

团 体 标 准

T/CSEE 0279—2021

中压柔性直流配电网系统调试规程

Code of system commissioning for VSC-MVDC project



2021-09-17 发布

2021-12-01 实施

中国电机工程学会 发布

团 体 标 准
中压柔性直流配电网系统调试规程

T/CSEE 0279—2021

*

中国电力出版社出版、印刷、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

*

2022年5月第一版 2022年5月北京第一次印刷
880毫米×1230毫米 16开本 1.75印张 55千字

*

统一书号 155198·4191 定价 44.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换



中国电机工程学会官方微信



155198.4191

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 总则	3
5 换流站试验	3
6 端对端系统试验	10
7 多端系统试验	14
8 直流配电站系统试验	18
9 试运行要求	20
附录 A（规范性） 系统调试项目及要求的	21
附录 B（资料性） 典型柔性直流配电网网架结构的	23
附录 C（资料性） 动态性能指标的	24

前 言

本文件按照《中国电机工程学会标准管理办法（暂行）》的要求，依据 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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会直流输电与电力电子专业委员会技术归口并解释。

本文件起草单位：南方电网电力科技股份有限公司、广东电网有限责任公司珠海供电局、南方电网科学研究院有限责任公司、中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司、广东电网能源发展有限公司、清华大学、珠海电力工程监理有限责任公司、北京四方继保自动化股份有限公司、南京南瑞继保工程技术有限公司、许继集团有限公司、广东必达电器有限公司、思源电气股份有限公司、山东泰开高压开关有限公司、特变电工新疆新能源股份有限公司、珠海瓦特电力设备有限公司。

本文件主要起草人：陈锐、董华梁、刘尧、罗俊平、韦甜柳、涂小涛、游涛、陈建福、张超树、祝椿浩、李巍巍、曹安琪、陈淼、陈勇、孙文星、余占清、屈鲁、欧阳有鹏、于向恩、魏强、岑义顺、罗红强、张浩、张志成、冯晓滨、肖立军、高仕龙、刘志强、何洪亮、廖珩、张跃。

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区白广路二条 1 号，100761，网址：<http://www.csee.org.cn>，邮箱：cseebz@csee.org.cn）。

中压柔性直流配电网系统调试规程

1 范围

本文件规定了中压柔性直流配电网系统调试的总则、换流站试验、端对端系统试验、多端系统试验、直流配电站系统试验、试运行要求。

本文件适用于 $\pm 1.5\text{ kV} \sim \pm 50\text{ kV}$ 中压柔性直流配电网工程。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 2887—2011 计算机场地通用规范
- GB/T 2900.50 电工术语 发电、输电及配电 通用术语
- GB/T 9361—2011 计算机场地安全要求
- GB/T 13498 高压直流输电术语
- GB/T 30553 基于电压源换流器的高压直流输电
- GB/T 36270—2018 微电网监控系统技术规范
- GB/T 37011—2018 柔性直流输电用变压器技术规范
- 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
- GB/T 38878—2020 柔性直流输电工程系统试验
- GB 50150 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准
- DL/T 664 带电设备红外诊断应用规范
- DL/T 722 变压器油中溶解气体分析和判断导则
- DL/T 1193—2012 柔性输电术语
- DL/T 1526—2016 柔性直流输电工程系统试验规程
- DL/T 5234—2010 $\pm 800\text{ kV}$ 及以下直流输电工程启动及竣工验收规程
- DL/T 5292—2013 1000 kV 交流输变电工程系统调试规程
- JB/T 10088 $6\text{ kV} \sim 1000\text{ kV}$ 级电力变压器声级

3 术语和定义

GB/T 2900.50、GB/T 13498、GB/T 30553、GB/T 36270—2018、GB/T 37011—2018、GB/T 38328—2019、GB/T 38878—2020、DL/T 1193—2012、DL/T 5234—2010、DL/T 1526—2016、DL/T 5292—2013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 36270—2018、GB/T 37011—2018、GB/T 38328—2019、GB/T 38878—2020、DL/T 1526—2016、DL/T 5292—2013中的某些术语和定义。

3.1

系统调试 **system commissioning**

中压柔性直流配电网在完成施工安装并通过分系统调试（3.2）检验合格后，针对设备和系统进行的一系列试验及测试，以确保系统具有投运条件。

[来源：DL/T 5292—2013，2.0.1，有修改]

3.2

分系统调试 **subsystem commissioning**

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。

[来源：GB/T 38878—2020，3.2，有修改]

3.3

换流站试验 **converter station test**

在分系统调试完成的基础上，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。

[来源：GB/T 38878—2020，3.3，有修改]

3.4

紧急停运试验 **ESOF test**

可不经保护装置，直接通过跳闸回路出口的硬接线按钮开关进行紧急停机的验证试验。

3.5

柔直变压器 **transformer for VSC-MVDC**

柔性直流配电用变压器，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：在不同的场所，柔直变压器也称为“联接变压器”“换流变压器”或者“接口变压器”。本文件统称为“柔直变压器”。

[来源：GB/T 37011—2018，3.1.5，有修改]

3.6

桥臂电抗器 **converter arm reactor**

位于换流器桥臂上，能够起到抑制换流器输出电流谐波以及限制暂态和故障电流作用的电抗器。

[来源：DL/T 1526—2016，3.9]

3.7

功率模块 **power module**

在交直流换流器或直流电力电子变压器等设备中，一个实现电能变换功能及保护功能的组成设备的运行单元。

3.8

端对端系统试验 **terminal to terminal system test**

在两个换流站试验完成并合格的基础上，两个换流站加直流线路的联合试验。

[来源：DL/T 1526—2016，3.16，有修改]

3.9

多端系统试验 **multi-terminal system test**

在端对端系统试验（3.8）完成并合格的基础上，多个换流站加直流线路的联合试验。

3.10

直流断路器 **DC circuit-breaker**

能够关合、承载和开断直流电网的直流运行电流，并能在规定的时间内关合、承载和开断异常回路条件（如短路条件）下的电流的开关装置。

[来源：GB/T 38328—2019，3.1.1，有修改]

3.11

多端口直流断路器 **multi-port DC circuit-breaker**

将多条直流线路的交汇点处安装的多个直流断路器（3.10）整合成一个，并通过优化拓扑来减少转移支路

的数量，具有 N ($N \geq 3$) 端口，可以关合、开断每个独立端口的直流断路器。

3.12

直流电力电子变压器 DC power electronic transformer

连接不同电压等级直流系统，实现低压直流系统与高压直流系统之间电能变换的装置。

3.13

直流配电站系统试验 DC substation system test

用直流电力电子变压器（3.12）将两个或多个不同电压等级直流系统连接起来的配电站内，在直流电力电子变压器分系统调试完成并合格的基础上，已具备带电条件，检验其功能的带电试验。

3.14

黑启动 black start

当电力系统发生重大事故，导致系统瓦解后，通过系统中具有自启动能力电源的启动，逐步扩大电力系统的恢复范围，最终实现整个电力系统的恢复过程。

[来源：DL/T 1526—2016，3.21]

3.15

直流微电网 DC microgrid

由分布式发电、用电负荷、监控、保护和自动化装置等组成（必要时含储能装置），是一个能够基本实现内部电力电量平衡的小型直流供用电系统。直流微电网分为并网型直流微电网和独立型直流微电网。

[来源：GB/T 36270—2018，3.1，有修改]

