

ICS29.240.01
F21
备案号: 18574-2006

DL

中 华 人 民 共 和 国 电 力 行 业 标 准

DL/T1010.1—2006

高压静止无功补偿装置
第 1 部分 系统设计

High-voltage static VAR compensator

Part 1 System design

2006-09-14 发布

2007-03-01 实施

中 华 人 民 共 和 国 发 展 与 改 革 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	2
4 型式及接线方式	4
5 主要功能	5
6 主要参数和性能	5
7 设计的基本调节	6
7.1 条件的确定原则	6
7.2 环境条件	6
7.3 系统条件	6
7.4 负荷条件	7
7.5 其它条件	7
8 系统设计	7
8.1 设计目标	7
8.2 设计内容	7
8.3 系统研究	7
8.4 设备布置	8
8.5 利用率和可靠性	9
8.6 损耗的评估	9
8.7 噪声	10
9 SVC 部件及子系统基本要求	10
9.1 晶闸管阀	10
9.2 晶闸管阀的冷却系统	11
9.3 相控电抗器	11
9.4 电容器组	12
9.5 滤波（串联）电抗器	12
9.6 断路器	13
9.7 隔离开关	13
9.8 避雷器	13
9.9 专用变压器（如果需要的话）	13
9.10 控制系统	13
9.11 保护及故障录波设备	14
9.12 表计和监控显示	15
9.13 辅助设备	15
10 其它要求	15
10.1 安装	16
10.2 消防	16
10.3 采暖通风	16

10.4 供货及服务范围	17
附录 A （规范性附录） 晶闸管阀的损耗计算方法	18
附录 B （资料性附录） 供货及服务范围	21

前 言

本标准是“高压静止无功补偿装置”系列标准中的第 1 部分，该系列标准共分为 5 个部分：

- 第 1 部分：系统设计
- 第 2 部分：晶闸管阀的试验
- 第 3 部分：控制系统
- 第 4 部分：现场试验
- 第 5 部分：密闭式水冷却装置

本标准主要是参考国内外的相关标准、规定，总结多年来的实际工程经验编写而成。本标准目前尚无对应的国际标准。

本标准的附录 A 为规范性附录。

本标准的附录 B 为资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由中国电力企业联合会归口。

本标准起草单位：

主要起草单位：中国电力科学研究院

参加起草单位：

本标准主要起草人：

本标准由中国电力科学研究院负责解释。

高压静止无功补偿装置 第1部分 系统设计

1 范围

本标准适用于输电系统和配电系统中使用晶闸管的静止无功补偿装置（以下简称“SVC”）新建工程的设计。SVC可应用于6kV及以上电力系统，其中晶闸管控制的支路可直接挂接于6~66（63）kV系统。对于扩建、改建工程可以参照本标准相关部分执行。SVC中包括电力滤波器部分，因此本标准的相关部分也可用于独立的电力滤波器设计。

本标准规定了SVC满足系统运行要求的设计内容；对SVC部件、子系统以及布置、安装和相关的设计问题提出了基本要求。

每个SVC工程均有其特殊性，应针对具体工程条件和要求使用本标准，必要时应作相应的补充。有关SVC晶闸管阀的试验、控制系统、冷却系统以及现场试验的详细规定，参见本系列标准其它部分。

本标准主要是针对晶闸管控制电抗器（TCR）型和晶闸管投切电容器（TSC）型SVC编制，适当兼顾晶闸管投切电抗器（TSR）型SVC的某些要求。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB 311.1-1997	高压输配电设备的绝缘配合
GB 1984-89	交流高压断路器
GB 1985-2004	高压交流隔离开关和接地开关
GB/T 6451-1999	三相油浸式电力变压器技术参数和要求
GB 10229-88	电抗器
GB/T 11022-1999	高压开关设备和控制设备标准的共同技术要求
GB/T 11024.1-2001	标称电压1kV以上交流电力系统用并联电容器
GB 11032-2000	交流无间隙金属氧化物避雷器
GB/T 12325	电能质量 供电电压允许偏差
GB 12326	电能质量 电压波动和闪变
GB/T 14549	电能质量 公用电网谐波
GB/T 15291-1994	半导体器件 第6部分 晶闸管
GB/T 15543	电能质量 三相电压允许不平衡度
GB/T 15945	电能质量 电力系统频率允许偏差
GB/T 18481	电能质量 暂时过电压和瞬态过电压
GB 50052-95	供配电系统设计规范
GB 50059-92	35~110kV变电所设计规范
GB 50060-92	3~110kV高压配电装置设计规范

GB 50277-95	并联电容器装置设计规范
DL 5014-92	330~500kV 变电所无功补偿装置设计技术规定
DL/T 553-94	220V~500kV 电力系统故障动态记录技术准则
ZB K48004-90	高电压交流滤波电容器
IEEE std1031-2000	IEEE Guide for the Functional Specification of Transmission Static Var Compensators

