



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX/IEC 62823: 2019

晶闸管控制串联电容器用晶闸管阀 电气 试验

Thyristor valves for thyristor controlled series capacitors (TCSC)
—Electrical testing

(IEC 62823:2019, IDT)

(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

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会

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..... | 1 |
| 4 TCSC 阀和阀的一般运行情况 | 4 |
| 4.1 TCSC 和 TCSC 阀..... | 4 |
| 4.2 TCSC 阀在容性提升运行模式下的电流和电压..... | 5 |
| 4.3 TCSC 典型运行模式..... | 7 |
| 5 一般要求..... | 8 |
| 5.1 型式试验执行导则 | 8 |
| 5.2 绝缘试验条件 | 9 |
| 5.3 运行试验条件 | 9 |
| 5.4 型式试验成功的判据 | 10 |
| 6 试验概况..... | 11 |
| 7 阀端子与阀室间的绝缘试验..... | 12 |
| 7.1 试验目的 | 12 |
| 7.2 试品 | 12 |
| 7.3 试验要求 | 12 |
| 8 阀端子间绝缘试验..... | 13 |
| 8.1 试验目的 | 13 |
| 8.2 试品 | 14 |
| 8.3 试验要求 | 14 |
| 9 周期性触发和关断试验..... | 15 |
| 9.1 试验目的 | 15 |
| 9.2 试品 | 15 |
| 9.3 试验要求 | 15 |
| 10 故障电流试验..... | 19 |
| 10.1 试验目的 | 19 |
| 10.2 试品 | 19 |
| 10.3 试验要求 | 19 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 11 阀抗电磁骚扰试验 | 20 |
| 11.1 试验目的 | 20 |
| 11.2 试验对象 | 20 |
| 11.3 试验要求 | 20 |
| 12 特殊性能试验 | 20 |
| 12.1 试验目的 | 20 |
| 12.2 试验对象 | 20 |
| 12.3 试验要求 | 20 |
| 13 例行试验 | 21 |
| 13.1 通则 | 21 |
| 13.2 外观检查 | 21 |
| 13.3 接线检查 | 21 |
| 13.4 均压电路检查 | 21 |
| 13.5 耐压检查 | 21 |
| 13.6 局部放电试验 | 21 |
| 13.7 辅助设备检查 | 21 |
| 13.8 触发检查 | 21 |
| 13.9 冷却系统压力测试 | 21 |
| 14 型式试验结果描述 | 21 |
| 附 录 A （资料性）TCSC 阀运行与额定参数 | 23 |
| 附 录 B （资料性）阀部件故障耐受 | 27 |

前 言

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

本文件等同采用 IEC 62823:2019《晶闸管控制串联电容器用晶闸管阀电气试验》。

本文件做了下列最小限度的编辑性改动：

——为便于使用，增加了公式编号；

——引用文件 IEC 60071-2 注明日期并用相应国标替换，因为该标准最新版中已删除本文件引用内容。

——考虑到我国电网频率为 50 Hz，故删除了电源频率为 60 Hz 的情况（见 5.1.4、5.3.1 和 7.3.1.1）；

——“保持试验电压 U_{tv1} 1 min”勘误为“保持试验电压 U_{tv1} 15 s”（见 8.3.1.2）。

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。

本文件由全国电力电子系统和设备标准化技术委员会（SAC/TC60）归口。

本文件起草单位：西安高压电器研究院有限责任公司、……

本文件主要起草人：胡治龙……

晶闸管控制串联电容器用晶闸管阀 电气试验

1 范围

本文件规定了交流输电晶闸管控制串联电容器装置(TCSC)用晶闸管阀的例行试验和型式试验。

本文件规定的试验是针对工作于容性提升运行模式或旁路模式的空气绝缘阀。对于其他绝缘形式阀和工作在感性提升运行模式的阀,试验要求和验收判据由买方和卖方协商确定。

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 311.2—2002 绝缘配合第2部分:高压输变电设备的绝缘配合使用导则(GB/T 311.2—2002, IEC 60071-2: 1996, EQV)

注1: GB/T 311.2—2002被引用内容与IEC 60071-2: 1996被引用内容没有技术上的差异。

GB/T 7354 高压试验技术局部放电测量(GB/T 7354—2018, IEC 60270: 2000, MOD)

注2: GB/T 7354—2018被引用内容与IEC 60270: 2000被引用内容没有技术上的差异。

GB/T 27025 检测和校准实验能力的通用要求(GB/T 27025—2019, ISO/IEC 17025: 2017, IDT)

注3: GB/T 27025—2019被引用内容与ISO/IEC 17025: 2017被引用内容没有技术上的差异。

IEC 60060-1:2010 高电压试验技术第1部分:一般定义及试验要求(High-voltage test techniques Part 1: General definitions and test requirements)

注4: GB/T 16927.1—2011 高电压试验技术第1部分:一般定义及试验要求(IEC 60060-1: 2010, MOD)

IEC 60071-1 绝缘配合第1部分:定义、原则和规则(Insulation co-ordination—Part 1:Definitions, principles and rules)

注5: GB/T 311.1—2012 绝缘配合第1部分:定义、原则和规则(IEC 60071-1: 2006, MOD)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

晶闸管阀 thyristor valve

晶闸管级的电气和机械组合,包括所有连接、辅助部件和机械结构,可与晶闸管控制串联电容器装置(TCSC)相电抗器串联。

3.2

阀段 valve section

由若干晶闸管级和其他部件构成的电气组合,按比例呈现完整阀的电气性能。

注:本术语主要用于定义阀试验时的试验对象。

3.3

晶闸管级 thyristor level

晶闸管阀的组成部分，由一对反向并联的晶闸管及其邻近的辅助电路构成，也包括电抗器（如有）。

3.4

冗余晶闸管级 redundant thyristor levels

通过型式试验验证，阀中可发生内部或外部短路，且不会影响阀安全运行的晶闸管级最大数量。如果短路晶闸管级超过该数量，需要停运阀以更换故障元件，否则将承受更大的故障风险。

3.5

阀避雷器 valve arrester

并联于阀两端的避雷器。

3.6

阀电子电路 valve electronics; VE

在阀电位上执行控制功能的电子电路。

3.7

阀接口电子单元 valve interface electronics unit

处于地电位，提供控制设备与阀电子电路或阀装置之间接口的电子设备。

注1：如果使用，阀接口电子单元通常位于靠近阀的地电位处。

注2：术语“阀基电子单元”（VBE）也用来定义这种装置。

3.8

晶闸管控制串联电容器 thyristor-controlled series capacitor bank; TCSC bank

由晶闸管阀、电抗器、电容器和机械结构、支撑绝缘子、开关等相关辅助部件以及整体运行所需的控制设备、保护设备组成的完整单元。

3.9

晶闸管控制串联电容器装置电抗器 thyristor-controlled series capacitor reactor; TCSC reactor

与晶闸管阀串接的一个或多个电抗器。

见图 1 中的第 4 项。

3.10

阀室 valve enclosure

平台固定的壳体，其内部可安装带阀冷却管路和电子回路的晶闸管阀。

3.11

暂态过负荷 temporary overload

晶闸管控制串联电容器装置（TCSC）在额定频率和规定的环境温度范围内的短时过负荷能力。

见图 5。

注：暂态过负荷典型持续时间为几秒钟，一般小于 10 s。

3.12

阀保护性触发 valve protective firing

防止晶闸管承受过电压，在预定的电压下触发晶闸管的保护方法。

3.13

线路电流 line current

i_L

流过线路的工频电流。

见图 2。

3.14

额定电流 rated current I_N

晶闸管控制串联电容器装置 (TCSC) 在额定电抗 (X_N) 和额定电压 (U_N) 下具备连续运行能力的线路电流 (I_L) 方均根值。

3.15

阀电流 valve current i_V

流过晶闸管阀的电流。

见图 2。

3.16

旁路电流 bypass current

当串联电容器被旁路时, 流过与其并联的晶闸管阀的电流。

3.17

电容器电压 capacitor voltage U_C

晶闸管控制串联电容器装置 (TCSC) 两端的电压。

见图 2。

3.18

标称电抗 nominal reactance X_N

在标称提升因数下晶闸管控制串联电容器装置 (TCSC) 每一相的标称工频电抗。

3.19

晶闸管控制串联电容器装置额定电压 rated thyristor-controlled series capacitor voltage;
rated TCSC voltage

