



团 体 标 准

T/CES XXXXX—XXXX

高压直流直挂式电化学储能系统启动调试 技术规范

Technical specification for commissioning of high-voltage direct current
directly connected electrochemical energy storage system

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

前 言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总体要求	2
5 站系统试验	2
5.1 试验的准备条件	2
5.2 不带电顺序控制试验	3
5.3 出口跳闸试验	3
5.4 抗干扰试验	4
5.5 柔直换流阀充电试验	5
5.6 STATCOM 运行方式试验	5
5.7 交流电压控制试验	5
5.8 柔直换流阀开路升压试验	6
5.9 储能阀开路升压试验	7
5.10 储能阀充电试验	7
6 端对端系统试验	8
6.1 试验的准备条件	8
6.2 初始运行试验	8
6.3 保护跳闸试验	9
6.4 控制系统自检与系统故障切换试验	11
6.5 控制模式切换试验	12
6.6 功率升降试验	14
6.7 环流抑制试验	16
6.8 动态性能试验	17
6.9 站用直流电源故障试验	17
6.10 就地控制试验	18
6.11 热运行试验	18
7 试运行试验	19
附 录 A（资料性） 高压直流直挂式电化学储能系统拓扑结构图	20
附 录 B（资料性） 高压直流直挂式电化学储能系统启动调试试验项目	21

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国电工技术学会储能技术专业分会提出。

本文件由中国电工技术学会归口。

本文件由中国电工技术学会团体标准技术办公室提出并解释。

本文件起草单位：XXXXXXXXXX。

本文件主要起草人：XXXXXXXXXX。

高压直流直挂式电化学储能系统启动调试技术规范

1 范围

本文件规定了高压直流直挂式电化学储能系统启动调试项目、方法和技术要求。

本文件适用于以电化学电池作为储能载体,通过 6kV~35kV 电压等级并网的直流直挂式电化学储能系统调试、验收。其他更高电压等级的直流直挂式电化学储能系统也可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 12325	电能质量 供电电压允许偏差
GB/T 14285	继电保护和安全自动装置技术规程
GB/T 14549	电能质量 公用电网谐波
GB/T 15543	电能质量 三相电压不平衡
GB/T 18481	电能质量 暂时过电压和瞬态过电压
GB/T 24337	电能质量 公用电网间谐波
GB/T 34131	电化学储能电站用锂离子电池管理系统技术规范
GB/T 35703	柔性直流输电系统成套设计规范
GB/T 35745	柔性直流输电控制与保护设备技术要求
GB/T 36276	电力储能用锂离子电池
GB/T 36547	电化学储能系统接入电网技术规定
GB/T 36548	电化学储能系统接入电网测试规范
GB/T 38878	柔性直流输电工程系统试验
GB/T 40865	柔性直流输电术语
GB/T 42737	电化学储能电站调试规程
DL/T 2247	电化学储能电站调度运行管理
DL/T 2528	电力储能基本术语
T/CES 076	中压直挂式储能系统技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 电压源换流阀/柔直换流阀 **voltage source converter valve (VSC) /converter valve**

用于将交流电能转换为直流电能或将直流电能转换为交流电能的装置,连接于三个交流端子和两个直流端子之间,具有电压源特性。

3.2 直流直挂式储能阀/储能阀 **DC direct-connected energy storage valve/energy storage valve**

由储能单元、电力电子器件及其辅件组成的电池、电气以及机械联合体,采用半桥模块化级联拓扑,直挂在正、负直流母线之间,实现电能存储、转换以及释放的装置。

3.3 极控制保护系统 **pole control and protection system (PCP)**

接收站控指令,生成调制波与触发指令并下发至阀基控制系统,实现极级功率控制与运行模式切换,同时具备极过流、极过压及不平衡等保护功能,以保障极与换流阀稳定运行及实现故障隔离的控制系统。

3.4 阀基控制系统 valve base control (VBC)

与极控制保护系统直接交换控制信息，实现对换流阀子模块的控制、保护、监测及通信，同时具备子模块电容电压均衡、环流抑制等功能的控制与监视系统。

3.5 动态无功补偿模式 static synchronous compensator (STATCOM) operation mode

在柔直换流阀处于正常运行状态，储能阀退出且直流侧处于空载或零功率运行条件下，系统作为静止同步补偿器向交流电网提供动态无功支撑的一种运行模式。

3.6 高压直流输电模式 high voltage direct current (HVDC) transmission mode

在柔直换流阀于直流侧形成完整回路、且储能阀参与有功功率传输的条件下，系统作为交直流变换接口，实现交流与直流系统之间功率交换的一种运行模式。

4 总体要求

4.1 高压直流直挂式电化学储能系统启动调试应在储能分系统试验完成并验收合格后进行，试验内容主要包括站系统试验、端对端系统试验和试运行试验。

4.2 高压直流直挂式电化学储能系统启动调试应编制调试大纲、调试方案和应急预案，试验前应向电网调度机构提出申请，经批准后实施。

4.3 调试人员应熟悉高压直流直挂式电化学储能系统电气设备及一次、二次系统的工作原理、调试流程、调试质量标准和安全工作规定，能正确使用工器具、仪器仪表和安全防护设备，调试所用工器具、仪器仪表和安全防护设备均应检测校验合格，并在有效期内。