4 总则

4.1 中压柔性直流配电网工程在投入商业运行之前，应进行系统调试。

4.2 系统调试包括换流站试验、端对端系统试验、多端系统试验和直流配电站系统试验。

4.3 工程系统调试范围以工程启动验收委员会（以下简称“启委会”）批准的试验方案为准。

4.4 系统调试应在各设备单体调试及分系统调试完成并验收合格后进行。

4.5 在系统调试过程中，应对换流站的稳定数据、动态数据和暂态数据等进行跟踪监测。系统和设备的功能和性能指标均应满足工程技术规范书的要求。

4.6 对于某些柔性直流配电网工程所需要的特殊功能/性能试验，可按其工程技术规范书的要求，增加相应试验项目。

4.7 系统调试有关试验项目及应要求应符合附录 A 的规定。典型柔性直流配电网网架结构见附录 B。

5 换流站试验

5.1 换流站试验条件

5.1.1 组织条件

换流站试验组织条件包括：

- a) 换流站试验的组织机构已满足 DL/T 5234—2010 的要求。
- b) 换流站试验调试方案、调度方案已获启委会批准。
- c) 启委会主任委员已下达换流站试验的命令。
- d) 现场指挥人员、换流站运行人员、所有调试试验人员、调度值班人员和相关专业技术人员已熟悉换流站试验调试方案、调度方案，试验操作票准备就绪。
- e) 换流站试验所需的运行规程已获批准并报调度备案。现场运行人员已熟悉现场运行规程。

5.1.2 土建条件

换流站试验土建条件包括：

- a) 与调试相关的建筑工程和生产区域的全部设备和设施：站内外道路、上下水、防火、防洪、环保工程等均已按设计完成并经验收检查合格。
- b) 生产区域的场地平整，道路畅通，平台栏杆和沟道盖板齐全，脚手架、障碍物、易燃物、建筑垃圾等已经清除。
- c) 站内控制保护室及阀设备室内门窗密闭良好并且牢固可靠、齐整，设备清洁无尘，符合运行要求。
- d) 站用电源、照明、通信、空调、除潮、通风等设施按设计要求安装试验完毕，已投入正常使用。
- e) 消防工程已通过消防部门验收，消防设施齐全，能投入使用。
- f) 站内安全、健康、环保完善，防小动物及防鼠设施完善，设备标识完善。
- g) 站内值班设施完善，安全工器具足够齐全。
- h) 站内地网接地电阻经测试结果合格，站内全部设备已按规范可靠接地。

5.1.3 电气条件

换流站试验电气条件包括：

- a) 投入的新设备按相关标准要求安装完毕，调试结果符合交接验收标准要求，经质检验收签证，具备换流站试验条件。
- b) 各项分系统调试全部完成且合格，有关记录齐全完整。带电部位的接地线已全部拆除，施工临时设施不满足带电要求的经检查已全部拆除，带电区域标识明显。
- c) 按工程设计要求，所有设备及其保护（包括通道）、调度自动化系统、安全自动装置、微机检测装置、监控装置以及相应的辅助设施均已安装齐全，调试整定合格且调试记录齐全。设备编号、标识核对无误。
- d) 生产运行单位已将所需的规程、制度、系统图表、记录表格、安全用具等准备好，投入的设备等已标识调度命名和编号。
- e) 调试范围内的通信设备工作正常，通信畅通。
- f) 调试、施工、监理、建设、运行方已办理具备系统调试条件的签证。
- g) 交流进线已具备带电条件。站用辅助电源系统已运行。
- h) 运行人员控制系统未出现影响系统调试的报警信号。

5.1.4 线路条件

换流站试验线路条件包括：

- a) 站与站之间线路（电缆）交接试验已完成并合格，影响线路（电缆）安全运行的问题已处理完毕。
- b) 按照设计规定的线路保护（包括通道）和自动装置已具备投入条件。
- c) 已确认线路（电缆）上无人作业，危及人身安全和安全运行的一切活动已停止，已向沿线发布带电运行通告，启动试运行前的检查维护工作已完成。
- d) 线路（电缆）工程的各种图纸、资料、试验报告齐全；运行所需的标准、制度、档案、记录齐全。
- e) 线路的运行杆塔号、极性已标识。
- f) 设计规定的有关防护设施等已经验收合格。

5.1.5 试验技术条件

5.1.5.1 试验技术资料条件

参加换流站试验的设备应具备以下技术资料：

- a) 成套设计文件；
- b) 设备技术规范；
- c) 直流系统功能规范；
- d) 工厂试验报告，包括型式试验、例行试验、功能试验和出厂试验等；
- e) 交接试验报告，包括单体调试、分系统调试等；
- f) 通过评审的调试方案，内容包括但不限于试验地点、试验计划、试验项目、试验方法、参试设备、试验接线图纸等。

5.1.5.2 试验环境条件

试验实施过程中应满足但不限于以下环境条件：

- a) 换流阀厅的温湿度：室内温度 10℃～30℃、相对湿度 25%～60%。
- b) 其他室内设备：试验室环境温度 10℃～30℃、相对湿度 25%～90%，场地安全要求应符合 GB/T 9361—2011 中 B 类的规定，接地电阻应符合 GB/T 2887—2011 中 4.8 的规定，洁净度应符合 GB/T 2887—2011 中 4.6.2 的规定。

5.1.6 安全措施

试验实施过程中应做好以下安全措施：

- a) 所有参与试验的人员应严格遵守电气作业安全规程及现场操作规程，已通过安规考试，熟悉已审批的试验方案，完成交底，以确认试验过程中的人身、系统、设备安全。
- b) 各类安全工器具、试验设备、通信器材等已准备就绪，并满足现场安全技术要求。
- c) 每日试验工作开始前，现场应对所有试验涉及的设备状态及环境进行检查，确认设备良好，满足试验要求。
- d) 试验期间所有设备视为带电，须规范设置警戒区域，悬挂警示牌，设专人监护，严禁非作业人员进出。
- e) 试验过程中，若需要对断路器、隔离开关进行操作，则由现场运行人员向调度申请，在启委会指挥下，运行人员负责试验过程中的操作，检查设备操作后无异常方可开始下一步试验工作。
- f) 试验前须向调度报送试验计划，并明确试验工作对电网系统的要求。试验过程中若发生系统事故，则现场应暂停或终止系统调试，并按照应急预案开展事故处理。
- g) 系统调试存在的风险及控制措施已做好识别和评估。

5.1.7 应急措施

试验实施过程中应具备以下应急措施：

- a) 系统调试现场应具备紧急联系电话表，相关的通信设备应保持畅通。
- b) 系统调试前启动小组应根据当前运行方式，考虑设备出现异常时，紧急断开启动电源的操作方式。
- c) 系统调试现场应保持紧急疏散通道的畅通。
- d) 系统调试前工作人员应熟悉设备操作电源的位置，当需要切断设备操作电源时应能及时执行。
- e) 对于故障后可能发生火灾的设备，系统调试启动前应准备好消防器具、防护用具，工作人员应

熟悉消防器具、防护用具的正确使用。

5.1.8 其他要求

试验实施过程中应满足以下要求：

- a) 试验实施单位应负责保存完整的试验记录，并确认试验记录。
- b) 若主要设备进行了控制保护系统实验室联调试验，则应解决试验发现的问题，并确保所有软件为通过试验的最终版本。
- c) 系统调试完成后，应冻结软件版本并确定最终版的版本号。

5.2 换流站试验项目及要

5.2.1 不带电顺序操作试验

5.2.1.1 试验要求

不带电顺序操作试验项目在换流站交流进线不带电条件下进行，不带电顺序操作试验可在有站间通信或无站间通信（如有）下进行检验。

5.2.1.2 不带电顺序操作方式

不带电顺序操作方式包括：

- a) 本站。在本站运行人员工作站进行不带电顺序操作。
- b) 远方。在调度机构进行不带电顺序操作。

5.2.1.3 不带电顺序操作控制模式

应分别在手动控制模式和自动控制模式下进行不带电顺序操作试验：

- a) 手动控制模式。在换流站执行单步操作。正确的操作应能执行，错误的操作应被拒绝。
- b) 自动控制模式。以综合指令的方式自动执行不带电顺序操作。正常应能按规定的顺序完成操作；当不能按顺序完成时，应有相应的报警信息，且相应设备应能手动退回上一个有定义的状态，或手动进入下一个有定义的状态。

