

ICS 29.200

CCS K 46

团体标准

T/CIECCPA 103—2025

高压直流输电可控换相换流阀电气试验

Electrical test specification for HVDC controllable line-commuted converter
valve

2025—11—21 发布

2025—11—27 实施

中国工业节能与清洁生产协会 发布

CLECCRA

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 缩略语..... 2

5 一般要求..... 2

 5.1 型式试验执行导则..... 2

 5.2 大气修正..... 3

 5.3 冗余处理..... 3

 5.4 型式试验回路..... 4

 5.5 多重阀、阀或阀组件的元部件劣化检验..... 4

 5.6 型式试验判据..... 4

6 型式试验项目..... 5

7 阀支架的绝缘试验..... 6

 7.1 试验目的..... 6

 7.2 试验对象..... 6

 7.3 试验要求..... 6

8 多重阀单元(MVU)绝缘试验..... 8

 8.1 试验目的..... 8

 8.2 试验对象..... 8

 8.3 试验要求..... 9

9 单阀绝缘试验..... 11

 9.1 试验目的..... 11

 9.2 试验对象..... 11

 9.3 试验要求..... 12

 9.4 阀非周期触发试验..... 16

10 运行试验..... 17

 10.1 周期性触发和关断试验..... 18

 10.2 晶闸管恢复期正向暂态电压试验..... 23

 10.3 短路电流试验..... 24

 10.4 电磁兼容试验..... 27

11 附加试验	28
11.1 可控关断试验	29
11.2 CLCC-LCC 相互切换试验	29
11.3 单阀电流关断试验	29
附录 A（资料性） CLCC 电路拓扑	31
参考文献	36

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。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。

本文件起草单位：中国电力科学研究院有限公司、中电普瑞电力工程有限公司、国网直流技术中心、国网经济技术研究院有限公司、国网上海市电力公司超高压分公司、国网重庆电力有限公司电力科学研究院、国网内蒙古东部电力有限公司内蒙古超特高压分公司、国网四川省电力有限公司电力科学研究院、北京龙腾蓝天科技有限公司。

本文件主要起草人：王成昊、杨俊、盛财旺、王蒲瑞、张娟娟、丁骁、任孟干、吴保义、柴斌、周亮、候俊义、张国华、高晟辅、魏卓、杨勇、李琦、高仕龙、冷超、方辉、向红吉、余亚南、高明雨、魏中奥、徐浩原、廖文龙、杨鑫、杨玥坪、李广、岳海洋。

本文件为首次发布。

CLECCRA

高压直流输电可控换相换流阀电气试验

1 范围

本文件规定了 $\pm 100\text{kV}$ 及以上电压等级的直流输电系统用可控换相换流阀的电气试验的一般要求、型式试验项目、阀支架的绝缘试验、多重阀单元(MVU)绝缘试验、单阀绝缘试验、运行试验、附加试验方法、要求及判据。

本文件适用于 $\pm 100\text{kV}$ 及以上电压等级的直流输电系统用可控换相换流阀或作为背靠背系统一部分的电网换相换流器中的可控换相换流阀,在阀两端直接连接有金属氧化物避雷器。本文件只限于电气型式试验和产品试验。

本文件规定的试验以空气绝缘阀为基础。其他类型的阀也可参照本部分的要求和验收标准。

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 13498 高压直流输电术语

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 20989 高压直流换流站损耗的确定

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 27025 检测和校准实验室能力的通用要求

GB/T 36559—2018 高压直流输电用晶闸管阀

3 术语和定义

GB/T 13498 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

阀保护性触发 IGBT valve protective firing

在预定的电压下触发 IGBT/晶闸管,防止其过电压的保护方法。

3.2

可控换相换流阀 controllable line commutated converter valve

半控器件与全控器件组合的电子开关设备,包含两条支路,两端并主避雷器,两条支路均具有单向(正向)通流和双向承压能力,可发挥换流臂功能。

3.3

子阀 sub valve

可控换相换流阀中由一个或多个单一器件串联组件构成的可独立控制单通或关断的电力电子功能单元。根据所用器件可分为半控型子阀及全控型子阀。

3.4

绝缘栅双极晶体管级 insulated gate bipolar transistor level; IGBT level

由绝缘栅双极晶体管与其反并联的续流二极管组合，与紧靠它们的辅助设备构成。

注：也称IGBT级。

3.5

可控换相模式 controllable line commutated converter operating mode (CLCC)

通过全控型器件与半控型器件组合，主动关断电流实现换相功能的运行模式。

3.6

电网换相模式 line-commuted converter operating mode (LCC)

通过全控型器件与半控型器件组合，主动关断电流实现换相功能的运行模式。

3.7

可控关断试验 controllable turn-off test

检验可控换相换流阀组件连续关断故障电流能力的试验。

3.8

CLCC-LCC 相互切换试验 CLCC-LCC mode switching test

检验可控换相换流阀组件工作模式切换的试验。

3.9

单阀电流关断试验 valve current turn-off test

检验可控换相换流阀单阀转移及分断电流能力的试验。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

CLCC：可控换相换流器

FOP：晶闸管/IGBT级过电压保护

MVU：多重阀单元

IGBT：绝缘栅双极晶体管

LCC：电网换相换流器

5 一般要求

5.1 型式试验执行导则

5.1.1 替代证明

可控换相换流阀的每一种设计都应通过本部分规定的型式试验。如果确实与以前试验过的阀类似,供方可提交以前的型式试验报告代替型式试验供买方考虑。这种情况应单独提供报告,详述设计的差异,并论述引用的型式试验如何满足本次设计的型式试验目的。

5.1.2 试品

型式试验既可在一个完整的阀上进行,也可在阀段上进行。如果在阀段上进行,被试验的阀段总数不能少于一个完整阀中的阀段数量。

必须在相同的阀、阀段上进行全部型式试验。

在型式试验开始之前,阀、阀段和/或它们的元件,都应证明通过了出厂试验,确保制造是正确的。

5.1.3 试验顺序

换流阀的运行特性试验必须在绝缘试验之后进行。

注:如果在绝缘型式试验程序之后执行局部放电测量,可增加其可信度。

5.1.4 试验方法

试验应按照 GB/T 16927.1 中相应规定进行。检测和校准实验室的能力应符合 GB/T 27025 的规定。

5.1.5 试验环境温度

试验应在试验设备正常的环境温度下进行,另有规定的除外。

5.1.6 试验频率

交流绝缘试验可在 50Hz 或 60Hz 下进行,运行试验对频率的特别要求在相关条款中给出。

5.1.7 试验报告

型式试验完成后,供方应按照 GB/T 20990.1—2020 的 16 要求提供型式试验报告。

5.2 大气修正

当相关条款规定时,供方应按照 GB/T 20990.1—2020 的 4.2 相关要求进行大气修正。

供货方应按照 GB/T 20990.1—2020 的 4.2 相关要求进行大气修正。

5.3 冗余处理

5.3.1 绝缘试验

对于阀端子间的所有绝缘试验,应短路冗余的晶闸管 /IGBT 级,但阀非周期性触发试验可能除外。晶闸管 /IGBT 级短路的位置应由买方和供方协商确定。

注:可根据设计限制短路晶闸管/IGBT级的分配。例如,一个阀段中短路的晶闸管/IGBT级数量可能有上限。

5.3.2 运行试验

对于运行试验,不应短路冗余的晶闸管/IGBT 级。适用时,试验电压应使用式(1)确定的比例因子 k_n 调整:

$$k_n = \frac{N_{\text{tut}}}{N_t - N_r} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

N_{tut} ——试品中串联晶闸管/IGBT 的数量;

N_t ——阀中串联晶闸管/IGBT 的总数；

N_r ——阀中冗余的串联晶闸管/IGBT 的总数。

5.4 型式试验回路

试验电路能在与实际情况等效的最不利条件下对换流阀性能进行全面而准确的试验，并能简明扼要地表明换流阀各种能力。

型式试验所用的测量设备都具备有效的核准证书，符合相关的国家标准或与之相当的国际标准。

5.5 多重阀、阀或阀组件的元部件劣化检验

除负载试验和对阀段进行的阀损耗试验以外，在每一项型式试验之前和之后，都将对被试的多重阀、阀、阀段以及晶闸管/IGBT 级进行检验，以确认晶闸管/IGBT 元件和晶闸管/IGBT 级辅助电路中的元部件以及试品中的其它任何元部件是否在试验中发生劣化。对每一晶闸管/IGBT 级至少进行下述检验：

- a) 耐受电压检验（检查是否短路）；
- b) 触发/关断检查。

在阀的绝缘型式试验以及运行特性型式试验后，除上述一般性检查外还对晶闸管/IGBT 级至少进行以下检验：

- a) 触发/关断和监视检验；
- b) 过电压保护触发检验；
- c) 正向恢复保护检验；
- d) 额定反向阻断电压和正向及反向操作冲击耐受电压检验；
- e) 均压回路阻抗检验。

这种检验可以用监视系统进行，通常不要求从阀组件中拆除元部件。

如果在上述试验中发现晶闸管/IGBT 元件或其相关元部件的特性发生改变，所测得的参数不能超过设计允许公差，否则视为不合格。

5.6 型式试验判据

5.6.1 关于晶闸管/IGBT 级的判据

下列判据适用于晶闸管/IGBT 级

- a) 在第 5 章列出的某项型式试验后，有 1 个以上晶闸管/IGBT 级短路（或者，超过一个完整阀中串联电力电子器件数量的 1%），认为该阀未通过型式试验；
- b) 如果某项型式试验后，有 1 级晶闸管/IGBT 短路（不超过一个完整阀中串联电力电子器件数量的 1%），允许修复损坏的晶闸管/IGBT 级，重新进行该项试验；
- c) 在重复进行某项型式试验时，如果在相同的位置上再次发生晶闸管/IGBT 级短路，则未通过型式试验；如果发生短路的晶闸管/IGBT 级的位置不同，同时数量上不超过上述 1) 的规定，则需修复损坏的晶闸管/IGBT 级，重新进行该项试验；
- d) 所有型式试验完成后，如果累计的短路晶闸管/IGBT 级数大于完整阀中晶闸管/IGBT 级数的 3%，则未通过型式试验；

- e) 按 5.5 节的要求, 对阀或阀组件进行检查。如果试验中或试验后发现有损坏的晶闸管/IGBT 级或附件, 在下一项试验前允许更换;
- f) 由于检查导致的短路晶闸管/IGBT 级按上述规定纳入判据中;
- g) 除短路的晶闸管/IGBT 级外, 在型式试验以及随后进行的检查中出现参数改变但尚未短路的晶闸管/IGBT 级数不能超过一个完整阀中全部晶闸管/IGBT 级数的 3%;
- h) 当按上述百分比确定最大允许的短路晶闸管/IGBT 级数或参数改变但尚未短路的晶闸管/IGBT 级数时, 小数点后数字的处理按 GB-T 20990.1 执行;
- i) 所有试验中发生短路或其它故障的晶闸管/IGBT 的分布必须是完全随机的, 不能有任何迹象显示发生短路或其它故障的晶闸管/IGBT 的位置与设计不合理有任何联系。

