



中华人民共和国能源行业标准

NB/T XXXX—XXXX

换流站用有功功率动态平衡装置技术规范

Technical Specification of Active Power Dynamic Balance Equipment used
in Converter Stations

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 2

4 使用条件 3

 4.1 使用条件 3

 4.2 安装条件 3

5 电气结构 3

 5.1 交流侧有功功率动态平衡装置连接位置 3

 5.2 交流侧有功功率动态平衡装置分类 3

 5.3 交流侧有功功率动态平衡装置电气结构 3

 5.4 直流侧有功功率动态平衡装置连接位置 4

 5.5 直流侧有功功率动态平衡装置分类 4

 5.6 直流侧有功功率动态平衡装置电气结构 4

6 性能要求 4

 6.1 一般要求 4

 6.2 电气性能 4

 6.3 安全性能 4

 6.4 冗余特性 5

 6.5 噪声水平 5

 6.6 抗扰性能 5

 6.7 损耗 5

 6.8 辅助功能 5

 6.9 机械性能 6

 6.10 触发系统性能 6

 6.11 阀控系统性能 6

 6.12 冷却系统（如有）性能 7

 6.13 功率平衡电阻性能 7

 6.14 防火性能 7

7 技术参数 7

7.1 概述..... 7

7.2 满功率连续投入最长时间..... 7

7.3 多次反复投入能力..... 8

7.4 最长冷却时间..... 8

7.5 投退动作定值..... 8

7.6 额定电阻值..... 8

7.7 绝缘水平..... 8

7.8 能量耐受要求..... 8

7.9 温升限值..... 8

7.10 爬电距离..... 9

7.11 使用寿命..... 9

8 试验..... 9

8.1 功率平衡阀的型式试验..... 9

8.2 功率平衡电阻的型式试验..... 14

8.3 功率平衡阀的例行试验..... 15

8.4 功率平衡电阻的例行试验..... 18

8.5 有功功率动态平衡装置的特殊试验..... 18

9 包装、运输和贮存..... 22

9.1 包装..... 22

9.2 运输..... 23

9.3 贮存..... 23

附录 A （资料性） 换流站用有功功率动态平衡装置电气结构..... 24

附录 B （资料性） 换流站用有功功率动态平衡装置投入时典型波形..... 26

附录 C （资料性） 换流站用有功功率动态平衡装置典型设计参数..... 28

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。

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。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国高压直流输电设备标准化技术委员会（SAC/TC333）归口。

本文件起草单位：国网经济技术研究院有限公司、西安高压电器研究院股份有限公司等。

本文件主要起草人：

换流站用有功功率动态平衡装置技术规范

1 范围

本文件规定了换流站用有功功率动态平衡装置的术语和定义、使用条件、电气结构、性能要求、技术参数、试验以及包装、运输和贮存。

本文件适用于电阻型换流站用有功功率动态平衡装置，解决功率盈余问题的其他类型能量耗散装置也可参照使用。

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 311.1—2012 绝缘配合 第1部分：定义、原则和规则
- GB/T 2423.16 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验J及导则：长霉
- GB/T 2423.17 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验Ka：盐雾
- GB/T 2423.18 环境试验 第2部分：试验方法 试验Kb：盐雾，交变(氯化钠溶液)
- GB/T 3096—2008 声环境质量标准
- GB/T 4208—2017 外壳防护等级（IP代码）
- GB/T 4937.13 半导体器件机械和气候试验方法 第13部分：盐雾
- GB/T 11022—2020 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求
- GB/T 11287 电气继电器 第21部分：量度继电器和保护装置的振动、冲击、碰撞和地震试验 第1篇：振动试验(正弦)
- GB/T 13384—2008 机电产品包装通用技术条件
- GB/T 14537—1993 量度继电器和保护装置的冲击与碰撞试验
- GB/T 16927.1 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求
- GB/T 17626.1~18 电磁兼容试验全标准
- GB/T 20840.8 互感器 第8部分：电子式电流互感器
- GB/T 20990.1—2020 高压直流输电晶闸管阀 第1部分：电气试验
- GB/T 20995—2020 输配电系统的电力电子技术 静止无功补偿装置用晶闸管阀的试验
- GB/T 33348—2016 高压直流输电用电压源换流器阀 电气试验
- GB/T 34118—2017 高压直流系统用电压源换流器术语
- GB/T 35702.1—2017 高压直流系统用电压源换流器阀损耗 第1部分：一般要求
- GB/T 35702.2—2017 高压直流系统用电压源换流器阀损耗 第2部分：模块化多电平换流器
- GB/T 36955—2018 柔性直流输电用启动电阻技术规范
- GB/T 50064 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范
- GB 50260 电力设施抗震设计规范
- GJB 150.10A 军用装备实验室环境试验方法 第10部分：霉菌试验
- GJB 150.11A 军用装备实验室环境试验方法 第11部分：盐雾试验

GJB 150.16A—2009 军用装备实验室环境试验方法 第16部分：振动试验

DL/T 860 系列标准工程化实施技术规范

ISO 12944—6 色漆和清漆—防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第6部分：实验室性能测试方法

3 术语和定义

GB/T 34118—2017，GB/T 36955—2018 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

有功功率动态平衡装置 active power dynamic balancing device

为保证系统有功功率平衡而投入的动态耗散盈余功率的装置。

注：有功功率动态平衡装置根据布置位置不同可分为交流侧有功功率动态平衡装置和直流侧有功功率动态平衡装置。

3.2

功率平衡阀（阀） power balancing valve (valve)

有功功率动态平衡装置中由多个功率平衡模块串联构成的阀，为区别换流阀，称为功率平衡阀，简称阀。

3.3

功率平衡模块 power balancing module

功率平衡阀的最基本电气单元，含驱动、均压或缓冲电路等附属部件，由一个或多个全控型功率器件或半控型功率器件构成。

3.4

阀段 valve section

由若干功率平衡模块和其他部件构成的用于测试目的的电气组合，按比例呈现完整阀（3.2）的电气性能。

3.5

阀塔 valve tower

由多个阀段串联构成的完整独立机械结构，包括冷却管路（如有）、光纤通道、均压屏蔽构件等。

3.6

阀支架 valve support

对阀（3.2）安装起机械支撑和对地电位起电气绝缘作用的部件。

注：阀的一部分，在所有的阀设计中可清楚地分辨出阀支架，并非所有的阀结构都含有阀支架。

[来源：GB/T 34118—2017，7.25]

3.7

冗余级数 redundant level

通过型式试验验证可被外部或内部短路且不影响阀安全运行的最大功率平衡模块数。如果故障或短接的功率平衡模块总数超过该数目，需要停运并检修有功功率动态平衡装置，否则有功功率动态平衡装置将面临更高的运行故障风险。

3.8

阀控系统 valve control device

功率平衡阀与直流控制保护系统的接口系统，用于接收直流控制保护信号并完成阀的控制、监视和保护等功能。

3.9

功率平衡电阻 power balancing resistor

有功功率动态平衡装置中起到耗散系统盈余功率作用的电阻。

注：根据布置方式可分为集中式功率平衡电阻和分布式功率平衡电阻。

4 使用条件

4.1 使用条件

可按照 GB/T 11022—2020 中 4.1、4.2 规定执行。

4.2 安装条件

功率平衡阀可采用支撑式或悬吊式安装。

集中式功率平衡电阻宜采用支撑式安装，宜布置于户外。

分布式功率平衡电阻集成于功率平衡阀阀塔内，布置在户内，宜配置冷却系统。

5 电气结构

5.1 交流侧有功功率动态平衡装置连接位置

交流侧有功功率动态平衡装置根据系统条件布置在直流输电系统联接/换流变压器网侧或阀侧，通常位于送端站联接/换流变压器网侧。

注：交流侧有功功率动态平衡装置在直流输电系统中的典型位置示意图见附录A图A.1。

5.2 交流侧有功功率动态平衡装置分类

根据交流侧有功功率动态平衡装置与直流输电系统的连接方式可将其分为直挂式与降压式两种形式。

直挂式交流侧有功功率动态平衡装置直接与直流输电系统送端换流站联接/换流变压器网侧交流母线相连。

降压式交流侧有功功率动态平衡装置通过降压变压器与直流输电系统送端换流站联接/换流变压器网侧交流母线相连。

5.3 交流侧有功功率动态平衡装置电气结构

交流侧有功功率动态平衡装置采用三相电路结构，每相一般由晶闸管反并联构成的功率平衡阀、功率平衡电阻、本体过流保护用测量装置等组成，三相之间采用三角形接线或星型接线方式。

注：交流侧有功功率动态平衡装置典型拓扑结构参见附录A图A. 2。

5.4 直流侧有功功率动态平衡装置连接位置

直流侧有功功率动态平衡装置根据系统条件布置在直流输电系统极线之间，通常位于受端站换流器直流侧出口处。

注：直流侧有功功率动态平衡装置在直流输电系统中的典型位置示意图见附录A图A. 3。

5.5 直流侧有功功率动态平衡装置分类

根据直流侧有功功率动态平衡装置中功率平衡电阻的布置方式可将其分为集中式、分布式与混合式三种技术路线。

集中式直流侧有功功率动态平衡装置采用集中式功率平衡电阻。

分布式直流侧有功功率动态平衡装置采用分布式功率平衡电阻。

混合式直流侧有功功率动态平衡装置同时采用集中式功率平衡电阻和分布式功率平衡电阻。

5.6 直流侧有功功率动态平衡装置电气结构

直流侧有功功率动态平衡装置采用单相电路结构，一般由全控型功率器件构成的功率平衡阀、功率平衡电阻等组成。

注：直流侧有功功率动态平衡装置典型拓扑结构参见附录A图A. 4。

6 性能要求

6.1 一般要求

当送端单极闭锁或受端交流系统故障等原因导致直流输电系统出现盈余功率时，有功功率动态平衡装置应及时、迅速地投入运行，尽快耗散盈余功率、实现系统故障穿越。

当上述故障清除后，有功功率动态平衡装置应迅速、可靠地退出，使系统平滑过渡到稳定状态。

有功功率动态平衡装置的投退操作不宜产生较大的交直流电压尖峰，不应导致相邻避雷器动作。

6.2 电气性能

功率平衡阀应采用功率平衡模块串联的方式获得足够的电压承受能力，应具备在平均工作电压不小于50%器件额定电压情况下长期运行的能力。

有功功率动态平衡装置各组部件应具有承受由于触发系统误动、装置内部故障或直流输电系统故障造成的冲击电压和电流的能力。

有功功率动态平衡装置设计应考虑功率平衡模块串联引起的电压不均匀分布特性以及其它非线性因素对功率平衡阀耐压能力的影响。

每只功率器件宜具有独立承担最大持续运行电流及各种暂态冲击电流的能力，不宜采用功率器件并联的设计。

6.3 安全性能

有功功率动态平衡装置的本体保护应能在各种故障条件下确保设备本体的安全。

有功功率动态平衡装置应配置误导通保护以避免其在直流输电系统稳态运行时误投入。

功率平衡阀的各功率平衡模块应被设计成可独立控制或隔离型,运行期间故障功率平衡模块应能被可靠隔离,单一元件故障或出现黑模块均不应引起整个装置或系统闭锁、停运。

黑模块指阀控系统无法确认其全部运行信息或运行状态的功率平衡模块。

功率平衡阀中功率平衡模块旁路开关(如有)拒动或误动不应影响或损坏其他功率平衡模块或设备。

有功功率动态平衡装置处于非投入状态时,各功率平衡模块应具备自检能力。

对于直流侧有功功率动态平衡装置,若功率平衡模块包含电容,应保证:

- a) 功率平衡阀具备长期启动等待的能力,此过程中不应影响系统其他设备正常运行,不应出现功率平衡阀中部分功率平衡模块电容充电电压分散引起功率平衡阀无法启动或其他功率平衡模块故障的问题;在长期启动等待过程中功率平衡阀可采用主动均压控制策略。
- b) 功率平衡阀应具备在启动过程中功率平衡模块电容充电至额定工作电压的能力。

直流侧有功功率动态平衡装置应避免频繁出现功率平衡模块通讯故障、驱动故障、取能电源故障、供能变压器(如有)故障等问题,采取的措施宜包括但不限于:

- a) 采用交叉供电或冗余供电模式,提高取能可靠性;
- b) 采用阀塔本地通信组网或通过相邻功率平衡模块下发旁路开关(如有)动作信号,保证通信冗余。

6.4 冗余特性

功率平衡模块的损坏是指功率平衡模块中全控型/半控型功率器件、直流电容器(如有)或其他相关元件的损坏导致该功率平衡模块短路,在功能上减少了功率平衡阀中功率平衡模块的有效数量。

如果在两次计划检修之间的12个月运行周期开始时没有损坏的功率平衡模块,并且在此运行周期内不进行任何功率平衡模块更换,则此运行周期内功率平衡阀的冗余功率平衡模块全部损坏的支路不超过一个。

功率平衡阀每支路功率平衡模块冗余级应不小于12个月运行周期内每支路功率平衡模块损坏级数期望值的2.5倍,也不宜少于每支路功率平衡模块总数的5%(直流侧有功功率动态平衡阀)或每支路3级(交流侧有功功率动态平衡阀)。

功率平衡模块损坏级数期望值应在全控型功率器件元件和相关部件的损坏率估计值的基础上,按独立随机损坏模型进行计算。全控型功率器件元件及相关元部件的损坏率估计值应根据同类应用条件下同类设备的运行经验选取。

6.5 噪声水平

有功功率动态平衡装置应采用低噪声元件,以降低其运行过程中的噪声水平,应满足GB/T 3096—2008中第5.1条。

6.6 抗扰性能

有功功率动态平衡装置应进行抗电磁骚扰设计,应充分考虑交、直流场内开关动作对功率平衡阀及其控制系统的电磁骚扰影响。

6.7 损耗

直流侧有功功率动态平衡装置的功率平衡阀损耗计算应符合GB/T 35702.1—2017和GB/T 35702.2—2017的规定。

交流侧有功功率动态平衡装置的功率平衡阀损耗计算应符合GB/T 20989—2017中第5.1条的规定。

6.8 辅助功能

当直流系统输电线路采用电缆敷设方式时，直流侧有功功率动态平衡装置应与直流控制保护系统协调配合，在系统正常停运或发生单极接地故障后辅助电缆快速放电。

6.9 机械性能

功率平衡阀的机械结构应简单、坚固、可靠性高、便于检修与维护，应采用组件式设计，组部件应可以更换。

触发系统如果采用光纤，其布置应便于光纤的断开和更换，同时还应避免安装时对光纤造成的机械损伤。

功率平衡阀应能够承受相应地震烈度的应力、检修人员到阀体上工作时所产生的应力以及由于各种故障或控制保护系统动作/误动作产生的电动力。

各种塑料构件应避免因电晕放电而导致老化。应尽可能使用抗电晕放电的材料。在容易受电晕放电的影响而产生老化的各种塑料构件附近，应避免此类电晕放电发生。

功率平衡阀（若含冷却系统）的结构应能保证泄漏出的冷却液体自动沿沟槽流出，离开带电部件，流至一个检测器并报警，而不会造成任何元部件的损坏。如果阀厅装设了水喷淋灭火系统，应保证在喷水系统动作时不会造成任何元部件的损坏。

6.10 触发系统性能

触发系统高、低压电路间宜采用光隔离。

若功率平衡阀功率平衡模块触发系统的取能电路可以满足取能要求，则任何系统故障都不应影响触发系统按照控制指令动作。

若功率平衡阀功率平衡模块触发系统的供电不足，则在触发系统不能正常工作之前，功率平衡阀应采取相应保护措施避免其损坏或出现不受控的情况。

6.11 阀控系统性能

阀控系统应满足直流控制保护系统的要求，且保证功能正确、完备、可靠性高。阀控系统与直流控制保护系统间的信号交换通过光缆/电缆或总线形式进行，宜采用 GB/T 20840.8 协议传输数据。阀控系统接入运行人员后台的告警信息应遵循 DL/T 860 通信规约。

阀控系统应具备试验模式，在有功功率动态平衡装置检修状态下，由阀控系统向功率平衡模块控制单元发出触发脉冲对功率平衡模块功率器件进行测试，并监视触发与回报信号。阀控过流保护应按“三取二”设计，如图 1 所示。有功功率动态平衡装置的控制主机、保护主机、三取二装置硬件上宜独立配置。

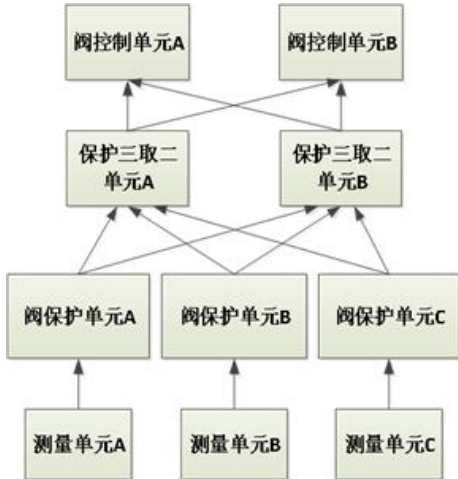


图1 阀控过流保护的“三取二”设计示意图

控制系统应按双重化设计。

阀控系统的控制周期应不超过 $50\ \mu\text{s}$ 。

阀控系统的整体链路延时应满足工程需要。

6.12 冷却系统（如有）性能

若需要配置内冷却系统，则其应具有足够的冷却能力，以保证在各种运行条件下有效冷却阀。

宜采用单循环冷却回路的液体冷却系统，冷却介质应为液体（例如去离子水）。

应根据换流站的环境条件，考虑是否需要有关测量并采取相应措施，以防止热传导流体结冰。

冷却系统设计应保证在最大持续运行电流下运行时和最大持续运行电流下发生故障时的功率器件结温要求并具有足够的设计裕度，同时保证在极端温度和湿度条件下，功率平衡阀不应出现凝露。

6.13 功率平衡电阻性能

功率平衡电阻设计时应考虑下列因素：

- a) 在运行、安装和维护期间的机械应力；
- b) 在运行时的热应力；
- c) 内部或外部故障对电阻器的电磁力；
- d) 风力、冰雪负荷；
- e) 抗震要求；
- f) 温度变化引起的机械应力影响。

电阻器材料应采用抗氧化、耐腐蚀、耐高温、温度系数低、加工性能好，宜选用片状或带状合金材料、陶瓷盘式电阻材料。电阻器应采用无感化设计。

电阻器设计应考虑发热对设计裕度的影响，按 GB/T 311.1—2012 中 3.3 进行校验，以满足热空气对绝缘的影响。

应通过功率平衡电阻回路电流测量装置对功率平衡电阻充电电流、冲击能量等进行监测。

电阻器支撑绝缘子和箱体套管应能承受所在位置的电压，并能满足机械强度和爬电距离要求。金属箱式和空心绝缘子型电阻器应根据运行电压等级安装适当的屏蔽装置，满足防电晕设计要求。电阻器接线端子的载流量应满足要求，方便连接，并保证足够的机械强度。接线端子耐受机械荷载的能力应满足：静态安全系数不小于 2.75，动态安全系数不小于 1.67。金属箱式电阻器外壳应符合 GB/T 4208—2017 第 5 章和第 6 章的规定。

6.14 防火性能

功率平衡阀的防火性能应符合 GB/T 37010—2018 中第 5.8 条的规定。

功率平衡电阻应不含可燃物质。

7 技术参数

7.1 概述

换流站用有功功率动态平衡装置投入时的系统关键参数典型波形如附录 B 所示。

换流站用有功功率动态平衡装置的典型设计参数列表（包括通用技术参数、功率平衡阀设计参数、功率平衡电阻设计参数）如附录 C 所示。

7.2 满功率连续投入最长时间

换流站用有功功率动态平衡装置在最大盈余功率下可连续投入的最长时间应满足实际工程要求，典型值为 1~2 s，并应符合盈余功率越小、可连续投入的时间越长的特性。

7.3 多次反复投入能力

换流站用有功功率动态平衡装置应具备在满功率连续投入最长时间内多次反复投入的能力。

7.4 最长冷却时间

换流站用有功功率动态平衡装置在两次满功率连续投入最长时间之间的最长冷却时间应满足实际工程要求，典型值为 20~30 min。

7.5 投退动作定值

直流侧换流站用有功功率动态平衡装置通常在直流电压首次达到 1.1 p. u. ~1.3 p. u. 间的某一定值后进入投入状态，在直流电压降至 0.95 p. u. ~1.05 p. u. 间的某一定值后退出投入状态。

交流侧换流站用有功功率动态平衡装置通常在交流电压首次达到 1.1 p. u. ~1.3 p. u. 间的某一定值后进入投入状态，在交流电压降至 0.95 p. u. ~1.05 p. u. 间的某一定值后退出投入状态。