5.2.2 不带电出口跳闸试验

5.2.2.1 试验要求

不带电出口跳闸试验在柔直变压器不带电的情况下进行。

5.2.2.2 不带电出口跳闸试验类型

不带电出口跳闸试验类型包括：

- a) 柔直变压器保护跳闸试验。柔直变压器保护包括电量保护和非电量保护。从柔直变压器保护跳闸出口端子施加跳闸信号，每个保护的跳闸回路应能正确跳开柔直变压器网侧相应交流断路器和协调控制保护系统停运对应的换流器，并正确地发出对应的信号和事件记录。
- b) 换流器保护跳闸试验。从换流器保护跳闸出口端子施加跳闸信号，跳开该换流器相应换流变压器网侧的交流断路器和协调控制保护系统停运对应的换流器。对于每套保护的跳闸类型，跳闸程序应被正确地执行，并发出对应的信号和事件记录。
- c) 直流保护跳闸试验。从直流保护系统保护跳闸出口端子施加跳闸信号，停运柔性直流配电网系

统，跳开柔直变压器网侧相应交流断路器和协调控制保护系统停运对应的换流器。对于每套保护的跳闸类型，跳闸程序应被正确地执行，并发出对应的信号和事件记录。

- d) 紧急停运试验。手动按下主控室的紧急停运按钮，跳闸程序应被正确地执行。停运对应的换流器、跳开柔直变压器网侧交流断路器，并发出对应的信号和事件记录。

5.2.3 柔直变压器充电试验

柔直变压器充电试验按照以下顺序进行：

- a) 充电试验应具备的条件。检查柔直变压器冷却系统正常运行。
- b) 充电试验。断开柔直变压器与换流器连接隔离开关，闭合柔直变压器网侧交流断路器，向柔直变压器充电，有差动保护的充电次数不应少于 5 次，无差动保护的充电次数不应少于 3 次，其中一次充电保持时间不应小于 1 h，前次断电到下次充电的间隔时间不小于 15 min。
- c) 分接头控制功能试验（如有）。在柔直变压器带电状态下，进行分接头控制功能试验。
- d) 测量项目：
 - 1) 投、切空载柔直变压器试验过程中励磁涌流峰值、操作过电压测量。柔直变压器充电时的励磁涌流峰值和操作过电压应在预期的限制值之内，其谐振应被充分阻尼，柔直变压器相关保护不应误动作。
 - 2) 额定电压下冲击合闸试验后柔直变压器油中溶解气体色谱分析测试。按 GB 50150 和 DL/T 722 的规定进行。
 - 3) 油箱表面的温度分布及引线接头的温度测量。按 DL/T 664 的规定进行。
 - 4) 空载下的噪声测量。空载声功率级按 JB/T 10088 的规定进行。

5.2.4 换流器充电试验

换流器充电试验按照以下顺序进行：

- a) 在换流器处于闭锁状态且与直流线路隔离开关断开，充电电阻旁路开关断开的情况下，闭合柔直变压器网侧交流断路器，向柔直变压器和换流器同时充电。在换流站试验期间，换流器充电次数不应少于 2 次，前次断电到下次充电的间隔时间不小于 15 min。
- b) 检查启动回路（包括启动电阻等）是否过热。检查桥臂电抗器网侧电压相序及大小，阀控装置回报模块电压和状态信号，检查直流侧电压极性和变比，在预定充电时间后，模块电压和直流电压应符合设计要求。
- c) 换流器阀控系统能正常工作，预检功能正确，换流器相关保护不应误动作。如有异常或故障应能正确报警，保护正确动作。

5.2.5 换流器空载运行试验

在换流器与直流线路隔离开关断开，充电电阻旁路开关断开的情况下，闭合柔直变压器网侧交流断路器，向柔直变压器和换流器同时充电；充电完成后，合充电电阻旁路开关，解锁换流器。

解锁换流器阶段，分别设置 50 ms 解锁、100 ms 解锁、500 ms 解锁和 10 s 解锁步骤，每个时间段的解锁波形正常、系统无动作后，再进行下一个时间段的解锁操作。

解锁前后，换流器阀控系统应能正常工作，预检功能正确，换流器相关保护不应误动作。

检查桥臂电抗器网侧电压波形、相序、幅值及电平数，换流器直流侧电压波形等应符合设计要求。

5.2.6 带电保护跳闸试验

5.2.6.1 试验要求

带电保护跳闸试验在柔直变压器或换流器带电的情况下进行。

5.2.6.2 带电保护跳闸试验类型

带电保护跳闸试验类型包括：

- a) 柔直变压器保护跳闸试验。柔直变压器保护包括电量保护和非电量保护。从柔直变压器保护跳闸出口端子施加跳闸信号，每个保护的跳闸回路应能正确跳开柔直变压器网侧相应交流断路器和协调控制保护系统停运对应的换流器，并正确地发出对应的信号和事件记录。
- b) 换流器保护跳闸试验。从换流器保护跳闸出口端子施加跳闸信号，跳开该换流器相应换流变压器网侧的交流断路器和协调控制保护系统停运对应的换流器。对于每套保护的跳闸类型，跳闸程序应被正确地执行，并发出对应的信号和事件记录。
- c) 直流保护跳闸试验。从直流保护系统保护跳闸出口端子施加跳闸信号，停运柔性直流配电网系统，跳开柔直变压器网侧相应交流断路器和协调控制保护系统停运对应的换流器。对于每套保护的跳闸类型，跳闸程序应被正确地执行，并发出对应的信号和事件记录。
- d) 紧急停运试验。手动按下主控室的紧急停运按钮，跳闸程序应被正确地执行。停运对应的换流器、跳开柔直变压器网侧交流断路器，并发出对应的信号和事件记录。

5.2.7 换流站一键启停

换流站一键启停试验包括：

- a) 换流站一键启动。在换流器处于停运或备用状态情况下，通过一键启动功能，换流站自动顺序控制换流器到解锁运行状态。
- b) 换流站一键停运。在换流器处于解锁运行状态情况下，通过一键停运功能，换流站自动顺序控制换流器到停运或备用状态。

5.2.8 开路试验

5.2.8.1 不带直流线路开路试验

不带直流线路开路试验类型包括：

- a) 手动控制模式。受试端换流站正、负极直流母线与直流线路断开；在手动控制模式下解锁该换流器；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，保持时间至少 0.5 h；再将直流电压降至最小可运行电压，闭锁换流器。试验中阀厅及直流侧设备无放电现象；交、直流保护不应误动作；升/降直流电压平稳；试验后检查阀避雷器及直流侧避雷器动作情况。
- b) 自动控制模式。受试端换流站正、负极直流母线与直流线路断开；在自动控制模式下解锁该换流器；将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，保持时间至少 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计的过程相符。试验中阀厅及直流侧设备无放电现象；交、直流保护不应误动作；升/降直流电压平稳；试验后检查阀避雷器及直流侧避雷器动作情况。

5.2.8.2 带直流线路开路试验

进行带直流线路开路试验时，受试端换流站正、负极直流母线与直流线路连接，直流断路器（如有）将首次加压。对侧换流站正、负极直流母线与直流线路断开。试验包括：

- a) 手动控制模式。在手动控制模式下解锁该换流器；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，保持时间至少 0.5 h；再将直流电压降至最小可运行电压，闭锁换流器。试验中阀厅及直流侧设备无放电现象；交、直流保护不应误动作，升/

降直流电压平稳；试验后检查阀避雷器及直流侧避雷器动作情况。

- b) 自动控制模式。在自动控制模式下解锁该换流器；将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，保持时间至少 1 min；再自动降至最小可运行电压，闭锁换流器；直流电压升/降过程与预设计的过程相符。试验中阀厅及直流侧设备无放电现象；交、直流保护不应误动作，升/降直流电压平稳；试验后检查阀避雷器及直流侧避雷器动作情况。