 U_N

晶闸管控制串联电容器装置 (TCSC) 每相工频电压。在额定电抗 (X_N)、额定电流 (I_N)、工频和环境温度范围内, 该电压可连续控制。

3.20

视在电抗 apparent reactance $X(\alpha)$

与晶闸管控制角 (α) 具有函数关系的晶闸管控制串联电容器装置 (TCSC) 的视在工频电抗。

见图 3、图 A.1 和公式 A.1。

3.21

额定电容 rated capacitance C_N

晶闸管控制串联电容器装置 (TCSC) 中电容设计值。

3.22

固有电抗 physical reactance X_C

晶闸管控制串联电容器装置 (TCSC) 在晶闸管闭锁状态和电容器内部介电温度为 20 °C 时的每相工频电抗。

$$X_C = 1 / (\omega_N \cdot C_N) \dots \dots \dots (1)$$

3. 23

提升因数 boost factor

k_B

视在电抗与固有电抗的比值。

$$k_B = X_{(\alpha)}/X_C \dots\dots\dots (2)$$

3. 24

导通区间 conduction interval

σ

半个工频周期内，晶闸管阀处于导通状态的部分。

$$\sigma = 2\beta \dots\dots\dots (3)$$

见图 3。

3. 25

控制角 control angle

α

测量从电容电压 (U_c) 过零点到晶闸管阀导通电流起始点的时间，将其换算得到的电角度。

见图 3。

3. 26

区内故障 internal fault

在包含晶闸管控制串联电容器装置 (TCSC) 串联子模块的受保护线路区间内发生的线路故障。

3. 27

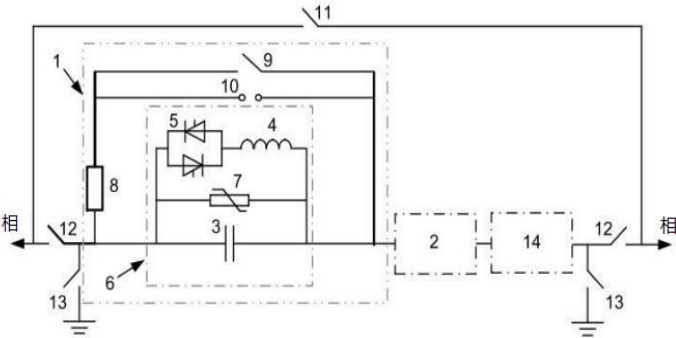
区外故障 external fault

在包含晶闸管控制串联电容器装置 (TCSC) 串联子模块的受保护线路区间外发生的线路故障。

4 晶闸管控制串联电容器装置 (TCSC) 阀和阀的运行

4. 1 TCSC 和 TCSC 阀

固定串联电容器 (FSC) 和基于可控子模块的晶闸管控制串联电容器装置 (TCSC) 的组合能够补偿输电线路的串联电抗，如图 1 所示。一个 TCSC 子模块由晶闸管控制电抗器 (TCR) 与额定电容 C_s 的电容器组并联而成，如图 2 所示。用于 TCSC 子模块中的晶闸管阀即是一个 TCSC 阀 (见图 1 中第 5 项)。



说明：

- | | |
|--------------------------|------------|
| 1 TCSC 单元 | 4 TCSC 电抗器 |
| 2 如有要求，附加的 TCSC 单元（如果适用） | 5 TCSC 阀 |
| 3 TCSC 电容器 | 6 TCSC 子模块 |

- 7 避雷器

8 放电限流器

9 旁路开关

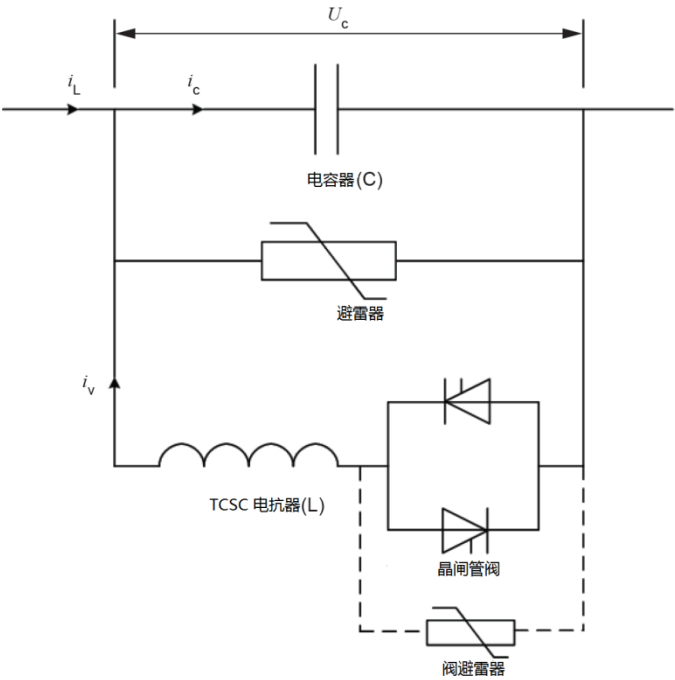
10 旁路间隙
- 11 外部旁路隔离开关

12 外部隔离开关

13 外部接地开关

14 如有要求，附加的 FSC 单元

图1 TCSC 的典型连接和名称



注：阀避雷器是可选的。

图2 TCSC 子模块

4.2 TCSC 阀在容性提升运行模式下的电流和电压

4.2.1 概述

虽然理论上 TCSC 阀能以感性提升运行模式运行，但是由于系统补偿需求和其他限制，TCSC 在实际应用中并未采用这种运行方式。TCSC 阀通常采用容性提升运行模式。

4.2.2 容性提升运行模式时的阀电流和电压波形

在正弦线路电流和电容器电压（见图 3a）下，TCSC 阀容性运行模式导致流过其自身和电容器组 C 的正弦电流发生畸变（见图 3b））。该电流提升 TCSC 子模块两端的工频电压。

TCSC 中晶闸管阀的电压波形如图 4 所示。

图4 TCSC 中晶闸管阀电压

4.2.3 TCSC 阀电流和电压应力计算公式

4.2.3.1 容性提升运行模式

在 TCSC 容性提升运行模式下, TCSC 阀电流计算公式如下:

当 $n \cdot \pi - \beta \leq (\omega_N \cdot t) \leq n \cdot \pi + \beta$ ($n=0, 1, 2, 3, \dots$) 时, 按公式 (4) 计算:

$$i_V = (-1)^n \cdot \frac{\lambda^2 \cdot i_{L_peak}}{\lambda^2 - 1} \cdot \left(\cos(\omega_N \cdot t) - \frac{\cos \beta}{\cos(\lambda \cdot \beta)} \cdot \cos(\lambda \cdot \omega_N \cdot t) \right) \dots \dots \dots (4)$$

$$i_V = 0, \quad n \cdot \pi + \beta < (\omega_N \cdot t) < (n+1) \cdot \pi - \beta \quad (n=0, 1, 2, 3) \dots \dots \dots (5)$$

式中:

λ ——TCSC 子模块 LC 支路固有频率与交流系统工频之比, $\lambda = \frac{1}{\omega_N \cdot \sqrt{L \cdot C}}$;

i_{L_peak} ——交流系统的线路电流;

ω_N ——交流系统标称角频率;

β ——TCSC 阀在 i_{L_peak} 下进行容性提升时, 单向最大导通角的一半;

晶闸管开通和关断时的电流变化率 di_V/dt 按公式 (6) 计算:

$$di_V/dt|_{\omega_N \cdot t = \frac{\pi}{2} + \beta} = \frac{\lambda^2 \cdot i_{L_peak}}{\lambda^2 - 1} \cdot \left[\omega_N \cdot \sin \beta - \omega_N \cdot \frac{\cos \beta}{\cos(\lambda \cdot \beta)} \cdot \sin(\lambda \cdot \beta) \right] \dots \dots \dots (6)$$

流过 TCSC 阀的电流峰值按公式 (7) 计算:

$$i_{V_peak} = \frac{\lambda^2 \cdot i_{L_peak}}{\lambda^2 - 1} \cdot \left[1 - \frac{\cos \beta}{\cos(\lambda \cdot \beta)} \right] \dots \dots \dots (7)$$

晶闸管开通和关断时刻的电容电压 U_{C_N} 按公式 (8) 计算:

$$U_{C_N} = \frac{\lambda \cdot i_{L_peak}}{\lambda^2 - 1} \cdot X_0 \cdot [\sin \beta - \lambda \cdot \cos \beta \cdot \tan(\lambda \cdot \beta)] \dots \dots \dots (8)$$

式中:

X_0 ——TCSC 子模块 LC 支路电抗: $X_0 = \sqrt{L/C}$ (L 为 TCSC 子模块 LC 支路的电感, C 为 TCSC 子模块 LC 支路的电容, 见图 2)。