5.6.2 关于整体阀的型式试验判据

在试验中阀的外部闪络、阀冷却系统的损坏以及触发/关断脉冲传输和分配系统的任何绝缘材料的击穿都不允许。

任何元件、导体及其接头的温度, 附近物体的表面温度都不能超过设计允许值。

6 型式试验项目

表 1 列出了第 7 章至第 11 章给出的型式试验。

表1 型式试验

试验类型	章条款	试验对象
阀支架直流耐压试验	7.3.2	阀支架
阀支架交流耐压试验	7.3.3	阀支架
阀支架操作冲击耐压试验	7.3.4	阀支架
阀支架雷电冲击耐压试验	7.3.5	阀支架
阀支架陡波前冲击耐压试验	7.3.6	阀支架
多重阀单元对地直流电压试验	8.3.1	多重阀
多重阀单元交流电压试验	8.3.2	多重阀
多重阀单元操作冲击电压试验	8.3.3	多重阀
多重阀单元雷电冲击电压试验	8.3.4	多重阀
多重阀单元陡波前冲击电压试验	8.3.5	多重阀
阀直流耐压试验	9.3.1	单阀、子阀
湿态直流耐压试验	9.3.2	单阀
阀交流耐压试验	9.3.3	单阀
阀操作冲击试验	9.3.5	单阀、子阀
湿态操作冲击耐压试验	9.3.6	单阀
阀雷电冲击试验	9.3.7	单阀
阀陡波前冲击试验	9.3.8	单阀
非周期触发试验	9.4	单阀
最大持续运行负载试验(CLCC/LCC)	10.1.3.2	阀或阀段

表 1 型式试验（续）

最大暂态运行负载试验(LCC)	10.1.3.3	阀或阀段
最小交流电压试验(CLCC/LCC)	10.1.3.4	阀或阀段
暂态低电压试验(LCC)	10.1.3.5	阀或阀段
直流电流断续试验(LCC)	10.1.3.6	阀或阀段
保护触发连续动作试验(CLCC)	10.1.3.7	阀或阀段
阀损耗验证	10.1.3.8	阀或阀段
晶闸管恢复期正向暂态电压试验(CLCC)	10.2	阀或阀段
短路电流试验(CLCC 逆变/LCC 整流)	10.3	阀或阀段
电磁兼容试验(CLCC)	10.4	阀或阀段
可控关断试验(CLCC/LCC)	11.1	阀或阀段
CLCC-LCC 相互切换试验(CLCC)	11.2	阀或阀段
单阀电流关断试验(CLCC)	11.3	单阀

7 阀支架的绝缘试验

7.1 试验目的

这些试验的主要目的是：

- a) 检验阀支架、冷却水管、光纤的绝缘以及其他与阀支架相关的绝缘部件的耐受电压能力。如果存在阀支架外的对地绝缘，则需要进行附加的试验；
- b) 验证局部放电的起始和熄灭电压高于阀支架上出现的最高运行电压。

注：根据应用情况，经过买方和供方协商，可取消阀支架的某些试验。

7.2 试验对象

用于试验的阀支架可是一个有代表性的单独试品，包括阀邻近部分的代表，或者可构成用于单阀或多重阀单元试验装置的部分。它应装配所有的辅助部件，并且恰当的表示相邻地电位表面。为了达到试验目的，冷却剂应处于代表最严酷运行条件的状态。

7.3 试验要求

7.3.1 总则

下面给出的所有试验水平都要进行 4.2 中描述的大气修正。

7.3.2 阀支架直流耐压试验

阀的两个主要端子应短接在一起，然后将直流电压加在已连接的两个端子与地之间。起始电压不大于 1min 试验电压的 50%，电压应在大约 10s 的时间上升至规定的 1min 试验电压，保持 1min 恒定，然后降低至规定的 3h 试验电压，保持 3h 恒定，最后降电压至零。在规定的 3h 试验的最后 1h，局部放电量超过 300pC 的脉冲数应按 GB/T 20990.1—2020 附录 B 中的规定予以记录。

局部放电水平应不超过下面给出的限值：

表2 阀支架直流耐压试验局放限制值

局部放电水平	限值
>300pC	最大 15 次/min
>500pC	最大 7 次/min
>1000pC	最大 3 次/min
>2000pC	最大 1 次/min

注1：如果发现局部放电的幅值或出现的频次有上升的趋势，可由买方与供方共同协商延长试验时间。

然后用相反极性电压重复上述试验。

注2：在相反极性重复试验前，阀支架可短路并接地几个小时。在直流电压试验结束时进行同样的程序。

阀支架直流试验电压 U_{tds} 按照以下公式计算：

$$U_{tds} = \pm U_{dms} \times k_1 \times k_t \dots\dots\dots (2)$$

式中：

U_{dms} ——阀悬吊/支承结构两端之间稳态运行电压直流分量的最大值；

k_1 ——试验安全系数：1min 试验， $k_1=1.6$ ；3h 试验， $k_1=1.3$ ；

k_t ——大气修正系数：1min 试验， k_t 按照 4.2 中的规定取值；3h 试验， $k_t=1.0$ 。

7.3.3 阀支架交流耐压试验

进行试验时，阀的两个主端子应短接在一起，交流试验电压加在阀已短接在一起的两端与地之间。起始电压不大于 1min 试验电压的 50%，电压应以大约 10s 上升至规定的 1min 试验电压 U_{tas1} ，保持 1min 恒定，然后降低至规定的 30min 试验电压 U_{tas2} ，保持 30min 恒定，最后降电压至零。在规定的 30min 试验期间的最后 1min，应监测和记录局部放电的水平。如果局部放电水平不大于 200pC，此设计可完全接受。如果大于 200pC，则应对试验结果进行评估(见 GB/T 20990.1—2020 附录 B 的 B.4)。

阀支架交流试验电压 U_{tas} 的方均根值，按照下式计算：

$$U_{tas} = U_{ms} / \sqrt{2} \times k_1 \times k_t \times k_r \dots\dots\dots (3)$$

式中：

U_{ms} ——阀支架两端之间的最大稳态运行重复电压峰值，包括换相过冲；

k_2 ——试验安全系数：1min 试验 $k_2=1.3$ ，30min 试验 $k_2=1.15$ ；

k_t ——大气修正系数：1min 试验， k_t 按照 4.2 中的规定取值；30min 试验， $k_t=1.0$ ；

k_r ——瞬时过电压系数，1min 试验， k_r 由系统研究确定，30min 试验， $k_r=1.0$ 。

7.3.4 阀支架操作冲击试验

在阀的两个主端子对公共地之间施加 3 次正极性和 3 次负极性操作冲击电压。

应采用符合 GB/T 16927.1 的标准操作冲击电压波形。

试验电压应按照高压直流(HVDC)换流站的绝缘配合选取。

7.3.5 阀支架雷电冲击试验

在阀的两个主端子对公共地之间施加 3 次正极性和 3 次负极性雷电冲击电压。

应采用符合 GB/T 16927.1 的标准雷电冲击电压波形。

试验电压应按照高压直流(HVDC)换流站的绝缘配合选取。

7.3.6 阀支架陡波前冲击试验

在阀的两个主端子对公共地之间施加 3 次正极性和 3 次负极性陡波前冲击电压。应采用符合 GB/T 20990.1—2020 中的 3.1.2 所定义的陡波前冲击电压波形。

试验电压应按照高压直流 (HVDC) 换流站的绝缘配合选取。

注：如果采用了未经实际运行经验验证的新型绝缘材料，或如果用户认为有必要通过陡波前冲击试验验证阀支架性能，则应考虑增加陡波前冲击试验。

8 多重阀单元(MVU)绝缘试验

8.1 试验目的

这些试验的主要目的是：

- a) 检验多重阀单元外绝缘性能，考虑它的环境，尤其是在极电位上连接的阀；
- b) 验证多重阀单元结构中各个单阀之间的耐受电压能力；
- c) 验证局部放电水平在规定的限值内。

注：根据应用情况，经过买方和供方协商，可取消阀支架的某些试验。

8.2 试验对象

阀和多重阀单元有多种可能的设计结构。目前试验应考虑的是，选取试品应尽可能准确地反映阀运行的布置和试验所考核的要求。试品应是完整配备的，除非能够证明一些部件可模拟或忽略，而不会对试验结果造成实质的影响。

基于多重阀单元结构和试验目的，某些单个的阀可能需要被短路。例如，对于最普通的四个同样的、垂直堆放的阀(四重阀)结构，应将位于导致最严苛工况位置的那个阀短路。

当多重阀单元的低压端未接到直流中性电位时，就要注意在试验中恰当端接多重阀单元低压端来正确地模拟此端子上出现的电压。应使用地电位面，其间距由与其他阀和地电位表面的接近程度决定。

注：当多重阀单元的低压端未接到直流中性电位时，接下来这种试验方法可作为替代；当多重阀单元内部的电压耐受能力已被其他试验项目多次验证(例如阀端子试验)，且多重阀单元低压端有足够的对增长的电压应力的耐受能力。在这种情况下，多重阀单元绝缘试验可在其短路状态下进行。

试验电压应加在多重阀单元短路端与地之间。

同时，可控换相换流阀多重阀试品还须满足以下要求：

- a) 如果在多重阀中安装有阀避雷器，在试验中将仅装设阀避雷器外套。多重阀中可以不安装全部的阀组件，但将包含均压电路或补偿电容以确保试验中电压的适当分布；
- b) 在试品阀周围将适当安装接地屏蔽以模拟邻近的建筑中钢结构、接地网和其它结构对试品阀的对地杂散电容的影响；

- c) 多重阀中将包含所有冷却设备和控制设备，以及连接被试模块和处于地电位的元件。试验中的冷却介质参数（电导率、流量、温度）与运行时相同。

8.3 试验要求

8.3.1 多重阀单元对地直流电压试验

直流试验电压应加在多重阀单元最高电位的直流端子与地之间。

起始电压不应大于 1min 试验电压的 50%，电压应在大约 10s 的时间上升至规定的 1min 试验电压，保持 1min 恒定，然后降低至规定的 3h 试验电压，保持 3h 恒定，最后降电压至零。在规定的 3h 试验的最后 1h，局部放电量超过 300pC 的脉冲数应按 GB/T 20990.1—2020 中附录 B 中的规定予以记录。

局部放电水平应不超过下面给出的限值：

表3 多重阀直流耐压试验局放限制值

局部放电水平	限值
>300pC	最大 15 次/min
>500pC	最大 7 次/min
>1000pC	最大 3 次/min
>2000pC	最大 1 次/min

注1：若观察到局部放电的数量或频次有增加的趋势，可由买方与供方共同协商延长试验时间。

然后用相反极性电压重复上述试验。

注2：用相反极性重复试验前，MVU可短路并接地几个小时。在直流电压试验结束时进行同样的程序。

试验电压：

$$U_{tdm} = \pm U_{dmm} \times k_3 \times k_t \dots\dots\dots (4)$$

式中：

U_{dmm} ——出现在多重阀单元高压端子对地间的稳态运行电压直流分量的最大值；

k_3 ——试验安全系数：1min 试验， $k_3=1.6$ ；3h 试验， $k_3=1.3$ ；

k_t ——大气修正系数：1min 试验， k_t 按照 4.2 中的规定取值；3h 试验， $k_t=1.0$ 。

8.3.2 多重阀单元交流电压试验

如果多重阀单元在任何两个端子之间承受了交流或交直流复合电压，但其承受能力未被其他试验充分证明，那么就有必要在多重阀单元的这些端子间进行交流电压试验。

进行这个试验，试验电压源应接于待考核的多重阀单元端子对上。根据试验电路布置安排接地点。起始电压不大于 1min 试验电压的 50%，电压在约 10s 左右升至规定的 1min 试验电压，保持 1min，然后降至 30min 电压，保持 30min 后降至零。

在规定的 30min 试验期间的最后 1 min，应监视并记录局部放电的水平。若局部放电值低于 200pC，此设计可完全接受。若局部放电值超过 200pC，则需要评价试验结果(见 GB/T 20990.1—2020 中 B.4)。

多重阀单元交流试验电压 U_{tam} 的方均根值按照式 (5) 计算：

$$U_{\text{tam}} = \frac{U_{\text{mm}}}{\sqrt{2}} \times k_4 \times k_t \times k_r \dots\dots\dots (5)$$