5.2.9 STATCOM 运行方式试验

5.2.9.1 定无功功率控制

以 STATCOM（静止同步补偿）运行方式启动换流站，启动前，控制系统的控制方式设置为定无功功率控制方式，有功功率定值设置为零，解锁换流器，依次设置无功功率参考值为最小值到额定值中的数个典型数值，每阶段保持 5 min 进行试验。最后按预设速率降低无功功率并闭锁换流器。

系统解/闭锁过程中冲击小，功率升/降过程应平稳。

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、无功功率。检查实际运行的无功功率值与整定值的差别，其误差宜在 3% 以内。

5.2.9.2 定交流电压控制

以 STATCOM 运行方式启动换流站，控制系统的控制方式设置为定交流电压控制方式，依次设置电压参考值低于或高于系统运行电压的数个典型数值，使配电网换流器自动调整无功功率。

系统解/闭锁过程中冲击小，功率升/降过程应平稳。

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、无功功率。检查实际交流电压值与整定值的差别，其误差宜在 0.5% 以内。

5.2.10 电磁干扰试验

在换流站一次设备正常运行、二次设备柜全部运行的情况下，在二次设备屏柜前/后门正前方 20 cm 处，在开门和关门两种状态下，手持站内通信步话机/手机通话。步话机发射的功率宜在 3 W~5 W 范围内。

受试换流站任何二次设备屏柜不应由于电磁干扰而出现异常现象。

5.2.11 站用电源切换试验

站用电源切换试验类型包括：

- a) 站用直流电源切换试验。带功率运行方式下，依次手动断开/合上站用直流一路电源，对带功率运行方式无影响。
- b) 站用交流电源切换试验。采用模拟方法进行站用交流电源切换试验已完成，结果符合设计要求。站用交流电源切换试验包括：
 - 1) 交流电源切换试验。切除任何一回站用交流电源进线开关时，站用电系统另一回进线电源自动投入（分别对各路进线开关进行此项试验）。电源自动切换功能正确。
 - 2) 站用交流电源备自投试验。切/合站内各电压等级母线电源。测试各级电源备自投功能，切除某一工作电源，备用电源自动投入，备自投功能正确。站用电源切换时不应导致闭锁情况发生。
 - 3) 交流辅助电源切换试验。带功率运行方式下，依次手动断开/合上站用变压器一路进线开关。断开站用变压器一路进线开关时，相应母线联络开关应自动合上；柔性直流配电网系统不应受扰动。

5.2.12 功率模块冗余试验

在换流站带功率运行方式下，通过拔出功率模块与阀控下行通信光纤等方法，模拟功率模块故障，将故障的功率模块旁路。若同一桥臂上的功率模块故障数量不超过冗余数量，则阀控装置继续正常运行；若同一桥臂上的功率模块故障数量超过冗余数量，则阀控装置发出跳闸请求。

对比旁路前后的直流电压和阀侧电压、电流；注意直流电压是否发生变化以及查看故障功率单元旁路开关、电容电压等状态信息。

5.2.13 通信接口试验

通信接口试验类型包括：

- a) 控制保护装置与阀控装置的接口测试。断开控制保护装置与阀控装置的通信接口，在有冗余的情况下，阀控装置保持正常运行状态；在无冗余的情况下，控制保护装置隔离换流器。
- b) 控制保护装置与直流断路器的接口测试。断开控制保护装置与直流断路器的通信接口，在有冗余的情况下，直流断路器保持正常运行状态；在无冗余的情况下，控制保护装置隔离直流断路器。
- c) 控制保护装置与直流电力电子变压器的接口测试。断开控制保护装置与直流电力电子变压器的通信接口，在有冗余的情况下，直流电力电子变压器保持正常运行状态；在无冗余的情况下，直流电力电子变压器退出运行。
- d) 控制保护装置与合并单元的接口测试。断开控制保护装置与合并单元的通信接口，在有冗余的情况下，合并单元保持正常运行状态；在无冗余的情况下，控制保护装置隔离合并单元所对应的系统。

5.2.14 计算机监控系统试验

计算机监控系统试验类型包括：

- a) 运行人员控制系统试验。模拟测量装置二次部分上的故障，在运行人员控制系统界面查看故障信号上送是否正确，故障应能被检测到，报送相应事件，且不应影响其他无关联设备的正常运行。在运行人员控制系统中下发遥控信号，应能准确执行到设备，且不影响其他设备的正常运行。
- b) 远动系统试验。在远动系统中向换流站发送遥控指令，换流站应能按遥控指令准确执行，系统无故障告警。在换流站模拟设备二次部分故障，远动系统应能接收到换流站的故障信息，且不应影响其他无关联设备的正常运行。
- c) 就地监控系统试验。分别模拟就地监控系统运行状态下的装置电源掉电，在测控程序系统中查看设备状态是否正确，测控程序应能检测到设备上送的故障信息，且能准确反应遥控操作，测控程序操作不应影响其他设备的正常运行。
- d) 网络性能试验。分别模拟 A、B 套监控系统局域网为主运行状态的交换机装置电源掉电，在主监控系统局域网发生阻断故障时，备监控系统局域网应能正确参与路由选择，且不应影响其他设备的正常运行。
- e) 时钟可靠性试验。在时钟同步装置上模拟 GPS 或北斗失锁，时间同步装置误差应满足试验要求，运行人员控制系统输出时间应符合设计标准，当时钟失去同步时，应自动告警并记录事件。

6 端对端系统试验

6.1 端对端系统试验条件

参照 5.1，并且满足：

- a) 两端的换流站试验已完成，且试验结果满足要求。
- b) 换流站之间的线路、直流断路器满足带载条件。

6.2 端对端系统控制试验

6.2.1 不带电试验

参照 5.2.1，补充以下内容：

- a) 极连接顺序控制操作正常。
- b) 直流断路器顺序控制操作正常。
- c) 不带电出口跳闸结果正常。

6.2.2 解/闭锁运行试验

系统解锁前，核实两端换流站均已进入停运或备用状态。

进行柔性直流配电网系统解锁和闭锁试验。一端换流站采用定直流电压控制模式，对端换流站采用定直流功率或定频率控制模式。解锁后，柔性直流配电网系统平稳建立直流电压、直流输送功率，按照预设速率升至预设值；启动闭锁后，柔性直流配电网系统先按照预设速率降至零功率，然后闭锁。柔性直流配电网系统的解锁和闭锁过程中，无任何交、直流保护误动作。

在校核运行人员工作站上校核相关监视数据显示是否正常；直流系统解锁和闭锁时序应正确。

6.2.3 紧急停运试验

柔性直流配电网系统小功率运行过程中，在有站间通信和无站间通信（如有）两种方式下，分别在两端换流站手动启动紧急停运。

在有站间通信的情况下，紧急停运时序应正确，交、直流保护无误动作，交、直流侧不应产生异常过电压；在无站间通信（如有）的情况下，手动启动紧急停运后，对端保护系统应能正确检测到紧急停运需求，并启动跳闸功能。

在紧急停运过程中，交、直流保护应无误动作和拒动。

6.2.4 保护跳闸试验

保护跳闸试验包括模拟保护动作跳闸试验和保护出口跳闸试验。

- a) 模拟保护动作跳闸应覆盖所有不同的保护出口类型，通常可包括：
 - 1) 柔直变压器保护区故障；
 - 2) 交流连接保护区故障；
 - 3) 换流器保护区故障；
 - 4) 直流线路保护区故障；
 - 5) 直流电力电子变压器保护区故障。
- b) 保护出口行为通常包括：
 - 1) 报警；
 - 2) 切换；
 - 3) 闭锁；
 - 4) 跳交流侧断路器；
 - 5) 跳直流侧断路器；
 - 6) 启动交、直流断路器失灵保护。