TCSC 阀上的电容电压峰值按公式 (9) 计算:

$$U_P = \lambda \cdot i_{L_peak} \cdot X_0 \cdot \left[1 + \frac{\lambda \cdot (\cos \beta \cdot \tan(\lambda \cdot \beta) - \lambda \cdot \sin \beta)}{\lambda^2 - 1} \right] \dots \dots \dots (9)$$

TCSC 子模块的容性提升因数按公式 (10) 计算:

$$k_B = 1 + \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot \cos^2 \beta}{\lambda^2 - 1} \cdot [\lambda \cdot \tan(\lambda \cdot \beta) - \tan \beta] - \beta - \frac{\sin(2 \cdot \beta)}{\beta} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

4.2.3.2 旁路运行模式

在 TCSC 旁路运行模式下, TCSC 阀完全导通且阀导通的工频正弦旁路电流按公式 (11) 计算:

$$i_{bypass} = \frac{1}{1 - \omega_N^2 \cdot L \cdot C} \cdot i_L \dots \dots \dots (11)$$

旁路运行模式下的电容电压按公式 (12) 计算:

$$U_C = \frac{-i_L}{(\lambda^2 - 1) \cdot \omega_N \cdot C} \dots \dots \dots (12)$$

4.3 TCSC 典型运行模式

见图 5。

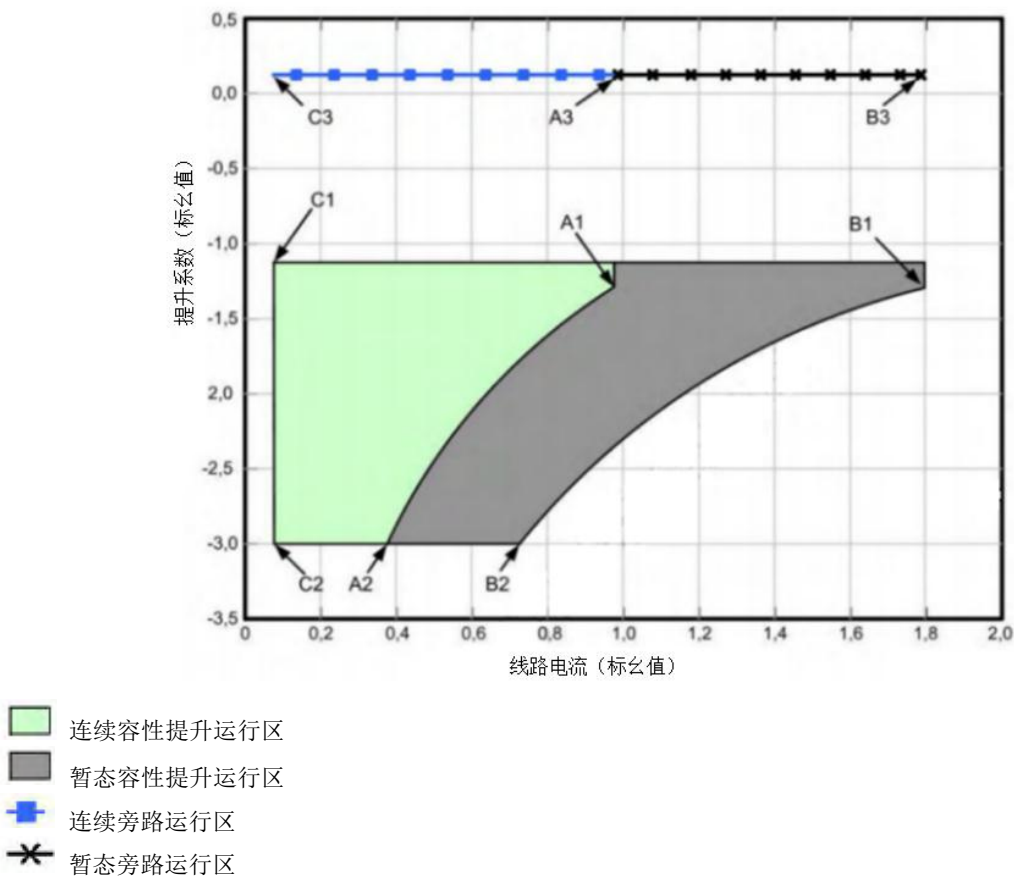


图5 TCSC 运行范围示例图

5 一般要求

5.1 型式试验执行导则

5.1.1 替代证明

5.1.1.1 概述

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阀类似，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。

5.1.1.2 试品

所述的试验适用于阀（或阀段），阀结构以及分布在阀结构之内或者连接在阀结构与平台之间的冷却系统、触发和监控电路。为了验证阀的正确功能，其他设备如阀控制保护系统和阀基电子单元在试验中是必须的，但它们自身并不作为试验对象。

某些型式试验可在完整阀或阀段上进行，如表 2 所示。阀段上进行的型式试验，试验的阀段总数不少于一个完整阀包含的阀段数量。

应采用相同的阀段进行所有型式试验，另有规定的除外。

5.1.2 试验顺序

在型式试验开始前, 阀、阀段和/或它们的部件都应通过了例行试验验证以确保产品正确制造。规定的型式试验可按任意顺序进行。

5.1.3 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。

5.1.4 试验频率

交流绝缘试验在 50 Hz 下进行。运行试验对频率的特别要求在 5.3.1 中给出。

5.1.5 试验报告

型式试验完成后, 卖方应按照第 14 章的规定提供型式试验报告。

5.2 绝缘试验条件

5.2.1 概述

绝缘试验应在完整组装的阀上进行。

阀应装配除阀避雷器外(如有)的全部辅助部件。除非另有规定, 阀电子单元都应带电。应特别说明的是, 除了流量和防冻介质含量可以减少外, 冷却和绝缘液应处于代表运行工况(比如电导率)的条件。若阀结构外的任何对象或设备对于正确再现试验应力是必要的, 它也应在试验中予以重现或模拟。应将不作为试验对象的阀结构的金属部分短接在一起并接地, 使之适合于所做的试验。

5.2.2 绝缘试验中冗余的处理

除非另有规定, 在完整阀上进行的全部绝缘试验中, 冗余晶闸管级应短接。

5.2.3 大气修正因数

相关条款有规定时, 应按照 IEC 60060-1:2010 的要求对试验电压进行大气修正。需要进行修正的参考条件如下:

——气压:

如果晶闸管阀受试部分的绝缘配合采用与 IEC 60071-1 一致的标准额定耐受电压, 仅需在海拔 a_s 超过 1000 m 时进行大气修正。因此, 如果设备安装地点的海拔小于 1000 m, 使用标准大气压 ($b_0=101.3$ kPa), 无需进行海拔修正。如果 a_s 大于 1000 m, 应按 IEC 60060-1:2010 中的标准程序进行海拔修正, 但参考大气压 b_0 替换为海拔 1000 m 处的大气压 (b_{1000m})。

如果晶闸管阀受试部分的绝缘配合未采用 IEC 60071-1 给出的标准额定耐受电压, 则按 IEC 60060-1:2010 的规定采用标准参考大气压 b_0 ($b_0=101.3$ kPa) 进行修正。

——温度:

设计的阀室最高空气温度 (°C);

——湿度:

设计的阀室最低绝对湿度 (g/m^3)。

采用的数值应由卖方确定。

5.3 运行试验条件

5.3.1 概述

在可能的情况下, 运行试验应对完整的晶闸管阀进行。其他情况下, 运行试验可在晶闸管阀段上

进行。选择主要取决于阀的设计和可获得的试验设施。当对阀段进行试验时，本标准规定的试验对由 5 个或更多晶闸管级串联组成的阀段有效。如果对由少于 5 级晶闸管级串联组成的阀段进行试验，应协商确定附加的试验安全系数。任何情况下，试验阀段包含的串联晶闸管级数都不能少于 3 级。

运行试验可在与运行频率不同的电源频率下进行，如采用 50 Hz 替代 60 Hz。一些运行应力如开关损耗和短路电流的 I^2t 在试验中会受到实际工频影响。在这种情况下，这些试验条件必须校核并做适当的改动以保证阀耐受应力至少等同于在实际运行频率下试验时的应力。

冷却剂状态应代表实际工况。特别是流量和温度应设定为适合于试验的最不利值。防冻介质含量应尽可能与实际运行时相当，不能实现时，应由买方与卖方协商采用一个修正系数。除非另有规定，运行试验中晶闸管结温不得低于实际工况中的温度。

5.3.2 运行试验中冗余的处理

对于运行试验，冗余的晶闸管级不应被短路。采用的试验电压应通过比例因子 k_n 调整：

$$k_n = \frac{N_{ut}}{N_t - N_r} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