式中:

U_{mm} ——稳态运行期间, 多重阀单元端子之间出现的最大重复运行电压的电压峰值, 包括换相过冲量;

k_4 ——试验安全系数: 1min 试验, $k_4=1.3$; 30min 试验, $k_4=1.15$;

k_r ——暂态过电压系数: 1min 试验值, k_r 由系统分析确定; 30min 试验, $k_r=1.0$;

k_t ——大气修正系数: 在 1min 试验中, k_t 按照 4.2 中的规定取值; 30min 试验, $k_t=1.0$ 。

8.3.3 多重阀单元操作冲击试验

采用 GB/T 16927.1 中的标准操作冲击电压波形。

多重阀单元操作冲击试验电压应加于多重阀单元高压端子与地之间。

试验由 3 次施加正极性和 3 次施加负极性的规定幅值的操作冲击电压组成。

多重阀单元操作冲击试验电压 U_{tsm} 按照式 (6) 确定:

$$U_{\text{tsm}} = \pm U_{\text{SIPLm}} \times k_5 \times k_t \dots\dots\dots (6)$$

式中:

U_{SIPLm} ——考虑到多重阀单元高压端子与地之间避雷器时, 由绝缘配合所决定的操作冲击保护水平;

k_5 ——试验安全系数, $k_5=1.15$;

k_t ——大气修正系数, 按照 4.2 中的规定取值。

如果上述规定的试验中, 在多重阀单元所有端子间未能充分地进行操作冲击耐受电压试验, 那么就要考虑进行额外试验检查其绝缘性能。

注: 在买方同供方协商一致的情况下, 可不进行多重阀单元操作冲击试验, 如果用其他方法可表明:

- a) 到其他阀及到地的外部空气间距能充分满足要求的操作冲击耐受电压水平;
- b) 多重阀单元任意两端子间的操作冲击耐受能力由其他试验所证明。

8.3.4 多重阀单元雷电冲击试验

采用 GB/T 16927.1 中的标准雷电冲击电压波形。

多重阀单元雷电冲击试验电压应加于多重阀单元高压端与地之间。

试验由 3 次施加正极性和 3 次施加负极性的规定幅值的雷电冲击电压组成。

多重阀单元雷电冲击试验电压 U_{lm} 由式 (7) 确定:

$$U_{\text{lm}} = \pm U_{\text{LIPLm}} \times k_6 \times k_t \dots\dots\dots (7)$$

式中:

U_{LIPLm} ——考虑到多重阀单元高压端子与地之间避雷器时, 由绝缘配合所决定的雷电冲击保护水平;

k_6 ——试验安全系数, $k_6=1.15$;

k_t ——大气修正系数, k_t 按照 4.2 中的规定取值。

如果不能证明上述规定的试验, 充分地试验了在多重阀单元所有端子间的雷电冲击耐受电压, 那么就要考虑额外进行试验检查其绝缘性能。

注1: 在买方同供方达成一致的情况下, 可不进行多重阀单元雷电冲击试验, 如果用其他方法可表明:

- a) 到其他阀及到地的外部空气间距能充分满足要求的雷电冲击耐受电压水平, 并且
- b) 多重阀单元任意两端子间的雷电冲击耐受电压由其他试验所充分证明。

注2: 在某些情况下, 考虑进行独立的陡波前冲击电压试验补充阀的陡波前冲击电压试验(见8.3.8)。

8.3.5 多重阀单元的陡波前冲击试验

本试验包括在 MVU 的高压端和地之间施加 3 次正极性和 3 次负极性陡波前冲击电压。

应采用符合 GB/T 20990.1 中 3.1.2 定义的陡波前冲击电压波形。

试验电压的选择应符合换流站绝缘配合的研究结果, 电压峰值应达到多重阀单元的陡波前冲击耐受水平。

注: 如果用户认为有必要通过陡波前冲击试验验证多重阀性能, 可与供方协商增加该项试验。

9 单阀绝缘试验

9.1 试验目的

这些试验用来验证阀设计的各种类型过电压(直流、交流、操作冲击、雷电冲击、陡波前冲击过电压以及非周期触发)相关的电压特性。这些试验应证明:

- a) 阀能够承受规定的过电压;
- b) 每一个内部过电压保护回路都是有效的;
- c) 在规定的试验条件下, 局部放电处于规定的限值之内;
- d) 内部的直流均压电路有足够的额定功率;
- e) 阀电子单元不受干扰影响且功能正确;
- f) 阀能够在规定的过电压条件下触发而避免损坏。

需要注意, 本条款所描述的试验, 是基于为试验高压交流系统和部件开发的标准波形和标准试验方法。这个途径为工业化提供了有利条件, 因为它可将很多现有的高压试验技术移植到高压直流(HVDC)阀的质量控制。另一方面, 应承认特殊的高压直流应用, 可导致波形不同于标准的波形, 在这种情况下, 有必要改进试验, 以实际地反映预期的条件。

9.2 试验对象

可控换相换流阀单阀试品及试验回路须完全满足 GB-T 20990.1—2020 的 8.2 要求, 同时还须满足:

- a) 受试阀包括与处于地电位的元部件相连接的冷却设备和控制设备;
- b) 对完整的阀进行试验, 包括阀运行所必需的附属设备(如饱和电抗器)以正确模拟阀的实际运行条件。其中冗余级全部短路(只在非周期触发试验中包括冗余级);

- c) 试验中不包括阀避雷器，当阀避雷器安装在阀上时，试验时只安装避雷器外套；
- d) 如果用调整冲击电压波头陡度的方法来反映阀的实际运行条件，将考虑阀避雷器对波形的影响，特别是波尾对饱和电抗器的影响，以及由此产生的对晶闸管/IGBT 元件的影响；
- e) 试验中将附加阀电路的杂散电容，并围绕阀支承结构合理设置接地屏蔽以模拟附近建筑物中的钢结构、接地网和其它任何结构物的影响，这些结构主要影响受试结构对地的杂散电容；
- f) 对于可控换相换流阀电路中子阀存在串联关系的情况，应评估绝缘试验中各子阀分压情况是否大于单阀实际工况所承受的电压水平，并符合绝缘试验裕度要求，如不满足，应对子阀单独开展相应的绝缘试验项目。

9.3 试验要求

9.3.1 阀直流耐压试验

直流耐压试验除须对单阀开展以外，根据可控换相换流阀电路特点及实际运行工况，还需针对子阀单独开展。

直流耐压试验电压：

$$U_{tdv} = \pm U_{dn} \times k_7 \dots\dots\dots (8)$$

式中：

U_{dn} ：对于单阀直流耐压试验，为六脉动桥额定直流电压（要求使用最大持续直流电压计算），对于子阀直流耐压试验，根据各子阀耐受直流电压应力确定；

k_7 ：试验安全系数，1min 试验 $k_7=1.6$ ，3h 试验 $k_7=0.8$ 。

9.3.1.1 单阀直流耐压试验

直流试验电压加在阀的一个主端子与地之间，阀的另一个主端子接地。起始电压不大于 1min 试验电压的 50%，电压应在大约 10s 的时间上升至规定的 1min 试验电压，保持 1min 恒定，然后降低至规定的 3h 试验电压，保持 3h 恒定，最后降电压至零。在规定的 3h 试验的最后 1h，局部放电量超过 300pC 的脉冲数应按 GB/T 20990.1—2020 中附录 B 中的规定予以记录。

局部放电水平应不超过下述限值：

表4 单阀直流耐压试验局放限制值

局部放电水平	限值
>300pC	最大 15 次/min
>500pC	最大 7 次/min
>1000pC	最大 3 次/min
>2000pC	最大 1 次/min

注1：若观察到局部放电的幅值或出现频次有增加的趋势，可由买方与供方共同协商延长试验时间。

试验应在相反极性的电压下重复进行。

注2：在相反极性重复上述试验之前，阀端子可短接并接地几个小时。在直流电压试验结束时进行同样的程序。

9.3.1.2 子阀直流耐压试验

试验电压加在被试子阀两端，其余子阀可根据实际情况短接/断开。起始电压不大于 1min 试验电

压的 50%，电压应在大约 10s 的时间上升至规定的 1min 试验电压，保持 1min 恒定，然后降低至规定的 3h 试验电压，保持 3h 恒定，最后降电压至零。在规定的 3h 试验的最后 1h，局部放电量超过 300pC 的脉冲数应按 GB/T 20990.1—2020 中附录 B 中的规定予以记录。局部放电水平按 8.3.1.1 节考核。

注：如果用户认为有必要通过直流耐压试验验证子阀性能，可与供方协商增加该项试验。

9.3.2 湿态直流耐压试验

应模拟在阀结构顶部的一个组件发生冷却水泄漏的情况下重复进行。

泄漏量至少应为 15L/h，在施加直流试验电压时和在此之前至少 1h 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至少高 5%。

合闸电压不大于最高试验电压的 50%，电压上升到规定的试验电压(同 8.3.1 中的 1min 试验电压值)保持恒定并维持 1min，然后降低到规定的试验电压(同 8.3.1 中的 3h 试验电压值)，保持恒定并维持 5min 后降到零。

然后，试验应在相反极性的电压下重复进行。每个极性电压试验结束后要将主端子短路并接地数小时。

9.3.3 阀交流耐压试验

本项试验只针对具有双向电压耐受能力的子阀，可根据实际情况将具有单向电压耐受能力的子阀短接或断开。进行该试验时，试验电压应接在阀的两个端子上。接地点与试验电路布置有关。起始电压不大于 15s 试验电压 50%，在大约 10s 的时间里将电压升至规定的 15s 试验电压，保持 15s，降至规定的 30min 试验电压，保持 30min，然后降至零。在规定的 30min 试验期间的最后 1min 内，应监测并记录局部放电水平。局部放电值不应超过 200pC(见 GB/T 20990.1—2020 中附录 B)。

阀的 15s 试验电压 U_{tav1} 按式 (9) 和式 (10) 计算：

$$U_{tav1r} = \sqrt{2}U_{v0max} \times k_8 \times k_c \times k_r \dots\dots\dots (9)$$

和

$$U_{tav1d} = \sqrt{2}U_{v0max} \times k_8 \times k_r \dots\dots\dots (10)$$

式中：

U_{tav1r} ——15s 反向试验电压峰值；

U_{tav1d} ——15s 正向试验电压峰值；

U_{v0max} ——变压器阀侧最大稳态空载相间电压；

k_r ——暂态过电压系数，由系统研究确定的值；

k_c ——反向换相过冲系数，用来计算甩负荷过电压峰值 ($\alpha=90^\circ$) 的恢复，包括由晶闸管反向恢复电荷引起的增加。 k_c 应考虑并联阀避雷器的限制作用；

k_8 ——试验安全系数， $k_8=1.1$ 。

注：由于 U_{tav1r} 大于或等于 U_{tav1d} ，15s 试验可用一个对称的交流试验电压方均根值等于 $U_{tav1r/2}$ 或采用能满足两项要求的交直流叠加的组合试验电压完成。

30min 试验电压 U_{tav2} 的方均根值应按照式 (11) 计算：

$$U_{\text{tav}2} = \frac{U_{\text{ppv}}}{2\sqrt{2}} \times k_9 \dots\dots\dots (11)$$

式中:

U_{ppv} ——跨接在阀上的稳态运行电压峰对峰最大值, 包括换相过冲;

k_9 ——试验安全系数, $k_9=1.15$ 。

当 $U_{\text{tav}2}$ 超过阀运行电压最大方均根值 U_{vrms} 15% 以上, 可采用以下试验步骤:

施加试验电压 $U_{\text{tav}1}$, 保持 15s, 然后将试验电压 $U_{\text{tav}2}$, 保持 10min。10min 试验过程的最后 1min 局部放电水平不应超过 200pC。

在 10min 电压试验结束后, 降低试验电压至 $U_{\text{tav}3}$ 并保持 30min, 其中 $U_{\text{tav}3}$ 按式(12)计算:

$$U_{\text{tav}3} = U_{\text{vrms}} \times k_9 \dots\dots\dots (12)$$

式中:

U_{vrms} ——最苛刻连续运行工况下阀电压最大方均根值。

9.3.4 阀冲击试验(综合)

阀冲击试验应考虑以下几个方面:

a) 本部分允许考虑应用成本最低原则从两个阀冲击试验方案中选择一种。

在第一个方案中, 对含有晶闸管的阀进行雷电和操作冲击试验的试验安全系数是 1.1, 陡波前冲击试验是 1.15, 当晶闸管被绝缘部件代替, 分别加到 1.15 和 1.2。

在第二个方案中, 对含有晶闸管的阀进行雷电和操作冲击试验的试验安全系数是 1.15, 陡波前冲击试验是 1.2。

详细说明在 GB/T 20990.1—2020 中附录 A 中给出。

b) 如果采用了阀保护性触发, 施加的正向冲击试验电压仅是预期值。需要证明任何这样的保护触发回路动作是预期的。

c) 除非另有规定, 阀的电子单元应带电。

d) 需要证实冲击起始时, 阀两端的电压满足下列关系:

$$-0.01 \times V_{\text{DSM}} \times (N_t - N_r) \leq \text{阀电压} \leq +0.01 \times V_{\text{DSM}} \times (N_t - N_r) \dots\dots\dots (13)$$

式中:

V_{DSM} ——额定的晶闸管断态不重复峰值电压;

N_t ——阀中串联的晶闸管级的总数;

N_r ——阀中冗余的串联晶闸管级的总数。

e) 在冲击试验期间, 监测阀在电磁干扰下行为是否正确(见第 9.4 节)。为了实现这一点, 阀基电子单元的那些必需与试验的阀正确交换信息的部分一定要包括在内。

9.3.5 阀操作冲击试验

操作冲击试验除须对单阀开展以外, 根据可控换相换流阀电路特点及实际运行工况, 还需针对子

阀单独开展。

采用 GB/T 16927.1 中的标准操作冲击电压波形。

操作冲击试验电压：

$$U_{tsv} = \pm SIWL_V \dots\dots\dots (14)$$

式中：

SIWL_v：对于单阀操作冲击试验，为阀避雷器操作冲击耐受水平，对于子阀操作冲击试验，根据各子阀避雷器操作冲击耐受水平或器件耐受能力确定；

9.3.5.1 单阀操作冲击试验

试验应由施加 3 次正极性和 3 次负极性规定幅值的操作冲击电压组成，阀电子单元初始加电。

在正向试验期间若阀正向过电压保护触发动作，则施加 3 次附加的预定幅值正向操作冲击，电压峰值略小于保护动作值，使阀不被触发。

9.3.5.2 子阀操作冲击试验

试验电压加在被试子阀两端，其余子阀可根据实际情况短接/断开。

试验应由施加 3 次正极性和 3 次负极性规定幅值的操作冲击电压组成，阀电子单元初始加电。

在正向试验期间若阀正向过电压保护触发动作，则施加 3 次附加的预定幅值正向操作冲击，电压峰值略小于保护动作值，使阀不被触发。

注：如果用户认为有必要通过操作冲击耐压试验验证子阀性能，可与供方协商增加该项试验。

9.3.6 湿态操作冲击试验

应模拟在阀结构顶部的一个组件发生冷却水泄漏的情况下，重复进行。

试验电压与试验次数同 8.3.5。

泄漏量至少应为 15L/h，在施加操作冲击试验电压时和在此之前至少 1h 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至少高 5%。

9.3.7 阀雷电冲击试验

采用 GB/T 16927.1 中的标准雷电冲击电压波形。

试验对象为可控换相换流阀单阀。

注：如果用户认为有必要通过雷电冲击耐压试验验证子阀性能，可与供方协商增加该项试验。

试验应由施加 3 次正极性和 3 次负极性规定幅值的雷电冲击电压组成。

在正向试验期间若阀正向过电压保护触发动作，则施加 3 次附加的预定幅值正向雷电冲击，电压峰值略小于保护动作值，使阀不被触发。

雷电冲击试验耐受的电压 U_{div} 按式(15)计算：

$$U_{div} = \pm LIPL_V \dots\dots\dots (15)$$

式中：

LIPL_v：阀避雷器雷电冲击耐受水平。

9.3.8 阀陡波前冲击试验

对于陡波前冲击试验,应采用 GB/T 20990.1—2020 中 3.1.2 的图 1 规定的电压波形。波头陡度不小于 $1200\text{kV}/\mu\text{s}$, 平均陡度的覆盖范围占电压达到峰值过程的 60% 以上。

注1: 如果运行中可能出现波前时间短于 $0.1\mu\text{s}$ 的过电压, 买方和供方可以协商采用适当的特快波前过电压试验代替上述陡波前冲击试验。

试验对象为可控换相换流阀单阀。

注2: 如果用户认为有必要通过陡波前冲击耐压试验验证子阀性能, 可与供方协商增加该项试验。

试验时, 加热冷却水使其温度达到正常运行晶闸管/IGBT 结温的最高温度, 在阀电子电路预充电的情况下, 施加 3 次正极性和 3 次负极性规定幅值的陡波前冲击。若阀带正向过电压或正向过 du/dt 触发保护, 在正向试验期间运行, 就要额外进行 3 次规定幅值和波前时间的正向冲击试验, 使阀不被触发。

陡波前冲击试验耐受电压 U_{tsfv} 由式 (16) 计算:

$$U_{\text{tsfv}} = \pm \text{FWWL}_V \dots\dots\dots (16)$$

式中:

FWWL_V : 由系统研究及配合电流所确定的阀避雷器波前耐受水平。

9.3.9 补充要求

单阀的绝缘试验还须满足下述要求:

- 在操作冲击耐压试验、雷电冲击耐压试验和陡波前冲击耐压试验时, 当电压水平等于或大于试验电压幅值的 50% 时, 在沿阀 4 个或更多个中间测点测量加于晶闸管元件上的电压, 以确定阀的内部电压分布;
- 操作冲击耐压试验、雷电冲击耐压试验和陡波前冲击耐压试验时, 试验前将检测阀的触发功能, 即触发电路可正确触发各晶闸管元件, 试验结束后将立即再次检测触发功能;
- 阀的雷电冲击试验和陡前波冲击试验时晶闸管元件的结温和阀电子电路的温度为短期过负荷运行方式的最高运行温度。如果对经过负荷试验预热的阀组件进行计及电压不均匀分布因素的补充试验, 则对整阀的试验可在室温下进行。

9.4 阀非周期触发试验

9.4.1 试验目的

阀非周期触发试验的目的是验证全控/半控电力电子元件及其相关联电路开通的一致性, 并且在规定的高电压情况下开通时, 有足够的电流和电压耐受能力。本试验通常可作为阀操作冲击试验的一部分进行(见 8.3.5)。

9.4.2 试验对象

试验对象为实际运行中可控换相换流阀可能出现的高电压情况下开通的支路或子阀。试验应分别对该支路/子阀进行。

试品阀同 8.2 的要求。对于下述避雷器方法 B, 试验可用阀段代替完整的阀进行。在这种情况下, 供方应说明阀段试验与完整阀试验间的等价性。

如果用 9.4.3.2 所述的方法 1, 验证多重阀单元中抗相邻阀之间耦合的电磁干扰性能, 那么除了试

验的阀外，在这个试验中还应当包括的一个辅助阀(或其有效的部分)。这个辅助阀不同于可控换相换流阀辅助支路，其是验证有关抗耦合电磁干扰的试品。电磁干扰试验的试品应根据运行的布置安排其几何位置。电磁干扰试品在阀非周期触发的触发时刻应具有正向偏置。电磁干扰试品的电子设备应加电。试验应包括与电磁干扰试品正确进行信息交换所需要的阀基电子单元的那些部分。

注：电磁干扰试品使用规定的几何布置和正向电压的幅值应一致，并以多重阀单元的设计为基础。

拆除辅助阀的所有短接线，辅助阀试验前加电至少 30s 且在试验期间持续带电，加电期间需确认辅助阀的回报信号。试品阀也需要预加电，冲击电压只加在试品阀上。

9.4.3 试验要求

试验在 CLCC 模式下开展。施加 3 次正向操作冲击电压，冲击发生器在辅助阀电源正向电压峰值时刻开始作用，试品阀在冲击电压峰值时刻被触发。

必须监视相邻的辅助阀，并检查是否产生误触发信号及错误的回报信号。

冲击发生器阻抗的选取，不仅应再现回路杂散电容放电引起的导通电流，而且应再现由系统研究确定的避雷器的电流最大值交换引起的导通电流。

试验应在室温下进行。

两种可用的验收方法描述如下。

- A. 并联电容器法：此方法中，试验阀上要并联一个电容器，它所形成的放电电流，至少应同预计值前 $10\mu\text{s}$ 一样严重。如果系统研究表明导通电流是振荡的，并且电力电子元件的电流有关断危险，加长时间就变得重要了。
- B. 避雷器法：此方法中，试验的阀端子间应接一个避雷器，从一个等于换相电感的电感后施加试验电压。阀端子之间应接一个电容，其值等于运行中预计的阀端对端杂散电容最大值。当避雷器通过的电流和其上的电压达到预先规定的水平，阀就应被触发导通。

触发时阀的电压为以下几个中最低的一个：

- a) 阀避雷器的操作冲击保护水平；
- b) 阀的保护触发水平；
- c) 阀的禁止触发水平(见注 3)。

若阀被低于阀避雷器操作冲击保护水平的保护触发导通，则试验要以有冗余的晶闸管级重新进行。

如果阀仍旧被低于操作冲击保护水平的保护触发导通，就要将冲击水平降至略低于保护触发起始值和用一般触发电路触发该阀，再重复试验。

注1：电压试验安全系数至少等于阀避雷器最大允许误差和最小允许误差之间的差(典型值约5%)已经包括在本试验中。因此没有使用单独的试验安全系数。

注2：由于冲击发生器实际尺寸的限制，方法B仅适用于低额定电压的阀。因此当系统研究表明需要 $10\mu\text{s}$ 以上时间精确显示导通电流，就要用方法A进行阀非周期触发试验，并用方法B在阀段上的另行试验作为补充。

注3：在一些设计中，阀高电压下的触发会被接在阀端的电压测量装置或并联的阀避雷器中的电流测量装置抑制。

在这种情况下，非周期触发试验的细节就要由买方和供方协商，考虑所用的抑制电路特性。

10 运行试验

运行试验的目的是为了验证所设计的换流阀在规定的正常运行条件和过负荷运行条件，以及非正常运行条件和故障暂态运行条件下的运行性能。

10.1 周期性触发和关断试验

10.1.1 试验目的

周期性触发和关断试验的主要目的是：

- a) 检查一个阀中晶闸管/IGBT 级和相关的电路，在最严重的重复作用条件下导通与关断时，对于电流、电压和温度的应力是否合适；
- b) 证明阀在最高温度下，用最低重复电压，符合最小触发角和关断角的正确特性。

10.1.2 试验对象

试验可在整个阀或阀段上进行。选择主要取决于阀的设计和试验所使用的设备。本部分规定的试验对象应根据各子阀晶闸管/IGBT 实际串联级数进行等比例折算。

试验用的阀或阀段应与全部的辅助部件组装在一起。若有要求，还应包括一个适当比例的阀避雷器。此避雷器应与试验中串联级数成比例，以提供至少与实际应用的避雷器最大特性相一致的保护水平。

