



中华人民共和国国家标准

GB/T 38878—2020

柔性直流输电工程系统试验

System tests for the projects of high-voltage direct current (HVDC) transmission
power using voltage sourced converters (VSC)

2020-06-02 发布

2020-12-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总则 2

5 站系统试验 2

 5.1 试验的准备 2

 5.2 试验项目及要求 3

6 端对端系统试验 7

 6.1 试验的准备 7

 6.2 试验项目及要求 8

 6.3 多端系统试验 16

7 试运行 16

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国电力电子系统和设备标准化技术委员会(SAC/TC 60)归口。

本标准起草单位:南方电网科学研究院有限责任公司、西安电力电子技术研究所、西安高压电器研究院有限责任公司、全球能源互联网研究院有限公司、国网冀北电力有限公司电力科学研究院、南京南瑞继保电气有限公司、中国电力科学研究院有限公司武汉分院、许继集团有限公司、中国电力科学研究院有限公司、荣信汇科电气技术有限责任公司、国网福建省电力有限公司电力科学研究院、国网上海市电力公司检修公司、西安西电电力系统有限公司、国网安徽省电力有限公司电力科学研究院、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院、广东电网有限责任公司汕头供电局、中国南方电网有限责任公司超高压输电公司。

本标准主要起草人:饶宏、蔚红旗、周会高、庞辉、魏伟、蔡巍、许树楷、刘涛、杨晓辉、卢宇、陈俊、徐思恩、孙栩、常忠廷、唐志军、易荣、苏丰、吴士普、常立国、宋志顺、徐子萌、同聪维、王弋飞、董朝阳、董添华、刘黎、李宾宾、王磊、赵恒阳、樊道庆、龙凯华、廖其艳。



柔性直流输电工程系统试验

1 范围

本标准规定了柔性直流输电工程系统试验的总则、站系统试验、端对端系统试验和试运行的要求。

本标准适用于对称单极、不对称单极和双极接线的端对端形式柔性直流输电工程。其他形式的柔性直流输电工程也可参照使用。

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 30553 基于电压源换流器的高压直流输电

GB/T 33348 高压直流输电用电压源换流器阀 电气试验

GB/T 34118 高压直流系统用电压源换流器术语

GB/T 34139 柔性直流输电换流器技术规范

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 37011 柔性直流输电用变压器技术规范

3 术语和定义

GB/T 30553、GB/T 33348、GB/T 34118、GB/T 34139、GB/T 35703、GB/T 35745 和 GB/T 37011 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用,以下重复列出了 GB/T 34118、GB/T 37011 中的某些术语和定义。

3.1

柔性直流输电用变压器 transformer for VSC-HVDC

在交流系统连接点与一个或多个电压源换流器单元之间传输电能的变压器。

注:柔性直流输电用变压器简称为柔直变压器,在不同的应用场所,柔直变压器亦称为“联接变压器”或“换流变压器”。

[GB/T 37011—2018,定义 3.1.5]

3.2

分系统试验 subsystem test

在换流站各单体设备安装试验完成的基础上,验证整组设备功能和技术指标的试验。

3.3

站系统试验 converter station system test

在分系统试验完成的基础上,换流站相关一次设备具备带电条件,在各换流站内验证换流站功能的试验。

3.4

端对端系统试验 end to end system test

验证两端柔性直流输电系统及与之连接的交流系统相互作用的功能和特性的试验。

3.5

对称单极 symmetrical monopole

两端直流电压输出对称的单个电压源换流器。

注：即使有两种直流电压极性，也仍然使用术语“对称单极”，因为在只有一个换流器的情况下，不可能提供冗余（冗余通常对应于术语“双极”）。

[GB/T 34118—2017, 定义 9.5]

3.6

不对称单极 asymmetrical monopole

两端直流电压输出不对称的单个电压源换流器，通常一端接地。

[GB/T 34118—2017, 定义 9.6]

3.7

双极 bipole

两个或两个以上电压源换流器不对称单极构成的一个两极直流电路，两极直流电压大小一致，极性相反。

3.8

双极系统 bipolar system

由两个或两个以上采用双极接线形式的柔性直流换流站和连接它们的直流线路组成的柔性直流系统。

3.9

黑启动 black start

电力系统因故障停运导致全部停电后，通过系统中具有自启动能力电源的启动，逐渐扩大系统恢复范围，最终实现整个系统恢复的过程。

4 总则

柔性直流输电工程在正式投入运行之前，应进行系统试验，包括站系统试验和端对端系统试验。

柔性直流输电工程系统试验应制定符合相关标准、规范和工程文件要求的试验方案。

柔性直流输电工程系统试验应在换流站分系统试验完成并验收合格后进行。

在系统试验过程中，应按照试验方案对系统的稳态数据以及对系统动态和暂态过程中交流系统、直流系统(含设备)的动态响应特性、过电压、谐波性能、换流站噪声、无线电干扰和接地极状态等进行跟踪监测。系统和设备的功能和性能指标均应满足工程设计要求。