N_{ut} ——试品中串联晶闸管级数量；

N_t ——阀中串联晶闸管级总数；

N_r ——阀中冗余的串联晶闸管级总数。

5.4 型式试验成功的判据

5.4.1 概述

工业经验表明，阀的设计即使再仔细，也不能避免运行中晶闸管级部件偶然的随机故障。尽管这些故障可能与应力相关，但在一定程度上被认为是随机的，因为故障原因或故障率与应力的关系无法预测或不易对其进行精确定量。型式试验对阀或阀段进行，短时内施加的多重应力相当于阀在其全寿命周期可能会经受的少数几次最严酷的应力。考虑到上述情况，设定如下型式试验成功判据，即型式试验中允许有少量的晶闸管级故障，只要这种故障极少且不表明任何有指向性的设计缺陷。

5.4.2 适用于阀级的判据

下列判据适用于阀级：

- a) 若第 6 章所列出的某项型式试验后，故障晶闸管级数目大于表 1 第 2 列规定值，则应认为该阀未通过型式试验。
- b) 若某项型式试验后，一个晶闸管级（或更多，若仍在表 1 第 2 列规定值之内）发生短路，应当修复故障级重复该项试验。
- c) 若在所有型式试验期间，短路的晶闸管级数量累计超过表 1 第 3 列规定值，则应认为该阀未通过型式试验。
- d) 当在阀段上进行型式试验时，由于被试阀段的数量不少于一个完整阀的段数（见 5.1.1.2），上述判据仍适用。
- e) 每项型式试验后，都应检查阀或阀段，以判断是否有晶闸管级发生短路。在进一步试验前，型式试验中或型式试验后发现的故障晶闸管或辅助部件可以更换。
- f) 完成试验程序后，阀或阀段应经历一系列的检查试验，至少应包括以下几项：
 - 检查晶闸管级正向和反向耐受电压；

- 检查门控电路（适用时）；
 - 检查监测电路；
 - 用施加高于及低于保护定值的暂态电压来检查晶闸管级保护电路（适用时）；
 - 检查均压电路。
- g) 检查试验期间发生的晶闸管级短路应计入上述确定的验收判据之内。除了短路的级之外，在型式试验程序和后续的检查试验中发现的出现故障但未导致晶闸管级短路的晶闸管级总数，应不超过表 1 第 4 列规定值。若这样的晶闸管级总数超过了表 1 第 4 列规定数量，应对故障性质及其成原因进行复查，并在买方与卖方达成一致的情况下采取额外措施（如果有）。
- h) 当采用百分比判据来确定短路的晶闸管级最大允许数目和未导致短路的故障晶闸管级最大允许数目时，实际应用中通常是向更高位取整数，如表 1 所列。

表1 型式试验中允许故障的阀级数量

| 完整阀中全部晶闸管级数与冗余级数之差 | 任何单项型式试验中允许出现的短路晶闸管级数 | 全部型式试验中允许出现的短路晶闸管级总数 | 全部型式试验中，其他未导致短路的故障晶闸管级数 |
|--------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| 33 及以下 | 1 | 2 | 2 |
| 34 至 67 | 2 | 3 | 3 |
| 67 以上 | 2 | 4 | 4 |

全部型式试验结束时，短路的晶闸管级和其他的晶闸管级故障应基本随机分布，不表明任何有指向性的设计缺陷。

5.4.3 整体阀的适用判据

阀的多个晶闸管级相关的公共电气设备不允许击穿或外部闪络，构成阀结构的绝缘材料部分、冷却水管、光导或脉冲传输及分配系统的其他绝缘部分不应有破坏性放电。

部件、导体表面、相关的载流结点和联接件的温度，以及相邻安装面的温度在任何时候均应保持在设计允许的限值范围内。

6 试验概述

表 2 列出了本文件给出的试验。

表2 试验列表

| 试验类型 | 条 | 试验对象 |
|-------------------|-------|------|
| 阀端子对阀室的绝缘试验（型式试验） | | |
| 交流电压试验 | 7.3.1 | 阀 |
| 雷电冲击试验 | 7.3.2 | 阀 |
| 阀端子间绝缘试验（型式试验） | | |
| 交流电压试验 | 8.3.1 | 阀 |
| 操作冲击试验 | 8.3.2 | 阀 |
| 运行试验（型式试验） | | |
| 最大连续容性提升试验 | 9.3.2 | 阀或阀段 |
| 最大暂态容性提升试验 | 9.3.3 | 阀或阀段 |

| 试验类型 | 条 | 试验对象 |
|--|---------|---------------------------|
| 最小容性提升试验 | 9.3.4 | 阀或阀段 |
| 最大暂态线路电流旁路模式运行试验 | 9.3.5.1 | 阀或阀段 |
| 最小暂态线路电流旁路模式运行试验 | 9.3.5.2 | 阀或阀段 |
| 不带后续闭锁的故障电流试验 | 10.3.1 | 阀或阀段 |
| 带后续闭锁的故障电流试验 | 10.3.2 | 阀或阀段 |
| 阀抗电磁骚扰试验（型式试验） | | |
| 操作冲击试验 | 11 | 阀或阀段 |
| 例行试验 | | |
| 外观检查 | 13.2 | 每一晶闸管级 ^a |
| 连接检查 | 13.3 | 每一晶闸管级 ^a |
| 均压回路检查 | 13.4 | 每一晶闸管级 ^a |
| 电压耐受检查 | 13.5 | 每一晶闸管级 ^a |
| 局部放电试验 | 13.6 | 每一晶闸管级 ^a |
| 辅助设备检查 | 13.7 | 每一晶闸管级 ^a 和阀或阀段 |
| 触发检查 | 13.8 | 每一晶闸管级 ^a |
| 冷却系统压力试验 | 13.9 | ^a 阀或阀段 |
| ^a 如果规定对每个晶闸管级单独进行试验，应将晶闸管级安装在完整阀或阀模块中进行试验，以使相邻晶闸管之间的连接得到充分测试。 | | |

7 阀端子对阀室的绝缘试验

7.1 试验目的

这些试验的主要目的是验证：

- 设计有足够的间隙以防止闪络；
- 阀结构，冷却水管和光导的绝缘、脉冲传输及分配系统的其他绝缘部分均不出现破坏性放电；
- 验证局部放电的起始和熄灭电压大于阀结构在稳态运行中出现的最高电压。

这些试验不适用于采用一个端子（指定为低压端子）与阀室等电位，且阀支架、冷却水管、光导连接至阀的低压电位方式设计的阀。在这种情况下，阀的高压端子与阀室之间的空气间隙应符合 GB/T 311.2—2002 的规定或在买方与卖方协商一致。

7.2 试品

试品为连接于阀高压端子的阀支架。用于试验的阀支架可以是一个代表阀的相邻部分的独立试品，应与全部辅助部件组装在一起。为了达到试验目的，冷却剂应处于代表最严酷运行工况的条件。

当试验对象为一个完整阀时，试验中应关注阀低压端子的正确终端连接。

7.3 试验要求

7.3.1 交流电压试验

7.3.1.1 试验参数和波形

交流电压试验应采用以下试验参数和波形：

a) 1 min 试验电压 U_{ts1}

试验采用 1 min 试验电压 U_{ts1} 和 10 min 试验电压 U_{ts2} 进行，试验电压波形为 50 Hz 的正弦波，试验电压频率取决于试验设备。试验电压 U_{ts1} 按公式 (14) 计算：

$$U_{ts1} = \frac{U_{s1}}{\sqrt{2}} \cdot k_1 \cdot k_t \dots\dots\dots (14)$$

式中：

U_{s1} ——施加于阀支架的最大暂态重复运行电压的峰值，包含关断过冲（通常由阀避雷器（如果有）和电容器避雷器的保护水平的较低值给出）；

U_{ts1} ——1 min 试验电压；

k_1 ——试验安全因数， $k_1=1.30$ ；

k_t ——大气修正因数，按照 5.2.3 选取。

b) 10 min 试验电压 U_{ts2}

$$U_{ts2} = \frac{U_{s2}}{\sqrt{2}} \cdot k_2 \dots\dots\dots (15)$$

式中：

U_{s2} ——施加在阀支架的最大连续运行电压的峰值，包含关断过冲（TCSC 用于潮流控制时，通常由图 5 中最大连续容性提升运行模式运行点 A2 导出；TCSC 用于阻尼功率振荡或抑制次同步谐振时，通常由串联电容器的最大连续电压峰值给出）；

k_2 ——试验安全因数（10 min 试验时， $k_2=1.20$ ）。

7.3.1.2 试验程序

试验应在阀高压端子和阀室之间施加规定时间的规定试验电压 U_{ts1} 和 U_{ts2} 。

- 在大约 10 s 内，将试验电压从 50 % U_{ts1} 升至 100 % U_{ts1} ；
- 保持试验电压 U_{ts1} 1 min；
- 试验电压降至 U_{ts2} ；
- 保持试验电压 U_{ts2} 10 min，记录局部放电水平后将试验电压降至零；
- 阀中对局放敏感的部件已经单独进行试验时，步骤 d) 最后 1 min 记录的周期性局部放电峰值不应超过 200 pC，否则不应超过 50 pC；
- 局部放电起始电压和熄灭电压的测量应按照 GB/T 7354 进行。