4.4 高压直流直挂式电化学储能系统启动调试过程中应记录原始数据，并在调试完成后编制调试报告。

5 站系统试验

5.1 试验的准备条件

- 1) 辅助电源系统已具备供电条件。
- 2) 交流一次设备完好，具备向直流场充电条件。
- 3) 直流一次设备完好，具备充电条件。
- 4) 阀冷系统已具备投运条件。
- 5) 站内一、二次设备安装施工及验收完成，符合技术规范。
- 6) 单体及分系统试验结束，具有相应完整的试验记录或测试报告，通过验收。
- 7) 保护接线、极性检查完毕，定值校验合格，整组传动正确；各操作、连锁、闭锁回路校验合格，信号正确；设备编号、相位、极性标识核对无误。
- 8) 站控、监视、阀控、保护、测量、检测、通讯及辅助系统可正常工作。
- 9) 试验区域接地线已拆除，箱柜关闭上锁，临时设施拆除，试验区域与其它区域隔离并设安全标志。
- 10) 站内主配电装置遮栏、安全措施齐全。
- 11) 所有电源、照明、通信、采暖、通风、防潮设施安装试验完毕，投入正常使用。
- 12) 消防工程已通过消防部门验收，消防设施齐全，能投入使用。
- 13) 系统试验范围内通信畅通，与相关调度机构通信畅通并经试验正常。
- 14) 系统试验的组织机构已成立，系统试验方案、调度方案、安全措施已制定并经批准。
- 15) 值班、操作、运行人员配齐，熟悉设备、规章并考核合格。
- 16) 设备命名、运行操作规程、二票三制等制度已建立，记录本、操作票齐全。
- 17) 已对试验期间的运行方式作出调整，下达试验保护整定单，并落实系统安全措施。
- 18) 试验期间的安全保卫措施已落实，站内消防系统经过检验可正常运行。
- 19) 调试期间试验现场出入制度完备，与调试无关的人员已撤离现场。
- 20) 储能系统设备安装、交接试验、调试结束，符合质量标准和设计要求。

- 21) 换流阀单体、分系统调试工作已完成，试验合格，满足系统启动条件。
- 22) 储能阀受电部分保护及自动装置定值已整定（含临时定值），并经整组试验验证可靠动作。

5.2 不带电顺序控制试验

在柔直换流阀交/直流一次设备不带电和储能阀直流一次设备不带电的条件下进行试验。

试验内容及要求如下：

- a) 手动控制模式下，检验检修/冷备用/热备用三种状态下柔直换流阀及储能阀开关、刀闸顺序自动操作以及顺控逻辑的正确性。顺序正确的操作应执行，错误的操作应被拒绝。
- b) 自动控制模式下，检验检修/冷备用/热备用三种状态下柔直换流阀及储能阀开关、刀闸顺序自动操作以及顺控逻辑的正确性。顺序自动操作应能按顺序执行完毕，当一个顺序未能完成时，应有相应报警信息，且相应设备应能手动退回上一个有定义的状态，或进入下一个有定义的状态。

5.3 出口跳闸试验

5.3.1 直流保护系统跳闸

在交/直流一次设备不带电、柔直换流阀及储能阀均为冷备用状态下进行该试验。本测试方法适用于配置三套冗余直流保护系统的高压直挂式电化学储能系统。配置数量少于或多于三套的储能系统，可参照执行。采用继电保护测试仪向直流保护系统模拟注入故障跳闸信号时，对应的断路器应可靠跳闸，并发出对应的信号和事件记录。

试验内容和要求如下：

- a) 将继保测试仪电流回路接入第一套直流保护及其冗余保护装置的对应电流采样通道。
- b) 确认仅待测试保护装置处于“运行”状态，其余冗余保护装置切换至“试验”状态。
- c) 通过继保测试仪施加大于保护定值的故障电流，第一套保护应正确动作，出口断路器跳闸，阀基控制系统收到系统闭锁命令。
- d) 依次对每一套冗余保护装置重复上述 b) —c) 步骤，记录动作事件。
- e) 将全部三套冗余保护装置均切换至“运行”状态，模拟任意两套保护同时动作，检查三取二装置是否正确动作。
- f) 将其中任意一套保护切换至“试验”状态，仅保留两套处于“运行”状态，模拟运行状态中的任意一套保护动作，检查三取二装置是否正确动作。
- g) 将其中两套保护切换至“试验”状态，仅保留一套处于“运行”状态，模拟该运行保护动作，检查三取二装置检查三取二装置是否正确动作。
- h) 记录所有试验现象。

5.3.2 控制台手动紧急跳闸

在交/直流一次设备不带电、柔直换流阀及储能阀均为冷备用状态下进行该试验。本测试方法适用于配置两套冗余直流控制系统的高压直挂式电化学储能系统。配置数量少于或多于两套的储能系统，可参照执行。

试验内容和要求如下：

- a) 将第一套直流控制系统设置为“运行”状态。
- b) 投入第一套直流控制系统的出口跳闸压板。
- c) 手动按下主控室紧急停运按钮。
- d) 相应开关断路器应正确跳闸，双侧阀转为冷备用状态。
- e) 依次对每一套冗余保护装置重复上述 a) —d) 步骤，记录对应的信号和事件记录。

5.3.3 冷却系统保护跳闸试验

在交/直流一次设备不带电、柔直换流阀及储能阀均为冷备用状态下进行该试验。

试验内容和要求如下：

- a) 将第一套直流控制系统设置为“运行”状态。
- b) 投入第一套直流控制系统的出口跳闸压板。
- c) 关闭冗余直流控制系统主机。
- d) 修改柔直换流阀冷却系统定值，模拟跳闸信号。
- e) 相应开关断路器应正确跳闸，双侧阀转为冷备用状态，并发出对应的信号和事件记录。
- f) 修改储能阀冷却系统定值，模拟跳闸信号。
- g) 相应开关断路器应正确跳闸，双侧阀转为冷备用状态。
- h) 依次对每一套冗余直流控制系统重复上述 a) —g) 步骤，记录对应的信号和事件记录。

5.3.4 阀基控制系统桥臂过流保护跳闸试验

在交/直流一次设备不带电、柔直换流阀及储能阀均为冷备用状态下进行该试验。

试验内容和要求如下：

- a) 将第一套直流控制系统设置为“运行”状态。
- b) 投入第一套直流控制系统的出口跳闸压板。
- c) 关闭冗余直流控制系统主机。
- d) 通过置数方式，在阀基控制系统中注入大于保护定值的桥臂过流故障量。
- e) 阀基控制系统的桥臂过流保护应正确动作，出口断路器跳闸，双侧阀转为冷备用状态。
- f) 依次对每一套冗余直流控制系统重复上述 a) —e) 步骤，记录对应的信号和事件记录。

5.3.5 阀基控制系统切换失败保护跳闸试验

在交/直流一次设备不带电、柔直换流阀及储能阀均为冷备用状态下进行该试验。

试验内容和要求如下：

- a) 将第一套直流控制系统设置为“运行”状态。
- b) 投入第一套直流控制系统的出口跳闸压板。
- c) 关闭冗余直流控制系统主机。
- d) 模拟备套、主套阀基控制系统与极控系统的通信链路相继中断。
- e) 切换失败保护应正确动作，相应开关断路器应正确跳闸，双侧阀转为冷备用状态。
- f) 依次对每一套冗余直流控制系统重复上述 a) —e) 步骤，记录对应的信号和事件记录。