5 站系统试验

5.1 试验的准备

5.1.1 换流站应具备的条件

站系统试验前，换流站应具备的条件包括但不限于：

- a) 站用电系统已投入运行；
- b) 与站系统试验相关区域的交流场已具备带电条件；
- c) 与站系统试验相关的生产区域内的全部设备和设施均已完成验收并具备使用条件；
- d) 试验区域与其他区域之间有明显的隔离和指示标志，受试设备已标识调度命名和编号；
- e) 调度通信自动化系统以及相应的辅助设施等安装齐全，试验整定合格且试验记录齐备；

- f) 直流系统的控制参数和保护定值整定完毕,现场核对无误;
- g) 各种测量装置以及仪表齐全,符合设计要求并经校验合格;
- h) 所有电源、照明、通信、采暖、通风和防潮等设施安装试验完毕,已投入正常使用;
- i) 换流阀冷却系统完成试验,具备投运条件;
- j) 必要的备品备件及工器具齐备;
- k) 参与站系统试验的相关单位已将与试验相关的各类图纸、资料和试验报告准备齐全;
- l) 无影响站系统试验的报警信号。

5.1.2 输电线路应具备的条件

站系统试验前,输电线路(架空线和电缆)应具备的条件包括但不限于:

- a) 线路完成竣工预验收;
- b) 线路的防护设施完好无损,安全标志清晰;
- c) 线路(包括两端换流站)的临时接地线已全部拆除;
- d) 确认线路上无人作业,且安全距离内的一切作业均已停止,并完成试验前的一切检查维护工作;
- e) 线路保护(包括通道)和自动装置具备投入条件;
- f) 线路绝缘电阻和频率特性等参数测试完毕;
- g) 线路工程的各种图纸、资料、试验报告齐备。

5.1.3 接地极及接地极线路应具备的条件

站系统试验前,接地极及接地极线路应具备的条件包括但不限于:

- a) 接地极及接地极线路完成竣工预验收;
- b) 接地极及接地极线路防护设施完好无损,安全标志清晰;
- c) 影响接地极及接地极线路正常运行的临时设施已清除;
- d) 确认接地极线路上无人作业,危及人身安全和安全运行的一切作业已停止;
- e) 接地极和接地极线路工程的各种图纸、资料和试验报告齐备。

5.1.4 其他应具备的条件

站系统试验前,除 5.1.1~5.1.3 规定以外,其他应具备的条件包括:

- a) 站系统试验方案和调度方案已确定;
- b) 换流站与相关调度机构之间通信畅通;
- c) 现场试验相关人员和调度人员熟悉站系统试验方案和调度方案。

5.2 试验项目及要求

5.2.1 试验项目

站系统试验项目见表 1。

表 1 站系统试验项目

序号	试验项目名称	必做	选做
1	不带电顺序操作试验	√	
2	不带电跳闸试验	√	
3	柔直变压器充电试验	√	

表 1 (续)

序号	试验项目名称	必做	选做
4	换流器充电试验	√	
5	换流器空载输出试验	√	
6	带电跳闸试验	√	
7	抗干扰试验		√
8	静止同步补偿(STATCOM)运行方式试验	√	
9	冗余切换试验	√	
10	开路试验	√	

5.2.2 不带电顺序操作试验

该试验在换流站直流场及极进线间隔不带电的条件下进行。

采用双极系统时,试验应在两极分别进行。

试验内容及要求如下:

- 手动控制模式检验换流站交流场单步操作及联锁。顺序正确的操作应执行,错误的操作应被拒绝。
- 手动控制模式检验换流站直流场单步操作及联锁。顺序正确的操作应执行,错误的操作应被拒绝。
- 检验换流站交流场顺序自动操作控制及联锁。顺序自动操作应按顺序执行完毕。当一个顺序未完成时,应有相应报警信息,且相应设备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。
- 检验换流站直流场顺序自动操作控制及联锁。顺序自动操作应按顺序执行完毕。当一个顺序未完成时,应有相应报警信息,且相应设备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。

5.2.3 不带电跳闸试验

5.2.3.1 一般要求

在换流器不带电的条件下进行该试验,采用模拟设备跳闸信号的方法验证直流保护、直流控制、换流阀冷却控制系统、紧急停运等设备的跳闸信号传递及断路器动作的正确性。当采用双极系统时,试验应在两极分别进行。