7.3.2 雷电冲击试验

试验应在阀主端子和阀室之间施加三次正极性和三次负极性的雷电冲击电压。

试验应采用符合 IEC 60060-1:2010 的雷电冲击电压波形。

试验电压应根据 TCSC 的绝缘配合情况进行选择。

注：上述试验电压可由以 TCSC 的额定电压 U 为基准，符合 IEC 60071-1 的标准雷电冲击耐受电压代替，但此方法并未考虑 TCSC 电容器避雷器或阀避雷器（如果有）的保护，并向支撑结构施加了高于实际工况中的电压，采用该方法应征得卖方的同意。

8 阀端子间绝缘试验

8.1 试验目的

阀端子间绝缘试验是验证与阀端子间过电压耐受能力相关的阀的设计。这些试验应证明：

- 阀应设计有足够的内绝缘以耐受规定的电压；
- 局部放电起始电压和熄灭电压高于阀最大稳态运行电压；
- 保护性过电压触发系统（如果有）按预期性能工作；
- 阀具有足够的 dv/dt 耐受能力以满足实际运行条件（在多数情况下，规定的试验足以验证阀的性能；但在某些例外情况下，可以要求采用附加试验对阀性能进行验证）。

8.2 试品

试品应是全部辅助部件一起组装的完整阀，阀避雷器（如果有）除外。冷却剂除了可减少流量外，应处于代表实际工况的条件。如果结构外的任何部件对于正确再现试验应力是必要的，则试验应包含或模拟该部件。

用于阀绝缘试验的试品，规定的试验电压通常不允许采用大气修正，以免在晶闸管或其他内部部件上产生过大应力。由于这个原因，阀端子间任何绝缘试验都不引入大气修正因数。卖方应证明大气条件对阀内部耐受电压的影响是完全允许的。

8.3 试验要求

8.3.1 交流电压试验

8.3.1.1 试验参数和波形

试验采用 15 s 试验电压 U_{tv1} 和 10 min 试验电压 U_{tv2} 进行，试验电压波形为 50 Hz 的正弦波，试验电压频率由试验设备决定。

$$U_{tv1} = \frac{U_{v1}}{\sqrt{2}} \cdot k_3 \dots \dots \dots (16)$$

式中：

U_{v1} ——包含关断过冲的阀最大暂态重复运行电压峰值（通常由阀避雷器（如果有）和电容器避雷器的保护水平的较低值导出）；

k_3 ——试验安全系数， $k_3=1.10$ 。

采用的试验会对一些阀部件产生与实际不符的热应力。

$$U_{tv2} = \frac{U_{v2}}{\sqrt{2}} \cdot k_3 \dots \dots \dots (17)$$

式中：

U_{v2} ——施加在阀支架的最大连续运行电压的峰值，包含关断过冲（TCSC 装置用于潮流控制时，通常由图 5 中最大连续容性提升模式运行点 A2 导出；TCSC 用于阻尼功率振荡或抑制次同步谐振时，通常由串联电容器的最大连续电压峰值给出）；

k_3 ——试验安全系数， $k_3=1.10$ 。

8.3.1.2 试验程序

试验程序应是在一端接地的阀两个端子间施加规定时间的规定电压。

- a) 在大约 10 s 时间内，将试验电压从 50 % U_{tv1} 升至 100 % U_{tv1} ；
- b) 保持试验电压 U_{tv1} 15 s；
- c) 试验电压降至 U_{tv2} ；
- d) 保持试验电压 U_{tv2} 10 min，记录局部放电水平并将试验电压降至零；

- e) 阀中对局放敏感的部件已经单独进行试验时, 步骤 d) 最后 1 min 记录的周期性局部放电峰值不应超过 200 pC, 否则不应超过 50 pC;
 - f) 局部放电起始电压和熄灭电压的测量应按照 GB/T 7354 进行。
- 阀保护性触发(如果有)在试验期间不应动作。

8.3.2 操作冲击试验

8.3.2.1 试验参数和波形

试验应采用与 IEC 60060-1:2010 中的 8.2.1 一致的标准 250/2500 操作冲击电压波形。

- a) 当阀有阀避雷器保护时, 阀操作冲击试验电压 U_{tsv} 应按公式 (18) 计算:

$$U_{tsv} = SIPL_v \cdot k_4 \dots \dots \dots (18)$$

式中:

$SIPL_v$ ——阀避雷器操作冲击保护水平;

k_4 ——试验安全系数, $k_4=1.10$ 。

- b) 当阀不含阀避雷器时, 阀操作冲击试验电压 U_{tsv} 应按公式 (19) 计算:

$$U_{tsv} = U_{valve} \cdot k_5 \dots \dots \dots (19)$$

式中:

U_{valve} ——由系统绝缘配合研究确定的阀端子间最大预期操作冲击电压;

k_5 ——试验安全系数, $k_5=1.15$ 。

若阀过压保护触发在试验期间动作, 应施加 5 次附加的约定幅值的操作冲击, 该幅值不应导致阀触发。阀电子单元在附加试验时应带电。

注: 如果阀冲击耐受水平等于或小于阀交流电压试验水平, 则认为阀交流试验可以覆盖冲击试验, 因此可省略冲击电压试验。

8.3.2.2 试验程序

每项试验应在一端接地的阀两个端子间施加 3 次每种极性的操作冲击电压。通过反转阀端子替代冲击发生器极性反转, 试验可以在冲击发生器单一极性下进行。

9 周期性触发和关断试验

9.1 试验目的

周期性触发和关断试验的主要目的是:

- 检查阀中与电流、电压和温度应力相关的晶闸管级和相关的电路, 在最严酷的重复应力条件下导通与关断时, 应力设计是否充分;
- 证明在与最小触发角一致的最小线路电流下, 阀在最小容性提升运行模式时的正确性能。

9.2 试品

试验可在 5.3.1 规定的完整阀或阀段上进行。被试阀或阀段应与保证其正确运行所必须的全部辅助部件组装在一起。

冷却剂应反映实际运行工况。特别是流量和温度应设置成适用于试验的最不利值。

9.3 试验要求

9.3.1 概述

采用交流电流源作为试验电路是恰当的，但通常无法实现。替代的适用试验电路，如合适的合成试验回路应产生与适当使用条件等效的应力。

在以下规定的最严酷运行工况下，阀或阀段耐受的电流电压波形应尽可能接近阀触发和关断期间经受的那些电流和电压波形。触发主要关注最初的 $10\ \mu\text{s} \sim 20\ \mu\text{s}$ 时间区间，而关断主要关注电流过零前 $0.2\ \text{ms}$ 和电流过零后 $1.0\ \text{ms}$ 之间的时间区间。

以下条件不得低于实际运行要求：

- 开通和关断时刻的电压幅值；
- 恢复期间电压峰值；
- 开通时刻和电流过零前至少 $0.2\ \text{ms}$ 时刻的 di/dt ；
- 晶闸管结温。

以下因素也应考虑：

- 再现阀端子间杂散电容；
- 足够的负荷电流幅值和持续时间，以实现晶闸管结全面积导通。

9.3.2 最大连续容性提升试验

9.3.2.1 试验参数和波形

试验电流和试验电压应由图5最大容性提升因数运行点A2对应的最大连续容性提升运行电流和最大环境温度计算。

试验电流应包含 1.05 的试验安全系数。

试验电压 U_{test} （晶闸管开通和关断时刻瞬时电压，不含过冲）按公式（20）计算：

$$U_{\text{test}} = U_{\text{C}_N} \cdot k_n \cdot k_6 \dots \dots \dots (20)$$

式中：

U_{C_N} ——按照 4.2.3.1 最大连续容性提升运行模式和图 5 运行点 A2，TCSC 阀晶闸管开通或关断时刻的电容电压；

k_n ——按照 5.3.2 的试验比例系数；

k_6 ——试验安全系数， $k_6=1.05$ 。

试验持续时间不应少于 $30\ \text{min}$ 。

9.3.2.2 试验程序

试验应采用合适的试验电路实施，如适当的合成试验电路，提供适应实际运行工况的等效开通和关断应力。

理想情况下，试验应通过再现规定的时变电源电流实施。但出于实际原因，可采用以下调整的试验程序：

- a) 建立 9.3.2.1 定义的最大稳态容性提升工况；
- b) 从达到热平衡时刻起，保持运行至少 $30\ \text{min}$ 。

9.3.3 最大暂态容性提升试验

9.3.3.1 试验参数和波形

试验电流和试验电压应基于暂态过负荷，见图 5 中 B2 点。

试验电流应包含 1.05 的试验安全系数。

试验电压 $U_{\text{test_max}}$ （晶闸管开通和关断时刻瞬时电压，不含过冲）按公式（21）计算：

$$U_{\text{test_max}} = U_{\text{C_max}} \cdot k_n \cdot k_7 \dots \dots \dots (21)$$