5.3.6 阀基控制系统消防跳闸试验

在交/直流一次设备不带电、柔直换流阀及储能阀均为冷备用状态下进行该试验。

试验内容和要求如下：

- a) 将第一套直流控制系统设置为“运行”状态。
- b) 投入第一套直流控制系统的出口跳闸压板。
- c) 关闭冗余直流控制系统主机。
- d) 断开消防系统两套控制器的供电电源，模拟其自检异常故障。
- e) 异常信号经阀基控制系统送至极控系统，触发保护跳闸逻辑，相应出口断路器应正确跳闸，双侧阀转为冷备用状态。
- f) 依次对每一套冗余直流控制系统重复上述 a) —e) 步骤，记录对应的信号和事件记录。

5.4 抗干扰试验

在储能阀一次设备不带电、系统二次设备屏柜已安装完成并带电运行的条件下进行该试验。

试验内容和要求如下：

- a) 开启二次屏柜柜门。
- b) 在屏柜前门及后门正前方 20cm 范围内，使用发射功率为 3W~5W 的站内通信对讲机或移动

通信终端进行通话操作。

- c) 试验过程中，屏柜内二次设备应运行正常，不得出现异常告警、误动作或通信中断等现象。
- d) 关闭二次屏柜柜门，重复执行 b) —c) 步骤，记录对应的信号和事件记录。

5.5 柔直换流阀充电试验

在柔直换流阀接线处于正常运行方式、阀冷系统正常投运、储能阀已可靠隔离的条件下进行该试验。试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“STATCOM”，直流控制系统为“运行”状态，柔直换流阀选择“自动顺序控制模式”。
- b) 执行顺序控制操作，将柔直换流阀由冷备用顺控至热备用状态，进行充电。
- c) 检查启动回路有无过热，启动电阻是否已自动切出。
- d) 检查阀基控制系统回报模块电压和状态信号，模块电压和直流电压应符合设计要求；阀基控制系统应正确工作，预检功能正常。
- e) 测量交流进线电压，验证其幅值与相序正确。
- f) 隔离直流控制系统的外部二次电压输入回路，接入继电保护测试仪模拟交流进线电压。
- g) 在交流进线断路器断开的情况下，执行柔直换流阀短时解锁，监测阀侧电压波形，并与测试仪输入的模拟电压进行比对，校验相序、相位是否一致，逆变电压电平数是否正确，确认是否符合设计要求。
- h) 闭锁柔直换流阀，将系统恢复至冷备用状态。
- i) 恢复控制系统的外部二次电压回路及所有临时修改的定值。

5.6 STATCOM 运行方式试验

在柔直保护正常投入、交流系统电压正常、试验无功功率满足调度许可范围的条件下进行该试验，验证柔直换流阀定无功运行性能，校核控制保护系统电流二次相量。

试验内容和要求如下：

- a) 将双侧阀置于冷备用状态，设置系统运行方式为“STATCOM”，控制方式为“无功控制”。
- b) 将柔直换流阀顺控至热备用状态。
- c) 在极控后台设置无功功率指令为 0Mvar
- d) 执行柔直换流阀短时解锁测试，时长分别为 10ms 和 500ms，检查交流侧电压幅值与频率。
- e) 解锁柔直换流阀，待系统进入稳态后，维持该状态 15 分钟，记录相关数据。
- f) 缓慢调整无功功率指令至容性最小无功功率，达到稳态后维持 15 分钟，记录相关数据。调节过程中密切监视网侧交流电压，若越限则立即暂停无功调整。
- g) 检查阀侧交流电流、上/下桥臂电流等电流相量，确认无误后投入相关母线保护。
- h) 将无功功率指令缓慢调整回 0Mvar，达到稳态后维持 15 分钟，记录相关数据。
- i) 缓慢调整无功功率指令至感性最小无功功率，达到稳态后维持 15 分钟，记录相关数据。调节过程中同样监视网侧交流电压，防止越限。
- j) 保存所有试验记录与数据。

试验中，无保护动作，实际输出无功功率与指令值保持一致，其误差宜在 3% 以内。

5.7 交流电压控制试验

在交流系统电压正常、试验电压设定值满足调度许可范围的条件下进行该试验，验证柔直换流阀定电压运行性能。

试验内容和要求如下：

- a) 将柔直换流阀置于冷备用状态，设置系统运行方式为“STATCOM”，控制方式为“无功控制”。
- b) 将柔直换流阀顺控至热备用状态，设置无功指令设为 0Mvar。
- c) 解锁柔直换流阀。

- d) 待系统稳态后，由极控后台下发实际交流电压死区值为 0.01kV，将控制方式由无功控制切换为交流电压控制，设定电压参考值为当前实际值，并设置电压变化速率为 1kV/min。
- e) 将交流电压指令值缓慢下调 0.5kV。
- f) 待系统达到新的稳态后，维持 15 分钟，记录电压数据。
- g) 将交流电压指令值缓慢上调 0.5kV。
- h) 待系统再次达到稳态后，确认无功输出在允许范围内，维持 15 分钟，记录电压数据。
- i) 下发柔直换流阀闭锁指令，停运系统。
- j) 保存所有试验记录与数据。

试验中，无保护动作，实际网侧电压与指令值保持一致，其误差宜在 0.5%范围内。

5.8 柔直换流阀开路升压试验

5.8.1 柔直换流阀手动空载加压试验

在储能阀处冷备用状态且不带电的状态下进行试验，以验证柔直换流阀一次设备的绝缘性能，并检验空载加压功能的逻辑正确正确性。

试验内容和要求如下：

- a) 将柔直换流阀置于冷备用状态，设置系统运行方式为“STATCOM”。
- b) 顺控柔直换流阀至热备用状态，投入并设置柔直换流阀空载加压功能为手动模式，等待空载加压允许信号触发。
- c) 将直流电压参考值设定为 90%额定电压，并设定升降速率。发令解锁柔直换流阀并开始升压，电压达到设定值后，保持该状态不少于 0.5h。
- d) 将电压参考值升至额定电压，达到设定值后，保持该状态不少于 1h。
- e) 将电压参考值回调至 90%额定电压，待电压降至设定值后，闭锁柔直换流阀。
- f) 待直流电压自然下降至最小可运行电压后，再次投入空载加压功能，解锁柔直换流阀，重新升压稳定至 90%额定电压。
- g) 将电压参考值修改为额定电压，随即按下紧急停运按钮，确认相应断路器跳闸、柔直换流阀已闭锁且到冷备用状态。
- h) 记录电压下降过程波形，并计算直流电压下降时间常数。
- i) 保存所有试验记录与数据，待电容器能量释放完毕后结束试验。