5.2.3.2 直流保护跳闸

从直流保护系统(包括柔直变压器保护)模拟故障跳闸信号,相应柔直变压器对应的断路器应跳闸,并发出对应的信号和事件记录。

5.2.3.3 直流控制跳闸

从直流控制系统(包括阀控系统)模拟故障跳闸信号,相应柔直变压器对应的断路器应跳闸,并发出对应的信号和事件记录。

5.2.3.4 换流阀冷却控制系统跳闸

从换流阀冷却控制系统模拟故障跳闸信号,相应柔直变压器对应的断路器应跳闸,并发出对应的信号和事件记录。

5.2.3.5 火灾跳闸

从换流站消防系统模拟故障跳闸信号,相应柔直变压器对应的断路器应跳闸,并发出对应的信号和事件记录。

5.2.3.6 手动紧急停运

手动按下主控室相应换流器的紧急停运按钮,相应柔直变压器对应的断路器应跳闸,并发出对应的信号和事件记录。

5.2.4 柔直变压器充电试验

试验前应断开柔直变压器阀侧与柔直换流器的电气连接。

闭合柔直变压器网侧断路器,向柔直变压器充电。

柔直变压器充电次数应不少于5次(其中至少一次充电保持时间不小于1 h,每次充电间隔不小于5 min);柔直变压器分接开关位置和风扇启动应符合设计要求;

柔直变压器带电状态下,应验证分接开关手动控制功能符合设计要求。

试验过程中励磁涌流峰值和操作过电压应在预期的限值内,相关保护不应误动作。柔直变压器的振动和噪声应符合设计要求。

试验完成后恢复柔直变压器阀侧与柔直换流器的电气连接。

试验完成后柔直变压器油中溶解气体色谱应合格。

5.2.5 换流器充电试验

采用双极系统时,试验应在两极对每一个换流器分别进行。

换流器充电试验宜在自动顺序控制模式下进行,闭合柔直变压器网侧断路器,向柔直变压器以及处于闭锁状态且直流线路断开的换流器充电。

充电回路启动电阻应正确自动切出,阀电压和直流电压符合设计值,相关充电回路和换流器保护不应动作。

换流器充电时子模块应正常充电,功能正常,阀控系统正常工作。试验不应导致子模块损坏,如果出现子模块故障报警信号应暂停试验,确保不会发生换流器更严重故障时可继续试验。

5.2.6 带电跳闸试验

带电跳闸试验应在换流器充电试验完成后进行。带电跳闸试验项目可参照不带电跳闸试验项目,验证直流保护、直流控制、换流阀冷却控制系统、紧急停运等设备的跳闸信号传递及断路器动作的正确性。

5.2.7 换流器空载输出试验

直流线路断开时,闭合柔直变压器网侧断路器,向换流器充电。充电完成后,手动解锁换流器。

解锁前后,换流器阀控系统应正常工作,相关保护不应误动作。

换流器桥臂电压波形、相序、幅值和电平数均应符合设计要求。

5.2.8 抗干扰试验(选做)

直流系统一次设备未带电、二次设备屏柜全部运行的状态下,利用隔离开关切/合空母线。

测量相关二次传导回路的干扰电压和电流。

试验中任何二次设备屏柜不应由于干扰而出现异常。

5.2.9 STATCOM 运行方式试验

5.2.9.1 一般要求

STATCOM 运行方式试验应在换流器充电试验和带电跳闸试验完成后进行。

采用双极系统时,试验应在单极和双极运行方式下分别进行。

5.2.9.2 解锁/闭锁性能试验

直流系统在最小无功功率定值下解锁/闭锁换流器。

直流系统解锁/闭锁时序应正确,直流系统应平稳运行,交直流保护无动作。

运行人员工作站显示的数据均应正确。

5.2.9.3 保护跳闸试验

直流系统在最小无功功率水平运行,手动模拟直流保护动作,相应柔直变压器对应的断路器应跳闸,换流器应闭锁,保护动作时序应正确,交流侧和直流侧不应产生异常过电流及过电压。