式中:

$U_{\text{C_max}}$ ——按照 4.2.3.1 最大暂态容性提升运行模式和图 5 运行点 B2, TCSC 阀晶闸管开通或关断时刻的电容电压;

k_n ——按照 5.3.2 的试验比例系数;

k_7 ——试验安全系数, $k_7=1.05$ 。

试验持续时间应为规定的暂态过负荷持续时间的 1.1 倍。

9.3.3.2 试验程序

试验应采用合适的试验电路实施, 如适当的合成试验电路, 提供适应实际运行工况的等效开通和关断应力。

理想情况下, 试验应通过再现规定的时变电源电流实施。但出于实际原因, 可采用以下调整的试验程序:

- a) 建立 9.3.2.1 定义的最大稳态容性提升工况并保持直到达到热平衡;
- b) 电源电流上升至试验值, 保持运行时间为规定的暂态过负荷时间的 1.1 倍。

9.3.4 最小容性提升试验

9.3.4.1 概述

试验目的是验证 TCSC 阀触发系统在规定的最小线路电流和规定的最小容性提升运行模式下能正确运行。

9.3.4.2 试验参数和波形

试验电流应基于图 5 容性提升运行点 C1 允许的规定最小连续线路电流。

试验电流应包含 0.95 的试验安全系数。

试验电压 $U_{\text{test_min}}$ (晶闸管开通和关断时刻瞬时电压, 不含过冲) 按公式 (22) 计算:

$$U_{\text{test_min}} = U_{\text{C_min}} \cdot \frac{N_{\text{tut}}}{N_t} \cdot k_8 \dots \dots \dots (22)$$

式中:

$U_{\text{C_min}}$ ——按照 4.2.3.1 最小容性提升运行模式和图 5 运行点 C1, TCSC 阀晶闸管开通或关断时刻的电容电压;

N_{tut} ——试品串联晶闸管级数量;

N_t ——阀中串联晶闸管级总数量;

k_8 ——试验安全系数, $k_8=0.95$ 。

试验持续时间应为 10 min。

试验电压峰值应可控以使阀电子设备能从交流系统取能, 按照 4.2.3.1 得到的试验电压峰值按同样原则确定。

9.3.4.3 试验程序

试验应采用合适的试验电路实施, 如适当的合成试验电路, 提供与 9.3.4.2 定义的试验条件等效的开通和关断应力。

理想情况下, 试验应通过再现规定的时变电源电流实施。但出于实际原因, 可采用以下调整的试验程序:

- a) 建立 9.3.4.2 定义的电流和电压的最小容性提升工况;
- b) 达到热平衡后, 保持运行 10 min。

9.3.5 旁路运行

9.3.5.1 最大暂态线路电流旁路模式运行

9.3.5.1.1 概述

若计算表明晶闸管旁路模式下的损耗高于容性提升运行模式, 应进行旁路试验对阀热容量进行验证。否则, 因阀热容量已被最大容性提升试验验证, 旁路试验不必进行。

9.3.5.1.2 试验参数和波形

试验电压和试验电流应根据 4.2.3.2 中最大暂态旁路运行电流在图 5 运行点 B3 的值和最大环境温度计算。

试验电流应包含 1.05 的试验安全系数。

试验持续时间应为最大暂态线路电流旁路模式规定运行时间的 1.2 倍。

9.3.5.1.3 试验程序

试验应采用合适的试验电路实施。以下规定的在运行条件下可能影响阀特性的所有辅助系统应投入运行:

- a) 建立线路电流最大连续运行工况和并保持直到达到热平衡;
- b) 在规定的试验持续时间内保持运行。

9.3.5.2 最小暂态线路电流旁路模式运行

9.3.5.2.1 概述

若阀未设计运行于表 5 最小线路电流旁路运行点 C3, 本试验不适用。

在阀电子设备无法从交流系统取能且晶闸管在低电压下的监控功能通过其他试验验证时, 如买方同意, 可不进行本试验。

依据选择的图 5 运行点 C3, 阀在最小暂态线路电流旁路模式下的运行能力可通过 9.3.4 进行验证。

9.3.5.2.2 试验参数和波形

试验电压和试验电流应根据 4.2.3.2 中最小旁路运行电流在图 5 运行点 C3 的值计算。

试验电流应包含 0.95 的试验安全系数。

试验电压 $U_{\text{test-by_min}}$ 按公式 (23) 计算:

$$U_{\text{test-by_min}} = U_{\text{by_min}} \cdot \frac{N_{\text{tut}}}{N_{\text{t}}} \cdot k_9 \dots\dots\dots (23)$$

式中:

$U_{\text{by_min}}$ ——在最小线路电流和 TCSC 阀旁路运行时的电容峰值电压, TCSC 阀旁路运行由 4.2.3.2 和图 5 运行点 C3 确定;

N_{tut} ——试品串联晶闸管级数量;

N_{t} ——阀中串联晶闸管级总数量;

k_9 ——试验安全系数, $k_9=0.95$ 。

试验持续时间应为规定的最小暂态线路电流持续时间的 2 倍或冷却剂入口温度稳定后最长 2 min。

9.3.5.2.3 试验程序

试验应采用合适的试验电路实施。以下规定的在运行条件下可能影响阀特性的所有辅助系统应投入运行：

- a) 建立 9.3.5.2.2 定义的旁路运行最小线路电流；
- b) 在规定的试验持续时间内保持运行。

10 故障电流试验

10.1 试验目的

故障电流试验的主要目的是验证阀承受短路电流引起的最大电流、电压、温度应力的设计是正确的。

试验应验证阀的以下能力：

- 导通输电线路内部故障时流过阀的不带后续闭锁的最大故障电流；
- 导通输电线路外部故障时流过阀的带后续闭锁的最大故障电流。

10.2 试品

见 9.2。

10.3 试验要求

10.3.1 不带后续闭锁的故障电流试验

10.3.1.1 试验参数和波形

发生内部故障时，故障大电流触发线路断路器来开断故障电流，将正常电网与故障点隔离。依靠故障处理程序，TCSC 保护系统可通过晶闸管阀和旁路开关将串联电容器旁路。故障电流通流后，TCSC 阀上不会出现后续闭锁电压。

故障电流峰值和通流时间应由最大交流系统短路容量经系统研究确定。

试验电流波形不必与实际运行中发生的故障电流波形完全一致。试验电流应具有至少与最大过电流值相等的峰值，且应使晶闸管结温至少与考虑旁路开关合闸时间的实际运行条件下能出现的最高温度相等。

10.3.1.2 试验程序

试验应采用合适的试验电路实施。以下规定的在运行工况下影响阀特性的所有辅助系统应投入运行：

- a) 建立与 9.3.2.1 定义的最大稳态工况一致的晶闸管结温（通过任何合适的方法）；
- b) 在规定的试验时间内施加试验电流。

10.3.2 带后续闭锁的故障电流试验

10.3.2.1 试验参数和波形

TCSC 在阀遭受带闭锁电压的故障电流方式下运行时，需要进行本项试验。

故障电流、通流时间和后续闭锁电压均由最严酷外部故障情况的系统研究确定。

试验电流和电压应对 TCSC 阀或阀段产生至少与实际运行同等严酷的应力。闭锁电压需施加 1.05

的安全因数。试验电流峰值应至少与最大过电流等值，且应使晶闸管结温在电压重新施加时刻至少达到最高值。

10.3.2.2 试验程序

试验应采用合适的试验电路实施。以下规定的在运行条件下影响阀特性的所有辅助系统应投入运行：

- a) 建立与 9.3.2.1 定义的最大稳态条件一致的晶闸管结温（通过任何合适的方法）；
- b) 在规定的试验持续时间内施加试验电流；
- c) 施加试验电压。