冷却剂应反映实际运行工况。特别是流量和温度，应设置成试验所考虑的最不利的值。

10.1.3 试验要求

10.1.3.1 总则

试验应采用合适的试验电路进行，给出等效于相应运行条件的应力，比如两个背靠背连接的六脉动桥或适当的合成试验电路。

再现的等效运行条件在 9.1.3.2~9.1.3.6 中有规定。9.1.3.2、9.1.3.3 和 9.1.3.4 规定了最大持续运行的电力电子元件结温下的运行工况。若较高的触发或恢复电压，或较低的触发角或关断角，可能不符合最大持续运行晶闸管/IGBT 结温的低负载条件，这些运行条件也应再现。出现这种情况的例子包括冬季过负荷运行，和在轻负荷条件下用换流器来限制向交流电网输出的过剩无功功率。为再现这样的条件，进行试验时试验电流和冷却剂温度应调整到反映最坏情况的热条件，以适应本试验代表的实际运行条件。

为了获得代表运行条件的电压和电流应力，试验回路中应正确地再现阀相关的总杂散电容和代表换相电抗的电感。在一个解锁的六脉动桥式电路中，每个阀具有一个等于单个阀关断状态 1.5 倍阻抗的并联阻抗。如果使用的试验电路不是六脉动桥，那么正确地反映此电路的这一特征就非常重要。

当对阀段进行试验时，试验的比例系数(k_n)应按照 4.3.2 决定。

试验电压和试验电路的电阻及电感应由实际值乘以系数 k_n 确定，而试验电路的电容应由实际值除以系数 k_n 确定。

为了正确地再现热效应，试验应在工作频率下进行。如不能做到这一点，实际工作频率与试验频率不同，则需要调整试验条件以近似补偿与同频率有关的损耗差值，有必要证实设备的正确作用。各种损耗产生机理的频率敏感性，见 GB/T 20989。

试验期间，要监测关键发热部件及其相邻安装表面的温升，以验证达到的最高温度在设计允许限

值内(见 4.6.2)。每种发热部件的监测数量和位置需要达成一致,而且电力电子元件外壳温度、阻尼电阻器表面温度和阀饱和电抗器表面温度,每种的监测点数量不得少于 3 个。如果试品中某种类型的部件少于 3 个,则该类型的所有部件都需要监测。

10.1.3.2 最大持续运行负载试验

10.1.3.2.1 概述

试验电流应是基于最高环境温度下的最大持续直流电流,包含一个 1.05 的试验安全系数。

冷却剂温度不低于实际运行中最高稳态晶闸管结温对应的冷却剂温度。

对应六脉动换流器空载线电压的试验电压 U_{tpv1} , 由式 (17) 确定:

$$U_{tpv1} = U_{v0max} \times k_n \times k_{13} \dots\dots\dots (17)$$

式中:

U_{v0max} ——变压器阀侧最高稳态空载线电压;

k_n ——按照 4.3.2 的试验比例系数;

k_{13} ——试验安全系数, $k_{13}=1.05$ 。

3 个最大运行负载试验的条件应满足下面 9.1.3.2.2、9.1.3.2.3 和 9.1.3.2.4 说明的细节。这些条件可分别或以任何组合得到满足。

注:在买方和供方达成一致的情况下,可考虑分别施加电流和电压应力,只要证明能够达到试验目的。

10.1.3.2.2 最大持续触发电压试验

阀或阀段以触发角 α 运行,以使阀(阀段)的触发电压 u_f 不低于下面的较大者,见式 (18) 和式 (19):

$$u_{fr} = U_{tpv1} \times \sqrt{2} \times \sin \alpha \dots\dots\dots (18)$$

$$u_{fi} = U_{tpv1} \times \sqrt{2} \times \sin(\gamma + \mu) \dots\dots\dots (19)$$

式中:

u_{fr} ——整流器阀触发电压;

u_{fi} ——逆变器阀触发电压;

α ——整流运行产生最高 u_{fr} 时的稳态触发角,与运行在最大持续运行的晶闸管结温相符;

$\gamma + \mu$ ——在逆变运行产生 u_{fi} 值最高时的稳态关断角和换相角之和,与运行在最大持续运行的晶闸管结温相符。

试验持续时间应在出口处的冷却剂温度稳定后不少于 30min。

10.1.3.2.3 最大持续恢复电压试验

阀或阀段以触发角 α 运行,以使电流为零时,预期的恢复阶跃电压 u_r 不低于下面的较大者,见式 (20) 和式 (21):

$$u_{rr} = U_{tpv1} \times \sqrt{2} \times \sin(\alpha + \mu) \dots\dots\dots (20)$$

$$u_{ri} = U_{tpv1} \times \sqrt{2} \times \sin \gamma \dots\dots\dots (21)$$

式中:

u_{tr} ——整流器恢复阶跃电压(不计换相过冲);

u_{ri} ——逆变器恢复阶跃电压(不计换相过冲);

$\alpha+\mu$ ——在整流运行产生 U_{r} 值最高时的稳态触发角和换相角之和,与运行在最大持续运行的晶闸管结温相符;

γ ——在逆变运行产生 u_{ri} 值最高时的稳态关断角,与运行在最大持续运行的晶闸管结温相符。

试验持续时间应在出口处的冷却剂温度稳定后不少于 30min。

10.1.3.2.4 热运行试验

为模拟持续运行中晶闸管/IGBT 和阻尼电路的最大综合损耗,阀或阀段以触发角 α 运行,以使一周期内测量的阀电压波形中的阶跃电压的平方和(不包括换相过冲)不低于[见式(22)]:

$$\sum \Delta V^2 = (1.75 + 1.5m^2) \times 2 \times U_{\text{pv1}}^2 [\sin^2 \alpha + \sin^2(\alpha + \mu)] \dots\dots\dots (22)$$

式中:

m ——电磁耦合系数(见 GB/T20989—2017 的 5.1.4);

α 和 μ ——相应于整流和逆变稳态运行条件下,使 $U_{\text{pv1}}^2[\sin^2 \alpha + \sin^2(\alpha + \mu)]$ 最大的值,与运行在最大持续运行的晶闸管结温相符。

试验 9.1.3.2.2-9.1.3.2.4 将联合进行。

试验持续时间应在出口处的冷却剂温度稳定后,分别在 CLCC 模式下与 LCC 模式下各运行 60min。

10.1.3.3 最大暂态运行负载试验

对应六脉动换流器的空载线电压的试验电压 U_{tpv2} , 应由式(23)确定:

$$U_{\text{tpv2}} = U_{\text{v0max}} \times k_{\text{n}} \times k_{\text{l4}} \times k_{\text{r}} \dots\dots\dots (23)$$

式中:

U_{v0max} ——变压器阀侧的最高稳态空载线电压有效值;

k_{n} ——按照 4.3.2 的试验比例系数;

k_{r} ——暂态过电压系数,其值由系统研究决定;

k_{l4} ——试验安全系数, $k_{\text{l4}}=1.05$ 。

进行试验前,阀或阀段应达到 9.1.3.2.2 条件下的热平衡。

对于有运行触发角度限制的可控换相换流阀,该试验应针对其可能存在的所有运行模式开展。触发角 $\alpha=90^\circ$, 在规定的时间内使得触发和预期的恢复电压均不低于 $U_{\text{tpv2}} \times \sqrt{2}$, 阀电压波形中的阶跃电压的平方和不应低于由 9.1.3.2.4 中表达式所得出的值。计算时,在 $\alpha=90^\circ$ 运行期间的电流,至少要等于由系统研究确定的 $\alpha=90^\circ$ 时运行的最大电流值乘以试验安全系数 1.05。在 $\alpha=90^\circ$ 运行了规定的时间之后,返回到 9.1.3.2.2 的相应条件,至少再保持恒定 15min。

在 $\alpha=90^\circ$ 时,运行的持续时间,应至少 2 倍于在此触发角下运行的正常允许时间。

根据暂态过电压控制策略,可能需要不同持续时间、不同的 k_{r} 值的试验。

10.1.3.4 最小交流电压试验

10.1.3.4.1 概述

选用 9.1.3.2 定义的试验电流和冷却剂温度。

对应六脉动换流器的空载线电压的试验电压 U_{tpv3} ，应由式 (24) 计算：

$$U_{\text{tpv3}} = U_{\text{v0min}} \times k_{15} \times \frac{N_{\text{tut}}}{N_{\text{t}}} \dots\dots\dots (24)$$

式中：

U_{v0min} ——变压器阀侧稳态最低空载线电压；

N_{tut} ——试验中串联晶闸管级的数量；

N_{t} ——包括冗余晶闸管/IGBT 级在内，一个完整阀串联晶闸管/IGBT 级的总数；

k_{15} ——试验安全系数。

10.1.3.4.2 最小延迟角试验

阀或阀段以 LCC 整流模式运行，触发角为 α ，使得阀(阀段)的触发电压 u_{fr} 不高于[见式 (25)]：

$$u_{\text{fr}} = U_{\text{tpv3}} \times \sqrt{2} \times \sin \alpha \dots\dots\dots (25)$$

式中：

α ——稳态运行下的整流器最小触发角，与运行在最大持续运行的晶闸管结温相符。

试验持续时间应在出口处的冷却剂温度稳定后不少于 15min。

若换流器的运行策略允许在 α 低于最小稳态值的条件下短时运行，那么在这个减小的值下运行也需要予以证明。运行在暂态 α 值的持续时间应至少为此触发角下正常允许运行时间的 2 倍。

应证明阀(阀段)在稳态和暂态 α 值下均能正常触发。

10.1.3.4.3 最小熄弧角试验

阀或阀段分别以 CLCC/LCC 逆变模式运行，关断角为 γ ，使得在电流过零时，预期的阶跃恢复电压 u_{ri} 不高于[见式 (26)]：

$$u_{\text{ri}} = U_{\text{tpv3}} \times \sqrt{2} \times \sin \gamma \dots\dots\dots (26)$$

式中：

γ ——最小稳态关断角，与运行在最大持续运行的晶闸管结温相符。并且，从电流过零到正向电压过零点的时间 t_{off} 不长于[见式 (27)]：

$$t_{\text{off}} = \frac{\gamma}{360 \times f} \dots\dots\dots (27)$$

式中：

γ ——最小稳态关断角，与运行在最大持续运行的晶闸管结温相符；

f ——工作频率。

试验持续时间应在出口处的冷却剂温度稳定后不少于 15min。

若换流器的运行策略允许在 γ 低于最小稳态值的条件下短时运行，那么在这个减小的值下运行也需要予以证明。运行在暂态最小 γ 的持续时间应至少为此关断角下正常允许运行时间的 2 倍。

应验证阀(阀段)在稳态或暂态最小 γ 值时都能可靠关断。

10.1.3.5 暂态低电压试验

暂态低电压试验是为了证明，以正常交流电压运行时，在交流系统故障引起的暂时低电压期间，晶闸管/IGBT 元件和所有辅助电路设计的正确性。

阀或阀段以 LCC 模式运行，触发能量取自阀端子间的电压。进行试验前，除试验电流可以降低外，阀或阀段应运行在与 9.1.3.4.1(稳态最小 α) 一致的条件下。阀或阀段以最小暂态 α 值运行规定的时间，施加的试验电压 U_{tpv4} 应由式 (28) 确定：

$$U_{tpv4} = U_{v0N} \times k_{16} \times \frac{N_{tut}}{N_t} \times k_u \dots\dots\dots (28)$$