7.6 额定电阻值

除有特殊规定外，功率平衡电阻的额定电阻值在 0~3 000 Hz 频率范围内应满足 0~+5 %的偏差。
测量额定电阻时，随着温度的变化电阻值在一定范围内变化，其额定电阻值 R_N 按式（1）计算，测量时应测试 5 次取平均值：

$$R_N = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \left(\frac{R_{x,i}}{1 + \alpha(T_i - 25)} \right) \dots\dots\dots (1)$$

式中：
 R_N ——额定电阻值（已折算到 25 ℃），单位为欧姆（Ω）；
 $R_{x,i}$ ——第 i 次测量电阻值，单位为欧姆（Ω）；
 α ——电阻材料温度系数，单位为每开尔文（1/K）；
 T ——测量时的温度值，单位为摄氏度（℃）。
除有特殊规定外，温升试验后的电阻热态额定值与额定电阻值 R_N 的高温偏差不应超过 0~+5 %。

7.7 绝缘水平

应符合 GB/T 311.1—2012 和 GB/T 50064 中的规定。

7.8 能量耐受要求

功率平衡电阻在满功率连续投入最长时间内能耐受的 最大能量与该时间内系统额定盈余能量的比值应考虑极端故障运行工况，建议取值为 2，具体数值可根据系统需求协商确定。

7.9 温升限值

功率平衡电阻材料在冲击能量下的温升要求如下：

表1 主要电阻材料的温升限值

电阻器型式	电阻器材料	电阻器最热点温升 (K)
片状/带状	Cr20Ni30	小于550
	Cr15Ni60	小于600

	Cr23Ni60	小于550
	Cr20Ni80	小于550
	Ni25Cr20Mo5	小于550
圆盘式	陶瓷材质	小于120

7.10 爬电距离

爬电距离应根据爬距计算电压和爬电比距确定，按式（2）计算：

$$l_t = l_f \times U_m \dots\dots\dots (2)$$

式中：
 l_f ——爬电比距，单位为毫米每千伏（mm/kV）。
 U_m ——爬距计算电压，单位为千伏（kV）。

7.11 使用寿命

应不小于 10 000 次投入或不小于 40 年使用寿命。

8 试验

8.1 功率平衡阀的型式试验

8.1.1 概述

功率平衡阀的型式试验包括阀支架绝缘试验、阀端间绝缘试验与运行特性试验。
功率平衡阀的绝缘试验中，冗余的功率平衡模块应短接；功率平衡阀的运行特性试验中，冗余的功率平衡模块可不短接，但应按规定的比例系数提高试验电压。
如含冷却系统，运行特性试验中冷却剂应反应实际运行工况，特别是流量和温度应设置成试验所考虑的最不利的值。

8.1.2 替代证明

阀的每一种设计都应以本文件规定的型式试验为依据。若阀确实与以前试验过的类似，卖方可提交以前的型式试验报告替代进行型式试验供买方考虑。同时应提出一个独立的报告详述设计的差异并论证参照的型式试验如何能满足所设计试品的试验目的。

8.1.3 试品

基于全控型功率器件的功率平衡阀的型式试验试品要求参照 GB/T 33348—2016 中的 4.1.2 条。
基于非全控型功率器件的功率平衡阀的型式试验试品要求参照 GB/T 20990.1—2020 中的 4.1.2 条。

8.1.4 试验项目

适用于交流侧有功功率动态平衡装置和直流侧有功功率动态平衡装置的功率平衡阀型式试验包括但不限于以下试验项目：

表2 功率平衡阀的型式试验项目

	交流侧有功功率动态平衡装置	直流侧有功功率动态平衡装置
阀支架绝缘试验		
阀支架直流耐压试验	/	适用

阀支架交流耐压试验	适用	适用
阀支架操作冲击试验	适用	适用
阀支架雷电冲击试验	适用	适用
阀支架陡波冲击试验	适用	适用
阀端间绝缘试验		
阀端间直流耐压试验	/	适用
阀端间湿态直流耐压试验	/	如配置冷却系统适用
阀端间交流耐压试验	适用	/
阀端间操作冲击试验	适用	如适用
阀端间雷电冲击试验	适用	如适用
阀非周期触发试验	适用	/
运行特性试验		
最小直流电压试验	/	如适用
最小交流电压试验	适用	/
最大持续运行负荷试验（通流试验）	适用	适用
最大暂时过负荷运行试验	适用	适用
模块均压试验	适用	如适用
阀段级过流关断试验	/	如适用
恢复期暂态正向电压试验	适用	/
保护性触发连续运行试验	适用	/
短路电流试验	适用	如适用
抗电磁干扰试验	适用	适用

8.1.5 试验判据

基于全控型功率器件的功率平衡阀的型式试验成功的判据参照 GB/T 33348—2016 中的 4.4 条。
 基于非全控型功率器件的功率平衡阀的型式试验成功的判据参照 GB/T 20990.1—2020 中的 4.4 条。

8.1.6 阀支架直流耐压试验

该试验是验证阀支架绝缘在最大稳态直流电压和短时过电压下的耐压能力。
 试验以正负极性重复进行，试验期间进行局放测量。
 试验方法和判据应符合 GB/T 33348—2016 中第 7.3.1 节的规定。
 1 min 试验电压 U_{tds} 按照式（3）计算：

$$U_{tds} = \pm U_{dms1} \times k_3 \times k_t \dots\dots\dots (3)$$

式中：
 U_{dms1} ——阀支架 1 s 内的平均电压最大值；
 k_3 ——试验安全系数，通常取 1.1；
 k_t ——大气修正系数，取值应参考 GB/T 16927.1。
 3 h 试验电压 U_{tds} 按照式（4）计算：

$$U_{tds} = \pm U_{dms2} \times k_4 \dots\dots\dots (4)$$

式中：

U_{rms2} ——阀支架稳态运行电压最大值（直流电压+交流电压峰值）；

k_4 ——试验安全系数，通常取 1.5。

8.1.7 阀支架交流耐压试验

该试验是验证阀支架绝缘在最大稳态交流电压和短时过电压（包括阀支架操作过电压）下的耐压能力。试验期间进行局放测量。

试验方法和判据应符合 GB/T 33348—2016 中第 7.3.2 节的规定。

试验频率按 50 Hz 或 60 Hz 考虑。

8.1.8 阀支架操作冲击试验

该试验是验证阀支架绝缘在不同操作脉冲下的耐压能力。该试验在阀主端子（短接）对地之间加不少于 3 个正极性和 3 个负极性的操作冲击波。测试的脉冲电压波形参照 GB/T 16927.1 中的标准操作冲击电压波形。

试验电压应参照系统绝缘配合设计要求。

8.1.9 阀支架雷电冲击试验

该试验是验证阀支架绝缘在不同雷电脉冲下的耐压能力。该试验在阀主端子（短接）对地之间加不少于 3 个正极性和 3 个负极性的雷电冲击波。测试的雷电脉冲电压波形参照 GB/T 16927.1 中的标准雷电冲击电压波形。

试验电压应参照系统绝缘配合设计要求。

8.1.10 阀支架陡波冲击试验

该试验是验证阀支架绝缘在不同陡波脉冲下的耐压能力。该试验在阀主端子（短接）对地之间加不少于 3 个正极性和 3 个负极性的陡波冲击波。测试的陡波脉冲电压波形参照 GB/T 16927.1 中的标准陡波冲击电压波形。

试验电压应参照系统绝缘配合设计要求。

8.1.11 阀端间直流耐压试验

该试验由 2 s 超短期、10 s 短期和 3 h 长期试验组成。试验时，冷却系统（如有）必须工作，但流量可以降低。试验期间进行局放测量。

初始电压应不高于最高试验电压的 50%，然后升至 2 s 试验电压 U_{tv0} ，持续 2 s 后，电压降至 10 s 试验电压 U_{tv1} ，持续 10 s 后，电压降至 3 h 试验电压 U_{tv2} ，持续 3 h 后电压降为零。

直流局放测量记录时间为 3 h 测试期间的最后 1 h。整个记录时间内，超过 300 pC 的局放脉冲平均不大于 15 个/min，超过 500 pC 的局放脉冲平均不大于 7 个/min，超过 1 000 pC 的局放脉冲平均不大于 3 个/min，超过 2 000 pC 的局放脉冲平均不大于 1 个/min。

U_{tv0} 按式（5）计算： U_{tv1} 与 U_{tv2} 计算公式如下：

$$U_{\text{nv0}} = U_{\text{dc0}} \cdot k_o \cdot k_9 \dots\dots\dots (5)$$

式中：

U_{dc0} ——极端最大阀端间直流过电压峰值，通常取为 1.6 倍额定直流电压；

k_o ——被试阀段折算系数，按式（8）计算；

k_9 ——试验安全系数（当被试阀段功率平衡模块数量不足一个完整阀塔功率平衡模块数量时， $k_9=1.15$ ；当被试阀段功率平衡模块数量大于或等于一个完整阀塔功率平衡模块数量时， $k_9=1.1$ ）。

$$U_{nv1} = U_{dc1} \cdot k_o \cdot k_9 \dots\dots\dots (6)$$

式中：

U_{dc1} ——暂态最大阀端间直流过电压峰值，通常取为 1.2 倍额定直流电压。

$$U_{nv2} = U_{dc2} \cdot k_o \cdot k_9 \dots\dots\dots (7)$$

式中：

U_{dc2} ——稳态运行最大阀端间直流电压，通常取为 1.05~1.1 倍额定直流电压。

$$k_o = \frac{N_{tu}}{N_t - N_r} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

N_{tu} ——被试阀段串联功率平衡模块数量；

N_t ——有功功率动态平衡装置支路上功率平衡模块总数；

N_r ——有功功率动态平衡装置支路上冗余的功率平衡模块数量；

8.1.12 阀端间湿态直流耐压试验（如配置冷却系统适用）

该试验是验证功率平衡阀在冷却管道发生冷却液体泄漏时的绝缘性能。

应在阀结构顶部的一个阀段发生冷却液体泄漏的情况下重复进行，泄漏量应不小于冷却系统设计的泄漏跳阈值，在施加试验电压时和在此之前至少 1 h 内泄漏量应保持恒定，液体的电导率应比引发电导率报警定值高 5 %。湿态直流耐压试验电压为第 8.1.11 款规定的 3 h 试验电压 U_{tv2} ，试验时间为 5 min。