11 阀抗电磁骚扰试验

11.1 试验目的

试验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骚扰的能力。阀中的敏感部件主要是用于晶闸管级触发、保护和监测的电子电路。

这些试验应验证：

——不会发生晶闸管误触发；

——虚假的晶闸管级故障信息或错误的信号不会通过阀电子单元传递给阀的控制和保护系统。

阀的抗电磁骚扰能力应通过在其他型式试验时监测阀来检查。当然，阀操作冲击试验（8.3.2）是最重要的。

11.2 试验对象

通常，试验对象是其他试验所用过的阀或阀段。

11.3 试验要求

通过在阀端子间的操作冲击试验时监测阀验证抗电磁骚扰性能。除非另有规定，被试阀电子设备应预先通电。阀基电子单元的那些与被试阀进行正确信息交换的必需部分应包含在内。试验通过判据是阀不发生误触发或阀不对控制系统或保护系统发出错误指示。

12 特殊性能试验

12.1 试验目的

这些试验是验证阀的任何特殊的设计和性能。特殊性能可以包括但不限于以下两类：

——实现阀的正确控制、保护和监测功能的电路；

——包含在阀中的提供故障允差的性能（参见附录 B）。

通常，第一类性能可作为其他试验的一部分进行验证。

第二类性能可能需要进行特殊的试验，这些试验应由买方和卖方逐项协商一致。

12.2 试品

试验可在一个完整阀、阀段或者任何相关的部件上进行。

12.3 试验要求

试验判据和试验方法的选取应考虑阀的实际设计，应对涉及的部件或电路预期性能进行验证。

13 例行试验

13.1 概述

规定的试验为最低试验要求。卖方应提供满足试验目的的试验程序的详细说明。

13.2 外观检查

试验目的：

- 检查全部材料和部件完好无损且安装正确；
- 检查已安装部件的资料；
- 检查阀内部的空气间隙和爬电距离。

13.3 接线检查

试验目的：

- 检查所有主要的载流接线正确连接；
- 检查晶闸管的紧固力；
- 检查接线端子的配线。

13.4 均压电路检查

试验目的：检查均压电路的参数（电阻和电容）从而确认电压在串联的晶闸管上均匀分布。

13.5 耐压检查

试验目的：检查晶闸管级能否承受与规定的阀最大电压相对应的电压。

13.6 局部放电试验

为验证制造正确，买方和卖方应就哪个部件和子部件是设计的关键和实施哪种适当的局部放电试验达成一致。

13.7 辅助设备检查

试验目的：验证每个晶闸管级上的辅助设备（例如监测和保护回路）和完整阀（或阀段）公共的辅助设备功能的正确性。

13.8 触发检查

试验目的：验证阀的每个晶闸管级在触发信号作用下正常导通。

13.9 冷却系统压力试验

试验目的：

- 检查有无泄漏；
- 检查阀整体和所有子回路中流量是否足够；
- 检查压力差。

14 型式试验结果描述

试验报告的发布应符合 GB/T 27025 中给出的通用导则。试验报告应包括以下信息：

- 实验室名称和地址以及试验地点；
- 买方名称和地址；
- 试品的明确标识，包括型号和额定值、序列编号和其他任何用于确认试品的必要信息；
- 试验日期；
- 试验回路的描述和试验程序的说明；
- 引用标准以及与标准中规定程序的偏差(如有)的清楚描述；
- 测量设备的说明和测量不确定性的规定；
- 以表格、图、波形图以及适当的照片形式给出的试验结果；
- 设备或部件故障的描述（如果适用）。

附 录 A (资料性) TCSC 阀运行与额定参数

A.1 概述

输电线路的串联电抗可通过固定串联电容器和 TCSC (见图 1) 组合进行补偿。TCSC 使用一个或多个可控模块实现买方规定范围的性能要求。附录 A 讨论了 TCSC 运行条件和额定参数。

具有图 1 所示回路结构的 TCSC 有三种基本运行模式：

- TCSC 阀闭锁运行，此时晶闸管均闭锁（没有电流流过晶闸管阀）；
- TCSC 阀旁路运行，此时晶闸管阀持续流过电流；
- TCSC 阀容性提升运行，此时晶闸管控制电抗器。

参照电压过零点的控制角 (α) 定义，与诸如晶闸管控制电抗器 (TCR) 等其他电力电子装置的选取一致。但需注意的是，很多 TCSC 控制系统都是以线路电流波形作为重要的控制参考。

当 TCSC 工作在容性提升运行模式时，晶闸管阀支路中的电流会改变电容器上的电压，导致电容器视在电抗大于电容器物理电抗值。在 TCSC 的一种应用中，电容器视在电抗的增加会导致线路电流的增加。通过晶闸管阀的电流脉冲会使电容器的电压 (U_c) 发生畸变。畸变的波形（见 4.2.2 的图 3）意味着电容电压包含非工频分量，因而总电压峰值和总电压方均根值之间的关系不像纯正弦波那样是 $\sqrt{2}$ 倍。表 A.1 给出了 TCSC 中典型的电压峰值和方均根值之间的关系。

表A.1 电压峰值和方均根值关系

| 容性提升因数 (k_b) | LC 支路固有频率与 工频之比 (λ) | 工频电压方均根值 | 工频电压峰值 | 总电压方均根值 | 总电压峰值 |
|---------------------|----------------------------------|----------|--------|---------|-------|
| 1.0 | 2.5 | 1.0 | 1.41 | 1.00 | 1.41 |
| 2.0 | 2.5 | 2.0 | 2.83 | 2.02 | 2.55 |
| 3.0 | 2.5 | 3.0 | 4.24 | 3.05 | 3.07 |
| 1.0 | 3.5 | 1.0 | 1.41 | 1.00 | 1.41 |
| 2.0 | 3.5 | 2.0 | 2.83 | 2.03 | 2.54 |
| 3.0 | 3.5 | 3.0 | 4.24 | 3.07 | 3.67 |

A.2 TCSC特性

TCSC 特性由第 4 章中图 2 所示的串联电容 (C) 和电抗器 (L) 电路参数决定。作为晶闸管控制角 (α) 的函数，TCSC 的稳态工频视在电抗 $X(\alpha)$ 可由公式 (A.1) 计算。典型的电抗特性如图 A.1 所示。

$$X(\alpha) = \frac{1}{\omega_N \cdot C} \left[1 - \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 - 1)} \cdot \frac{2 \cdot \beta + \sin(2 \cdot \beta)}{\pi} + \frac{4 \lambda^2}{(\lambda^2 - 1)^2} \cdot \cos^2(\beta) \cdot \frac{\lambda \cdot \tan(\lambda \cdot \beta) - \tan(\beta)}{\pi} \right] \dots \dots \dots (A.1)$$

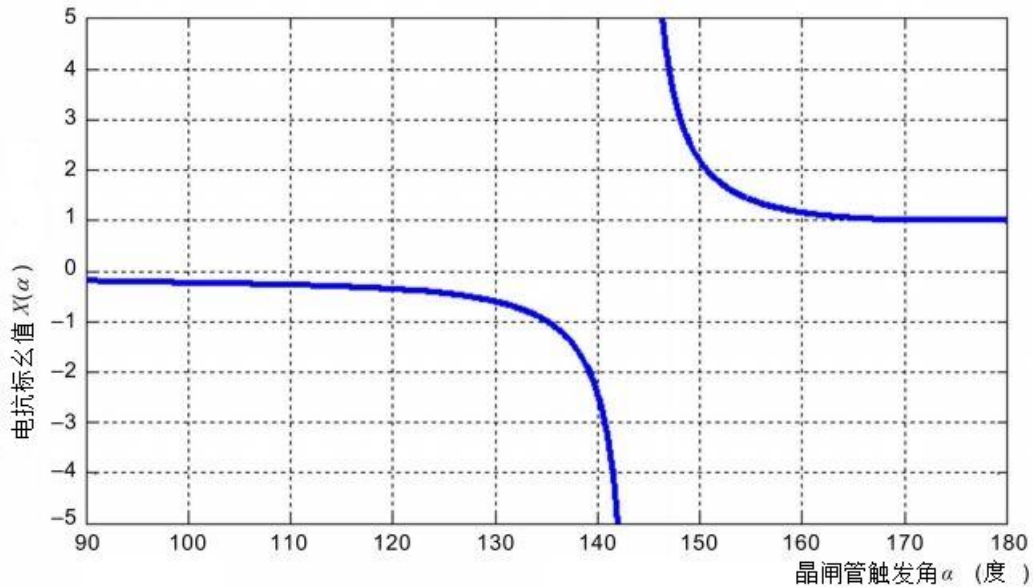
式中：

β ——TCSC 阀在一个电流方向上容性提升运行模式下导通角的一半 ($\beta = \pi - \alpha$)；

α ——从电容器电压零点计算的控制角；

λ ——TCSC 子模块 LC 支路固有频率与交流系统工频之比： $\lambda = \frac{1}{\omega_N \cdot \sqrt{L \cdot C}}$ (C 为串联电容器电容值， L