3 术语

本标准采用了下列术语。

3.1 静止无功补偿装置 (SVC) static var compensator

由静止元件构成的并联可控无功功率补偿装置,通过改变其容性或(和)感性等效阻抗来调节输出,以维持或控制电力系统的特定参数(典型参数是电压、无功功率)。

3.2 晶闸管控制电抗器 (TCR) thyristor controlled reactor

由晶闸管控制的并联电抗器,通过控制晶闸管阀的导通角使其等效感抗连续变化。

3.3 晶闸管投切电容器 (TSC) thyristor switched capacitor

由晶闸管投切的并联电容器,通过晶闸管阀的开通或关断使其等效容抗成级差式变化。

3.4 晶闸管投切电抗器 (TSR) thyristor switched reactor

由晶闸管投切的并联电抗器,通过晶闸管阀的开通或关断使其等效感抗成级差式变化。

3.5 滤波(固定)电容器 (FC) filter/fixed capacitor

由电容器和电抗器(有时还有电阻器)适当组合而成的并联装置,兼有无功补偿、滤波和调压功能。

3.6 晶闸管级 thyristor level

晶闸管阀的组成部分,由一对反并联的晶闸管(或晶闸管和二极管反并联)构成,包括辅助电路(触发、保护、均压、阻尼元件等)。

3.7 晶闸管阀 (TV) thyristor valve

晶闸管级的电气和机械联合体,配有连接、辅助部件和机械结构,它可与 SVC 每相的电抗器或电容器相串联。

3.8 晶闸管电子电路 (TE) thyristor electronics

在阀电位上执行控制功能的电子电路。接受阀基电子单元的控制信号,并向阀基电子单元回报阀的信息。

3.9 阀基电子单元 (VBE) valve base electronics

处在阀电位的电子单元,是 SVC 控制系统与晶闸管阀之间的接口。

3.10 闭锁 blocking

控制系统不发出触发信号,使晶闸管阀处于关断状态。

3.11 控制系统 control system

对 SVC 进行调节、保护、触发和监测等单元的总称。

3.12 角度 angle

将正弦波中的时间间隔用相应角度来描述,图 1 表示了通常使用的“角度”,并定义如下:

开通角 α (firing angle): 从晶闸管受到正向电压的开始时刻到晶闸管开始导通时刻之间的间隔,有些文献中称为延迟角。

导通角 σ (conduction angle): 晶闸管导电的间隔,正常情况下,它是关断角 γ 及开通角 α 之差。

关断角 γ (extinction angle): 从晶闸管受到正向电压的开始时刻到晶闸管停止导通时刻的间隔。

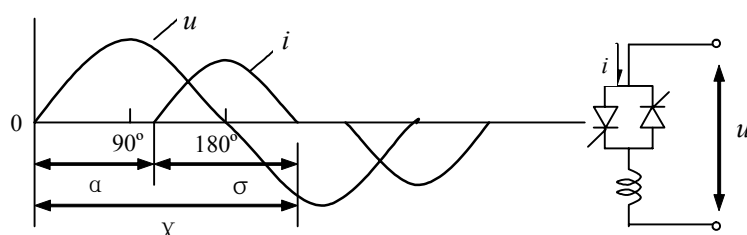


图1 角度的定义

3.13 误通 false firing

无论由于何种原因，在不正确的时刻造成的晶闸管阀的开通。

3.14 响应时间 response time

当输入阶跃控制信号后，SVC 输出达到要求输出值的 90% 所用的时间，且期间没有产生过冲（图 2）。

注：由于电压变化范围较小，难以获得清晰的变化曲线，一般可以用无功电流变化曲线来说明响应时间。

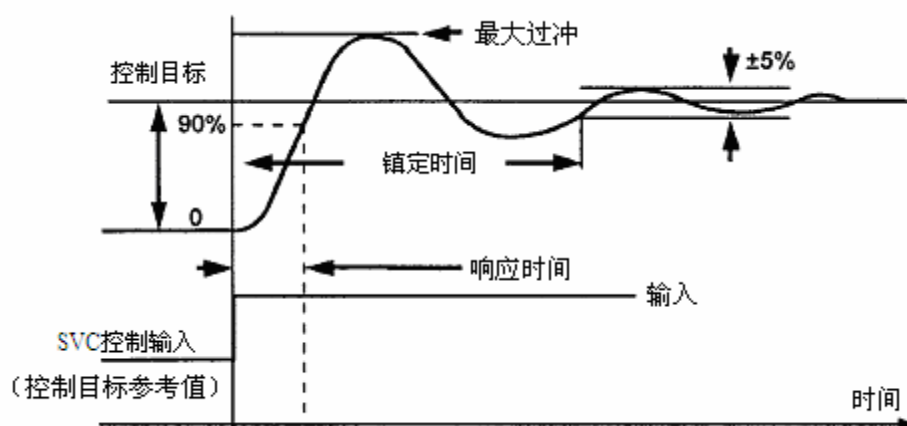


图2 响应时间和镇定时间定义

3.15 镇定时间 settling time

当输入阶跃控制信号后，SVC 输出达到要求输出值的 $\pm 5\%$ 范围内所用的时间（图 2）。

3.16 电压/电流特性 (V/I) voltage/current characteristic

SVC 在连接点处的稳态电流与电压之间的关系。

3.17 控制范围 control range

在连接点处由 SVC 提供的无功电流或无功功率的感性至容性最大变化范围。

3.18 滞后运行 lagging operation

SVC 吸收容性无功，等效于并联电抗器。

3.19 超前运行 leading operation

SVC 发出容性无功，等效于并联电容器。

3.20 参考电压 reference voltage

SVC 运行在既不发出、也不吸收无功功率时的电压。

3.21 斜率 (SL) slope

在 SVC 的线性可控范围内，其电压—电流特性的斜率，即电压变化对电流变化（标么值）的百分数。

3.22 电压击穿 (VBO) 保护 voltage break-over protection

晶闸管的一种过电压保护，当电压达到设定的电压值时使晶闸管触发开通。一般采用击穿二极管 (BOD)。

3.23 公共连接点 (PCC) point of common coupling

电力系统中一个以上用户的连接处。

3.24 考核点 (CP) check point

供用电双方合同规定的指标衡量点。

4 型式及接线方式

- SVC 是由静止元件构成的并联可控无功功率补偿装置，主要类型有：晶闸管控制电抗器 (TCR) 型、晶闸管投切电容器 (TSC) 型、晶闸管投切电抗器 (TSR) 型、晶闸管控制高阻抗变压器 (TCT) 型、磁控电抗器 (MCR) 型、自饱和电抗器 (SR) 型，上述六种 SVC 既可单独使用，也可根据需要组合使用。
- 输电系统 SVC 应连接在主变压器（或专用变压器）二次或三次侧，并且宜用专用母线的接线方式；配电系统 SVC 宜与被补偿负荷并联连接。
- FC 部分可以根据装置的容量、支路数量，通过技术经济比较确定由一台断路器带一支路或多支路；TCR (TSR) 支路原则上应单独设置一台断路器，也可和 FC 支路共用断路器。
- TCR 的电抗器一般分成相同的两组线圈，每相晶闸管两侧各连接一组线圈，采用三角形接线（图 3）。
- TSC 晶闸管阀一般置于电容器和电抗器之间，采用三角形接线（图 4）。

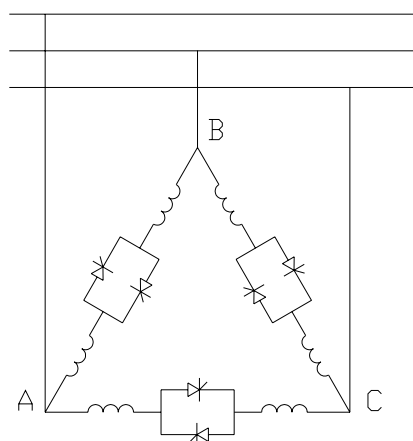


图3 TCR (TSR) 的接线方式

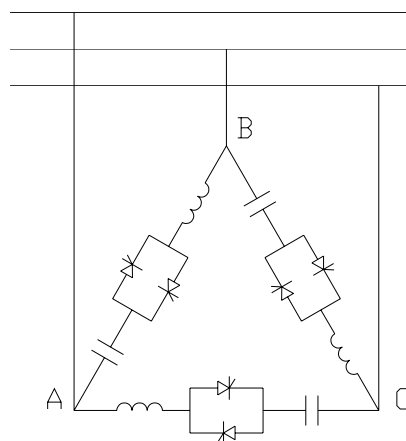


图4 TSC 的接线方式

f) FC 支路接线的一般规定：

- FC 的型式主要采用单调谐、双调谐、“C”型和高通滤波器等四种，原理接线分别如图 5 所示。
- FC 支路宜采用单星型接线或双星型接线，并且中性点不应接地。
- FC 支路电容器组的每相或每个桥臂，有多台电容器串联组合时，应采用先并联后串联的接线方式。
- 滤波电抗器或串联电抗器装设于电源侧时，其电流应满足动稳定和热稳定要求。

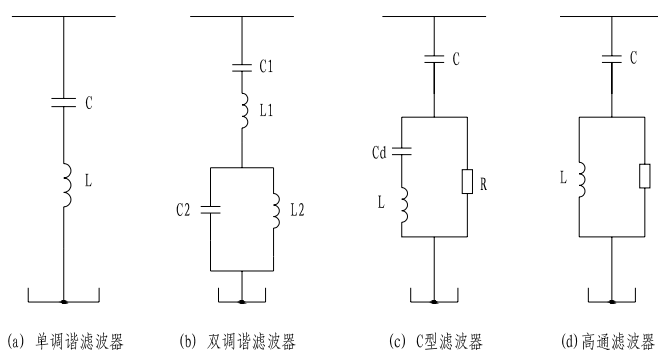


图5 FC 的接线方式

5 主要功能

a) 输电系统 SVC 的功能特性一般包括：

- 1) 正常工况下调相调压（即无功控制和电压偏差调节）和故障情况下电压支撑；
- 2) 抑制工频过电压及减少电压波动；
- 3) 改善系统稳定性和提高输电功率；
- 4) 降低谐波水平；
- 5) 其它特殊功能（例如：阻尼功率振荡）。

b) 配电系统及工业用户 SVC 的功能特性一般可以包括：

- 1) 抑制电压波动和闪变；
- 2) 校正三相电压不平衡；
- 3) 降低谐波电流和谐波电压；
- 4) 改善功率因数。

6 主要参数和性能

SVC 的基本特性由稳态电压—电流（U/I）特性所决定，如图 6 所示。

图中：a—b—c 为线性工作区（ab 为容性，bc 为感性）；cd 为感性过载区（晶闸管导通角保持最大），当 $I > I_{\max}$ 时，TCR 由保护动作退出运行。

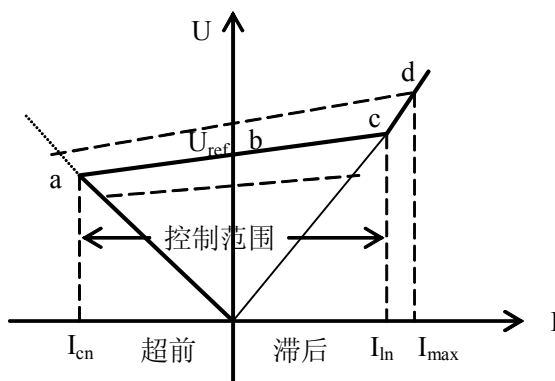


图6 SVC 的 U/I 特性

SVC 主要特性由下列参数及性能描述：

a) 额定电压 U_n (kV)

指 SVC 连接点（母线）的标称电压；通常取 $U_n=1$ (pu)。

b) 额定容量 Q_n (Mvar)

指晶闸管控制的感性或容性基波无功功率，应分别指明 TCR（TSR）、TSC 支路在额定电压下的基波无功功率。

c) 动态调节范围 (Mvar)