8.1.13 阀端间交流耐压试验

试验方法和判据应符合 GB/T 20990.1—2020 中第 8.3.3 款的规定。

8.1.14 阀端间操作冲击试验（如适用）

基于全控型功率器件的功率平衡阀的阀端间操作冲击试验按照 GB/T 33348—2016 中第 9.3.2 和 9.3.3 款执行。

基于非全控型功率器件的功率平衡阀的阀端间操作冲击试验按照 GB/T 20990.1—2020 中第 8.3.4、8.3.5 和 8.3.6 款执行。

8.1.15 阀端间雷电冲击试验（如适用）

基于全控型功率器件的功率平衡阀的阀端间雷电冲击试验按照 GB/T 33348—2016 中第 9.3.2 和 9.3.4 款执行。

基于非全控型功率器件的功率平衡阀的阀端间雷电冲击试验按照 GB/T 20990.1—2020 中第 8.3.4 和 8.3.7 执行。

8.1.16 阀非周期触发试验

试验方法和判据应符合 GB/T 20990.1—2020 中第 8.4 款的规定。

试验电压为 0.95 倍 BOD 电压，试验电流为额定电流。

8.1.17 最小直流电压试验（如适用）

该试验是验证从直流电容取能的板卡电子设备性能，证明阀设计的正确性。

试验对象是功率平衡模块单元串联组成的一个完整阀段。

利用电压源对阀段的端子之间施加一个直流电压，当达到最小直流电压时，所有功率模块应能启动工作，反馈信号正常。

试验电压 U_{\min} 定义为：

$$U_{\min} = \frac{N_{\text{out}}}{N_t} \cdot U_w \cdot k_2 \dots\dots\dots (9)$$

式中：

U_w ——实际运行中功率平衡阀两端的最小直流电压，不大于额定电压的 50 %；

N_{out} ——试验中串联功率平衡模块的数量；

N_t ——有功功率动态平衡装置支路上串联功率平衡模块的总数，包括冗余；

k_2 ——试验安全系数， $k_2=0.95$ 。

试验持续时间不少于 10 min。该试验主要以考核电压为主，不考核电流。

8.1.18 最小交流电压试验

该试验是验证晶闸管阀的触发系统在规定的最小交流电压和运行条件下能否正常运行。

试验方法和判据应符合 GB/T 20995—2020 中第 5.4.2 款的规定。

8.1.19 最大持续运行负荷试验（通流试验）

该试验的是检验功率平衡阀中功率器件及其相关电路在运行状态中最严重的作用条件下重复导通、关断时，对于电流、电压和温度的作用是否满足要求。

- a) 启动试验系统，按照最大运行电流考核典型工况（至少包括过负荷（如适用）、100 %、75 %、50 %、25 %、10 % 盈余功率工况）下的运行特性，使功率器件按照实际运行时对应工况下的投切情况进行投切操作，记录反应设计和运行条件的重要参数和数据，各典型工况的运行时间均按不小于满功率连续投入最长时间考虑。其中，对于温升最严重的工况应连续开展两次试验（间隔时间不大于最长冷却时间）。
- b) 试验期间监测是否有误触发、发送错误报文现象，检查阀的抗电磁干扰性能，检验阀能够在最恶劣的运行条件下正确运行，不引起功率器件和其它相关元部件的损坏或劣化。

8.1.20 8.1.20 阀段级过流关断试验（如适用）

该试验是验证发生特定短路故障或误触发后全控型功率器件关断时，在相应电压、电流应力作用下阀设计是否合适。试验对象为阀段。

在使全控型功率器件相关元件达到正常运行最高稳态结温的条件下，启动全控型功率器件过电流事件，控制保护电路检测到过电流，在电流值小于最大安全关断电流极限值时关断全控型功率器件来限制过电流，并应根据系统条件对电流上升率提出要求。试验电压对应于最大暂态直流过电压，试验安全系数为 1.05。从检测出过电流到全控型功率器件关断的时间间隔内的试验电流波形，应再现实际运行工况。试验过程中，全控型功率器件应可靠关断，无功率平衡模块发生误触发或错误报文。

注：若因功率平衡模块中全控型功率器件与电阻直接串联等原因而无法开展阀段级过流关断型式试验，应在功率平衡阀的特殊试验中针对功率平衡模块补充开展过流关断试验考核。

8.1.21 恢复期暂态正向电压试验

根据 GB/T 20990.1—2020 中的第 10 条执行。

8.1.22 保护性触发连续运行试验

试验中应将一个晶闸管级的正常触发功能闭锁，使该晶闸管级的保护性触发连续动作，试验参数与试验时间参照最大持续运行负荷试验。

8.1.23 短路电流试验

该试验是在特定短路条件的电流、电压和温度的综合应力下，检测器件和相关电路的设计是否合适。短路电流通常可按照额定电流的 2 倍考虑（即考虑一半的电阻器闪络），持续时间不小于满功率连续投入最长时间，具体故障情况和短路电流可结合系统条件确定。

注：若因功率平衡阀含分布式功率平衡电阻而无法开展短路电流试验，应在功率平衡阀的特殊试验中针对功率平衡模块补充开展试验考核。

8.1.24 抗电磁干扰试验

该试验通过在 8.1.16~8.1.23 款的运行特性试验中监测功率平衡阀的工作状态来验证。在这些试验过程中，所有模块的电子电路板卡应正常工作，无功率器件的误触发现象，模块对上通讯应正常，无数据丢失、报文错误等现象。

8.2 功率平衡电阻的型式试验

8.2.1 概述

集中式功率平衡电阻的型式试验中，绝缘试验在一个完整的电阻器塔上进行，其余试验可在 1 个电阻模块上进行。

分布式功率平衡电阻应在 1 个电阻模块上进行或随功率平衡阀的型式试验同步进行考核。

所有试验应在同一试品上进行，同一试品全部试验合格后，才能判定通过试验。

8.2.2 试验项目

功率平衡电阻的型式试验项目应包括其例行试验的全部项目，并应增加以下试验项目：

表3 功率平衡电阻的补充型式试验项目

	集中式功率平衡电阻	分布式功率平衡电阻
绝缘试验	适用	随功率平衡阀的型式试验同步进行
无线电干扰电压试验	适用	随功率平衡阀的型式试验同步进行
抗震试验或计算	适用	随功率平衡阀的型式试验同步进行
防护等级检查	适用	适用
温升试验	适用	适用
水路密闭性试验	/	如含冷却系统适用

注：除温升试验和水路密闭性试验外的其余试验项目的试验方法和判据应符合GB/T 36955—2018中第7章的规定，冲击能量试验和冲击电流试验的时间按满功率连续投入最长时间考虑。

8.2.3 温升试验

结合冲击能量要求进行等效的温升试验，试验包含五个周期，每个周期分为两个阶段，如图 3 所示：

第一阶段：试验时间 T_1 为满功率连续投入最长时间，并根据式（10）确定等效试验电流 I_1 ，且等效试验电流 I_1 的峰值应达到最大冲击电流（按照额定电流的 2 倍考虑，即考虑一半的电阻器闪络）。

$$\int_0^{T_1} I_1^2 R_N dt \geq kW \dots\dots\dots (10)$$

式中：
 W ——电阻试品在满功率连续投入最长时间内可能吸收的最大能量；
 K ——为考虑极端故障运行工况的试验安全系数，建议取值为 2，具体数值可根据系统需求协商确定。
第二阶段：冷却，试验时间 T_2 不大于最长冷却时间。

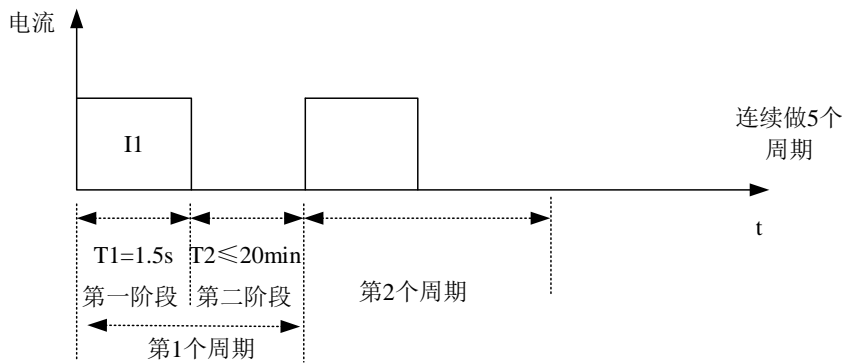


图2 温升试验示意图

测量温升的时间包含但不限于以下时间点：

- a) 第一阶段结束前时刻；
- b) 第二阶段开始前时刻；
- c) 第二阶段结束前时刻。

测量温升的位置包含但不限于下列各点（如适用）：

- a) 电阻元件，测温点位于中间元件上端位置；
- b) 内部绝缘子，电阻箱内上端绝缘子外表面；
- c) 套管，电阻箱内套管外表面；
- d) 电阻元件的金属支撑件，支撑件中部上端位置；
- e) 排出空气，百叶窗中部上端位置；
- f) 顶蓬，中间位置；
- g) 空心绝缘子型电阻的电阻材料表面（仅空心绝缘子型电阻器适用）；
- h) 环境温度，距离受试设备约 1 m 处。

对于干式电阻器用热电偶或红外线测温设备测量。

试验中观察电阻片的表现，试验后检查电阻片的状况，应无龟裂、变形、烧灼、击穿等现象，颜色应无明显变化。试验前后均应对电阻值进行测量，测量的电阻值均应在最大允许偏差范围内。

8.2.4 冷却回路密闭性试验

根据实际最严苛运行工况对单个分布式功率平衡电阻模块冷却回路施加一定水压并保持一定时间，典型试验参数如施加 1.2 MPa 水压并保持 20 min。

试验期间应无管路破裂或漏水现象。

8.3 功率平衡阀的例行试验

8.3.1 试验项目

适用于交流侧有功功率动态平衡装置和直流侧有功功率动态平衡装置的功率平衡阀例行试验包括但不限于以下试验项目：

表4 功率平衡阀的例行试验项目

	交流侧有功功率动态平衡装置	直流侧有功功率动态平衡装置
外观检查	适用	适用
连接检验	适用	适用
均压电路抽样检验	适用	适用
辅助设备检验	适用	适用
触发监视试验	适用	适用
耐受电压试验	适用	适用
压力试验（配置冷却系统适用）	/	适用
开关闭断试验	/	适用
最小直流电压试验	/	适用
最小交流电压试验	适用	/
最大持续运行负荷试验	适用	适用
抗电磁干扰试验	适用	适用
局部放电试验	可选	可选

8.3.2 外观检查

试验目的：保证试品外观完好无损。

试验内容：

- a) 通过目视的方法检查功率器件、散热器、均压电阻等元器件的外观；
- b) 通过目视的方法检查水冷管道（如有）、连接铜排、边框底座等外观。

试验判据：各元件表面完好，无磕碰、划伤；水管（如有）内部无异物，导线接头无破损、走向符合工艺要求；装配过程符合工艺要求。

8.3.3 连接检查

试验目的：确保试品元器件、螺栓、水管（如有）接头等连接处连接紧固。

试验内容：依据配线图检查并确认功率平衡模块和阀段所有材料和元件安装正确、所有主回路的连接正确，端子接线等可靠连接。生产工人使用力矩扳手按照工艺要求进行装配，并使用记号笔在螺栓及水管连接处画力矩线；检查人员使用相同的方法进行复检，并使用不同颜色记号笔画力矩线。