为 TCSC 电抗器的电感值)。



图A.1 $\lambda=2.5$ 时, 由公式 A.1 确定的 TCSC 工频稳态视在电抗特性

A.3 运行范围

运行范围是 TCSC 额定参数最重要的因素之一。它对主电路部件应力有重大影响, 因此买方应明确规定。在规定的工作范围内, TCSC 应设计成能够在不同电抗和线路电流下运行。要求的工作范围应由买方通过系统研究确定, 并在技术规范中通过 TCSC 基频视在电抗或与线路电流相对的提升因数 (k_b) 的一组曲线来明确说明, 如 4.3 中的图 5 所示。要求的工作范围取决于 TCSC 用途。一般来说, 用于功率振荡阻尼 (POD) 的 TCSC 所需的工作范围要比用于缓解次同步谐振 (SSR) 的 TCSC 大。

由于晶闸管阀在极低的阀电压和电流下不能稳定触发, 因此应对最小线路电流加以考虑。所有晶闸管以及相关触发、监控电子单元均有最低工作电压, 当电压低于该电压时, 触发和监测单元不能可靠运行。此外, 有些晶闸管触发电路由电源供电, 当线路电流很低时, 将对晶闸管的触发施加额外限制。这将导致最小线路电流值和提升因数 (k_b) 的存在。当低于该值时, 容性提升运行模式不能实现, 将影响 TCSC 的应用和运行。在低线路电流下, 串联补偿的作用是有限的。若考虑次同步谐振, TCSC 在无法维持容性提升模式运行的线路电流下应被旁路。

A.4 额定无功功率

当 TCSC 在容性提升运行模式下运行时, 电力系统端的无功功率与电容器组的无功功率不同。TCSC 输出无功功率和电容器组无功功率由以下公式给出:

$$Q_{\text{TCSC}} = 3 \cdot \frac{k_B}{\omega \cdot C} \cdot I_L^2 \dots\dots\dots (A.2)$$

$$Q_{\text{CAP}} = 3 \cdot \frac{k_B^2}{\omega \cdot C} \cdot I_L^2 \dots\dots\dots (A.3)$$

TCSC 的额定无功功率应定义为在标称提升因数和额定线路电流下, 由公式 (A.2) 确定的输出无功功率 Q_{TCSC} 。

A.5 功率振荡阻尼 (POD)

功率振荡阻尼 (POD) 是闭环电抗控制的一个专门的子功能, 它可通过调节 TCSC 对输电系统的电抗响应实现对电力系统振荡的抑制。

用于功率振荡阻尼 (POD) 应用的 TCSC 通常应满足以下基本要求:

- POD 控制器能处理导致功率振荡过零的系统扰动, 并且对平均潮流方向不敏感;
- POD 控制器能处理大的系统扰动。这意味着 POD 控制器结构应使 TCSC 输入信号和输出信号之间预期的相位偏移与功率振荡的幅值无关;
- 在功率振荡阻尼时, TCSC 控制系统能应对从容性提升运行模式到旁路模式和从旁路模式到容性提升运行模式的方式转换。

A.6 次同步谐振抑制

如果设计和应用得当, 在大于 1 的提升因数下运行时, TCSC 可在一定程度缓解次同步谐振 (SSR)。TCSC 可缓解由固定串联电容器引起的次同步谐振 (SSR)。

如果要求解决次同步谐振 (SSR) 问题, 应对涉及电力系统、附近的汽轮发电机和 TCSC 详细模型的性能进行研究。在电力系统包含固定串联电容器和 TCSC 的组合, 且混合串联补偿超过 50% 时, 以上推荐的模型研究作用明显。如果研究表明, 有预期补偿效果固定串联电容器将导致次同步谐振 (SSR) 问题, TCSC 卖方应积极参与对次同步谐振 (SSR) 问题的研究。

只有当阀处于连续运行的情况下, TCSC 才能提供次同步谐振 (SSR) 抑制。因此, 为使 TCSC 满足次同步谐振 (SSR) 抑制要求, 其应被限制在提升因数等于或大于能够实现预期次同步谐振 (SSR) 抑制的最小提升因数值的区间运行。次同步谐振 (SSR) 抑制程度可以是控制角的一个函数, 但 TCSC 控制系统最好能够提供尽可能不依赖于提升因数的次同步阻抗。

在次同步谐振 (SSR) 抑制作为关键功能的应用中, 应对 TCSC 在小线路电流条件下的运行进行评估, 见 A.3。

A.7 谐波

TCSC 在容性提升运行模式下运行时会产生谐波。谐波的大小取决于运行点的线路电流和提升因数。

在抑制次同步谐振 (SSR) 或功率振荡阻尼的应用中, TCSC 通常以额定提升因数运行, 仅在系统失调时以较高的提升因数暂态运行。因此, 应给出此类 TCSC 额定运行即额定线路电流和额定提升因数下的谐波要求。

应根据 TCSC 在串联补偿线路段连接母线引起的最大允许电压畸变给出其谐波要求。为研究 TCSC 谐波, 买方应提供详细的串联补偿线路传输线参数以及线路两端的谐波等值网络。

A.8 并联线路的多套 TCSC 之间的控制交互

在系统失调时, 并联在线路上的两套 TCSC 存在控制相互作用的风险。为减少并联的 TCSC 之间有害的相互作用风险, 建议采用以下方法:

- 多台 POD 控制器应使用相同的输入信号, 即并联电路总潮流;
- 多台 POD 控制器应有相似的动态性能;
- 在达到极限时, 多套电抗控制器应具有相似的动态性能和相似的响应特性;
- 在最大提升因数下, 线路段补偿程度应远低于 100 %。

A.9 运行范围、过电压和负荷周期

A.9.1 运行范围

运行范围一般由买方规定。

A.9.2 暂态过电压

TCSC 应适于在电力系统故障引起的暂态过电压下重复运行，其端间预计将出现最高可能的电压值 U_L 。暂态过电压通常受避雷器限制。

A.9.3 负荷周期

TCSC 应设计能够耐受要求的一系列故障，如买方规定的暂态过负荷和连续电流。这些序列构成了 TCSC 所有部件均应设计能够耐受的负荷周期。负荷周期应与周围电力系统在线路区内和区外故障时的运行方式一致。买方应明确常规故障、长时故障以及不同类型故障（三相和单相）的负荷周期。相间故障在买方有特别规定时应予以考虑。

买方应给定用于研究输电线路区外故障和区内故障的电力系统等值参数，以便确定设备的额定参数。

尽管 A.9.3 关注涉及电力系统故障的负荷周期，但在买方规定的条件下，TCSC 应设计能够在投入和重新投入等其他情况下运行。

附 录 B
(资料性)
阀部件故障耐受

故障耐受能力可定义为在计划停运前, TCSC 晶闸管阀在存在故障的部件或子系统或过负荷部件的情况下完成其预定功能, 且不得由于存在的故障条件导致任何其他部件不可接受的故障或故障扩大。设计中可能需要特殊的措施保证故障耐受。可能需要故障耐受的故障类型包括但不限于以下:

- a) 一个晶闸管短路
即使一个短路的晶闸管会短接晶闸管级上其他部件, 在某些设计中, 可能存在使门控脉冲变压器(如果有)过载、载流连接过负荷(采用并联晶闸管时)或改变钳位负荷的风险。
- b) 由于丢失一级晶闸管正常触发脉冲, 而使该级晶闸管保护性触发连续动作。
保护性触发连续动作能导致受影响的晶闸管级阻尼电阻和其他部件过负荷。
- c) 阻尼电容、阻尼电阻、分压器或均压电容(如有)绝缘失效
与晶闸管并联的任何部件的绝缘失效可以向其注入负荷电流, 引发危险状态。
- d) 阀冷却剂少量泄漏
若阀采用液体冷却, 少量泄漏不易监测。泄漏的冷却剂能污染灵敏的部件, 导致功能故障并使绝缘失效的可能性增加。

买方应与卖方一起审查提供的设计以确定某些故障的概率和可能出现的后果。适用时, 应在型式试验程序中考虑进行特殊试验来验证阀的故障耐受能力的关键方面。此类试验应由买方和卖方逐项协商确定。