指 SVC 通过晶闸管阀控制实现的可调无功范围，即在额定电压下 SVC 无功功率变化的最大范围。

d) 参考电压 U_{ref} (kV, pu)

如图 6 中 b 点电压，通常 U_{ref} 应可设置， $U_{\text{ref}}=0.9\sim 1.1\text{pu}$ 。

e) 斜率 (%)

指图 6 中的 ac 段的斜率，一般在 0.5~10% 范围内可调。

f) 响应时间 (ms)

SVC 响应时间定义参见术语 3.14，一般由供方提供。SVC 的响应时间和镇定时间可以通过专门的系统研究得到。

g) 过载能力

SVC 能达到的过负荷倍数和持续时间。SVC 的所有设备，如晶闸管投切电容器 (TSC) 支路、晶闸管投切电抗器 (TSR) 支路、晶闸管控制电抗器 (TCR) 支路、滤波 (固定) 电容器 (FC) 支路和电抗器组支路，其设计都应能耐受所要求的连续或短时过负荷能力，在电压和电流超过允许值时应能进行保护。

7 设计的基本条件

7.1 确定原则

设计的基本条件根据工程特点，原则上由需方提供，但某些条件可由供需双方协商确定，例如，电网谐波阻抗如何确定；负荷谐波发生量是否可由供方根据工程经验确定。由需方提供的 SVC 基本设计条件可包括以下全部或部分內容。

7.2 环境条件

- a) 海拔高度 (m)
- b) 年均降雨量 (mm)
- c) 最大月降雨量 (mm)
- d) 年平均环境温度 (°C)
- e) 最高环境温度 (°C)
- f) 最低环境温度 (°C)
- g) 年平均相对湿度 (%)
- h) 最大相对湿度 (%)
- i) 覆冰厚度 (mm)
- j) 最大地面积雪厚度 (mm)
- k) 最大结霜厚度 (mm)
- l) 冻土层厚度 (m)
- m) 年平均风速 (m/s)
- n) 年最大风速 (m/s)
- o) 地震烈度 (度)
- p) 年平均雷电数 (日/年)
- q) 污秽等级及盐密 (ESDD) (级、 mg/m^2)
- r) 日照强度 (W/cm^2)
- s) 地电阻率 ($\text{Ohm}\cdot\text{m}$)

7.3 系统条件

- a) 装置连接点的额定电压及变化范围;
- b) 电网频率及变化范围;
- c) 电网谐波阻抗;
- d) 过电压保护水平, 包括雷电冲击和操作冲击保护水平;
- e) 系统接地;
- f) 供电系统主接线和设备参数以及供电方式、供电设备容量、相关的无功补偿装置及参数;
- g) PCC 或 CP 的背景电能质量参数, 包括电压变化范围(曲线)、谐波电压、谐波电流、电压波动和闪变、三相电压不平衡度等;
- h) PCC 或 CP 的短路水平, 包括最大和最小方式下的三相、单相短路电流(或短路容量);
- i) 相关保护定值以及故障清除时间。

7.4 负荷条件

- a) 用电协议容量;
- b) 负荷容量及性质, 包括谐波发生量、有功和无功功率变化范围(曲线)、功率因数、最大负序电流等;
- c) 接线方式及负荷工况。

7.5 其它条件

- a) 占地面积 (m^2);
- b) 水冷却所需要的外部条件(如水温, 水压, 流量, 水质等);
- c) 现有相关装置及设备(应包括接地、防雷等);
- d) 布置方式(户外或户内, 单层或双层布置, 电缆或架空连接等);
- e) 监控方式(就地和/或远方);
- f) 站用电条件;
- g) 噪声水平。

8 系统设计

8.1 设计目标

SVC系统设计的基本目标是在规定的设计条件下, 通过技术经济比较合理地确定SVC主接线方式及基本参数, 以保证装置安全可靠运行, 并达到预期补偿指标。

8.2 设计内容

- a) 系统条件的确定;
- b) 装置所在外部条件的确定;
- c) 装置的基本参数及主接线选择;
- d) 性能指标的核算;
- e) 装置元件的安全运行校验;
- f) 谐波谐振校验;
- g) 操作过电压计算及其保护方式、保护元件配置和参数确定;
- h) SVC 主要元件参数及订货技术条件;
- i) 继电保护配置及保护定值;
- j) SVC 运行方式的确定;
- k) 装置的安装布置方案及相关图纸;
- l) SVC 的系统研究。

8.3 系统研究

8.3.1 研究内容

系统研究是SVC设计性能的保证，一般应包括动态特性的研究，谐波、负序、电压波动和闪变的研究以及过电压的研究，但不应仅限于此，其中动态特性的研究主要适用于输电系统的SVC。具体的研究内容可根据工程实际情况确定。本部分主要参考标准为：GB/T 12325、GB 12326、GB/T 14549、GB/T 15543、GB/T 15945、GB/T 18481。

8.3.2 动态特性的研究

当系统发生扰动（例如主要的故障和甩负荷）时，应从暂态和动态稳定角度研究SVC控制的性能，并评估所有规定的功能。

- a) 系统故障和操作时 SVC 对电压支撑和稳定性能的研究，以及 SVC 响应特性的研究；
- b) SVC 的保护和保护配合的研究；
- c) 如果需要，应通过研究验证在系统发生扰动之后 SVC 阻尼系统功率振荡、抑制次同步振荡所需的附加控制功能；
- d) 研究评估 SVC 控制和邻近的其他控制系统之间的相互作用，包括高压直流控制、发电机控制以及其它灵活交流输电系统（FACTS）装置的控制。