式中：

U_{v0N} ——变压器阀侧额定空载线电压；

N_{tut} ——试验中串联晶闸管级的数量；

N_t ——包括冗余晶闸管级在内，一个完整阀串联晶闸管级的总数；

k_u ——换流器保持可控的暂态欠电压系数(基波频率)；

k_{16} ——试验安全系数， $k_{16}=0.95$ 。

暂态低电压运行持续时间不应少于交流系统的后备保护动作清除故障时间，包括交流系统自动重合闸产生的无电流时间。

在规定的时间内，返回 9.1.3.4.1 节所述的初始运行状态。

应证明阀(阀段)在整个暂态低电压期间保持可控。

根据暂态低电压水平和采用的试验方法，试验回路也许不能在此试验期间保持正常运行。如果发生这种情况，需要证明这是试验期间反常电压情况的固有结果，而不是阀(阀段)响应触发信号失败而导致的结果。

10.1.3.6 直流电流断续试验

直流电流断续试验用于证明在正常触发条件下阀的触发系统功能正确，以及阀对于直流断续电流具有足够的耐受能力。

试验在冷却管出口的冷却介质温度稳定在过负荷运行的最高温度后进行。在两种运行条件反复再现断续直流电流运行造成的应力：

- a) 在 $\alpha=90^\circ$ ，以最大交流电压运行，且 $k_r=1.0$ (见 9.1.3.3)；
- b) 整流器在最小 α 下以最小交流电压运行(见 9.1.3.4.1)。

试验的持续时间应至少为规定条件下以断续直流电流正常运行允许工作时间的 2 倍。试验达到规定的时间后将电路运行条件调节至试验开始时的状态，并持续正常运行至少 5min，不存在换相失败、误触发、阀阻尼电阻过热、换相过冲过高、某些晶闸管级损坏、保护触发功能或任何晶闸管级其它控制功能出错等现象。

这些试验将证明，晶闸管能按照设计在每周期内按必需的触发次数安全导通。作为有效的证明，应使用一个可调整的断续直流电流来研究阀(阀段)的性能。断续电流的无电流持续时间，可在零到与晶闸管关断时间可比的数值范围内变化，以正确模拟运行中所出现的断续电流。

10.1.3.7 保护触发连续动作试验

试验用于证明阀组件具有承受由于某些开关器件保护触发连续动作所产生电压电流应力的能力。

10.1.3.7.1 晶闸管一级闭锁试验

试验方法和条件与 9.1.3.2.2 一致，将一个晶闸管级触发电路的触发功能闭锁，使该级晶闸管级的保护触发连续动作，从而使晶闸管级的相关元件承受在保护触发动作下产生的电压应力和热应力。

试验需演示 FOP 保护功能，并对所有发热元件表面温度进行监测和记录。FOP 保护功能的验证将在最大持续运行负载试验中进行，试验持续时间不少于 1h。

10.1.3.7.2 IGBT 一级闭锁试验

试验方法和条件与 9.1.3.2.2 一致，将一个 IGBT 级触发电路的触发功能闭锁，使该级 IGBT 的保护触发连续动作，从而使 IGBT 级的相关元件承受在保护触发动作下产生的电压应力和热应力。

试验需演示 FOP 保护功能，并对所有发热元件表面温度进行监测和记录。FOP 保护功能的验证将在最大连续运行负载试验中进行，试验持续时间不少于 1h。

10.1.3.8 阀损耗验证

阀损耗应符合 GB/T 20989 中的规定，损耗量可通过试验和已获得的试验结果进行综合计算验证。

10.2 晶闸管恢复期正向暂态电压试验

10.2.1 试验目的

恢复期暂态正向电压试验的主要目的是，检查在最高温度下，阀能够在电流关断后的紧随区间承受施加的暂态正向电压。试验应证明阀能承受正向电压或能安全地导通。同时验证换流阀运行于最高稳态结温下，恢复期后施加暂态正向电压时，阀的保护触发水平和 du/dt 耐受能力与设计一致。

10.2.2 试验对象

要求同 9.1.2。试验对象为晶闸管子阀。

10.2.3 试验要求

除了需要一个连接于逆变阀或阀段上的冲击发生器外，试验要求与第 9.1 节中的最大运行负载试验相同。冲击发生器的触发应当与正常运行波形同步，在电流关断后的区间施加正向冲击到试验的阀或阀段。

阀或阀段以 CLCC 模式运行，应选取产生最大连续运行晶闸管结温的试验电流和冷却剂温度。试验阀(阀段)的运行条件应是 9.1.3.4.2 稳态最小 γ 规定的条件。

冲击发生器应进行设置，以使预期的正向峰值电压 U_{tvd} 由式 (29) 确定：

$$U_{tvd} = U_{IMPLV} \times k_n \dots\dots\dots (29)$$

式中：

U_{IMPLV} ——阀避雷器的冲击保护水平，或具有操作冲击波形的保护性触发的保证不触发水平(如果更低)；

k_n ——按 4.3.2 中的比例系数。

注1： U_{IMPLV} 在波前时间100 μ s的波形中体现为 U_{S1PLV} ，在波前时间1.2 μ s和10 μ s的波形中体现为 U_{L1PLV} 。

试验应当用 3 种不同的冲击波形进行：

类型 1: 上升时间 $100(1 \pm 30\%) \mu\text{s}$;

类型 2: 上升时间 $10(1 \pm 30\%) \mu\text{s}$;

类型 3: 上升时间 $1.2(1 \pm 30\%) \mu\text{s}$ 。

从冲击的电压顶峰降至半峰值的时间不是关键,但对于冲击电压下阀没有开通的情况,施加的任何波形此时间都不应少于 $10 \mu\text{s}$ 。

注2: 设备对不同波形冲击的灵敏度是设计决定的。根据买方与供方达成的协议,倘若可表明能达到此试验的目的,可考虑试验限制为单一冲击波形。

在电流零点到反向恢复期结束的各个时段,应逐一施加每种类型的冲击不少于 5 次。在恢复期结束后,应施加每种类型的附加冲击 3 次。

注3: 当晶闸管完全恢复关断电压和 du/dt 耐受能力时,认为恢复时期已经结束。在某些设计中这一点可用 1 个时间窗口的结束来标记,在时间窗口期间保护电路增加了灵敏度。有关的时间由供方来规定。

阀或阀段应承受冲击或安全地导通。

如果阀具有恢复期暂态正向电压保护的功能,则应证明该保护按预期动作。

在恢复期结束后施加的任何冲击,阀都不应触发,除非能证明触发是保护性触发电路在断态期间(见注 3)的合理动作。如果在恢复期结束后施加规定的波形进行保护性触发,应额外施加 3 次修正幅值和波前时间的正冲击脉冲,而阀未被触发。应证明不使阀触发的修正幅值和波时间与阀的保护性触发策略一致。

10.3 短路电流试验

10.3.1 试验目的

故障电流试验的主要目的是验证设计的阀可承受短路引起的最大电流、电压和温度。

试验验证阀或子阀的以下能力:

- 承受从最高结温开始出现的一个最大幅值的单波故障电流,并且能够闭锁随后出现的反向和正向电压,包括甩负荷造成的过电压;
- 在类似单波试验的条件下,能耐受交流断路器跳闸之前的多波故障电流,但无再加正向电压。本试验覆盖了罕见的情况,即移相或交流系统暂态阻止了阀在第一个周波电流结束后闭锁故障需要的条件。

10.3.2 试验对象

试验对象为主支路和辅助支路。

10.3.3 试验要求

10.3.3.1 一般要求

试验应区分可控换相换流阀的 LCC 模式及 CLCC 模式,同时考虑整流运行模式和逆变运行模式,并采用尽可能再现规定的最严酷故障电流条件的试验回路进行试验。

对于单波故障电流试验,主要的要求是,在单波故障电流后的第一个再加正向半波电压峰值处,再现正向电压与晶闸管结温叠加的最不利工况。

对于多波故障电流试验,主要的要求是,再现多波故障电流倒数第二个故障电流波后,反向恢复

期间反向电压与晶闸管结温相叠加的最不利工况。

单波故障电流试验的第二个要求是，验证晶闸管有充分的关断时间，能够耐受故障电流结束后在电压正向过零点重加的正向电压。从故障电流的过零点到电压正向过零点之间的时间间隔，取决于试验电路的阻尼系数和试验的电源频率。试验参数应与实际运行参数一致或通过调整获取一个具有代表性的关断间隔。若不能这样进行，供方就要用其他方法验证，晶闸管在单波故障电流过后的关断时间足够短。

在多波故障电流试验期间，为了再现正确的暂态反向电压，正确地设置阀相关的总杂散电容和回路中换相电抗是非常重要的。正确地表示六脉动桥中其他阀的有效并联阻抗，考虑假设短路的位置和过电流时采用的控制策略也是非常重要的。在故障电流最后一个波后，阀或阀段不需要承受任何恢复电压。

当进行阀段试验时，试验电压和试验回路的部件参数应与 9.1.3 中所描述的试品串联的晶闸管级数成比例。

注1：在9.3.3.2和9.3.3.3中规定的故障电流试验，是基于一个整流阀端间短路产生的最大故障电流的最严酷条件。

若晶闸管的电压与结温的最严酷组合与整流阀端间短路造成的最大故障电流不一致，就要相应调整试验条件。

注2：如单阀最大故障电流条件与各子阀最大故障电流条件不一致，可协商采用各子阀最严苛试验条件或分别对各子阀进行短路电流试验。

10.3.3.2 主支路再加正向电压的单波故障电流试验

试验进行前，应使阀或阀段运行至最大连续运行晶闸管结温。

给阀或阀段施加规定峰值和导通时间的单波故障电流，接着重加正向电压。重加的正向电压第一个半波的峰值 U_{tfvd} 可由式(30)计算：

$$U_{\text{tfvd}} = U_{\text{v0max}} \times \sqrt{2} \times k_n \times k_r \times k_{17} \dots\dots\dots (30)$$

式中：

U_{v0max} ——变压器阀侧的最高稳态空载线电压；

k_n ——按照 4.3.2 中的试验比例系数；

k_r ——暂态过电压系数，由系统研究决定的值；

k_{17} ——试验安全系数， $k_{17}=1.05$ 。

故障电流的峰值和持续时间应由系统研究决定，需要考虑：

——交流系统最大短路水平。

——与上述一致的交流系统最小稳态频率。

——涉及换流变压器阀侧电抗的最低允许误差。

——以下组合的最严酷工况：

- 1) 故障起始时刻对应于阀侧最大稳态运行电压的最小触发角；
- 2) 故障起始时刻对应于最小触发角的阀侧最小运行电压。

——交流系统和涉及换流变压器阀侧的最小阻尼系数。

——整流阀端间短路。

这样计算出来的故障电流峰值不需要减去直流电流的一半($I_d/2$), 除非供方可证明此减少对于提出的控制策略是正确的。

k_r 的值应同计算故障电流所用的交流系统条件一致。直流甩负荷应是换流站额定直流功率因故障而损失的部分。

若试验电路的参数不能获得规定的故障电流幅值和导通持续时间, 那么可采用一个严格等效的电流波形。需要证明, 等效峰值电压作用产生的晶闸管结温, 至少要和正确的电流波形产生的值一样大。

10.3.3.3 主支路无再加正向电压的多波故障电流试验

试验进行前, 应使阀或阀段运行至最大持续运行晶闸管结温。

给阀或阀段施加规定峰值、导通时间和故障波次数的故障电流。在各个故障电流波次之间应给阀或阀段施加反向电压, 但应通过持续触发晶闸管防止阀承受正向闭锁电压。

在倒数第二个故障电流波电流过零时的反向恢复电压预期值 u_{tfvr} 应由式 (31) 确定:

$$u_{\text{tfvr}} = U_{\text{v0max}} \times \sqrt{2} \times \sin \psi \times k_n \times k_{18} \times k_r \dots\dots\dots (31)$$