6.2.5 控制系统手动切换试验

柔性直流配电网系统解锁稳定运行后，手动将主值控制系统切换为备用系统，再将切换后的备用系统切换为主值控制系统。

备用系统应自动响应切换命令转为主值控制系统，整个切换过程不对系统传输的直流功率及直流电压产生扰动，依据无功功率控制模式不同，整个切换过程不对系统无功功率、交流电压产生扰动。

试验中监测柔性直流配电网系统的直流电流、有功功率、无功功率和换流站端交、直流电压。

6.2.6 控制系统监视与切换试验

在含冗余的直流控制保护设备、阀控设备和测量装置的二次部分上模拟故障，故障包含但不限于主机电源故障、数据总线故障、电气量测量故障、主机间通信故障等。故障应能被检测到，报送相应事件，并按照事件的严重等级告警、切换系统、跳闸等。

试验中监测柔性直流配电网系统的直流电流、有功功率、无功功率和换流站端交、直流电压。

6.2.7 控制模式切换试验

在双端直流系统稳态运行过程中，应能进行如下控制模式切换，且在整个切换过程中，双端直流系统应无扰动、站间通信应正常。控制模式切换试验包括：

a) 有功功率控制模式切换。

- 1) 双端系统稳态运行过程中，在定有功功率控制模式换流站启动有功功率控制模式切换后，控制系统应能够正确地由有功功率控制模式切换到定频率控制模式。整个切换过程中，直流系统无扰动。
- 2) 双端系统稳态运行过程中，在定频率控制模式换流站启动有功功率控制模式切换后，控制系统应能够正确地由定频率控制模式切换到定有功功率控制模式。整个切换过程中，直流系统无扰动。
- 3) 试验中监测柔性直流配电系统各有关参量。

b) 无功功率控制模式切换。

- 1) 双端系统稳态运行过程中，在定交流电压控制模式换流站启动无功功率控制模式切换后，控制系统应能够正确地由定交流电压控制模式切换到定无功功率控制模式。整个切换过程中，直流系统无扰动。
- 2) 双端系统稳态运行过程中，在定无功功率控制模式换流站启动无功功率控制模式切换后，控制系统应能够正确地由定无功功率控制模式切换到定交流电压控制模式。整个切换过程中，直流系统无扰动。

6.2.8 功率升/降试验

功率升/降试验包括：

a) 有功功率升/降试验。在定有功功率控制的换流站，以设定的速率升/降有功功率；在有功功率升/降过程中，试验“暂停”功能。

各站有功功率升/降应是平稳的；当下令“暂停”时，各站有功功率应能保持在下令“暂停”时刻的数值上。

b) 有功功率升/降过程中控制系统切换试验。在有功功率升/降过程中，在定有功功率控制的换流站，手动将当前主值控制系统切换为备用系统，再将切换后的备用系统切换为主值控制系统。切换过程中，备用系统应正确跟踪原主值控制系统的定值。

- c) 通信故障对有功功率升/降影响（如有）。在有功功率升/降过程中，切断两站间的全部通信通道，观察通信故障对有功功率升/降的影响。
通信故障对有功功率升/降应无影响。
- d) 有功功率反转试验。在定有功功率控制稳态运行工况下，整定功率反转速率和反转后直流功率定值。手动启动有功功率反转顺序控制功能，在直流有功功率达到反向稳定传输值后，再次启动有功功率反转顺序控制功能。
有功功率输送方向和反转时序应是正确的；直流电流、直流功率的变化应平稳。
- e) 无功功率升/降试验。在定无功功率控制的换流站，以设定的速率升/降无功功率；在无功功率升/降过程中，试验“暂停”功能。
无功功率升/降应是平稳的；当下令“暂停”时，无功功率保持在下令“暂停”时刻的数值上。
- f) 无功功率升/降过程中控制系统切换试验。在无功功率升/降过程中，在定无功功率控制的换流站，手动将当前主值控制系统切换为备用系统，再将切换后的备用系统切换为主值控制系统。
切换过程中，备用系统应正确跟踪原主值控制系统的定值。
- g) 额定有功功率升/降试验。在正常模式稳态运行工况下，在定有功功率控制的换流站整定好有功功率升/降的功率定值和变化速率。有功功率指令从最小值，按试验方案慢速升至额定值，稳定 5 min 之后，再以同样的方法从额定值返回最小值。在额定有功功率下，在两个站分别校验模拟量输入信号，将主控权转移到对站，重复功率升/降过程。
有功功率升/降应是平稳的。在有功功率升/降过程结束后，有功功率都应达到其指令值。检查实际运行的功率值与整定值的差别，其误差宜在 1% 以内。其他交/直流保护不应误动作。

6.2.9 动态性能测试

动态性能测试包括：

- a) 有功功率阶跃试验。柔性直流配电网系统运行过程中，当直流功率输送水平处于相应的最小功率至额定功率之间时进行有功功率阶跃试验。
有功功率阶跃试验通过改变直流有功功率设定值的方式进行。
阶跃量为当前有功功率控制目标设定值的 $\pm 3\%$ 时，响应时间不大于 80 ms，超调量不大于阶跃量的 30%，或其动态性能指标（见附录 C）满足技术规范书要求。
- b) 无功功率阶跃试验。直流系统在设计的最小无功功率和额定无功功率之间的任意功率水平下运行时进行无功功率阶跃试验。
无功功率阶跃试验通过改变无功功率设定值的方式进行。
阶跃量为当前无功功率控制目标设定值的 $\pm 3\%$ 时，响应时间不大于 80 ms，超调量不大于阶跃量的 30%，或其动态性能指标满足技术规范书要求；STATCOM 运行方式下参照此要求。
- c) 直流电压阶跃试验。对应直流系统所有可能的运行方式下，进行直流电压阶跃试验。
直流电压阶跃试验通过改变直流电压设定值的方式进行。
阶跃量为额定电压的 $\pm 2\%$ 时，响应时间不大于 90 ms，超调量不大于阶跃量的 30%，或其动态性能指标满足技术规范书要求。
- d) 交流电压阶跃试验。对应直流系统所有可能的运行方式下，进行交流电压阶跃试验。
交流电压阶跃试验通过改变交流电压设定值的方式进行。
阶跃量为额定电压的 $\pm 1\%$ 时，无功响应时间不大于 90 ms，超调量不大于阶跃量的 30%，或其动态性能指标满足技术规范书要求。

6.2.10 环流抑制试验

投入相间环流抑制功能前后，应监测相间环流。

以相间环流作为反馈量，通过调整调制波，达到减少相间环流分量的目的。
投入相间环流抑制功能后，相间环流分量应满足工程技术规范书的要求。

6.2.11 阀冷却系统切换试验

在系统稳态运行过程中，进行阀冷却系统的主从水泵的切换试验。切换过程中功能正常，监视冷却水回路的压力和流量应无异常。

在系统稳态运行过程中，进行阀冷却系统的主从控制系统的切换试验。切换过程中功能正常，监视冷却水回路的压力和流量应无异常。

6.2.12 就地/远方控制试验

就地/远方控制试验包括：

- a) 将控制位置选为“就地”，运行人员控制系统的控制位置应显示为“就地”。工作人员就地操作设备时应可控。
- b) 将控制位置选为“远方”，运行人员控制系统的控制位置应显示为“远方”。工作人员在远方控制台或调度中心操作设备时应可控。

6.2.13 站间通信故障试验

在系统稳态运行过程中，模拟站间通信故障，系统应维持正常运行，或满足设计要求。

7 多端系统试验

7.1 多端系统试验条件

参照 6.1，并且满足：

- a) 端对端系统试验已完成，且试验结果满足要求。
- b) 多端口直流断路器满足控制及带载条件。

7.2 多端系统控制试验

7.2.1 整体启动/整体停运试验

在换流站的交流进线开关已经闭合的情况下，通过控制保护系统下发“整体启动/整体停运”命令，柔性直流配电网系统各换流站、直流配电站依次解锁/闭锁，最终达到整体运行或整体停运。