5.2.9.4 紧急停运试验

直流系统在最小无功功率水平运行,手动按下主控室相应换流器的紧急停运按钮,相应柔直变压器对应的断路器应跳闸,换流器应闭锁,并发出对应的信号和事件记录。

5.2.9.5 无功功率升降试验

无功功率升降试验包括:

a) 定无功功率控制模式下的无功功率升降试验

直流系统在定无功功率控制模式运行,在无功功率允许范围内手动设定无功功率目标值和升降速率,无功功率升降过程应无明显扰动;

b) 定交流电压控制模式下的无功功率升降试验

直流系统在交流电压控制模式运行,手动设定交流电压目标值,使无功功率在允许范围内进行升降,无功功率升降过程应无明显扰动。

5.2.9.6 无功功率阶跃试验

直流系统在定无功功率控制模式运行,在无功功率允许范围内手动设定无功功率阶跃量和返回时间,无功功率阶跃响应应满足设计要求。

5.2.10 冗余切换试验

冗余切换试验的对象通常包括:

a) 直流站控系统和交流站控系统;

b) 极控制系统、换流器控制系统和阀控系统;

c) LAN 网系统、主时钟系统和运行人员工作站;

d) 换流阀冷却系统和柔直变压器冷却系统。

冗余设备切换,直流电压及无功功率应无明显波动。各系统切换后的状态及切换时间应满足设计要求。

5.2.11 开路试验

采用双极系统时,试验应在两极分别进行。

开路试验应在不带直流线路和带直流线路两种方式下分别进行,试验包括:

a) 手动模式开路试验

在手动控制模式下解锁换流器,将直流电压由最小可运行电压升至预期的目标值(或分为几个台阶升至预期的目标值),保持至少 0.5 h,再将直流电压降至最小可运行电压,闭锁换流器。试验中,阀厅、直流场设备和直流线路应无放电现象,交流保护和直流保护不应误动或拒动,直流电压升/降过程平稳。

试验后,检查阀避雷器及直流场避雷器动作情况。

b) 自动模式开路试验

在自动控制模式下解锁换流器,直流电压按预定速率由最小可运行电压升至预期的目标值,保持至少 1 min,再自动降至最小可运行电压,闭锁换流器。

直流电压升/降过程与预设的程序相符。

试验中,阀厅、直流场设备及直流线路应无放电现象,交流保护和直流保护不应误动或拒动,直流电压升/降过程平稳。

试验后,检查阀避雷器及直流场避雷器动作情况。

6 端对端系统试验

6.1 试验的准备

6.1.1 换流站应具备的条件

端对端系统试验前,换流站应具备的条件包括但不限于:

- a) 站系统试验已完成,且试验结果满足要求;
- b) 站间通信系统试验和端对端控制与保护信号传递联调均已完成,各项功能满足要求;
- c) 直流系统的控制参数和保护定值已整定完毕,现场已核对无误;
- d) 确认监控系统未出现影响端对端系统试验的报警信号。

6.1.2 输电线路应具备的条件

端对端系统试验前,输电线路应具备的条件见 5.1.2。

6.1.3 接地极及接地极线路应具备的条件

端对端系统试验前,接地极及接地极线路应具备的条件见 5.1.3。

6.1.4 其他应具备的条件

端对端系统试验前,除 6.1.1~6.1.3 规定以外,其他应具备的条件包括:

- a) 端对端系统试验方案和调度方案已确定;
- b) 换流站与相关调度机构之间通信畅通;
- c) 现场相关试验人员和调度人员对端对端系统试验方案和调度方案已熟悉。

6.2 试验项目及要求

6.2.1 单极系统试验

6.2.1.1 试验项目

单极系统试验在站系统试验完成后进行,工程采用双极接线形式时,解/闭锁性能试验、紧急停运试验、降压运行试验(适用时)、直流线路故障试验(适用时)应分别在单极大地回线和单极金属回线运行方式下进行,其他试验项目可根据现场条件选择单极大地回线或单极金属回线运行方式进行。试验项目见表 2。

表 2 单极系统试验项目

序号	试验项目名称	必做	选做	备注
1	直流侧充电试验		√	
2	解/闭锁性能试验	√		
3	紧急停运试验	√		
4	保护跳闸试验	√		
5	子模块冗余试验	√		
6	有功功率升降试验	√		
7	功率阶跃响应试验	√		
8	功率反转试验	√		适用时
9	稳态性能试验	√		
10	冗余切换试验	√		
11	无功控制模式切换试验	√		
12	最后断路器跳闸试验	√		适用时
13	热运行试验	√		
14	过负荷试验	√		适用时
15	黑启动试验		√	
16	运行方式转换试验	√		适用时
17	降压运行试验	√		适用时
18	交流线路故障试验		√	
19	直流线路故障试验	√		适用时

