(E-mail: xu.dangguo@jibei.sgcc.com.cn)。2

宁琳如(1994—)，女，硕士，工程师，从事开关类设备检测技术研究(E-mail: ning.linru@jibei.sgcc.com.cn)。