式中:

U_{v0max} ——变压器阀侧最大稳态空载线电压;

ψ ——用电角度表示的一个工作周期波形的一部分, 它正是倒数第二个故障电流波次的电流过零点超前电压正向过零点的那一部分;

k_n ——按照 4.3.2 中的试验比例系数;

k_r ——暂态过电压系数, 由系统研究确定的值;

k_{18} ——试验安全系数, $k_{18}=1.05$ 。

故障电流波的数量由用于切断换流器短路电流的主要断路器操作时间决定。操作时间应包括故障检测和信号延迟时间, 以及断路器灭弧时间。

故障电流波的峰值和持续时间的确定应同 9.3.3.2 中定义的方式一样, 除此之外, 在第一个波后的所有故障波的初始触发角设为 0° 。

k_r 的值按 9.3.3.3 说明确定。

10.3.3.4 逆变侧再加正向电压的主支路单波故障电流试验

试验进行前, 应使阀或阀段运行至最大连续运行晶闸管结温, 闭锁辅助支路与旁路支路。

给阀或阀段施加规定峰值和导通时间的单波故障电流, 接着重加正向电压。重加的正向电压第一个半波的峰值 u_{tfvd} 可由式 (30) 计算

故障电流的峰值和持续时间应由系统研究决定, 需要考虑:

- 交流系统最大短路水平;
- 与上述一致的交流系统最小稳态频率;
- 涉及换流变压器阀侧电抗的最低允许误差;
- 以下组合的最严酷工况:
 - 故障起始时刻对应于阀侧最大稳态运行电压的最小触发角;
 - 故障起始时刻对应于最小触发角的阀侧最小运行电压。

——交流系统和涉及换流变压器阀侧的最小阻尼系数；

——逆变阀端间短路。

这样计算出来的故障电流峰值不需要减去直流电流的一半 ($I_d/2$)，除非供方可证明此减少对于提出的控制策略是正确的。

k_f 的值应同计算故障电流所用的交流系统条件一致。直流甩负荷应是换流站额定直流功率因故障而损失的部分。

若试验电路的参数不能获得规定的故障电流幅值和导通持续时间，那么可采用一个严格等效的电流波形。需要证明，等效峰值电压作用产生的晶闸管结温，至少要和正确的电流波形产生的值一样大。

10.3.3.5 逆变侧辅助支路单波故障电流试验

试验进行前，应使阀或阀段运行至最大连续运行晶闸管结温，闭锁主支路与旁路支路。

故障电流的峰值和持续时间应由系统研究决定，需要考虑：

交流系统最大短路水平；

——与上述一致的交流系统最小稳态频率；

——涉及换流变压器阀侧电抗的最低允许误差；

——以下组合的最严酷工况：

- 故障起始时刻对应于阀侧最大稳态运行电压的最小触发角；
- 故障起始时刻对应于最小触发角的阀侧最小运行电压。

——交流系统和涉及换流变压器阀侧的最小阻尼系数；

——逆变阀端间短路。

这样计算出来的故障电流峰值不需要减去直流电流的一半 ($I_d/2$)，除非供方可证明此减少对于提出的控制策略是正确的。

若试验电路的参数不能获得规定的故障电流幅值和导通持续时间，那么可采用一个严格等效的电流波形。需要证明，等效峰值电压作用产生的晶闸管结温，至少要和正确的电流波形产生的值一样大。

10.4 电磁兼容试验

10.4.1 试验目的

主要目的是验证：阀抵抗从阀内部产生的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。阀中敏感的部件主要是用于晶闸管/IGBT 级触发/关断、保护和监测的电子电路。

通常，阀的抗电磁干扰能力可通过在其他型式试验时监测阀来检查。当然，阀冲击试验和阀非周期触发试验(8.4)是最重要的，这是因为，在换流站正常运行时，这些试验所等效的工况可能会出现，这些工况不会导致换流站跳闸。

这些试验宜用于验证：

- a) 不会发生晶闸管误触发或导通顺序混乱；
- b) 不会发生 IGBT 误触发/关断或导通/关断顺序混乱；
- c) 阀上安装的电子保护电路按照预定动作；

- d) 不会发生晶闸管/IGBT 级故障的错误指示, 阀基电子设备也不会因为从阀监测电路接收到错误信息而将错误的信号送到换流器控制和保护系统。

对于本部分, 验证阀抗电磁干扰能力试验, 仅适用于晶闸管/IGBT 阀和连接阀与地的信号传输系统部分。

本部分的范围不包括验证位于地电位设备的抗电磁干扰能力和作为其他设备电磁干扰源的阀特性。

10.4.2 试验对象

通常, 试品是其他试验所用过的阀或阀段。

当验证抗多重阀中邻近阀间耦合引起的电磁干扰时, 可按 9.4.3 定义两种方法。在这种情况下, 按照所采用的方法, 试品应为独立的阀或阀段。

10.4.3 试验要求

10.4.3.1 概述

当验证抗多重阀中邻近阀间耦合引起的电磁干扰时, 此试验要求取决于采用以下两种方法的任何一种。

本项试验与 8.4 节非周期触发试验联合完成。

10.4.3.2 方法 1

方法 1 是作为试验方案的一部分, 直接模拟电磁干扰源。这样的试验方案要求有两个及以上的阀以检查它们之间的相互影响。电磁干扰源的几何布置要考虑试验的阀, 应尽可能接近实际运行布置(否则在电磁干扰上更加严重)。

8.4.2 中给出了采用方法 1 的更详细要求。

10.4.3.3 方法 2

方法 2 是从理论考虑或由实际测量来确定在最严重运行条件下的电磁场强度。接下来, 这些电磁场由可产生正确的(或更严重的)各种频率的电磁辐射试验电路来模拟。然后将阀段置于试验干扰源产生的电磁场内。

方法 2 的基本前提是确定阀关键位置上的场强与方向。一般这可在单个阀触发试验期间, 用探测线圈测量获得; 或者, 这个场可通过三维场模拟程序预测; 然后, 用一个独立的励磁线圈产生至少与预估值同样严重的场强、频谱和方向, 对阀段进行试验。

被试的阀段应满足下列条件:

- 在阀段端子间应有运行电压(按比例), 并且给励磁线圈充电时是正向偏置;
- 试验时, 阀段的电子电路应带电;
- 也应包括阀基电子单元中与阀段正确地交换信息的部分。

10.4.3.4 验收标准

方法 1 和方法 2 的验收标准已在 9.4.1 中定义。

11 附加试验

11.1 可控关断试验

11.1.1 试验目的

本项试验主要考核可控换相换流阀各子阀间控制时序逻辑,以及换流阀在关断故障电流时,各子阀元器件的电压、电流耐受能力。

11.1.2 试验对象

见 9.1.2。

11.1.3 试验要求

试验进行前,应使阀或阀段运行于 9.1.3.4.3 规定的稳态最小 γ 的条件下。

故障电流的峰值和持续时间根据逆变侧交流系统故障工况决定。

给试品阀或阀段施加规定峰值和持续时间的故障电流,要求在试验过程中,可控换相换流阀能够按照控制指令切换工作状态,能够强迫关断故障电流,换流阀具备可控换相的功能,且连续关断故障电流后换流阀仍能持续运行。

11.2 CLCC-LCC 相互切换试验

11.2.1 试验目的

本项试验主要考核可控换相换流阀从 LCC 模式切换至 CLCC 模式的过程中,各子阀的电气应力及控制时序。

11.2.2 试验对象

见 9.1.2。

11.2.3 试验要求

本项试验与 9.1.3.2 节最大持续运行负载试验联合进行,

本项试验将试品阀或阀段从 LCC/CLCC 模式切换至 CLCC/LCC 模式,运行 10min。

要求试品阀或阀段能够按照控制指令切换工作模式,换流阀能够持续运行。

11.3 单阀电流关断试验

11.3.1 试验目的

本项试验主要对可控换相换流阀在稳态运行下的电流转移功能、开断故障电流能力以及换流阀整体关断控制保护策略设计的合理性进行考核。

11.3.2 试验对象

见 9.1.2。

11.3.3 试验要求

试品阀以 CLCC 模式运行。

试验电流的峰值需根据换流阀运行能力及交流系统故障工况决定。

试验进行前,可通过外部电源为试品阀或阀段提供取能电压。

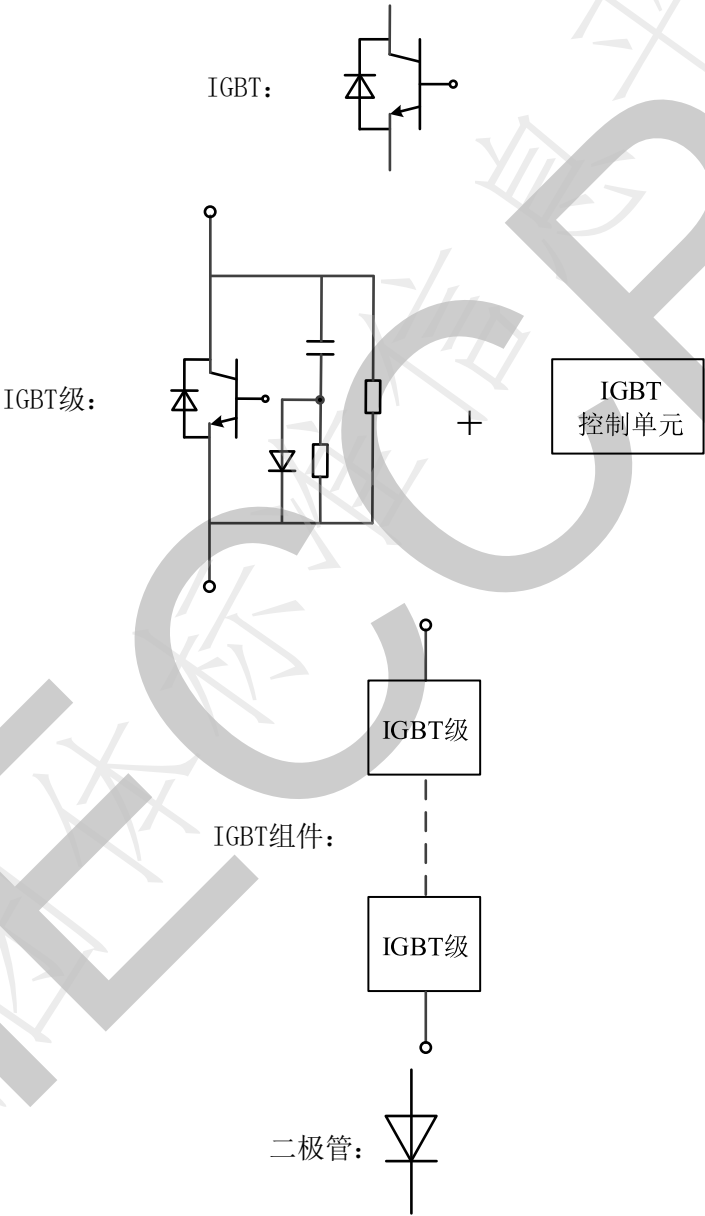
试验应采用合适的试验电路进行,给出等效于相应开断条件的应力,试验中应等效复现的电气应力有电流幅值、最高 di/dt 、电压幅值和最高 du/dt 。为了正确再现热效应,试验应在试品阀运行达到热稳定后进行,如不能做到这一点,应调整试验条件近似补偿有关损耗的差值。