8.3.3 谐波、负序、电压波动和闪变性能的研究

- a) 通过谐波潮流的研究以验证 SVC 谐波滤波器设计是否合理。
此项研究应当评估在 SVC 考核点和（或）公共连接点处的谐波水平。研究报告应包括以下内容：
 - 1) 在规定的系统运行条件下（包括最大和最小系统电压水平）SVC 的最大和最小无功功率输出；
 - 2) 谐波的抑制效果；
 - 3) 在系统电压不平衡和触发角不平衡的情况下产生的非特征谐波；
 - 4) 可能产生的谐振过电压；
 - 5) 校核滤波器元件的安全裕度。
- b) 评估由于负荷产生的负序电流对电力系统的影响以及采用 SVC 后的改善效果。
- c) 评估由于负荷无功冲击引起母线的电压波动和闪变以及采用 SVC 后的改善效果。

8.3.4 过电压的研究

过电压（包括雷电和操作过电压等）的研究用于确定过电压保护方式、设备的绝缘水平、避雷器参数等，需要研究的内容如下：

- a) 雷电和开关操作过电压；
- b) 母线故障（单相对地、相间和三相）；
- c) 晶闸管阀故障（包括可能出现的误通）。

8.4 设备布置

- a) SVC 设备的布置和安装设计，原则上应保证安全、利于通风散热、便于运行巡视和维护检修。一般要求可参考 GB 50052、GB 50059、GB 50060、DL 5014 等。
- b) 晶闸管阀及其冷却系统，均宜采用户内布置。
- c) 监控和保护装置不宜放置于阀厅内，但应靠近阀组以缩短信号传输距离（一般不宜超过 10 m）。
- d) 相控电抗器可以采用户内或户外（包括半露天）分相布置。根据现场条件，三相采用水平排列或三角排列。对于空心式电抗器相间的距离应保证在 $1.7D$ （ D 为电抗器外径）以上。电抗器与天棚和地面的距离在 $0.5D$ 以上（分别以电抗器的上面和下面为基准）；电抗器中心和墙壁（或围栏）的距离在 $1.1D$ 以上。电抗器周围（在上述距离之内）的金属构件应采用非磁性材料制造，并避免构成金属环路和并联回路。
- e) 滤波电抗器的布置原则上同 d)，但为减少占地面积，也可以用三相叠装方式。
- f) 滤波电容器一般宜采用户外布置；严寒、湿热、风沙等特殊地区和污秽、易燃、易爆等特殊环境宜采用户内布置。户外布置的电容器装置，应设置防止凝露引起污闪事故的措施。

- g) 电容器组的布置，宜分相设置独立的框架；根据现场条件，电容器可以采用立式或卧式布置。当电容器台数较少或受到场地限制时，可设置三相共用的框架。
- h) 分层布置的电容器组框架，不宜超过三层，每层不应超过两排，四周和层间不得设置隔板。当电容器必须采用三层以上布置时，宜采用卧式电容器。
- i) 电容器组的安装设计最小尺寸，应符合表 1 的规定：

表1 电容器组安装设计最小尺寸（mm）

名称	电容器		电容器底部距地面		装置顶部至顶棚净距
	间距	排间距里	户外	户内	
最小尺寸	100	200	300	200	1000

- j) 户内外布置的电容器组，在其四周或一侧应设置维护通道，其宽度不应小于 1.2m。当电容器双排布置时，框架和墙之间或框架相互之间可设置检修走道，其宽度不应小于 1m。

注 1：维护通道系指正常运行时巡视，停电后进行维护检修和更换设备的通道。

注 2：检修走道系指停电后维护工作使用的走道。

- k) 熔断器的装设位置和角度，应符合下列要求：
- 1) 应装设在有通道一侧；
 - 2) 严禁垂直装设。装设角度和弹簧拉紧位置，应符合制造厂的产品技术要求；
 - 3) 熔丝熔断后，尾线不应搭在电容器外壳上。
- l) SVC 可根据周围环境中小动物活动的情况，设置防侵袭的封堵、围栏和网栏等设施。

8.5 利用率和可靠性

8.5.1 定义

- a) 强迫停运：指由于 SVC 设备故障造成的停运，导致 SVC 失去其部分或全部主要功能。
- b) 计划停运：指为了确保 SVC 连续可靠运行而进行预防性维护、检修所造成的停运，会造成 SVC 暂时失去部分或全部功能。
- c) 停运持续时间：指从 SVC 退出运行时刻到恢复运行时刻所持续的时间，以小时为单位。停运持续时间包括：
- 1) 确定停运原因或者确定需要维修或更换的设备所需要的时间。
 - 2) 系统运行人员为准备维修工作而切除设备并将设备接地直到维修完成后去除接地可将设备重新投入所需要的时间。由于缺少合格的户操作人员造成的拖延不累积。
 - 3) 局部停运时的等效停运持续时间：如果 SVC 仍有部分运行，等效停运持续时间为运行时间与该时间段内所减少的输出容量与额定容量的比例的乘积。
- d) 年利用率：指考虑 SVC 由于失去全部和部分功能造成停运而得到年等值利用率，用百分数表示。用下式计算：

$$\left[1 - \frac{\sum \text{等效停运持续时间}}{8760} \right] \times 100\%$$

8.5.2 利用率和可靠性指标

对 SVC 的可靠性有如下要求：

- a) 考虑强迫停运 SVC 而得到的年利用率（%）。
- b) 年强迫停运次数（次）。

8.6 损耗的评估

根据下列条款 a) 至 f) 中公式提供 SVC 总损耗（kW）的估计值或保证值。在 SVC 设计的运行范围内，对 SVC 不同运行点下的总损耗分别计算并取平均值。