7.2.2 紧急停运试验

多端系统带功率运行过程中，在有站间通信和无站间通信（如有）两种方式下，分别在各换流站进行紧急停运试验。

在有站间通信的情况下，紧急停运时序应正确，交、直流保护无误动作，交、直流侧不应产生异常过电压；在无站间通信（如有）的情况下，紧急停运后，对应其他站保护系统应能正确检测到紧急停运需求，并启动跳闸功能。

在紧急停运过程中，交、直流保护应无误动作和拒动。

7.2.3 功率升/降试验

参照 6.2.8，在多端系统正常运行的情况下，在定有功功率/定无功功率控制的换流站，以设定的速率升/降有功/无功功率。

7.2.4 动态性能测试

参照 6.2.9，在多端系统正常运行的情况下，进行动态性能测试。

7.2.5 $N-1$ 端运行，第 N 端计划性并网试验

在 $N-1$ 端系统正常运行时，第 N 端换流站计划性并网，多端系统应维持平稳运行。若并网换流站为直流电压控制站，则并网稳定运行后，应按策略由该站从其他换流站接管直流电压控制权，接管过程中应维持系统平稳运行。

7.2.6 N 端运行，第 N 端计划性离网试验

在 N 端系统正常运行时，第 N 端换流站计划性离网，系统应维持平稳运行。若离网换流站为直流电压控制站，则应按策略由其他换流站接管直流电压控制权。

7.2.7 N 端运行，第 N 端故障退出试验

在 N 端系统正常运行时，模拟第 N 端换流站故障，控制保护系统自动退出第 N 端换流站，系统应维持平稳运行。若离网换流站为直流电压控制站，则应按策略由其他换流站接管直流电压控制权。

7.3 直流断路器试验

7.3.1 直流断路器系统与直流控制保护系统通信试验

直流控制保护系统向直流断路器发送指令，直流断路器应能接收并响应指令，直流断路器上送至直流控制保护系统的信息，直流控制保护系统应能正确显示及处理。直流控制保护系统与直流断路器之间的通信断链应有告警提示。

7.3.2 直流断路器本体控制故障试验

在双端换流站运行的情况下，模拟直流断路器本体各种运行方式下的故障，直流断路器控制装置能正常反应，并正常上送对应的故障或告警信息，操作完成后，各开关位置正确，无误触发或误报现象。

直流控制保护系统接收到断路器上送的故障或告警信息后，应能正常响应。

7.3.3 直流断路器负荷开断试验

直流断路器负荷开断试验的目的是检验直流断路器是否具备关合和开断电流的能力。

直流断路器负荷开断试验应保证在以下负荷电流情况下各试验一次：

- a) 直流系统带电，负荷为 10%额定电流。
- b) 直流系统带电，负荷为 50%额定电流。
- c) 直流系统带电，负荷为 100%额定电流。

在直流系统三种状态负荷情况的运行方式下，进行开断试验时，直流断路器应能正确动作、开断成功，且直流断路器的运行及开断过程中对系统产生的影响应限制在可接受的程度和范围之内。

对于双向直流断路器，应验证两个方向的直流负荷电流。

7.3.4 多端口直流断路器控制试验

在多端系统正常运行时，对多端口直流断路器进行运行方式的转换操作，操作过程中其他端口不应受影响，操作完成后，各开关位置应指示正确，各站部分驱动系统和控制系统指示及显示状态无异

常，无误触发或误指示错误，且不影响各站间通信。

7.3.5 直流断路器偷跳试验

直流断路器偷跳试验按以下两种方式进行：

- a) 在多端系统正常运行时，通过直流控制保护装置进行置位，模拟直流断路器偷跳试验。在直流断路器出现单极、双极偷跳的工况下，直流控制保护装置应能正常响应，并能正常启动系统后备保护。
- b) 在多端系统正常运行时，不通过直流控制保护装置，就地操作单极、双极直流断路器跳闸，直流控制保护装置检测到断路器跳闸后，应判断出直流断路器偷跳，并能正常启动系统后备保护。

单极偷跳试验应在正、负极直流断路器上分别进行。若直流断路器有针对偷跳的自保护逻辑，则自保护逻辑应能正常控制直流断路器进行自保护动作。

7.3.6 直流断路器失灵试验

在多端系统正常运行时，模拟直流断路器失去分闸的能力。在直流控制保护系统下发跳闸命令后，直流断路器拒动并上报失灵信号。

在直流断路器出现失灵拒动的情况下，直流控制保护系统接收到直流断路器的失灵信号后应能正常响应，并能正常启动系统后备保护。

7.4 额定负荷试验

7.4.1 试验条件

7.4.1.1 额定负荷试验的试验条件包括：

- a) 满足额定有功功率稳定运行条件；
- b) 备用冷却（如有）不投运。

7.4.1.2 试验按照以下顺序进行：

- a) 关闭冗余冷却系统（如有）；
- b) 将有功功率升至额定值，持续运行至少 2 h。

7.4.1.3 检查内容包括：

- a) 记录柔性直流配电网系统运行参数，如交流母线电压、阀侧电流、直流电压、直流电流和有功功率等；
- b) 柔性直流配电网系统运行参数应与设计值相符；
- c) 检查主回路参数，监测阀冷却系统进出水温度，柔直变压器本体温度，桥臂电抗器本体温度，平波电抗器本体温度，交、直流屏柜和换流器的温度，夹线接头温度，隔离开关主触头温度，测量按 7.4.2 给出的要求进行；
- d) 换流站阀冷却系统进出水的温度应在技术规范规定的范围内；
- e) 记录换流站阀/平波电抗器（油浸式）油温和线圈温度，运行温度应在技术规范规定的范围内。

7.4.2 额定功率运行下的专项测量

额定功率运行下的专项测量包括：

- a) 交流电压谐波测量。测量换流站交流母线电压中的 2 次~50 次谐波。按工程技术规范规定的算法，计算各次谐波畸变率、总谐波畸变率、电压谐波波形系数。计算出的各次谐波畸变率、总谐波畸变率、电压谐波波形系数不应大于工程技术规范规定的数值。

- b) 可听噪声测量。按照工程技术规范规定的条件进行测量。测得的可听噪声数值不应大于工程技术规范规定的数值。
- c) 站辅助系统功率损耗测量。测量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。

7.5 交流系统人工短路试验（选做）

在直流系统各种可能的运行方式下，对交流变电站母线上的其他线路进行人工单相对地瞬时故障试验，交流保护应能正确动作。

多端直流系统应能穿越此故障，直流功率应在技术规定的时间内恢复到故障前的稳态值；恢复期间不允许出现直流电流和直流电压的持续震荡。

7.6 直流系统人工短路试验（选做）

在直流系统各种可能的运行方式下，对直流线路进行人工单/双极对地瞬时故障试验，保护应能正确动作。

多端直流系统有直流断路器时，应能准确地隔离故障。

7.7 黑启动试验（选做）

7.7.1 一般要求

柔性直流配电网系统可具有黑启动功能。当电力系统发生重大事故，导致系统全停或者瓦解时，可通过柔性直流配电网系统作为电力系统恢复电源。在一端电网全部失电的情况下，能够通过其他端换流站完成对失电端换流站的启动，使电力系统逐步恢复运行。

具有黑启动功能的换流站应配置独立站用电源后备电源。

7.7.2 一般步骤

7.7.2.1 直流侧充电

在换流器与直流线路极连接，通过直流断路器连接相应端换流器，柔直变压器与换流器连接隔离开关断开的情况下，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，无源端换流器阀控系统应能正常工作，预检功能应正确，换流器相关保护不应误动作。