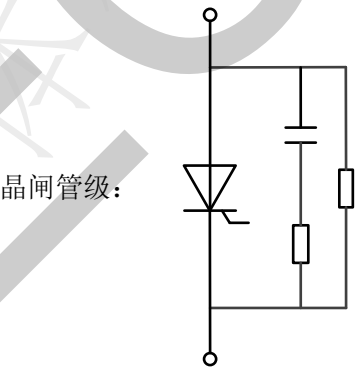
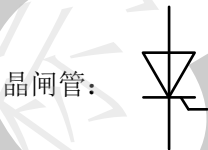
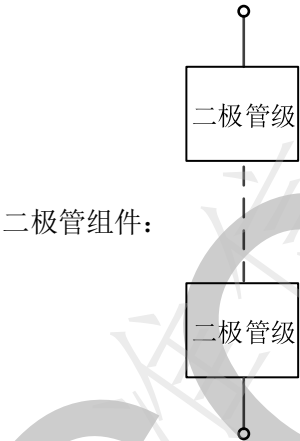
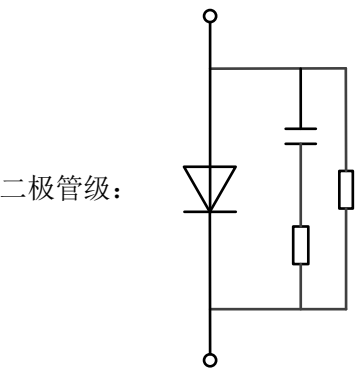
试品阀应能够可靠完成设计要求电流的连续开断。

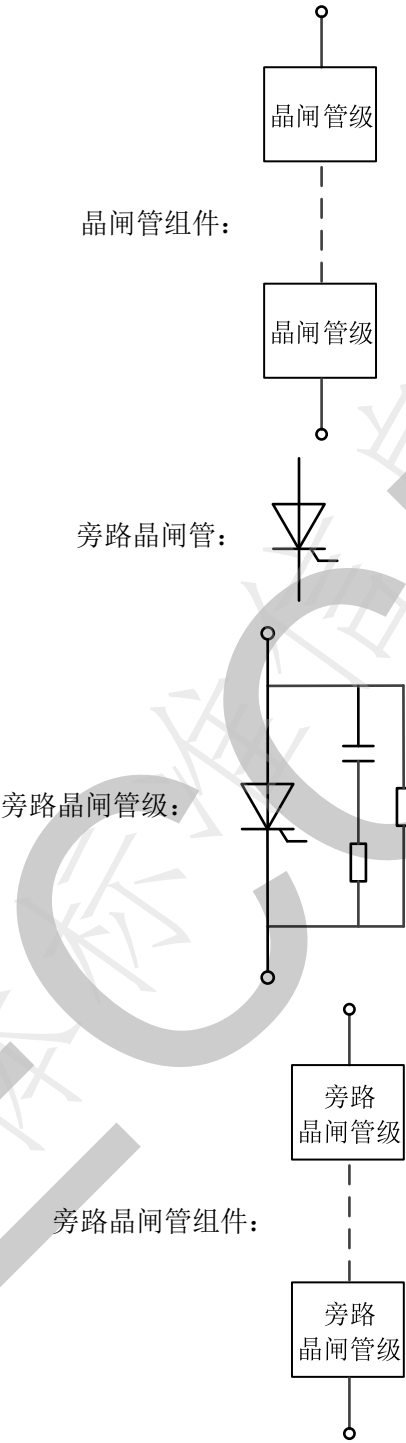
试验要求阀塔具备关断大电流以及关断电流过程引起的关断电压耐受能力。

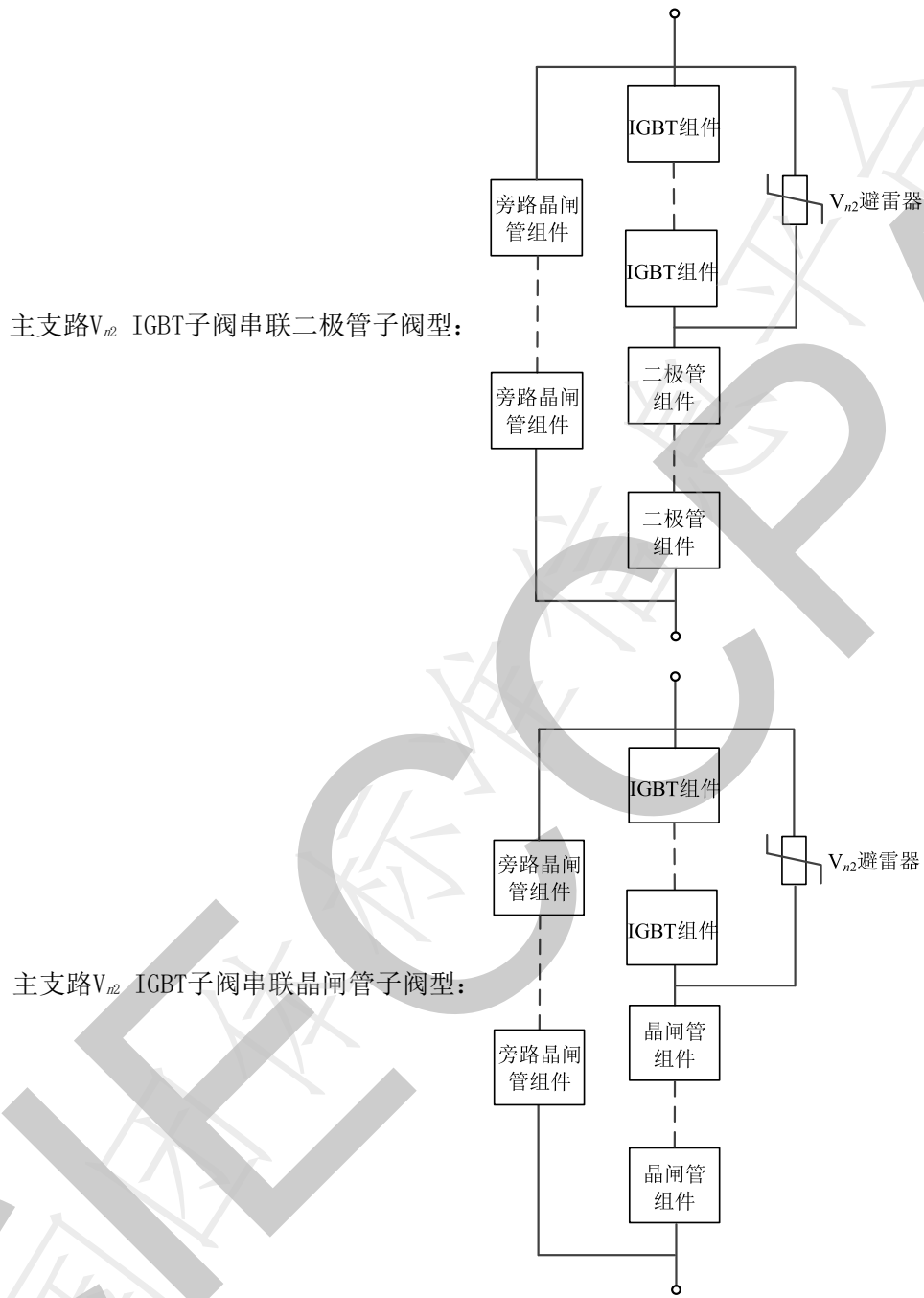
附录 A
(资料性)
CLCC 电路拓扑

CLCC 阀 V_{m1} 和 V_{m4} 子阀组成可参考 GB/T 36559—2018。
 V_{m2} 子阀组成典型例子见图 A. 1

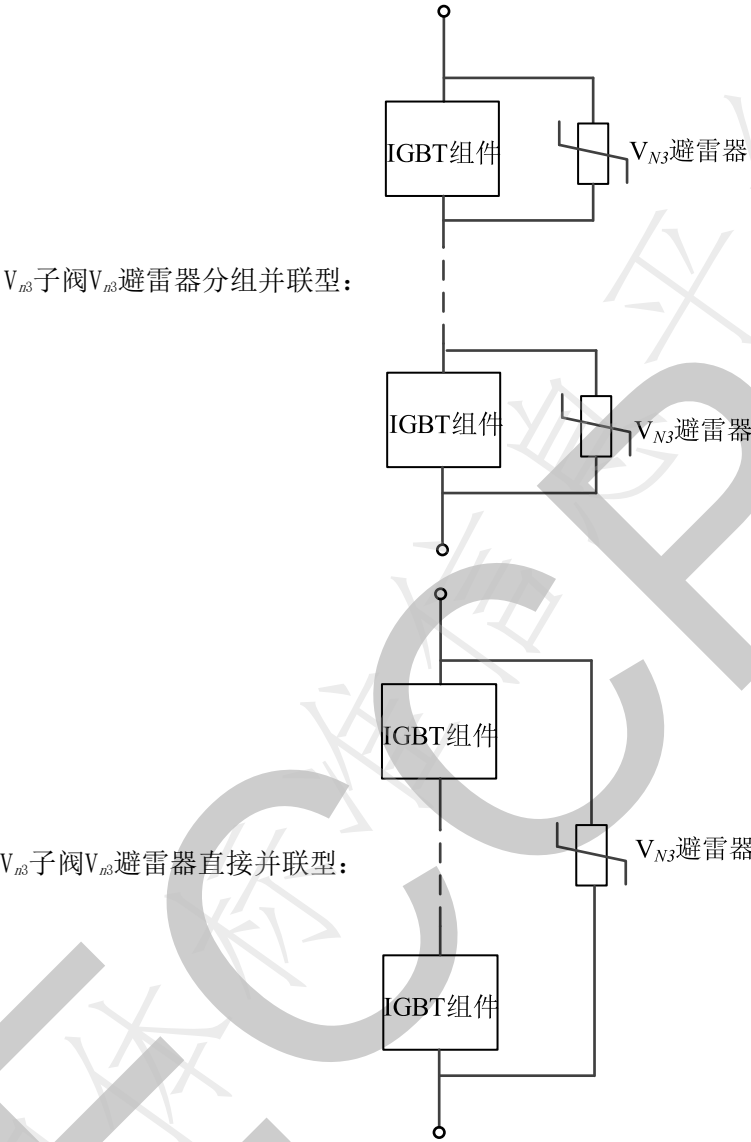






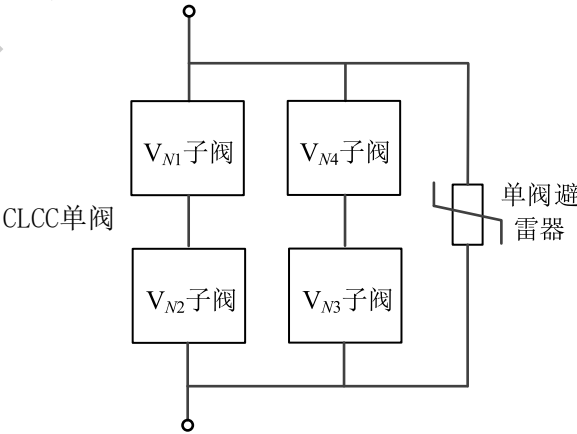


V_{n3} 子阀组成典型例子见图A.2



图A. 2 V_{N3} 子阀组成典型例子示意图

CLCC单阀组成典型例子见图A. 3



图A. 3 CLCC 单阀组成典型例子

参 考 文 献

- [1] GB/T 311.1 绝缘配合 第1部分：定义、原则和规则
- [2] GB/T 7354 高电压试验技术 局部放电测量
- [3] GB/T 11032 交流无间隙金属氧化物避雷器
- [4] IEC60700-1 Thyristor valves for high voltage direct current (HVDC) power transmission—Part 1:

Electrical testing