试验中，直流电压升/降过程应平稳，阀厅及直流场设备应无明显放电，阀避雷器及直流场避雷器不应动作；交 / 直流系统保护不应动作。

5.8.2 柔直换流阀自动空载加压试验

试验内容和要求如下：

- a) 将柔直换流阀置于冷备用状态，设置系统运行方式为“STATCOM”。
- b) 顺控柔直换流阀至热备用状态，投入并设置柔直换流阀空载加压功能为自动模式，待空载加压允许信号触发。
- c) 系统按设定速率自动将直流电压从 0 升至额定电压，到达后保持该状态至少 120s。
- d) 保持阶段结束后，系统自动闭锁柔直换流阀，记录直流电压从额定电压自然下降至最小可运行电压的波形。
- e) 退出空载加压自动模式，保存所有试验记录与数据。

试验中，直流电压升/降过程应平稳，阀厅及直流场设备应无明显放电，阀避雷器及直流场避雷器不应动作；交 / 直流系统保护不应动作。

5.9 储能阀开路升压试验

5.9.1 储能阀手动空载加压试验

在柔直换流阀处冷备用状态且不带电的状态下进行试验，以验证直流场一次设备的绝缘性能，并检验空载加压功能的逻辑正确正确性。

试验内容和要求如下：

- a) 投入直流低电压、直流过电压和直流电压不平衡等保护，投入黑启动功能。
- b) 将柔直换流阀置于冷备用状态，设置系统运行方式为“STATCOM”。
- c) 顺控储能阀至热备用状态，投入并设置储能阀空载加压功能为手动模式，待空载加压允许信号触发。
- d) 将直流电压参考值设定为 50%额定电压，并设定升降速率为 50%额定电压/min。发令解锁储能阀并开始升压，电压达到设定值后，保持该状态不少于 0.5h。
- e) 将电压参考值升至额定电压，达到设定值后，保持该状态不少于 0.5h。
- f) 将电压参考值回调至 50%额定电压，待电压降至设定值后，记录电压波形。
- g) 将电压参考值设置为 0，当直流电压降至约 0 时，闭锁储能阀。
- h) 再次投入空载加压功能，解锁储能阀，重新升压稳定至 50%额定电压。
- i) 将电压参考值修改为额定电压，电压达到设定值后，随即按下紧急停运按钮，记录电压下降过程波形，并计算直流电压下降时间常数。
- j) 保存所有试验记录与数据，待电容器能量释放完毕后结束试验。

试验中，直流电压升/降过程应平稳，阀厅及直流场设备应无明显放电，阀避雷器及直流场避雷器不应动作；交 / 直流系统保护不应动作。

5.9.2 储能阀自动空载加压试验

试验内容和要求如下：

- a) 投入直流低电压、直流过电压和直流电压不平衡等保护，投入黑启动功能。
- b) 将柔直换流阀置于冷备用状态，设置系统运行方式为“STATCOM”。
- c) 顺控储能阀至热备用状态，投入并设置储能阀空载加压功能为手动模式，待空载加压允许信号触发。
- d) 将直流电压参考值设定为额定电压，发令解锁储能阀。
- e) 按设定速率自动将直流电压从 0 升至额定电压，到达后保持该状态至少 120s。
- f) 保持阶段结束后，系统自动闭锁储能侧，记录直流电压下降过程的波形。
- g) 退出空载加压自动模式，保存所有试验记录与数据。

试验中，直流电压升/降过程应平稳，阀厅及直流场设备应无明显放电，阀避雷器及直流场避雷器不应动作；交 / 直流系统保护不应动作。

5.10 储能阀充电试验

在储能阀、阀冷系统、控制保护系统运行正常的条件下进行该试验，验证储能阀一次设备的绝缘性能。

试验内容和要求如下：

- a) 将双侧柔直换流阀和储能阀置于冷备用状态。
- b) 将系统运行方式设置为“HVDC”。
- c) 将双侧阀均设置为“自动顺序控制模式”。
- d) 将双侧阀由冷备用顺控至热备用状态。
- e) 核查双侧阀充电有无异常，保存所有试验记录与数据。

试验中，储能阀一次设备运行正常。

6 端对端系统试验

6.1 试验的准备条件

- 1) 交流场设备带电试验完成，试验合格；
- 2) 交流侧母线电压波动范围正常，在调度允许范围内；
- 3) 交流系统已经准备好通过柔直换流阀向储能阀输送额定功率；
- 4) 柔直换流阀的 STATCOM 试验、开路升压试验和储能阀开路升压试验已完成；
- 5) 应满足 5.1 相关要求。

6.2 初始运行试验

6.2.1 正常启停试验

正常启停试验检验和考核控制保护系统对直流正常启停逻辑功能、被试站能否平滑地解锁及闭锁，控制保护系统二次相量校核。

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压。
- b) 储能阀确认热备允许条件满足后，由冷备用状态顺控至热备用状态。
- c) 柔直换流阀确认热备允许条件满足后，由冷备用状态顺控至热备用状态进行不控充电，并监视网侧电压。
- d) 对储能阀执行短时解锁测试，时长分别为 10ms 和 500ms，检查并记录直流电压是否正常。
- e) 在解锁条件满足后，正式解锁储能阀。
- f) 待直流电压升至额定电压且稳定后，对柔直换流阀执行短时解锁测试，时长分别为 10ms 和 500ms，检查并记录交流侧电压幅值与频率是否正常。
- g) 在解锁条件满足后，正式解锁柔直换流阀。
- h) 系统稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ ，功率上升速率为 $10\%P_N/\text{min}$ ，到达后稳定运行 1min。
- i) 修改交流侧有功功率参考值为 P_N ，系统稳定后，记录直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率和阀侧无功功率。
- j) 将有功功率指令降回 0MW，核实系统按预设速率平稳降功至 0，闭锁双侧阀。
- k) 保存所有试验记录与数据。