6.2.1.2 直流侧充电试验

在两端的网侧交流断路器断开的情况下,将两端的换流器与直流线路连接,闭合陪试端柔直变压器的网侧交流断路器,通过直流线路向受试端换流器充电。

充电时,受试端换流器阀控制系统应正常工作,预检功能应正确,换流器相关保护不应误动作。

检查阀控制装置回报模块电压和状态信号,经过预定的充电时间后,模块电压和直流电压应符合设计要求。

6.2.1.3 解锁/闭锁性能试验

直流系统选择功率传输运行方式,最小功率定值下解锁/闭锁换流器。

解锁/闭锁过程中各端之间解锁/闭锁指令时序应配合正确。

解锁过程中,系统应平稳建立直流电压,直流输送功率应按照预设速率升至设定值。

解锁/闭锁过程中,系统不应有交流保护和直流保护误动作。

6.2.1.4 紧急停运试验

直流系统运行于两端最小功率运行方式,在下述两种情况下,分别在各端按下手动紧急停运按钮使系统停运:

a) 站间通信正常

任何一端按下手动紧急停运按钮均应使整个端对端系统快速闭锁,各端交流断路器应跳闸,停运过程中不应出现异常的过电压和过电流。

b) 站间通信异常

任何一端按下手动紧急停运按钮后,另一端控制保护系统应能正确检测到紧急停运需求,并启动跳闸功能。

6.2.1.5 保护跳闸试验

保护跳闸试验应模拟所有不同的保护出口类型,通常包括:

a) 模拟各端直流保护出口跳闸;

b) 模拟各端柔直变压器保护出口跳闸;

c) 模拟各端阀控系统保护出口跳闸;

d) 模拟各端换流阀冷却系统故障启动跳闸。

直流系统解锁状态下,任何一端保护动作均应使整个端对端系统快速闭锁,各端交流断路器应跳闸,跳闸停运过程中不应出现异常的过电压和过电流。

6.2.1.6 子模块冗余试验

子模块冗余试验在直流系统解锁状态下进行,在各端的任一桥臂上使子模块逐一旁路,并使旁路个数大于桥臂冗余数。

子模块旁路数在冗余数量之内时,端对端系统应保持稳定运行,超过冗余数量后系统应立即闭锁跳闸。

6.2.1.7 有功功率升降试验

有功功率升降试验分为手动功率升降试验和自动功率升降试验:

a) 手动功率升降试验

直流系统解锁状态下,手动修改有功功率目标值和升降速率,系统应按照预先设定的速率达到新的目标值,过程中启动“有功功率暂停”功能后,升降过程应中止,并在停止“有功功率暂停”功能后恢复升降过程。

b) 自动功率升降试验

直流系统解锁状态下,启动“自动功率曲线”功能后系统应按照预先设定的功率曲线实现自动升降,退出“自动功率曲线”功能后系统应保持当前有功功率值。

6.2.1.8 功率阶跃响应试验

功率阶跃响应试验应在各端分别进行。

端对端系统稳态运行后,通过在控制器外环输入环节修改目标值的方式使系统产生有功功率/无功功率的阶跃。

有功功率阶跃量宜选择 0.1p.u.和 0.5p.u.。

有功功率和无功功率阶跃响应的响应时间和超调量应满足设计要求。

6.2.1.9 功率反转试验(适用时)

工程设计有功功率反送功能时,应进行本试验。

采用修改有功功率目标值或者功率方向的方式实现端对端系统的功率反转。

功率反转过程应具备与正常功率升降同样的平滑特性。

6.2.1.10 稳态性能试验

选取最小功率点和最大功率点以及之间的若干功率点作为有功功率/无功功率目标值,使系统进入稳态。

在每个功率点,端对端系统应保持稳定运行,电压和电流波形满足控制要求,柔直变压器分接开关挡位正确。

6.2.1.11 冗余切换试验

冗余切换试验的对象通常包括:

- a) 直流站控系统和交流站控系统;
- b) 极控制系统和阀控制系统;
- c) 本地网络(LAN)系统、主时钟系统和运行人员工作站;
- d) 换流阀冷却系统和柔直变压器冷却系统。

冗余设备切换不应导致有功功率及无功功率出现明显波动,冗余切换后的状态及切换时间应满足设计要求。

6.2.1.12 无功控制模式切换试验

在各端进行定无功功率控制和定交流电压控制等不同的无功控制模式切换,在不同控制模式下修改控制目标值,观察无功功率的输出。

无功控制模式的切换过程应平滑,当由定无功功率控制模式切换到定交流电压控制模式后,应按照交流电压目标值和预定的控制策略正确输出无功功率;当由定交流电压控制模式切换到定无功功率控制模式时,应保持当前无功功率输出。