试验判据：所有连接部位连接牢固，力矩线清晰。

8.3.4 均压电路抽样检验

试验目的：检测均压电路的元件参数并由此确保电压在串联连接的功率平衡模块上的正确分布。

试验内容：对阀段两端施加一定的电压并静置一段时间，观察并记录阀段中各个功率平衡模块的电压。

试验判据：各个功率平衡模块的电压应基本一致，功率平衡模块电压的最大值与最小值应不超过设计规定值。

注：由监造方代表业主对检验的元件进行抽样，抽样试验至少应在每批中每种类型的一个阀段上进行。抽样率应不低于5%。

8.3.5 辅助设备检验

检查每一阀段中每一个功率平衡模块的辅助设备以及整阀的辅助设备功能正确。

8.3.6 触发监视试验

检测并确认功率平衡模块及真空接触器的触发及回报功能正确，验证组成阀的主要部分的控制、保护和监测回路的功能正确。

8.3.7 耐受电压试验

试验目的：检查晶闸管级或全控型功率器件级能否耐受对应于全阀所规定的最大过电压的电压水平。

试验内容：对交流侧有功功率动态平衡装置阀段施加对应于阀所规定的最高冲击电压以及最高工频电压（维持一定时间）；对直流侧有功功率动态平衡装置阀段施加对应于阀所规定的最高直流电压（维持一定时间）；在试验时应进行局部放电测量以检验功率平衡模块的装配正确，绝缘完好。

试验判据：阀段能够承受对应于阀所规定的最高电压。

8.3.8 压力试验（配置冷却系统适用）

试验目的：检验冷却水管是否有漏水现象。

试验内容：在阀段中充满去离子水，施加压力大于正常压力的 1.2 倍并观察一定时间。

试验判据：阀段在试验过程中无渗漏现象。

注：也可使用“气体”压力测试方法。

8.3.9 开关闭断试验

试验目的：验证全控型功率器件触发关断信号功能的正确性。

试验内容：检查功率平衡模块全控型功率器件触发关断信号功能。

试验判据：功率平衡模块全控型功率器件触发关断信号功能正确，无误触发现象。

8.3.10 最小直流电压试验

试验方法和判据应符合第 8.1.17 节中的规定。

8.3.11 最小交流电压试验

试验方法和判据应符合第 8.1.18 节中的规定。

8.3.12 最大持续运行负荷试验

试验方法和判据应符合第 8.1.19 节中的规定。

8.3.13 抗电磁骚扰试验

试验目的：验证功率平衡模块抵抗从内部产生及外部强加的瞬时电压和电流引起的电磁干扰（电磁扰动）的能力。

试验内容：在功率平衡模块最大持续运行负荷试验中检查以下内容：

- a) 是否发生误触发或导通顺序混乱；
- b) 功率平衡模块上所装的电子保护电路是否按照预定动作；
- c) 是否发生功率平衡模块故障的错误指示。

试验判据：在功率平衡模块最大持续运行负荷试验中无发生误触发或导通顺序混乱、功率平衡模块上所装的电子保护电路按照预定动作、功率平衡模块无错误的故障指示。

8.3.14 局部放电试验

为验证正确的制造，买方和卖方应共同确定设计中关键部件和分组件，需要进行适当的局部放电试验。

8.4 功率平衡电阻的例行试验

功率平衡电阻的例行试验包括但不限于以下试验项目：

- a) 外观及一般检查；
- b) 额定电阻值测量；
- c) 电感值测量；
- d) 工频耐压试验（适用于交流侧有功功率动态平衡装置）；
- e) 直流耐压试验（适用于直流侧有功功率动态平衡装置）。

试验方法和判据应符合 GB/T 36955—2018 中第 8 章的规定。

8.5 有功功率动态平衡装置的特殊试验

8.5.1 概述

为全面验证有功功率动态平衡装置在设计和制造方面满足本标准所规定的性能和要求，还应对功率平衡阀以及功率平衡电阻进行特殊试验。

8.5.2 试验项目

适用于交流侧有功功率动态平衡装置和直流侧有功功率动态平衡装置的特殊试验包括但不限于以下试验项目：

表5 有功功率动态平衡装置的特殊试验项目

	交流侧有功功率动态平衡装置	直流侧有功功率动态平衡装置
功率平衡模块防爆试验	/	如适用
功率平衡模块旁路开关误合试验	/	如适用
功率平衡模块内单一元件失效试验	/	如适用
功率平衡模块过压保护动作试验	/	适用
功率平衡阀小规模功率循环可靠性试验	适用	适用
功率平衡模块均压试验	适用	适用
功率平衡模块级过流关断试验	/	如需
功率平衡阀长期老化试验	/	如适用
阀控系统与交流站控制保护系统联调试验	适用	适用
阀冷系统联调试验	/	如适用
功率平衡模块电磁兼容试验	适用	适用
功率平衡模块高低温环境及老化试验	/	适用
环境（盐雾、霉菌）试验	如适用	如适用
抗震计算与试验	适用	适用
振动、倾斜、摇摆、冲击等试验	适用	适用

8.5.3 功率平衡模块防爆试验（如适用）

若功率平衡模块包含直流电容器和全控型器件,且全控型器件导通可能造成直流电容器直接经全控型器件短路,则应进行功率平衡模块防爆试验,对运行过程中的该工况进行模拟,验证此时能够满足不影响或损坏其他功率平衡模块或设备。

8.5.4 功率平衡模块旁路开关误合试验(如适用)

若功率平衡模块包含旁路开关和直流电容器,且旁路开关误合可能造成直流电容器直接短路,则应进行旁路开关误合试验,对运行过程中的该工况进行模拟,验证此时能够满足不影响或损坏其他功率平衡模块或设备。

8.5.5 功率平衡模块内单一元件失效试验(如适用)

若功率平衡模块包含直流电容器,且功率平衡模块内电阻器等单一元件失效可能造成直流电容器直接短路,则应进行单一元件失效试验,对运行过程中的该工况进行模拟,验证此时能够满足不影响或损坏其他功率平衡模块或设备。

8.5.6 功率平衡模块过压保护动作试验

应进行软件过压保护和硬件过压保护动作试验(如采用击穿晶闸管,应设计晶闸管击穿试验),验证此时能够满足不影响或损坏其他功率平衡模块或设备。

试验后开展 5 次 100 % 盈余功率工况下的通流试验(每次投入时间按不小于满功率连续投入最长时间考虑,两次投入间隔不大于最长冷却时间),以验证功率平衡模块的短路能力。

8.5.7 功率平衡阀小规模功率循环可靠性试验

a) 对于不含分布式功率平衡电阻的功率平衡阀

功率平衡阀小规模功率循环试验按例行试验设计,试验采用阀组件(功率模块)对推的试验方案,分批次进行,每批次为 5 % 功率平衡模块数。

第一批次功率循环试验时间按不小于 72 h 考虑,每个功率模块依次在功率 10 %、25 %、50 %、75 %、100 %、过负荷(如适用)等典型盈余功率工况下运行,每个工况下至少投入满功率连续投入最长一段时间后冷却,冷却时间不大于最长冷却时间,冷却后进入下一盈余功率工况运行,以此循环。

可基于 IGBT 器件自身特性采取等效方式进行,在保证每周周期投入时间和总循环周期数不变的前提下调整冷却时间。

如果第一批次试验中功率平衡模块运行状况良好,无任何功率平衡模块出现问题,下一批次功率循环试验时间可缩短到 8 h,否则继续按 72 h 进行。

功率平衡阀功率循环试验重点考核阀控系统及功率平衡模块的可靠性,试验过程中需观测功率模块关键点的温度及功率模块的运行状态,综合评价功率模块的可靠性。

b) 对于含分布式功率平衡电阻的功率平衡阀

应参照上述试验要求,针对功率平衡模块的实际拓扑结构,结合系统需求与试验条件进行具体试验方案设计,以验证功率平衡阀的小规模功率循环可靠性。

8.5.8 功率平衡模块均压试验

该试验是验证功率平衡阀的各功率平衡模块在长期多次开断条件下的均压特性。该试验可在最大持续运行负荷试验(通流试验)时同步进行。应考虑典型工况(至少包括过负荷(如适用)、100 %、75 %、50 %、25 %、10 % 盈余功率工况)下的运行特性,各典型工况的运行时间均按不小于满功率连续投入最长时间考虑。试验期间任一时刻所有功率平衡模块的电压不均衡度应不大于 10 %,电压不均衡度计算方法为:

$$\varepsilon = \frac{U_{sm_max} - U_{sm_min}}{U_{sm_avg}} \times 100\% \dots\dots\dots (11)$$

式中：

U_{sm_max} ——某一时刻下所有功率平衡模块电压的最大值；

U_{sm_min} ——某一时刻下所有功率平衡模块电压的最小值；

U_{sm_avg} ——某一时刻下所有功率平衡模块电压的平均值。

8.5.9 功率平衡模块级过流关断试验（如需）

该试验适用于在型式试验中因功率平衡模块中全控型功率器件与电阻直接串联等原因而无法开展阀段级过流关断试验的功率平衡阀。试验对象为功率平衡模块。试验应设计为用于验证全控型功率器件是否能可靠关断最大安全关断电流极限值，且功率平衡模块是否无误触发或错误报文。

8.5.10 功率平衡阀长期老化试验（如适用）

对于采用液体冷却的阀，因阀结构内具有塑料或橡胶管道，应进行适当的老化试验或提供可以接受的报告以证明该种材料所制成的构件在阀内的环境下具有超过规定年限的寿命。通过试验应估计温度、弯曲或变形所产生的应力和电场的影响以及这些因素的综合影响。应提供有关曲线，详细地描述规定年限运行寿命期限内的劣化程度并由此判断此种材料的劣化特征是否是线性的、指数型的或可以预计的。

8.5.11 阀控系统与换流站控制保护系统联调试验

应开展阀控系统与换流站控制保护系统联调试验，允许出于方便试验的目的对参加试验的阀控设备进行适当精简，但应保留主要的功能模块，且不得改变阀控的整体功能、性能以及与换流站控制保护系统的接口。