试验中，两侧监视数据正常，解闭锁逻辑、启停时序配合正确，无任何交、直流保护误动作。

6.2.2 紧急停运试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压。
- b) 解锁双侧换流阀。
- c) 待直流电压到达额定电压后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 在极控系统按下“紧急停机”按钮，记录停机过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率和跳闸信号。
- e) 核实柔直换流阀与储能侧储能阀是否已同时闭锁，交流侧断路器是否已跳闸，双侧是否均在冷备用状态。
- f) 保存所有试验记录与数据。

试验中，直流系统正确跳闸，在紧急停运过程中设备应在过电压及过电流范围内，符合设计规范。

6.2.3 控制系统手动切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压到达额定电压后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 将第一套直流控制系统 PCPA 切换到备用。
- e) 检查备用直流控制系统 PCPB 变为值班系统，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率和状态信号。
- f) 核实阀基控制系统是否由 A 系统切换到备用 B 系统。
- g) 在交流侧将备用直流控制系统 PCPB 切换到备用。
- h) 检查第一套直流控制系统 PCPA 变为值班系统，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率和状态信号。
- i) 核实阀基控制系统是否由备用 B 系统切换到 A 系统。

试验中控制系统切换过程平稳，直流输电系统继续正常运行，对直流功率无影响。

6.2.4 站用电源切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压到达额定电压后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 备自投充电装置充电灯亮后，断开备自投装置站用电母线/进线 PT 空开模拟母线失压，触发备自投动作
- e) 检查对应进线开关是否正确跳闸、备用电源开关是否正确合闸，记录切换过程的备自投切换时间、直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率和状态信号。
- f) 试验完成后系统切换回正常运行方式。

试验中，备自投切换逻辑正确，动作时间符合要求，站用电负荷运行正常。

6.3 保护跳闸试验

6.3.1 交流连接线过流保护跳闸试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 系统进入稳定运行状态后，临时降低第一套直流保护系统、第二套直流保护系统的交流连接线过流保护定值。
- e) 检查并确认：交流连接线过流保护正确动作，柔直换流阀与储能侧储能阀均闭锁，交流侧相应出口断路器跳闸，系统双侧均已自动转为冷备用状态，记录闭锁信号、状态指示、交流过压保护信号、交流过压保护命令。
- f) 试验后，恢复交流连接线过流保护的原始定值。

试验中，交流连接线过电流保护逻辑正确，出口断路器正确动作，不拒动或误动。

6.3.2 阀基控制系统桥臂过流保护跳闸试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统，关闭备用直流控制系统主机。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 系统进入稳定运行状态后，临时降低阀基控制系统桥臂过流保护定值。
- e) 核实阀基控制系统桥臂过流保护动作，柔直换流阀及储能阀均闭锁，交流侧相应出口断路器已跳闸，双侧均已转冷备用状态，记录闭锁信号。
- f) 试验后，恢复阀基控制系统桥臂过流保护定值。

试验中，阀控桥臂过流保护跳闸功能逻辑正确，出口断路器正确动作，不拒动或误动。

6.3.3 阀基控制系统切换失败保护跳闸试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统，关闭备用直流控制系统主机。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ 。
- d) 模拟备套、主套阀基控制系统与极控系统的通信链路相继中断。
- e) 核实交流侧相应出口断路器已跳闸，柔直换流阀及储能阀均闭锁，双侧均已转冷备用状态，记录闭锁和状态信号。
- f) 恢复原有运行方式，切换至另一套直流控制系统作为值班系统，重复 a) -e) 试验步骤。

试验中，阀基控制系统切换失败保护跳闸逻辑功能正确，出口断路器正确动作，不拒动或误动。

6.3.4 阀基控制系统消防跳闸试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统，关闭备用直流控制系统主机。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ 。
- d) 断开消防系统两套控制器的供电电源，模拟其自检异常故障，该异常信号经阀基控制系统送至极控系统，触发保护跳闸。
- e) 核实交流侧相应出口断路器已跳闸，柔直换流阀及储能阀均闭锁，双侧均已转冷备用状态。
- f) 恢复原有运行方式，切换至另一套直流控制系统作为值班系统，重复 a) -e) 试验步骤。

试验中，阀基控制系统切换失败保护跳闸逻辑功能正确，出口断路器正确动作，不拒动或误动。

6.3.5 冷却系统保护跳闸试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统，关闭备用直流控制系统主机。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 在柔直换流阀冷却系统上模拟跳闸信号。
- e) 核实交流侧相应出口断路器已跳闸，柔直换流阀及储能阀均闭锁，双侧均已转冷备用状态，记

录闭锁和状态信号。

- f) 恢复原有运行方式，在储能阀冷却系统上模拟跳闸信号。
- g) 核实交流侧相应出口断路器已跳闸，柔直换流阀及储能阀均闭锁，双侧均已转冷备用状态，记录闭锁和状态信号。

试验中，冷却系统保护跳闸逻辑功能正确，出口断路器正确动作，不拒动或误动。

6.4 控制系统自检与系统故障切换试验

6.4.1 主值控制系统电源故障切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 确认备用直流控制系统状态正常。
- e) 断开第一套直流控制系统机柜供电电源。
- f) 核实备用直流控制系统切换为值班系统，系统继续正常运行，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、闭锁信号和状态信号。
- g) 切换第一套直流控制系统为值班系统。
- h) 断开主套阀基控制系统机柜供电电源。
- i) 核实备用直流控制系统切换为值班系统，系统继续正常运行，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、闭锁信号和状态信号。

试验中，控制系统切换过程平稳，直流输电系统继续正常运行，对直流传输功率无影响，系统自监视功能和事件记录功能正常。

6.4.2 主值系统处理器故障切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 确认备用直流控制系统状态正常。
- e) 在柔直换流阀直流控制系统上模拟主值系统处理器故障。
- f) 核实第一套直流控制系统退出运行。
- g) 核实备用直流控制系统切换为值班系统，系统继续正常运行，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、闭锁信号和状态信号。

试验中，控制系统切换过程平稳，直流输电系统继续正常运行，对直流传输功率无影响，系统自监视功能和事件记录功能正常。

6.4.3 主值控制系统总线故障切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 确认备用直流控制系统状态正常。
- e) 在柔直换流阀直流控制系统模拟总线故障。