在损耗评估中，配电装置、母线、电缆、线夹、连接件等的损耗没有包括在内，并忽略了与谐波电流相关的损耗（但在确定电阻器、冷却设备等参数的时候需要加以考虑）。

- a) 晶闸管阀损耗 P_{valve}
见附录 A。
- b) 变压器损耗（指 SVC 专用降压变压器）
变压器的损耗采用厂家或试验所得出的数据。
- c) 电抗器损耗 P_{reac}
电抗器损耗 P_{reac} 采用下式计算：

$$P_{reac} = 3 \times R_{reac} \times I^2 \quad (1)$$

式中：

R_{reac} — 电抗器的直流电阻值，可以从电抗器的试验报告中查到

I — 电抗器电流有效值

- d) 电容器组损耗 P_{cap}
电容器组损耗 P_{cap} 采用下式计算：

$$P_{cap} = Q_{cap} \times \tan \delta \quad (2)$$

式中：

Q_{cap} — 电容器容量

$\tan \delta$ — 电容器介质损耗角正切值，可以从试验报告中查到，取所有电容器 $\tan \delta$ 的平均值用于损耗计算

- e) 电阻器损耗 P_{res}
电阻器的损耗计算公式

$$P_{res} = 3 \times R_{res} \times I^2 \quad (3)$$

式中：

R_{res} — 电阻器阻值

I — 电阻器的电流有效值

- f) SVC 辅助系统所消耗的功率
指包括泵、风机、加热系统在内的辅助系统所消耗的功率。

8.7 噪声

SVC 装置中电抗器、电容器、晶闸管阀等设备会产生噪声，其可听噪声水平应控制在相关标准所要求的限制值以内，具体数值请参考相关设备标准。

9 SVC 部件及子系统基本要求

9.1 晶闸管阀

9.1.1 功能

晶闸管阀用于控制流过电抗器或电容器组中的交流电流，以提供可变的感性或容性无功功率。

9.1.2 一般说明

- a) 晶闸管阀应根据系统运行条件及性能要求设计，包括必要的保护和附件。
- b) 晶闸管阀结构的设计应做到便于用户对晶闸管近距离巡视、日常维护以及故障处理或部件更换。
进行维护工作时，应不影响其它的设备继续运行。
- c) 晶闸管阀由若干串联的阀组件构成，其中包括全部必要的散热器，均压和保护电路，触发转换和取能电路、控制和监视信号通道器件。

9.1.3 参数选择和触发方式

晶闸管阀的选择应遵循：

- a) 阀元件应根据系统故障和操作引起的最大过电压和过电流进行设计。
- b) 阀的设计应考虑阀中晶闸管电压分布不均匀性而留有适当裕量。单相每组晶闸管阀中串联晶闸管级的最小冗余数为 1。
- c) 阀的设计应具备防止或耐受误通的能力。
- d) 晶闸管的触发应提供正常触发和强制触发两个独立的触发系统。
- e) 晶闸管的基本技术要求参考 GB/T 15291。

9.1.4 晶闸管阀的保护

晶闸管阀应具备以下过电压保护：

- a) 阀的两端可采用氧化锌避雷器或其它保护措施作为过电压保护。
- b) TCR 阀和 TSR 阀应该有强制触发系统（例如 BOD 保护），如果过电压保护失效或者晶闸管阀中只有部分导通或关断，则对晶闸管可以起后备保护作用。
- c) TSC 阀不宜采用强制触发，在过电压时不应被触发，应提供联锁和闭锁装置避免误通。
- d) 动态均压和静态均压回路。

9.1.5 试验

晶闸管阀应经规定的试验参照本系列标准第2部分《晶闸管阀的试验》和第4部分《现场试验》执行。

9.2 晶闸管阀的冷却系统

9.2.1 用途

晶闸管阀冷却系统的作用是将阀产生的热量带走，并将其传递到周围的空气或其它介质中，使晶闸管元件保持在允许的温度范围。

9.2.2 冷却系统型式

冷却系统分为水冷却和空气冷却等型式，在 SVC 容量较大时一般宜采用密闭式水冷系统。本标准仅对水冷却型式提出基本要求。

9.2.3 水冷却系统的基本要求

- a) 为保持密闭系统中水的高电阻率应使用去离子回路。
- b) 可以采取水—风或水—水的热交换方式。
- c) 设计功能和特性
 - 1) 应当提供两台循环泵，一台运行，一台备用。当运行泵故障时，备用泵应自动投运而无需关闭冷却系统，同时在控制屏上显示报警信息。
 - 2) 每台泵应能提供所需的最大水流量。
 - 3) 水冷系统可根据被冷却设备的具体需要设置由脱氧树脂构成的脱氧床，或两套旁路离子交换器，采用一用一备工作方式
 - 4) 每个水—风热交换器至少有一个备用风机。
 - 5) 冷却系统应有足够的表计和指示器显示装置的任何部件处于正常运行或维修状态。
 - 6) 冷却系统应能监测自身的运行和冷却介质的情况，并有完善的保护及报警信号。
 - 7) 冷却系统必需具备信号上传和远程控制功能。
 - 8) 其余要求参考本系列标准第 5 部分《密闭式水冷却装置》。

9.3 相控电抗器

- a) TCR 相控电抗器一般采用单相干式空心电抗器，每个单相电抗器分成相同的两个线圈，上下叠装。
- b) 电抗器容量应根据 SVC 的动态无功补偿容量，考虑晶闸管阀的导通角以及流经的谐波电流和过载能力。
- c) 感抗偏差：每相总电抗值偏差应在 $\pm 3\%$ 以内，三相之间偏差应在 2% 以内。
- d) 电抗器的损耗宜根据容量与型式，经技术经济比较选定。