检查阀控装置回报模块电压和状态信号，检查直流侧电压极性变比，按预定充电时间充电后，模块电压和直流电压应符合设计要求。

7.7.2.2 启动

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、相序正确，频率稳定在预期范围内。

7.8 交直流备自投试验（选做）

模拟交流系统发生故障，导致单端交流系统失电。先由交直流备自投装置形成负荷的孤岛，再通过柔性直流配电网系统控制，由定直流功率或定直流电压控制模式切换至定交流电压控制模式，使柔性直流配电网系统继续正常运行。

各站控制模式切换应平稳，输出的交流电压和频率符合规范要求，网侧电压和电流的幅值、相位、相序正确，频率稳定在预期范围内。

8 直流配电站系统试验

8.1 直流电力电子变压器试验

8.1.1 充电闭锁试验

将直流电力电子变压器高压侧断路器（或隔离开关）闭合、充电电阻旁路开关断开，使变压器高压侧接入电源，变压器高压侧开始充电。此过程中系统处于不控整流充电闭锁状态，需观察变压器端口及模块电压、充电电流、控制状态信号是否有异常，充电结束后检查启动回路（包括启动电阻等）是否过热。

充电过程中变压器相关保护不应误动作，如有异常故障应能正确报警，保护正确动作。充电闭锁试验结束后变压器系统应能正常工作。

试验期间，变压器充电次数不应少于 2 次，充电间隔时间不小于 15 min。

8.1.2 紧急停机试验

直流电力电子变压器充电完成后，通过按下急停按钮，对变压器进行紧急停机，验证变压器是否能正常执行紧急停机命令。

紧急停运时序应正确，变压器保护无误动作，不应产生异常过电压。

8.1.3 空载运行试验

直流电力电子变压器充电完成后，按内部逻辑正常启动到空载运行状态，变压器低压侧带空载额定电压，在空载完成后进行正常停机。

空载运行过程中变压器高低压侧直流电压波形、幅值应符合设计要求，检查变压器功率模块运行是否正常。

8.1.4 空载停机试验

8.1.4.1 正常停机

当变压器高低压侧具备分断点（接触器/断路器），下达停机指令时，变压器应断开高低压侧接触器/断路器，使变压器与电网断开连接。

当变压器高压侧不具备分断点（如外部断路器置于变压器外侧且由直流控制保护装置控制分合），对变压器下达停机指令时，变压器应能向直流控制保护装置发出停机请求，使变压器与电网断开连接。

8.1.4.2 故障停机

通过注入二次信号或按下紧急按钮模拟变压器内部故障，变压器应能主动进行停机动作或向直流控制保护装置发出停机指令，使直流变压器与电网断开连接。

8.1.5 模块冗余试验

在直流电力电子变压器正常运行状态下，模拟功率模块故障，变压器将故障的功率模块旁路，当旁路模块数量不超过系统冗余数量时，变压器继续正常运行不停机；当旁路模块数量达到系统冗余数量上限时，变压器发出停机请求。

模块冗余试验期间应观察各模块电压、电流，端口电压、电流是否满足设计需求；观察被旁路模

块高压侧端口电压是否为零。

8.2 直流配电站系统控制试验

8.2.1 直流配电站系统启动

在多端系统正常运行时，直流配电站控制保护装置下发启动运行综合指令，直流电力电子变压器正常投入运行，变压器低压侧相关设备接收指令，按照内部逻辑进入运行状态，完成直流配电站系统启动。启动过程中变压器低压侧电压、电流稳定，无保护动作。

8.2.2 变压器计划性退出试验

直流电力电子变压器在正常带负荷运行过程中，接收到直流配电站控制保护装置下发的计划退出命令后，应正常降低负荷后停机。退出过程中不对系统造成影响。

8.2.3 变压器控制模式切换试验

直流电力电子变压器应具备在线切换高低压侧控制模式的功能，包括电压控制模式和功率控制模式之间的切换。

变压器运行在电压控制模式时，电压控制误差应在设计标准之内；接收到直流配电站控制保护装置下发的功率控制指令后，无缝切换到功率控制模式。

变压器运行在功率控制模式时，功率控制误差应在设计标准之内；接收到直流配电站控制保护装置下发的电压控制指令后，无缝切换到电压控制模式。

8.2.4 第 N 端换流站并离网对变压器扰动试验

在多端系统正常运行时，直流电力电子变压器正常运行，投入第 N 端换流站，观测变压器高压侧电压与电流，变压器应正常运行。

在多端系统正常运行时，直流电力电子变压器正常运行，退出第 N 端换流站，观测变压器高压侧电压与电流，变压器应正常运行。

8.3 直流微电网接入试验（选做）

8.3.1 计划性并网转离网

在多端系统正常运行时，直流微电网运行于并网模式，直流配电站控制保护装置下达离网指令，直流电力电子变压器低压侧由电压控制模式切换为功率控制模式，直流微电网内储能系统由功率控制模式切换为电压控制模式，并调节并网点交换功率至允许切换范围内，控制变压器退出运行，完成并网转离网切换。

离网过程中直流微电网电压稳定，无保护动作。

8.3.2 非计划性离网

在多端系统正常运行时，直流微电网运行于并网模式，直流配电站控制保护装置模拟保护动作出口跳闸，直流电力电子变压器退出运行，直流微电网离网稳定运行，无保护动作。

8.3.3 离网转并网

在多端系统正常运行时，直流微电网运行于离网模式，直流配电站控制保护装置下达并网指令，直流电力电子变压器投入运行，变压器低压侧为电压控制模式，在连接直流微电网后，直流微电网内

储能系统由电压控制模式切换为功率控制模式，完成离网转并网切换。

并网过程中直流微电网电压稳定，无保护动作。

8.3.4 功率交换功能试验

直流微电网功率交换功能的调试，应以直流微电网与柔性直流配电网系统之间的交换功率最大允许值为基准值（受现场环境条件限制时，以现场环境条件下交换功率最大可输出或吸收值为基准）进行。功率交换功能调试应包括直流微电网输出功率功能调试和直流微电网吸收功率功能调试。在功率交换功能试验中，设定不同的功率交换值，记录直流微电网实际输出或吸收的功率值，实际值与设定值的偏差不应大于 10%。

9 试运行要求

系统试运行时应满足以下要求：

- a) 系统试验完成后，将柔性直流配电网系统投入正常工作状态，考核其运行稳定性、可靠性和是否满足设计所规定的功能和性能。
- b) 试运行应在多端系统、直流配电站系统试验已完成，发现的缺陷和异常情况已处理后进行。
- c) 柔性直流配电网系统连续带电试运行时间不应少于 168 h。
- d) 柔性直流配电网系统的电网负荷率不应低于 80%。
- e) 如果柔性直流配电网系统在试运行期间出现故障而被迫退出运行，就需等待故障或异常处理完成后重新进行试运行。
- f) 试运行期间，应实时监测有关设备各部分的温升。
- g) 试运行开始前和结束后，应对充油设备取油样进行色谱对比分析并记录相关数据。
- h) 试运行完成后，应对设备做一次全面检查，处理试运行期间出现的缺陷和异常情况。对暂时不具备处理条件而又不影响安全运行的项目，由启委会决定负责处理的单位和完成时间。
- i) 由于设备制造质量缺陷而不能达到规定要求时，由建设项目法人或总承包商通知供货商负责消除设备缺陷，施工单位应积极配合处理，并做出记录。消缺后视具体情况，由建设项目法人决定是否重新进行有关试验进行验证。
- j) 试运行过程中，应对各项设备的运行情况做出详细记录，由试验指挥组编写试运行报告。