8.5.12 阀冷系统联调试验（如适用）

为保证阀冷却设备的可靠性，在阀冷系统各单项试验合格后应进行整套系统连续运行试验。连续运行时间不低于 6 h。试验时，开启整机运行，调整管路各阀门，使主水流量、压力、电导率等达到并维持在额定值，观察电机、水泵等主要部件，在试验期间应无异常现象发生，无泄漏。阀冷联调试验中应进行阀冷保护定值校验及保护动作正确性验证。

功率平衡阀及内冷却系统、外冷系统应在投运前各自完成清洗及压力试验工作，连接后还应由内冷供货方负责进行全面清洗。

8.5.13 功率平衡模块电磁兼容试验

本试验按照每批次不少于千分之三的比例进行随机抽查。

应按照 GB/T 17626.1~18 开展电磁骚扰试验，试验项目至少包括但不限于如下项目：

- a) 静电放电抗扰度试验（不低于 4 级）；
- b) 射频电磁场辐射抗扰度试验（不低于 30 V/m）；
- c) 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验（不低于 4 级）；
- d) 浪涌（冲击）抗扰度试验（不低于 4 级）；
- e) 射频场感应的传导骚扰抗扰度试验（不低于 3 级）；
- f) 工频磁场抗扰度试验（不低于 5 级）；
- g) 脉冲磁场抗扰度试验（不低于 5 级）；
- h) 阻尼振荡磁场抗扰度试验（不低于 5 级）；

- i) 阻尼振荡波抗扰度试验（不低于 3 级）。
被试品为完整功率平衡模块或等效功率平衡模块。

8.5.14 功率平衡模块高低温环境及老化试验

本试验按照每批次千分之三的比例进行随机抽查。

8.5.14.1 高低温环境试验

8.5.14.1.1 高温试验

测试温度：70℃；

测试部位：整机（电容可外置）；

测试时间：高温恒温 2 h 后，高温带电连续运行 72 h。

测试方法：将等效替换电容后的功率平衡模块放入温箱中，将温度调节至 70℃，恒温储存 2 h；外接电源为功率平衡模块供电，令功率平衡模块处于正常工作状态，连续运行 72 h；运行过程中，实时通过上位机监测功率平衡模块运行状态。

8.5.14.1.2 低温试验

测试温度：-10℃；

测试部位：去掉均压电阻的功率平衡模块，等效电容外置；

测试时间：低温恒温 2 h 后，低温带电连续运行 72 h。

测试方法：将等效替换电容后的功率平衡模块放入温箱中，将温度调节至-10℃，恒温储存 2 h；外接电源为功率平衡模块供电，令功率平衡模块处于正常工作状态，连续运行 72 h；运行过程中，实时通过上位机监测功率平衡模块运行状态。

8.5.14.2 极限高温环境试验

测试温度：80℃；

环境湿度：60%。

测试部位：去掉均压电阻的功率平衡模块，等效电容外置；

测试时间：高温恒温 2 h 后，高温带电连续运行 16 h。

测试方法：将等效替换电容后的功率平衡模块放入温箱中，将温度调节至 80℃，恒温储存 2 h；外接电源为功率平衡模块供电，令功率平衡模块处于正常工作状态，连续运行 16 h；运行过程中，实时通过上位机监测功率平衡模块运行状态。

8.5.14.3 功率平衡模块功率对推附加耦合类干扰试验

该试验是为了验证功率平衡模块接近运行工况下各板卡的抗干扰能力。

测试条件：

- 1) 功率平衡模块电压达到（接近）功率平衡模块工作电压；
- 2) 各功率平衡模块按照器件考核结温反推电流值。

外施附加干扰项目（建议）：电快速瞬变脉冲群。

8.5.14.4 168 h 老化试验

该试验是验证功率平衡模块长期运行各部件的可靠性，包括 IGBT 驱动器、取能电源、中控板等部件。

按照功能试验连接测试工装与功率平衡模块，功率平衡模块达到正常工作状态，触发 PWM 使能和误码数监测。将功率平衡模块放入高温老化试验箱中，温度为 65℃，实时监测功率平衡模块的运行状态和通讯误码数，持续时间为 168 h。

8.5.15 环境（盐雾、霉菌等）试验（如适用）

对于运行环境存在盐雾、霉菌因素的情况适用。

板卡、功率平衡模块、阀段的环境（盐雾、霉菌等）试验方法应参照下列标准进行：《ISO 12944—6 色漆和清漆—防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护—第 6 部分：实验室性能测试方法》、《GB/T 2423.17 电工电子产品基本环境试验规程试验 KA 盐雾试验方法》、《GB/T 2423.16 电工电子产品环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 J 及导则：长霉》、《GB/T 2423.18 环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 Kb：盐雾，交变（氯化钠溶液）》、《GJB 150.10A 军用装备实验室环境试验方法 第 10 部分：霉菌试验》、《GJB 150.11A 军用装备实验室环境试验方法 第 11 部分：盐雾试验》、《GB/T 4937.13 半导体器件机械和气候试验方法 第 13 部分：盐雾》，具体试验指标可由卖方与买方协商确定。

功率平衡模块、阀段试验后应就地开展功率器件开通关断试验，并尽快进行通流试验。

板卡试验后应就地开展带电试验。

8.5.16 抗震计算与试验

有功功率动态平衡装置及各主要构件安全系数应满足《GB 50260 电力设施抗震设计规范》要求。

应提供详细的功率平衡阀、集中式功率平衡电阻及各主要构件抗震计算报告。

阀段应按照抗震分析计算提取的阀组件加速度响应作为振动台输入条件开展地震振动试验，其余相关参数要求参照《GJB 150.16A 军用装备实验室环境试验方法 第 16 部分：振动试验》执行。

试验后应就地开展带电试验。

8.5.17 振动、倾斜、摇摆、冲击等试验

有功功率动态平衡装置及各主要构件应满足《GB/T 11287 电气继电器 第 21 部分：量度继电器和保护装置的振动、冲击、碰撞和地震试验 第 1 篇：振动试验（正弦）》规定的 I 级振动响应和振动耐受要求以及《GB/T 14537-1993 量度继电器和保护装置的冲击与碰撞试验》规定的 I 级冲击响应、冲击耐受以及 I 级碰撞耐受要求。

应提供详细的功率平衡阀、集中式功率平衡电阻及各主要构件的振动、倾斜、摇摆、冲击计算报告。

阀段应参照《GJB 150.16A 军用装备实验室环境试验方法 第 16 部分：振动试验》开展运输振动试验。

试验后应就地开展带电试验。

9 包装、运输和贮存

9.1 包装

产品包装应符合 GB/T 13384—2008 的规定。

随同产品包装一起提供的技术文件包括但不限于：

- 装箱清单；
- 产品合格证；
- 产品安装使用说明书；
- 产品出厂试验报告；

9.2 运输

功率平衡阀运输前应包装完好且为符合包装要求的完整阀段或功率平衡模块,其运输应满足相关大型电力设备运输标准要求。

功率平衡阀与功率平衡电阻运输过程应使用合适的包装,防止雨淋,防止挤压、碰撞;运输中应保证设备固定可靠,不发生各方向的滑动移位;在极端运输环境条件下(例如雨天、雪天、恶劣路况等),运输都应保证设备的包装不受损坏、设备安全、无损伤。

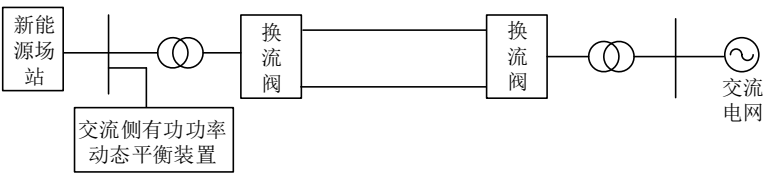
9.3 贮存

集中式功率平衡电阻宜储存在通风干燥的室内,其余元件应储存在通风干燥的室内。

附录 A
(资料性)