6.2.1.13 最后断路器跳闸试验

最后断路器跳闸试验应在各端分别进行。

模拟任何一端交流进线线路最后一台断路器跳闸后,最后断路器保护逻辑应使整个端对端系统正确闭锁跳闸,系统闭锁跳闸过程中不应出现异常的过电压和过电流。

6.2.1.14 热运行试验

在热运行试验前后,应对柔直变压器中的油样进行色谱分析,监测乙炔等气体含量的变化。

端对端系统达到额定功率后,退出换流阀、柔直变压器和电抗器(油浸式)的冗余冷却系统,保持长时间稳态运行,通常为 6 h~8 h,直至柔直变压器绕组温度、柔直变压器(包括套管)油温和换流阀冷却水温达到稳定值。

试验过程中,以下数据应满足设计要求:

- a) 系统运行参数,如柔直变压器分接开关位置、交流母线电压、阀侧电流、直流电压、直流电流和有功功率等;
- b) 换流阀冷却系统进出口水温度;
- c) 柔直变压器本体外壳温度、油温和绕组温度;
- d) 电抗器本体温度;
- e) 交流场、直流场和阀厅的母线本体温度、接头线夹温度;
- f) 隔离开关主触头温度等。

试验过程中,还应同时测量以下数据:

- a) 交流谐波。测量两端换流站交流母线电压中的 2 次~50 次谐波,计算各次谐波畸变率、总谐波畸变率和电话谐波波形系数。计算出的各次谐波畸变率、总谐波畸变率和电话谐波波形系数不应大于设计值。
- b) 无线电干扰。对换流站的无线电干扰强度进行测量,测得的无线电干扰数值不应大于设计值。
- c) 电磁场强。对换流站内和换流站外的电磁场强进行测量,测得的电磁场强数值应不大于设计值。
- d) 可听噪声。对换流站可听噪声进行测量,测得的可听噪声数值应不大于设计值。
- e) 站辅助系统功率损耗。测量各端换流站站用电负载功率。各换流站站用电负载功率不应大于设计值。

6.2.1.15 过负荷试验

工程设计有过负荷能力时,应进行本试验。过负荷试验的限值应满足设计要求。

通过手动启动的方式使端对端系统的功率值达到设计要求的过负荷水平,并保持规定的过负荷时间。

试验中,各端柔直变压器绕组温度、柔直变压器(包括套管)油温和换流阀冷却水温的最终稳定值应在设计要求的范围内,各端换流站直流场、交流场和阀厅的母线、接头线夹、刀闸等设备的最终稳定温度值应无异常。

试验过程中,应进行交流谐波、无线电干扰、电磁场强、可听噪声和站辅助系统功率损耗的测量,测量值应不大于设计值。

6.2.1.16 黑启动试验

6.2.1.16.1 一般要求

对于设计有黑启动功能的换流站应配置独立的后备站用电源。

整个试验过程中,进行黑启动的一端换流站应始终保持与交流电网隔离的状态。

6.2.1.16.2 试验步骤

在两端的网侧交流断路器断开的情况下,将两端的换流器与直流线路连接,闭合有源端柔直变压器的网侧交流断路器,通过直流线路向无源端换流器充电。

充电时,无源端换流器阀控制系统应正常工作,预检功能应正确,换流器相关保护不应误动作。

检查阀控制装置回报模块电压和状态信号,经过预定的充电时间后,模块电压和直流电压应符合设计要求。

在直流侧充电完成后,依次解锁有源端换流器和无源端换流器,闭合无源端交流断路器。

无源端阀侧和网侧电压和电流的幅值、相位和相序应正确,频率应稳定在预期范围内。

6.2.1.17 运行方式转换试验

采用双极系统时,应进行本试验。

本试验应至少在最小功率和额定功率两种不同功率水平下分别进行。

被试极在大地回线方式下运行,确认另一极处在极隔离状态且直流线路可用,分别进行大地回线至金属回线和金属回线至大地回线的运行方式转换。

转换时序应正确,金属回线转换开关和大地回线转换开关均应在不同功率水平下成功转换。

转换前后,直流系统应保持稳定运行。

6.2.1.18 降压运行试验

采用双极系统时,应分别在大地回线运行方式和金属回线运行方式下进行如下试验:

a) 手动降压运行试验

直流系统单极大回线/金属回线运行,在额定直流电压和额定功率下,进行降压运行试验。

在启动降压运行的过程中,直流电压的变化应平稳,直流电流不应超过限值。

b) 保护启动降压运行试验

直流系统单极大回线/金属回线运行,在额定直流电压和额定功率下,模拟保护启动降压运行。

在保护启动降压运行的过程中,直流电压的变化应平稳,直流电流不应超过限值,其他交流保护和直流保护不应误动作。

6.2.1.19 交流线路故障试验

端对端单极系统稳态运行后,分别在整流侧和逆变侧的交流线路上人工模拟单相对地瞬时故障,交流侧保护应正确动作。

系统应具备设计要求的故障穿越能力。故障消失后,系统应在设计要求的时间内恢复到故障前的稳态值。恢复期间不应出现直流电流、直流电压和交流电压的持续振荡。

6.2.1.20 直流线路故障试验

系统采用直流架空线路运行时,应进行本试验。

端对端单极系统稳态运行后,在运行极的直流线路上人工模拟对地瞬时故障。故障点宜为整流侧换流站、逆变侧换流站以及线路中点附近。

对于具备直流线路故障清除能力的端对端系统,直流系统应在设计要求的时间内完成故障清除并恢复稳态运行。

对于不具备直流线路故障清除能力的端对端系统,直流保护应正确动作。

6.2.2 双极系统试验

6.2.2.1 试验项目

双极系统试验一般在单极系统试验完成后进行,试验项目见表 3。

表 3 双极系统试验项目

序号	试验项目名称	必做	选做	备注
1	双极启动/停运试验	√		
2	双极功率升降试验	√		
3	双极电流平衡控制试验	√		
4	双极功率转移试验	√		
5	双极功率反转试验	√		适用时
6	双极降压运行试验	√		适用时
7	双极热运行试验	√		
8	双极无功控制试验	√		
9	双极过负荷试验	√		适用时
10	交流线路故障试验		√	
11	直流线路故障试验	√		适用时

6.2.2.2 双极启动/停运试验

双极启动/停运试验包括：

a) 双极先后启动/停运试验

双极先后启动/停运试验包括：

- 1) 一极定单极功率控制运行,另一极定单极功率控制启动/停运。一极在定单极功率控制模式下稳态运行,另一极在定单极功率控制模式下进行换流器充电、极解锁/闭锁操作,观察两极的相互影响。
- 2) 一极定单极功率控制运行,另一极定双极功率控制启动/停运。一极在定单极功率控制模式下稳态运行,另一极在定双极功率控制模式下进行换流器充电、极解锁/闭锁操作,观察两极的相互影响。
- 3) 一极定双极功率控制运行,另一极定单极功率控制启动/停运。一极在定双极功率控制模式下稳态运行,另一极在定单极功率控制模式下进行换流器充电、极解锁/闭锁操作,观察两极的相互影响。
- 4) 一极定双极功率控制运行,另一极定双极功率控制启动/停运。一极在定双极功率控制模式下稳态运行,另一极在定双极功率控制模式下进行换流器充电、极解锁/闭锁操作,观察两极的相互影响。

试验过程中,后解锁极的启动/停运应平稳,双极功率分配应满足设计要求；

b) 双极同时启动/停运试验

双极均在双极功率控制模式下进行解锁/闭锁操作。

解锁时,两极应能同时解锁。

闭锁时,两极应能同时闭锁。若一极先闭锁,直流功率应转移到另外一极,待其功率下降至最小值后再闭锁。

6.2.2.3 双极功率升降试验

双极功率升降试验包括：

a) 手动双极功率升降试验

手动双极功率升降试验时,两极均在双极功率控制模式下稳态运行,手动启动双极直流功率升降指令,双极功率应同步升降。

在功率升降过程中,分别在两站对各极进行控制系统切换操作,控制系统切换对双极功率升降应无扰动。

b) 自动双极功率升降试验

自动双极功率升降试验时,两极均在双极功率控制模式下稳态运行,整定自动功率曲线,将功率控制模式由手动改为自动,双极功率应跟随功率曲线平稳变化。

6.2.2.4 双极电流平衡控制试验

一极定双极功率控制运行,另一极定单极功率控制运行,调整单极功率目标值,使双极不平衡运行,将定单极功率控制切换为定双极功率控制,两极在双极功率控制模式下进入稳态运行后,流入中性线的直流电流应小于设计要求的限值。

6.2.2.5 双极功率转移试验

双极功率转移试验包括:

a) 控制模式切换的功率转移试验

两极均在双极功率控制模式下稳态运行,将其中一极由双极功率控制模式改为单极功率控制模式,并升/降该极功率。

试验过程中,双极直流传输功率应始终保持不变。

对两极均进行同样的试验。

b) 极跳闸的功率转移试验

两极均在双极功率控制模式下稳态运行,将其中一极手动紧急停运。这时,停运极的功率应在设计要求的时间内转移到另一极,接收极应在其功率传输能力范围内接受停运极损失的功率。对两极均进行同样的试验。