- f) 核实第一套直流控制系统退出运行，状态为“严重故障”。
- g) 核实备用直流控制系统切换为值班系统，系统继续正常运行，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、闭锁信号和状态信号。

试验中，控制系统切换过程平稳，直流输电系统继续正常运行，对直流传输功率无影响，系统自监视功能和事件记录功能正常。

6.4.4 设备间通信故障切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 确认备用直流控制系统状态正常。
- e) 模拟柔直换流阀设备间通信故障。
- f) 核实备用直流控制系统切换为值班系统，系统继续正常运行，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、闭锁信号和状态信号。
- g) 切换第一套直流控制系统为值班系统。
- h) 模拟储能阀设备间通信故障。
- i) 核实备用直流控制系统切换为值班系统，系统继续正常运行，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、闭锁信号和状态信号。

试验中，控制系统切换过程平稳，直流输电系统继续正常运行，对直流传输功率无影响，系统自监视功能和事件记录功能正常。

6.5 控制模式切换试验

6.5.1 有功功率控制模式切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ 。
- d) 系统稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 0MW 。
- e) 将柔直换流阀“有功功率控制”模式改为“直流电压控制”模式。
- f) 核实储能阀由“直流电压控制”切换为“直流电流控制”模式，系统运行正常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、解锁信号。
- g) 将储能阀“直流电流控制”模式改为“直流电压控制”模式。
- h) 核实柔直换流阀由“直流电压控制”切换为“有功功率控制”模式，系统运行正常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、解锁信号。

试验中，控制模式切换快速且切换后系统稳定运行。

6.5.2 无功功率控制模式切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ 。
- d) 系统稳定后，修改交流侧无功功率参考值为 0 。

- e) 在极控系统中，设定交流电压控制死区值为 0.01kV，将交流电压控制参考值设定为当前交流母线电压实际测量值。
- f) 将柔直换流阀“无功功率控制”模式改为“交流电压控制”模式。
- g) 核实交流电压指令为当前系统侧电压，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、解锁信号。
- h) 将柔直换流阀“交流电压控制”模式改为“无功功率控制”模式。
- i) 核实无功功率指令为当前输出无功值，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、解锁信号。
- j) 将交流侧无功功率参考值改为 0。

试验中，控制模式切换快速且切换后系统稳定运行。

6.5.3 虚拟同步控制与定功率控制模式切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 0。
- d) 投入虚拟同步控制功能。
- e) 核实柔直换流阀切换为“虚拟同步控制”模式，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。
- f) 退出虚拟同步控制功能。
- g) 核实柔直换流阀切换为“定功率控制”模式，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。

试验中，控制模式切换快速且切换后系统稳定运行。

6.5.4 柔直换流阀主从水泵切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 10%PN，功率升降速率为 10%PN/min。
- d) 由极控系统下发主从水泵切换指令。
- e) 核实切换功能正常，冷却水回路的压力和流量无异常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、状态信号、水泵压力及流量。
- f) 由极控系统发从主水泵切换指令。
- g) 核实切换功能正常，冷却水回路的压力和流量无异常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、状态信号、水泵压力及流量。
- h) 模拟备用泵故障，柔直换流阀进行从主水泵切换试验，无法进行主从水泵切换。
- i) 核实切换功能正常，冷却水回路的压力和流量无异常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、状态信号、水泵压力及流量。

试验中，主从水泵切换快速且切换后系统稳定运行；切换过程中冷却水回路的压力和流量无异常。

6.5.5 储能阀主从水泵切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 10%PN，功率升降速率为

10%PN/min。

- d) 由电池管理系统下发主从水泵切换指令。
 - e) 核实切换功能正常，冷却水回路的压力和流量无异常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、状态信号、水泵压力及流量。
 - f) 由电池管理系统发从主水泵切换指令。
 - g) 核实切换功能正常，冷却水回路的压力和流量无异常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、状态信号、水泵压力及流量。
- 试验中，主从水泵切换快速且切换后系统稳定运行；切换过程中冷却水回路的压力和流量无异常。

6.5.6 柔直换流阀冷却主从控制系统切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
 - b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
 - c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为10%PN，功率升降速率为10%PN/min。
 - d) 由柔直换流阀冷却系统下发主从控制系统切换指令。
 - e) 核实切换功能正常，冷却水回路的压力和流量无异常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、状态信号、水泵压力及流量。
 - f) 由柔直换流阀冷却系统发从主控制系统切换指令。
 - g) 核实切换功能正常，冷却水回路的压力和流量无异常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、状态信号、水泵压力及流量。
- 试验中，主从水泵切换快速且切换后系统稳定运行；切换过程中冷却水回路的压力和流量无异常。

6.5.7 储能阀冷却主从控制系统切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
 - b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
 - c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为10%PN，功率升降速率为10%PN/min。
 - d) 由储能阀冷却系统下发主从控制系统切换指令。
 - e) 核实切换功能正常，冷却水回路的压力和流量无异常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、状态信号、水泵压力及流量。
 - f) 由储能阀冷却系统发从主控制系统切换指令。
 - g) 核实切换功能正常，冷却水回路的压力和流量无异常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、状态信号、水泵压力及流量。
- 试验中，主从水泵切换快速且切换后系统稳定运行，切换过程中冷却水回路的压力和流量无异常。

6.6 功率升降试验

6.6.1 有功功率升降试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，控制模式为“定功率控制”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 P_N ，功率升降速率为10% P_N /min。
- d) 核实功率升降过程平稳，功率升降结束后功率都达到了整定值，记录切换过程的直流功率、直

流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。

- e) 修改交流侧有功功率参考值为 0。
- f) 核实功率升降过程平稳，功率升降结束后功率都达到了整定值，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。
- g) 修改交流侧有功功率参考值为 $-P_N$ 。
- h) 核实功率升降过程平稳，功率升降结束后功率都达到了整定值，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。
- i) 修改交流侧有功功率参考值为 0。
- j) 核实功率升降过程平稳，功率升降结束后功率都达到了整定值，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。

试验中，系统在有功功率控制模式下，能够依据设定的功率整定值及功率升降速率，平稳、线性地调节直流功率至目标值，控制误差宜保持在 1%以内，且不应引起其他交/直流保护误动作。