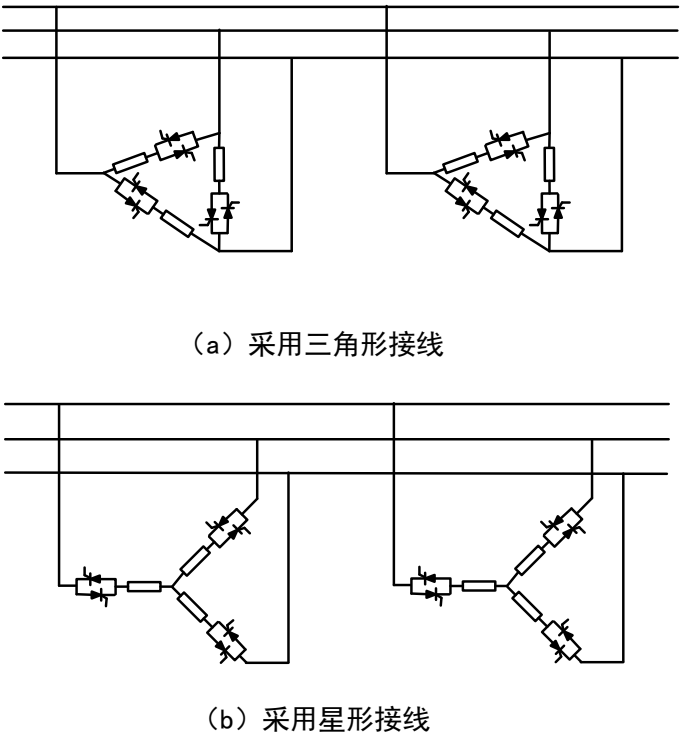
换流站用有功功率动态平衡装置电气结构

交流侧有功功率动态平衡装置在直流输电系统中的典型位置示意图如图 A. 1 所示。



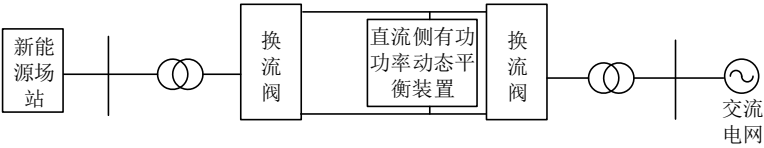
图A. 1 交流侧有功功率动态平衡装置在直流输电系统中的典型位置示意图

交流侧有功功率动态平衡装置典型拓扑结构如图 A. 2 所示。



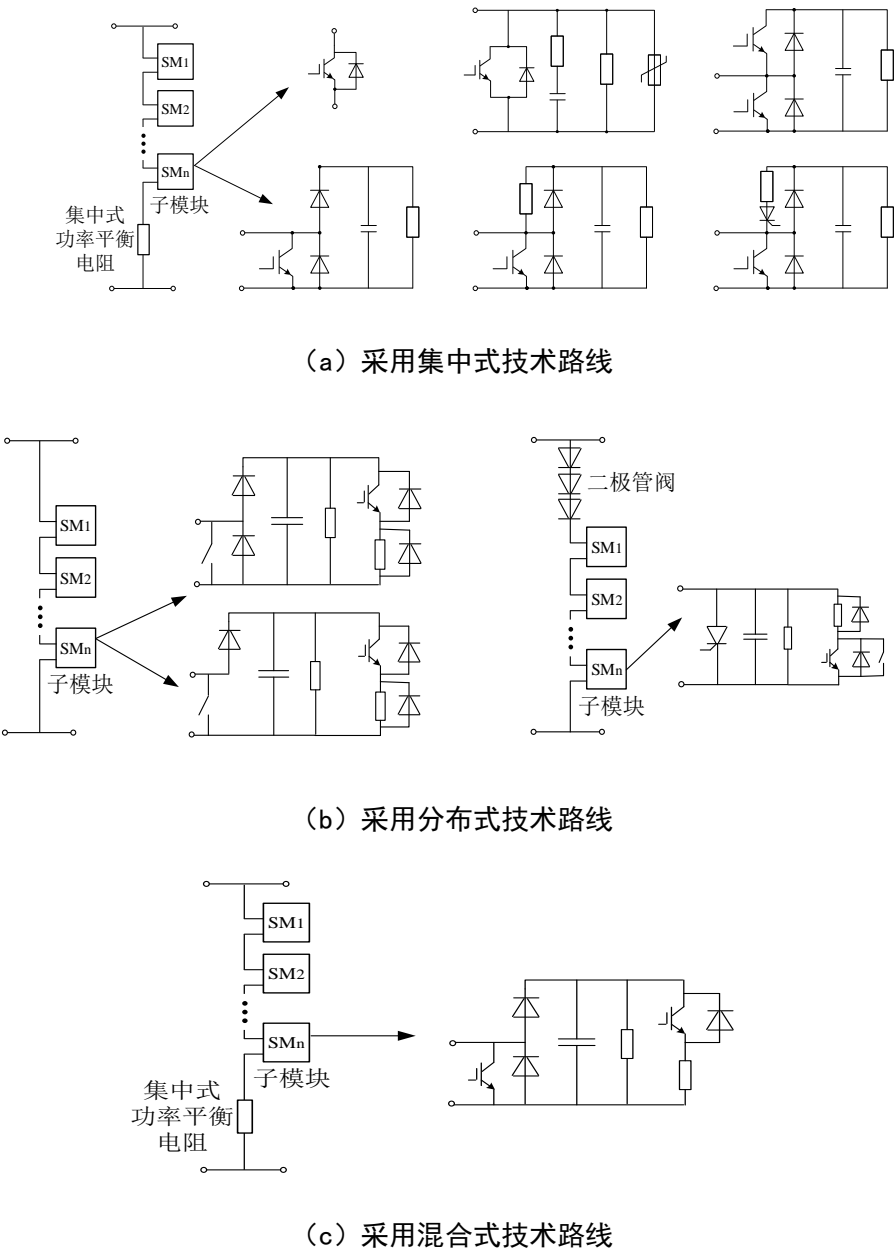
图A. 2 交流侧有功功率动态平衡装置典型拓扑结构图

直流侧有功功率动态平衡装置在直流输电系统中的典型位置示意图如图 A. 3 所示。



图A. 3 直流侧有功功率动态平衡装置在直流输电系统中的典型位置示意图

直流侧有功功率动态平衡装置典型拓扑结构如图 A. 4 所示。



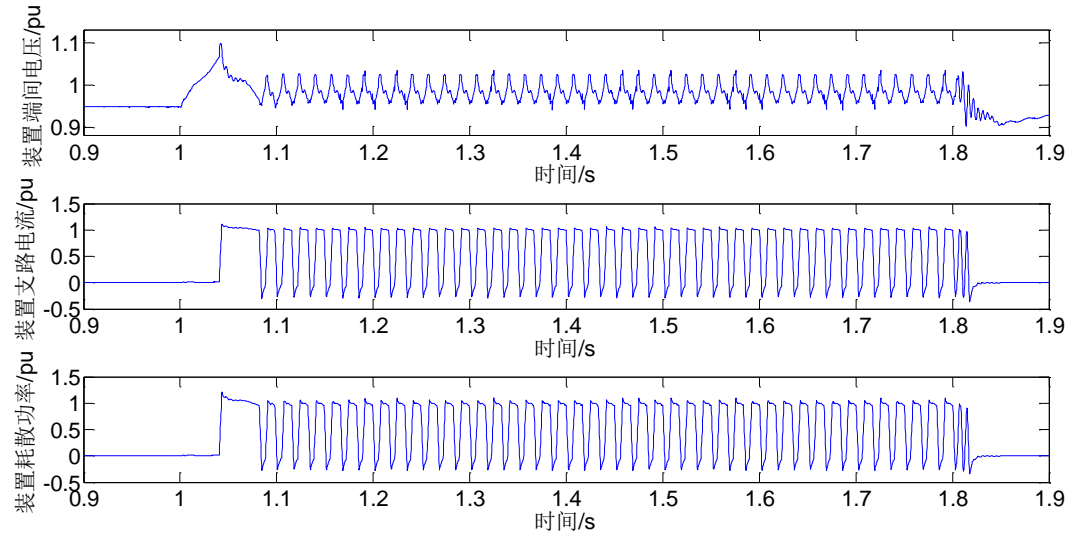
图A. 4 直流侧有功功率动态平衡装置典型拓扑结构图

附 录 B

(资料性)

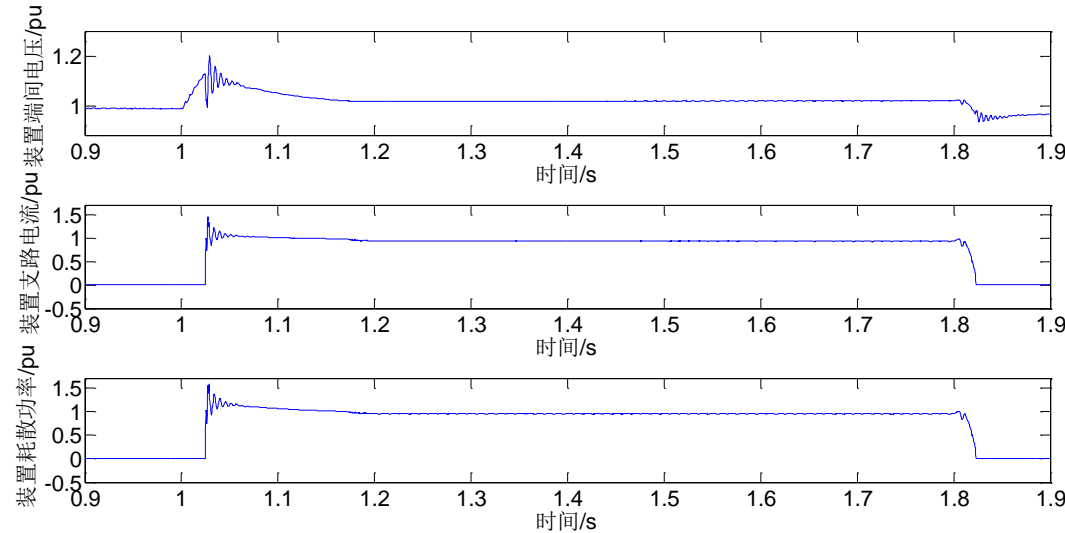
换流站用有功功率动态平衡装置投入时典型波形

集中式直流侧有功功率动态平衡装置投入时的系统参数典型波形如图 B. 1 所示。



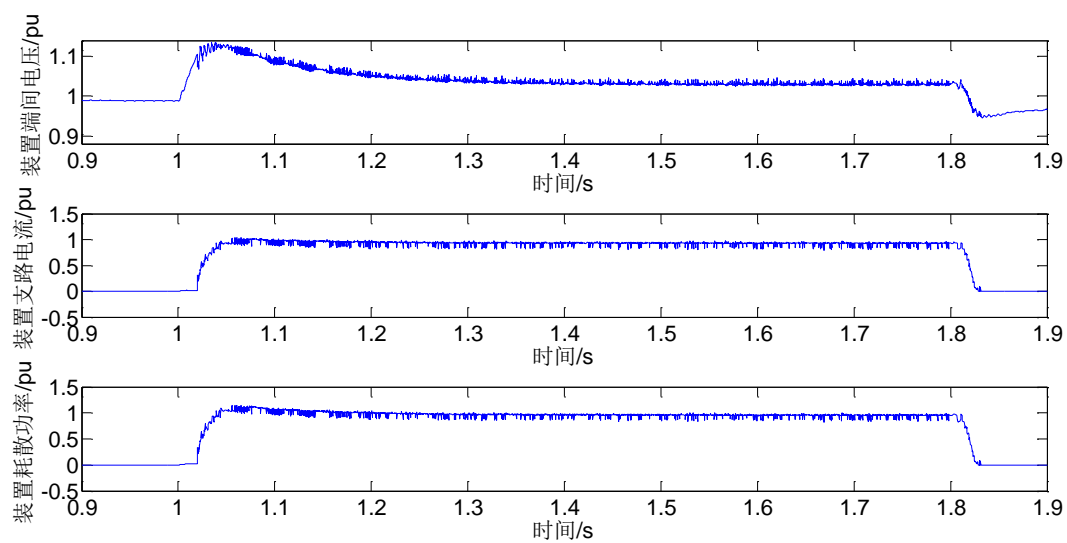
图B. 1 集中式直流侧有功功率动态平衡装置投入时的系统参数典型波形图

分布式直流侧有功功率动态平衡装置投入时的系统参数典型波形如图 B. 2 所示。



图B. 2 分布式直流侧有功功率动态平衡装置投入时的系统参数典型波形图

混合式直流侧有功功率动态平衡装置投入时的系统参数典型波形如图 B. 3 所示。



图B.3 混合式直流侧有功功率动态平衡装置投入时的系统参数典型波形图

附录 C
(资料性)