- e) 额定绝缘水平符合 GB 311.1 的规定；装设在严寒，高海拔，温热带等地区和污秽，易燃，易爆等环境中的电抗器，应满足相应的特殊要求（本条规定也适用于其他设备，以下不再重复）。
- f) 噪声：不超过 60dB。

9.4 电容器组

9.4.1 电容器

- a) 型式：根据现场安装条件，可以采用户外式或户内式，立式或卧式；根据单台熔丝的保护方式不同，可以采用外熔丝或内熔丝型式；一般采用全膜或膜纸复合介质电容器；根据放电需要可以采用带或不带内放电电阻。
- b) 额定电压：电容器组额定电压的选取应考虑下列因素：
 - 1) 串联电抗器引起的滤波电容器工频电压升高；
 - 2) 接入点的系统最高运行电压；
 - 3) 谐波引起的电容器电压升高；
 - 4) 相间和串联段间的电压分配不均匀；
 电容器承受的长期过电压不应超过其额定电压的 1.1 倍。
- c) 额定电流：电容器组流过的电流值为基波电流和谐波电流方均根合成值，稳态过电流一般应不超过其额定电流的 1.3 倍，或由用户和制造厂协商确定。
- d) 单台电容器的容量选择应按电容器组单相容量和每相电容器的串、并联台数以及保护方式确定，并宜尽可能选用大容量产品。
- e) 置放在绝缘台上的串联段数为两段及以上的电容器宜选用单套管结构。
- f) 电容器组每相电容值误差应不超过设计值 $\pm 5\%$ ，三相间偏差不超过 2%。
- g) 单台电容器的技术条件应满足 GB/T 11024.1 和 ZB K48004 的规定，成组电容器的设计参考 GB 50277。

9.4.2 熔断器

- a) 单台电容器保护使用的外熔断器宜采用喷逐式熔断器。
- b) 熔断器的熔丝额定电流按电容器额定电流的 1.5~2 倍选取。
- c) 熔断器的耐爆能量应大于并联段全部电容器在 1.1 倍额定电压下所储存的能量。
- d) 熔断器的额定电压、耐受电压、开断性能、熔断特性、抗涌流能力、机械性能和电气寿命均应符合现行标准 GB 15166.5。

9.4.3 放电装置

- a) 放电装置的绝缘水平应与接入处电网绝缘水平一致。放电装置的额定端电压不应低于电容器组的额定电压，其稳态过电压允许值应与电容器组相一致。
- b) 放电装置的放电特性应满足：
 - 1) 手动投切电容器组的放电装置，应能使电容器组三相及中性点的剩余电压在 5 min 内自额定电压峰值降至 50V 以下；
 - 2) 采用开关自动投切电容器组的放电装置，应能使电容器组三相及中性点的剩余电压在 5s 内自电容器组额定电压峰值降至 0.1 倍额定电压以下。
- c) 放电装置的容量应满足在最大放电容量下放电时的热稳定要求。当放电装置带有二次线圈并用于保护和测量时，应满足二次负荷和电压变比误差的要求。
- d) 当采用电压互感器作放电装置时，宜采用全绝缘产品，其相关技术特性应符合放电装置的规定。

9.5 滤波（串联）电抗器

- a) 型式：一般采用干式空心电抗器。
- b) 额定电流：电抗器的额定电流值应按流过的基波电流和相关频次的谐波电流方均根合成值考虑，稳态过电流一般应不超过其额定电流的 1.35 倍，其谐波电流容量应由设计确定。
- c) 电抗值允许偏差：

- 1) 在额定电流下电抗值的允许偏差为 $\pm 2\%$;
- 2) 对于空心式电抗器在所允许过电流情况下的电抗值应等于其额定电流下的电抗值;
- d) 滤波电抗器的电感值一般采用连续或抽头调节, 其调节范围至少为 $\pm 5\%$ 。
- e) 电抗器的品质因数 Q 值应根据调谐要求和电抗器的型式确定, 空心电抗器的 Q 值一般为 $50 \sim 100$ 。
- f) 最大允许短路电流:
 - 1) 装于电容器组电源侧的电抗器, 在电抗率为 4% 及以上时, 应能承受 25 倍额定电流, 持续 $2s$ 而不产生热的和机械的损伤; 若电抗率小于 4% , 则根据计算结果与制造厂协商确定;
 - 2) 装于电容器组中性点侧的电抗器, 应能承受额定电流 20 倍的合闸涌流冲击。
- g) 电抗器噪声水平不超过 65dB 。
- h) 其余要求参考 GB 10229, 特殊要求由供方和需方共同商定。

9.6 断路器

- a) 用于 SVC 的断路器, 除应满足一般断路器的技术条件 (GB 1984) 外, 还应符合下列要求:
 - 1) 用于 FC 的断路器应具备开断相应容性电流的能力, 并且开断时, 不应重击穿;
 - 2) 应能承受合闸涌流, 以及工频短路电流和电容器高频放电电流的联合作用;
 - 3) 经常投切的断路器, 应具备频繁操作的能力。
- b) SVC 的总断路器应具有投切其所连接的全部无功补偿装置最大输出电流和短路电流的能力; 分组断路器不满足开断短路电流的要求时, 应增设开断短路电流的总断路器, 条件允许时, 分组支路的断路器可采用不承担开断短路电流的开关设备。
- c) 当支路额定电流、短路开断能力、恢复电压上升速率等要求不能满足时, 可采用较高电压等级断路器, 必要时也可采用加装并联小电容的方法满足恢复电压上升速率。