6.6.2 有功功率升降过程中控制系统切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，控制模式为“定功率控制”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 P_N ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 在功率上升过程中，手动将第一套直流控制系统切换到第二套备用直流控制系统，再将第二套备用直流控制系统切换回第一套直流控制系统。
- e) 核实功率继续上升，功率指令无暂态变化，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。
- f) 修改交流侧有功功率参考值为 0。
- g) 在功率下降过程中，手动将第一套直流控制系统切换到第二套备用直流控制系统，再将第二套备用直流控制系统切换回第一套直流控制系统。
- h) 核实功率继续下降，功率指令无暂态变化，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。

试验中，控制系统切换过程应平稳，直流输电系统继续正常运行，对直流传输功率无影响。

6.6.3 有功功率反转试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，控制模式为“定功率控制”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 P_N ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 待系统稳定运行后，修改交流侧有功功率参考值为 $-P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- e) 核实功率在预定的时间内反转，直流电压、直流功率的变化是平稳的，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。
- f) 修改交流侧有功功率参考值为 P_N ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- g) 核实有功功率在预定的时间内反转，直流电压、直流功率的变化是平稳的，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。

试验中，有功功率在预定的时间内反转，交流电压、交流电流，交流功率、直流电压、直流功率的变化平稳。

6.6.4 无功功率升降试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，控制模式为“定功率控制”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 P_N ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- d) 设置无功功率升降速率为 $10\%Q_N/\text{min}$ 。
- e) 缓慢调节无功功率至最小无功功率值，并在该功率水平下至少保持 5min。
- f) 缓慢调节无功功率至 Q_N ，并在该功率水平下至少保持 5min。
- g) 核实功率升降过程平稳，功率升降结束后功率都达到了整定值，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。
- h) 修改交流侧有功功率参考值为 $-P_N$ 。
- i) 缓慢调节无功功率至最小无功功率值，并在该功率水平下至少保持 5min。
- j) 缓慢调节无功功率至 Q_N ，并在该功率水平下至少保持 5min。
- k) 核实功率升降过程平稳，功率升降结束后功率都达到了整定值，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。

试验中，在无功功率控制模式下，能够依据设定的功率整定值及功率升降速率，平稳、线性地调节无功功率至目标值，控制误差宜保持在 3%以内，且不应引起其他交/直流保护误动作。

6.6.5 无功功率升降过程中控制系统切换试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，控制模式为“定功率控制”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧无功功率参考值为 Q_N ，功率升降速率为 $10\%Q_N/\text{min}$ 。
- d) 在功率上升过程中，手动将第一套直流控制系统切换到第二套备用直流控制系统，再将第二套备用直流控制系统切换回第一套直流控制系统。
- e) 核实功率继续上升，无功功率指令无暂态变化，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、状态信号。
- f) 修改交流侧无功功率参考值为 0，功率升降速率为 $10\%Q_N/\text{min}$ 。
- g) 在功率下降过程中，手动将第一套直流控制系统切换到第二套备用直流控制系统，再将第二套备用直流控制系统切换回第一套直流控制系统。
- h) 核实功率继续下降，无功功率指令无暂态变化，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率、状态信号。

试验中，控制系统切换过程应平稳，直流输电系统继续正常运行，对直流传输功率无影响。

6.7 环流抑制试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，控制模式为“定功率控制”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，设置交流侧有功功率参考值为 0。
- d) 修改交流侧无功功率参考值为 $10\%Q_N$ ，功率升降速率为 $10\%Q_N/\text{min}$ 。
- e) 系统运行稳定后，投入相间环流抑制功能。

- f) 核查桥臂电流谐波分量。
- g) 退出相间环流抑制功能。
- h) 核查桥臂电流谐波分量。
- i) 修改交流侧有功功率参考值为 $10\%P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- j) 系统运行稳定后，投入相间环流抑制功能。
- k) 核查桥臂电流谐波分量。
- l) 退出相间环流抑制功能。
- m) 核查桥臂电流谐波分量。

试验中，试验过程无保护动作，实际输出功率与指令值保持一致。在环流抑制投入时，桥臂环流分量应满足工程技术规范书要求。

6.8 动态性能试验

6.8.1 有功功率指令阶跃试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，控制模式为“定功率控制”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，在交流侧施加持续时间为 5s，幅值为 $10\%P_N$ 的有功功率指令阶跃。
- d) 核实有功功率阶跃响应时间及超调量满足设计要求。

6.8.2 无功功率指令阶跃试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，控制模式为“定功率控制”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧无功功率参考值为 $10\%Q_N$ ，功率升降速率为 $10\%Q_N/\text{min}$ 。
- d) 在交流侧施加持续时间为 1s，幅值为 $10\%Q_N$ 的无功功率指令阶跃。
- e) 核实无功功率阶跃响应时间及超调量满足设计要求。

6.8.3 直流电压指令阶跃试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，控制模式为“定功率控制”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 系统稳定运行后，在储能阀施加持续时间为 1s，幅值为 0.02p.u.的直流电压指令阶跃。
- d) 核实直流电压阶跃响应时间及超调量满足设计要求。

6.9 站用直流电源故障试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，控制模式为“定功率控制”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 系统稳定运行后，手动断开一路站用直流电源。
- d) 核实柔直换流阀及储能阀是否运行正常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀

侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。

- e) 手动合上步骤 c) 断开的站用直流电源。
- f) 核实柔直换流阀及储能阀是否运行正常，记录切换过程的直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。

试验中，直流输电系统继续正常运行，对直流传输功率无影响。

6.10 就地控制试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，控制模式为“定功率控制”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 将柔直换流阀控制位置切换为“就地”模式，后续操作在就地控制柜上执行。
- c) 确认柔直换流阀满足热备允许条件，将其由冷备用状态顺控至热备用状态，完成不控充电，并密切监视网侧电压。
- d) 确认储能阀满足热备允许条件后，将其由冷备用状态顺控至热备用状态。
- e) 待储能阀解锁允许条件满足，执行“解锁储能阀”命令。
- f) 待柔直换流阀解锁允许条件满足，执行“解锁柔直换流阀”命令。
- g) 待直流电压升至额定电压并稳定后，修改交流侧有功功率参考值为 $30\%P_N$ ，功率升降速率为 $10\%P_N/\text{min}$ 。
- h) 在功率上升过程中执行“暂停”操作，核实功率上升过程可被中止，且暂停期间功率保持平稳。
- i) 取消暂停，待有功功率到达设定值，记录直流功率、直流电压、直流电流、阀侧电压、阀侧电流、阀侧有功功率、阀侧无功功率。
- j) 修改交流侧有功功率参考值为 0，功率升降速率不变。
- k) 在功率下降过程中执行“暂停”操作，核实功率下降过程可被中止且保持平稳，随后取消暂停使功率平稳降至 0。
- l) 依次执行“闭锁柔直换流阀”及“闭锁储能阀”命令。
- m) 核实双侧均已停运并处于热备用状态，将柔直换流阀及储能阀由热备用状态顺控至冷备用状态。