换流站用有功功率动态平衡装置典型设计参数

交流侧有功功率动态平衡装置的通用技术参数、功率平衡阀设计参数、功率平衡电阻设计参数分别如表 C. 1、表 C. 2、表 C. 3 所示。

表C. 1 交流侧有功功率动态平衡装置通用技术参数

序号	名称	单位	设计要求值
1	额定电压	kV	
2	额定功率（单组）	MW	
3	额定电流	kArms	
4	频率	Hz	
5	接线型式		
6	单次连续最大投入时间	s	
7	两次最大投入的时间间隔	min	
8	投入动作定值	p. u.	
9	投入响应时间	μs	
10	退出动作定值	p. u.	
11	退出响应时间	μs	
12	投入后直流电压最大峰值	kV	
13	投入且直流电压达到稳态后的波动范围	%	
14	投切过程中功率平衡阀支路电流变化率 di/dt	A/μs	
15	投切过程中功率平衡阀支路电流谐波畸变率	/	
16	非投入状态功率平衡阀功率损耗	kW	
18	无线电干扰电压	μV	
19	噪声水平	dB	
20	使用寿命	年	
21	检修周期	年	

表C. 2 交流侧有功功率动态平衡阀专用设计参数

序号	名称	单位	设计要求值
1	单组单相功率平衡模块级联个数（不含冗余）	个	
2	功率平衡模块冗余率	%	
3	额定电压	kV	
4	额定电流	kArms	

5	暂时冲击电流峰值		kA	
6	额定雷电冲击耐受电压峰值	端对地	kV	
7	额定操作冲击耐受电压峰值	端对地	kV	
8	额定陡波冲击耐受电压峰值	端对地	kV	
9	额定雷电冲击耐受电压峰值	端对端	kV	
10	额定操作冲击耐受电压峰值	端对端	kV	
11	额定短时工频耐受电压	端对地	kVrms	
12	额定短时工频耐受电压	端对端	kVrms	
13	功率平衡模块晶闸管	基本型号	英寸	
		持续断态电压（直流）	kV	
		断态重复峰值电压	kV	
		通态平均电流	kA	
		反向重复峰值电压	kV	
		通态电流临界上升率	A/μs	
14	功率平衡模块阻尼电容	额定电容值	mF	
		电容值允许制造偏差	/	
		电压波动率（功率平衡阀使能状态）	%	
		局放	pC	
		最大长期耐受端间电压	kV	
		最大长期运行电流	kA	
		最大暂态电流	kA	
15	功率平衡模块均压电阻		kΩ	
16	功率平衡模块尺寸（L×W×H）		mm	
17	功率平衡阀冷却系统（如有）	额定冷却容量	kW	
		额定流量	L/min	
		最小流量	L/min	
		最大流量	L/min	
		冷却水电导率	S/cm	
		额定进水温度	℃	
		高进水温度（报警温度）	℃	
		高进水温度（跳闸温度）	℃	
		进出水温差	℃	
18	开关器件取能回路	取能方式		
		有无交叉取能或冗余取能		
19	额定功率下开关器件及辅助电路的损耗		kW	

20	最小爬距计算电压	kV	
21	最小爬电比距	mm/kV	
22	阀塔数	个	
23	层数/塔	层	
24	单个阀塔尺寸 (L×W×H)	m	
25	单个阀塔重量	吨	
26	整体尺寸	m	
27	整体重量	吨	

表C.3 交流侧有功功率动态平衡电阻专用设计参数

序号	名 称		单位	设计要求值
1	结构型式或型号		/	
2	每台电阻器组件数		/	
3	钢材型号 AISI		/	
4	成分表示		/	
5	电阻材料、型号		/	
6	电阻质量		kg	
7	每相额定阻值 (25 ℃)		Ω	
8	制造及投入运行过程阻值最大允许偏差		/	
9	最大电感值		mH	
10	阻值随温度变化特性		Ω/℃	
11	设计功率 (单组单相)		MW	
12	设计电流		kA	
13	1.5~2s 内能量耐受		MJ	
14	冷却方式		/	
15	安装位置		/	
16	表面允许最高温度		℃	
17	投切过程中最热点温升		℃	
18	冲击能量, 时间		MJ, s	
19	冲击电流峰值		kA _{peak}	
20	声级水平		dB	
21	最大稳态运行电压	端对端	kV _{dc}	
		端对地	kV _{dc}	

序号	名 称		单位	设计要求值
22	额定雷电冲击耐受电压峰值	端对地	kV	
23	额定操作冲击耐受电压峰值	端对地	kV	
24	额定雷电冲击耐受电压峰值	端对端	kV	
25	额定操作冲击耐受电压峰值	端对端	kV	
26	额定短时工频耐受电压	端对地	kVrms	
	额定短时工频耐受电压	端对端	kVrms	
27	对地绝缘子爬距		mm	
28	层间绝缘子爬距		mm	
29	出线套管爬距		mm	
30	端对端爬距		mm	

直流侧有功功率动态平衡装置的通用技术参数、功率平衡阀设计参数、集中式功率平衡电阻(如有)设计参数分别如表 C. 4、表 C. 5、表 C. 6 所示。

表C. 4 直流侧有功功率动态平衡装置通用技术参数

序号	名称		单位	设计要求值
1	最大稳态运行电压	端对端	kV_{dc}	
		端对地		
2	额定功率		MW	
3	额定电流		kA_{dc}	
4	单次连续最大投入时间		s	
5	两次最大投入的时间间隔		min	
6	投入动作定值		p. u.	
7	投入响应时间		μs	
8	退出动作定值		p. u.	
9	退出响应时间		μs	
10	投入后直流电压最大峰值		kV	
11	投入且直流电压达到稳态后的波动范围		%	
12	投切过程中功率平衡阀支路电流变化率 di/dt		$\text{A}/\mu\text{s}$	
13	投切过程中功率平衡阀支路电流谐波畸变率		/	
14	功率平衡阀是否中间接地		/	
15	非投入状态功率平衡阀功率损耗		kW	
16	用于本体保护的高速电流测量装置	测量界限	/	
		测量精度	/	
		采样率	kHz	
		阶跃响应时间	μs	
		频率响应(最大允许幅值比偏差)	/	
		频率响应(最大允许相位移)	μs	
		最小截止频率(-3 dB)	kHz	
		最大允许光纤传输信号衰减	dB	
17	无线电干扰电压		μV	

18	噪声水平	dB	
19	使用寿命	年	
20	检修周期	年	

表C.5 直流侧有功功率动态平衡阀专用技术参数

序号	名称		单位	设计要求值
1	额定雷电冲击耐受电压峰值	端对地	kV	
2	额定操作冲击耐受电压峰值	端对地	kV	
3	额定陡波冲击耐受电压峰值	端对地	kV	
4	额定雷电冲击耐受电压峰值	端对端	kV	
5	额定操作冲击耐受电压峰值	端对端	kV	
6	直流耐受电压	端对地	kV _{dc}	
7	交流耐受电压	端对地	kV _{rms}	
8	直流耐受电压	端对端	kV _{dc}	
9	湿态直流耐受电压（有水冷适用）	端对端	kV _{dc}	
10	暂时耐受电压	端对地	kV	
11	功率平衡模块级联个数（不含冗余）		个	
12	功率平衡模块冗余率			
13	功率平衡模块串联不均压系数			
14	分布式功率平衡电阻 （如有）	额定阻值（25℃）	Ω	
		阻值允许制造偏差		
		阻值随温度变化特性	Ω/℃	
		设计功率	MW	
		设计电流	kA	
		1.5~2s 内能量耐受	MJ	
		冷却方式		
		表面允许最高温度	℃	
		投切过程中最热点温升	℃	
		最大长期耐受端间电压	kV	
		最大长期运行电流	kA	
15	功率平衡模块电容（如有）	额定电容值	mF	
		电容值允许制造偏差		
		电压波动率（功率平衡阀使能状态）	%	
		局放	pC	

		最大长期耐受端间电压	kV	
		最大长期运行电流	kA	
		最大暂态电流	kA	
16	功率平衡模块 IGBT/IEGT/IGCT	额定电压 V_{CE}	kV	
		额定电流 I_C	kA	
		BOD 动作电压（如有）	kV	
		开关频率	Hz	
17	功率平衡模块二极管 （如有）	额定正向工作电流 I_F	kA	
		反向重复峰值电压 V_{RRM}	kV	
		最大通态压降	V	
		最高使用电压	kV	
18	功率平衡模块晶闸管 （如有）	断态重复峰值电压	kV	
		通态平均电流	kA	
		反向重复峰值电压	kV	
		通态电流临界上升率	A/ μ s	
19	功率平衡模块避雷器 （如有）	参考电压	kV _{dc}	
		放电电流	kA _{peak}	
		残压	kV _{peak}	
		最大吸收能量	MJ	
20	功率平衡模块均压电阻		k Ω	
21	功率平衡模块尺寸（L×W×H）		mm	
22	功率平衡阀冷却系统 （如有）	额定冷却容量	kW	
		额定流量	L/min	
		最小流量	L/min	
		最大流量	L/min	
		冷却水电导率	S/cm	
		额定进水温度	℃	
		高进水温度（报警温度）	℃	
		高进水温度（跳闸温度）	℃	
		进出水温差	℃	
23	开关器件取能回路	取能方式	/	
		有无交叉取能或冗余取能	/	
24	额定功率下开关器件及辅助电路的损耗		kW	
25	阀塔数		个	
26	层数/塔		层	

27	单个阀塔尺寸 (L×W×H)	m	
28	单个阀塔重量	吨	
29	整体尺寸	m	
30	整体重量	吨	

表C.6 集中式直流侧有功功率动态平衡电阻（如有）专用技术参数

序号	名 称		单位	设计要求值
1	结构型式或型号		/	
2	每台电阻器组件数		/	
3	钢材型号 AISI		/	
4	成分表示		/	
5	电阻材料、型号		/	
6	电阻质量		kg	
7	额定阻值 (25 ℃)		Ω	
8	制造及投入运行过程阻值最大允许偏差		/	
9	最大电感值		mH	
10	阻值随温度变化特性		Ω/℃	
11	设计功率		MW	
12	设计电流		kA	
13	1.5~2s 内能量耐受		MJ	
14	冷却方式		/	
15	安装位置		/	
16	表面允许最高温度		℃	
17	投切过程中最热点温升		℃	
18	冲击能量，时间		MJ，s	
19	冲击电流峰值		kA _{peak}	
20	声级水平		dB	
21	最大稳态运行电压	端对端	kV _{dc}	
		端对地	kV _{dc}	
22	额定雷电冲击耐受电压峰值	端对地	kV	
23	额定操作冲击耐受电压峰值	端对地	kV	
24	额定雷电冲击耐受电压峰值	端对端	kV	

序号	名 称		单位	设计要求值
25	额定操作冲击耐受电压峰值	端对端	kV	
26	直流耐受电压	端对地	kV _{dc}	
		端对端	kV _{dc}	
27	对地绝缘子爬距		mm	
28	层间绝缘子爬距		mm	
29	出线套管爬距		mm	
30	端对端爬距		mm	