6.2.2.6 双极功率反转试验

两极均在双极功率控制模式下稳态运行,进行双极功率反转操作。

双极功率应按设计要求同步反转。

6.2.2.7 双极降压运行试验

双极降压运行试验包括:

a) 一极全压、一极降压运行试验

两极均在双极功率控制模式下全压运行,对其中一极手动启动降压运行操作。

一极全压、一极降压运行应是稳定的。

试验应在两极分别进行。

b) 双极降压运行试验

两极均在双极功率控制模式,一极全压、一极降压运行,全压极运行在额定功率,手动启动全压极的降压操作。

直流电压下降应是平稳的,直流电流应保持在允许的限值内。

6.2.2.8 双极热运行试验

两极均在双极功率控制模式下解锁,分阶段升高直流功率至双极额定功率,运行至少 2 h。进行交

流谐波、无线电干扰、电磁场强、可听噪声以及站辅助系统功率损耗测量,测量值应符合设计要求。

试验过程中,系统应稳定运行。

两极的运行参数,如交流母线电压、阀侧电压、阀侧电流、桥臂电流、直流电压、直流电流、直流功率、调制比、柔直变压器分接开关位置等均应符合设计要求。

6.2.2.9 双极无功控制试验

双极无功控制试验包括:

a) 双极定无功功率控制试验

两极均在双极功率控制模式下稳定运行,无功控制模式设置为定无功功率控制,依次设置无功功率目标值和升降速率,分阶段在最小无功功率和额定值之间升高/降低无功功率,在每个功率水平至少保持 5 min。

b) 双极定交流电压控制试验

两极均在双极功率控制模式下稳定运行,无功控制模式设置为定交流电压控制,依次设置交流电压目标值高于或低于交流系统运行电压的数个典型值,使柔性直流系统自动调整双极的无功功率。

试验中,测量网侧交流电压、网侧交流电流、阀侧交流电压、阀侧交流电流、桥臂电流和无功功率等。测量值应无异常波动。

此项试验应在两端换流站分别进行。

6.2.2.10 双极过负荷试验

双极过负荷试验包括:

a) 双极连续过负荷试验

手动启动连续过负荷运行,直流功率应升至直流系统的连续过负荷水平,并保持连续稳定运行。

进行交流谐波、无线电干扰、电磁场强、可听噪声以及站辅助系统功率损耗测量,测量值应符合设计要求。

两极的运行参数,如交流母线电压、阀侧电压、阀侧电流、桥臂电流、直流电压、直流电流、直流功率、调制比和柔直变压器分接开关位置等均应符合设计要求。

b) 一极短时过负荷试验

两极均在双极功率控制模式下稳定运行,双极功率整定值稍大于一极的短时过负荷能力。手动紧急停运一极,迫使另一极进入短时过负荷运行。

进入短时过负荷极的直流功率水平、过负荷时间应满足设计要求。

6.2.2.11 交流线路故障试验

直流双极系统稳态运行后,分别在整流侧和逆变侧的交流线路上人工模拟单相对地瞬时故障,交流侧保护应正确动作。

直流系统应具备设计要求的故障穿越能力,双极系统响应一致。

故障消失后,应在设计要求的时间内恢复到故障前的稳态值。恢复期间,直流电流、直流电压和交流电压不应出现持续振荡。

6.2.2.12 直流线路故障试验

系统采用直流架空线路运行时,应进行本试验。

直流双极系统稳态运行后,分别在两极的直流线路上人工模拟对地瞬时故障。故障点宜为整流侧

换流站、逆变侧换流站以及线路中点附近。

故障极直流保护应正确动作,健全极应尽可能保持双极稳态功率不变。

对于具备直流故障清除能力的端对端系统,直流系统应在设计要求的时间内完成故障清除并恢复稳态运行。

直流线路故障定位装置检测到的故障距离应在设计要求的精度范围之内。

对于不具备直流故障清除能力的端对端系统,直流保护应正确动作。

6.3 多端系统试验

对于多端系统,完成两端系统试验后,进行三端及更多端(若有)的系统试验。

多端系统的启动/停运、功率升降和直流动态性能等试验可参照端对端试验的要求进行。

具备在线投入和退出功能的多端柔性直流输电系统应进行第三端及更多端(若有)的换流站在线投入和退出试验,换流站的投入和退出应平稳可控,不应对其余换流站造成持续扰动。

多端柔性直流输电系统在稳态运行工况下,当定直流电压站闭锁,预期的下一个换流站应进入定直流电压控制模式。

7 试运行

工程试运行应在全部系统试验完成、试验中发现的问题已解决并重新试验检验完毕后启动。

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。

柔性直流输电工程的试运行时间不应小于 168 h。