试验中，直流系统就地控制柜操作功能正常。

6.11 热运行试验

试验内容和要求如下：

- a) 设置系统运行方式为“HVDC”，控制模式为“定功率控制”，直流电压设定值为额定电压，投入直流控制系统。
- b) 解锁双侧柔直换流阀和储能阀。
- c) 待直流电压升至额定电压并稳定后，设置交流侧有功功率参考值，以 0 、 $-20\%P_N$ 、 $-40\%P_N$ 、 $-60\%P_N$ 、 $-80\%P_N$ 逐级下降，功率下降速率为 $20\%P_N/\text{min}$ ，每个功率控制点持续运行 60s。
- d) 修改交流侧有功功率参考值为 $-P_N$ ，系统稳定后持续运行 1h。
- e) 核实功率升降过程平稳，功率升降结束后功率都达到了整定值。
- f) 设置交流侧有功功率参考值，以 $-80\%P_N$ 、 $-60\%P_N$ 、 $-40\%P_N$ 、 $-20\%P_N$ 、 0 、 $20\%P_N$ 、 $40\%P_N$ 、 $60\%P_N$ 、 $80\%P_N$ 逐级上升，功率升降速率为 $20\%P_N/\text{min}$ ，每个功率控制点持续运行 60s。
- g) 修改交流侧有功功率参考值为 P_N ，系统稳定后持续运行 1h。
- h) 核实功率升降过程平稳，功率升降结束后功率都达到了整定值。
- i) 在系统稳定运行在 $-P_N$ 和 P_N 期间，结合红外、紫外测试核查以下项目：
 - ①系统运行参数，如交流母线电压、阀侧电流、直流电压、直流电流、有功功率等均应与设计值相符。
 - ②桥臂电抗器、平波电抗器本体温度应在技术规范规定的范围内。
 - ③柔直换流阀和储能阀冷却系统进出水的温度应在技术规范规定的范围内。
 - ④柔直换流阀和储能阀结温应在设计允许的范围

内。⑤直流场、交流场和阀厅、母线、接头线夹、刀闸、设备等的温度值都应在技术规范允许范围内。⑥分析直流电流的1次~50次谐波，计算出的等效干扰电流不应大于工程技术规范规定的数值。⑦分析交流母线电压中的2~50次谐波，计算出的各次谐波畸变率、总谐波畸变率、电压谐波波形系数应不大于技术规范书规定的数值。⑧测量站辅助系统功率损耗，计算的站用电负载功率不应大于设计值。

试验中，直流系统在有功功率控制模式下，能够依据设定的功率整定值及功率升降速率，平稳、线性地调节直流功率至目标值，控制误差宜保持在1%以内；各设备温度处于正常范围；各项指标满足设计要求。

7 试运行试验

7.1 试运行应在站系统和端对端系统试验完成、试验中发现的问题已解决并重新试验检验完毕后启动。

7.2 根据确定的试运行方案安排试运行期间的负荷水平、运行方式、试运行时间及试运行期间需进行的其他工作。

7.3 高压直挂式电化学储能系统工程的试运行时间不应小于168h，每日满功率充电和放电时间各不少于2小时。

7.4 在试运行期间，每隔1小时进行运行参数记录，记录数据包含柔直换流阀和储能阀侧电流、电压以及功率，阀冷系统相关运行参数，阀控制系统运行参数，主设备温升，储能电池状态等。

附录 A

(资料性)

高压直流直挂式电化学储能系统拓扑结构图

高压直流直挂式电池储能系统拓扑结构如图 A 所示。

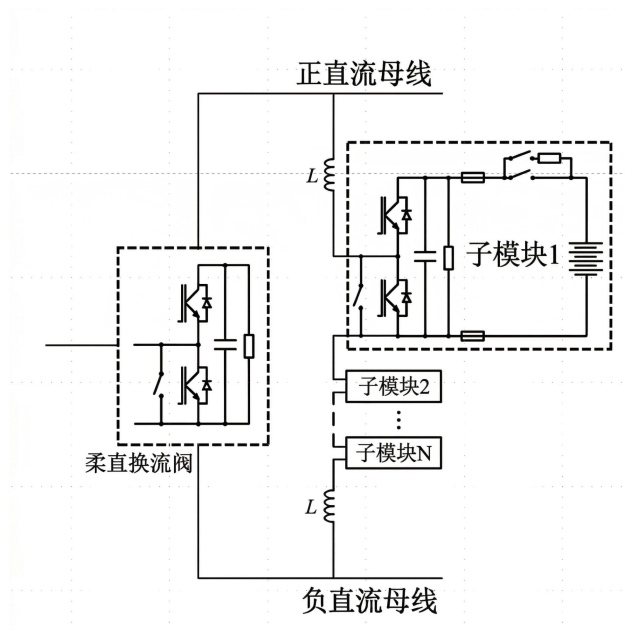


图 A 高压直流直挂式电池储能系统拓扑结构

附录 B

(资料性)

高压直流直挂式电化学储能系统启动调试试验项目

高压直流直挂式电化学储能系统启动调试试验项目如表 B.1 所示。

表 B.1 高压直流直挂式电化学储能系统启动调试试验项目

序号	检测项目	
1	站系统试验	不带电顺序控制试验
2		出口跳闸试验
3		抗干扰试验
4		柔直换流阀充电试验
5		STATCOM 运行方式试验
6		交流电压控制试验
7		柔直换流阀开路升压试验
8		储能阀开路升压试验
9		储能阀充电试验
10	端对端系统试验	初始运行试验
11		保护跳闸试验
12		控制系统自检与系统故障切换试验
13		控制模式切换试验
14		功率升降试验
15		环流抑制试验
16		动态性能试验
17		站用直流电源故障试验
18		就地控制试验
19		热运行试验
20	试运行试验	