附 录 A
(规范性)
系统调试项目及要求

系统调试项目及要求见表 A.1。

表 A.1 系统调试项目及要求

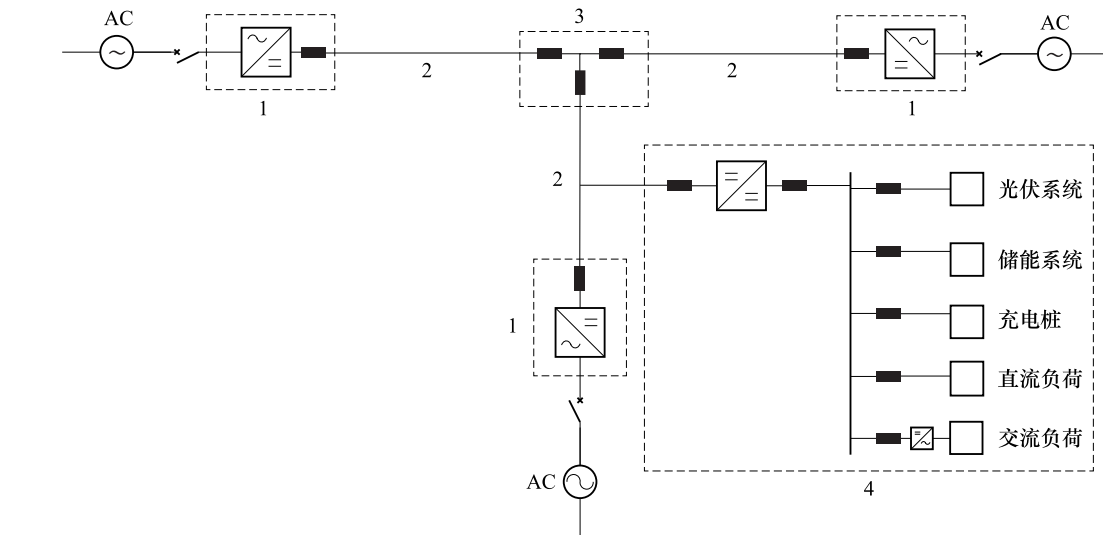
序号	调试项目名称	条款	调试类别	调试要求
1	不带电顺序操作试验	5.2.1	换流站试验	必做项目
2	不带电出口跳闸试验	5.2.2	换流站试验	必做项目
3	柔直变压器充电试验	5.2.3	换流站试验	必做项目
4	换流器充电试验	5.2.4	换流站试验	必做项目
5	换流器空载运行试验	5.2.5	换流站试验	必做项目
6	带电保护跳闸试验	5.2.6	换流站试验	必做项目
7	换流站一键启停	5.2.7	换流站试验	必做项目
8	开路试验	5.2.8	换流站试验	必做项目
9	STATCOM 运行方式试验	5.2.9	换流站试验	必做项目
10	电磁干扰试验	5.2.10	换流站试验	必做项目
11	站用电源切换试验	5.2.11	换流站试验	必做项目
12	功率模块冗余试验	5.2.12	换流站试验	必做项目
13	通信接口试验	5.2.13	换流站试验	必做项目
14	计算机监控系统试验	5.2.14	换流站试验	必做项目
15	不带电试验	6.2.1	端对端系统试验	必做项目
16	解/闭锁运行试验	6.2.2	端对端系统试验	必做项目
17	紧急停运试验	6.2.3	端对端系统试验	必做项目
18	保护跳闸试验	6.2.4	端对端系统试验	必做项目
19	控制系统手动切换试验	6.2.5	端对端系统试验	必做项目
20	控制系统监视与切换试验	6.2.6	端对端系统试验	必做项目
21	控制模式切换试验	6.2.7	端对端系统试验	必做项目
22	功率升/降试验	6.2.8	端对端系统试验	必做项目
23	动态性能测试	6.2.9	端对端系统试验	必做项目
24	环流抑制试验	6.2.10	端对端系统试验	必做项目
25	阀冷却系统切换试验	6.2.11	端对端系统试验	必做项目
26	就地/远方控制试验	6.2.12	端对端系统试验	必做项目
27	站间通信故障试验	6.2.13	端对端系统试验	必做项目
28	整体启动/整体停运试验	7.2.1	多端系统试验	必做项目
29	紧急停运试验	7.2.2	多端系统试验	必做项目
30	功率升/降试验	7.2.3	多端系统试验	必做项目

表 A.1 (续)

序号	调试项目名称	条款	调试类别	调试要求
31	动态性能测试	7.2.4	多端系统试验	必做项目
32	$N-1$ 端运行, 第 N 端计划性并网试验	7.2.5	多端系统试验	必做项目
33	N 端运行, 第 N 端计划性离网试验	7.2.6	多端系统试验	必做项目
34	N 端运行, 第 N 端故障退出试验	7.2.7	多端系统试验	必做项目
35	直流断路器系统与直流控制保护系统通信试验	7.3.1	多端系统试验	必做项目
36	直流断路器本体控制故障试验	7.3.2	多端系统试验	必做项目
37	直流断路器负荷开断试验	7.3.3	多端系统试验	必做项目
38	多端口直流断路器控制试验	7.3.4	多端系统试验	必做项目
39	直流断路器偷跳试验	7.3.5	多端系统试验	必做项目
40	直流断路器失灵试验	7.3.6	多端系统试验	必做项目
41	额定负荷试验	7.4	多端系统试验	必做项目
42	交流系统人工短路试验	7.5	多端系统试验	选做项目
43	直流系统人工短路试验	7.6	多端系统试验	选做项目
44	黑启动试验	7.7	多端系统试验	选做项目
45	交直流备自投试验	7.8	多端系统试验	选做项目
46	直流电力电子变压器试验	8.1	直流配电站系统试验	必做项目
47	直流配电站系统控制试验	8.2	直流配电站系统试验	必做项目
48	直流微电网接入试验	8.3	直流配电站系统试验	选做项目

附录 B
(资料性)
典型柔性直流配电网网架结构

典型柔性直流配电网网架结构如图 B.1 所示。



说明:

—*— 交流断路器;

—■— 直流断路器;

—(AC)⊙— 交流电网;

⊞= —换流器;

⊞= —直流电力电子变压器;

1 —换流站;

2 —直流线路(电缆);

3 —多端口直流断路器;

4 —直流配电站。

图 B.1 典型柔性直流配电网网架结构

附录 C
(资料性)
动态性能指标

C.1 动态性能指标定义

动态性能指标定义如图 C.1 所示。

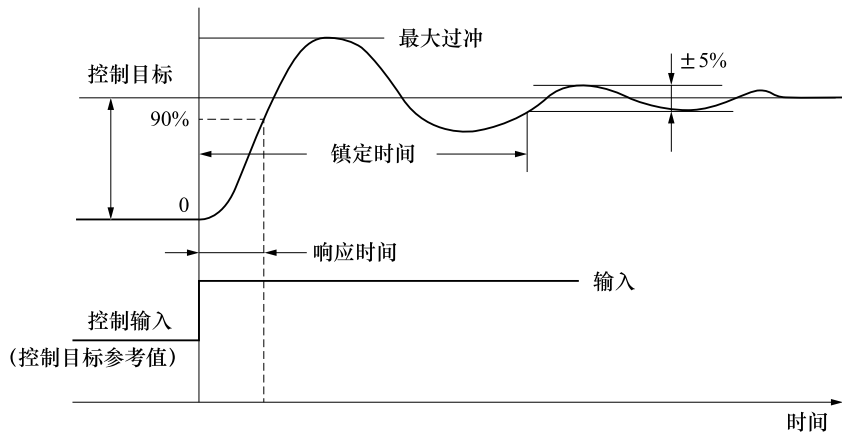


图 C.1 动态性能指标定义

C.2 响应时间

当输入阶跃控制信号后，柔性配电装置输出电气量从目标值的 0% 达到目标值的 90% 所用的时间，且期间没有产生过冲。

C.3 镇定时间

当输入阶跃控制信号后，柔性配电装置输出电气量达到目标值的 $\pm 5\%$ 范围内所用的时间。

C.4 超调量

当输入阶跃控制信号后，柔性配电装置输出电气量超出稳态值的最大偏移量与稳态值之比。

C.5 最大过冲

当输入阶跃控制信号后，柔性配电装置输出电气量第一个波峰值。