9.7 隔离开关

- a) 隔离开关应按电压等级、最大稳态电流和故障暂态电流选择。
- b) 隔离开关的设置用于保证 SVC 主要部件维修时和系统带电 (或可能带电) 部分有明显断开点。根据电容器放电或检修安全需要, 还应适当配置接地开关。
- c) 其余要求参考 GB1985, 特殊要求由供方和需方共同商定。

9.8 避雷器

- a) SVC 的避雷器用于限制操作过电压, 应选用无间隙金属氧化物避雷器。
- b) 避雷器的额定电压应为正常运行线电压的上限以及系统单相接地引起的工频电压升高, 并留有一定裕度。
- c) 设计中应校验避雷器的通流容量以确保运行安全。对保护滤波器的避雷器, 应以在电源侧发生单相接地时, 断路器发生操作重燃过电压为校验其通流容量的条件。
- d) 其余要求参考 GB 11032, 特殊情况下如需采用阻容吸收装置, 由供方和需方共同商定。

9.9 专用变压器 (若需用时)

- a) 如 SVC 通过变压器接入电网, 则变压器绝缘水平应与接入处电网绝缘水平一致。
- b) 变压器应能输出 100% 的无功电流, 其设计铁心磁通密度应低于一般用途的变压器。
- c) 变压器能耐受正常谐波电流。
- d) 其余要求参考 GB/T6451, 特殊要求由供方和需方共同商定。

9.10 控制系统

9.10.1 控制系统监控各部件的运行状态, 使 SVC 满足设计的要求, 达到各预定的目标, 例如 SVC 运行范围, 电压无功控制, 增加系统阻尼, 优化无功潮流, 改善功率因数等。

9.10.2 应具备计算、自动调节、监视、保护、通信、启动、停止顺序控制、文件记录等功能。

9.10.3 SVC 控制系统按预定的程序使 SVC 启动、停止、按规定顺序投切各组支路、调节 TCR 输出, 保护 SVC 本身不受损坏, 不使事故扩大。

9.10.4 通过通讯接口与站控和上级控制（或调度中心）保持相互传送信息和运行命令。

9.10.5 其余要求参考本系列标准第4部分《控制系统》。

9.11 保护及故障录波设备

9.11.1 功能

除了通过控制系统对晶闸管阀提供保护性控制外，还应对于可能发生的异常运行情况提供常规保护及故障录波。

9.11.2 保护设备

9.11.2.1 结构和配置

- a) 继电保护设备可以单独组柜，也可以分散配置。
- b) 继电保护设备从电流互感器、电压互感器等传感器上取信号。
- c) 过电压保护器件（避雷器、阻容吸收装置）根据系统设计配置。
- d) 联切功能根据系统设计实施。

9.11.2.2 设计性能和要求

- a) SVC系统中所有设备应具有相应的保护。
- b) SVC所有保护设备和系统应相互配合。
- c) SVC的保护应与用户系统的保护相互配合。

9.11.2.3 保护要求

保护的一般要求如下（不限于此）：

- a) 专用变压器
 - 1) 过电流
 - 2) 温度过高
 - 3) 差动
 - 4) 接地故障
 - 5) 瓦斯过量
 - 6) 压力突增
- b) 母线
 - 1) 过电流或电流差动
 - 2) 接地故障
- c) TCR电抗器
 - 1) 过电流
- d) 电容器组（或滤波器）
 - 1) 过电流
 - 2) 电流速断
 - 3) 过电压
 - 4) 欠电压
 - 5) 低频（可选）
 - 6) 不平衡（用于反映每组电容器内部故障的保护）
 - 7) 闭锁、联切（根据需要设置）
- e) TCR/TSC/TSR支路
 - 1) 过电流
 - 2) 过电压
 - 3) 欠电压

9.11.3 故障录波装置

- a) 可以单独组柜，也可以分散配置。

- b) 应具备事件的监视与记录, 即顺序事件记录 (SER) 功能, 包括内部和外部事件, 分辨率为 1ms 或更高。
- c) 应具备暂态故障记录功能 (TFR 功能)。采样频率应大于 5kHz (可调)。
- d) 所记录的模拟量至少应包括 TCR 支路和 FC 支路电流、SVC 接入点母线电压、调节目标的电压或电流等。
- e) 所记录的开关量至少应包括 SVC 断路器、隔离开关、主变压器总断路器 (SVC 接入侧)、控制器发出的故障录波启动信号等。
- f) 其它的基本技术要求参考 DL/T553。

9.12 表计和监控显示

就地或远程监控柜至少有以下显示项目:

- a) 启动和停机的过程
- b) SVC 运行指示
- c) SVC 停机指示
- d) SVC 总的无功功率和三相电流
- e) 晶闸管阀和相控电抗器的三相电流和三相线电流
- f) 变压器高压侧电压 (可以切换测量三相线电压)
- g) 变压器低压侧电压 (可以切换测量三相线电压)
- h) 参考电压整定值
- i) 斜率整定值
- j) 每个滤波器支路的电流
- k) 状态和报警信息 (列表)

9.13 辅助设备

- a) 单台电容器至母线或熔断器的连接线以及电容器之间的连接线应采用软导线, 其长期允许电流不应小于单台电容器额定电流的 1.5 倍。
- b) 各回路的电器、导体和连线的长期允许电流, 不应小于该回路主设备 (电抗器、电容器、阀组) 额定电流的 1.5 倍, 且应考虑机械强度, 动稳定和热稳定的要求。
- c) 双星型电容器组的中性点连线和桥型接线电容器组的桥连线, 其长期允许电流不应小于电容器组的额定电流。
- d) 用于高压电容器组不平衡保护的电流互感器, 应符合下列要求:
 - 1) 绝缘水平应按接入处电网电压选择;
 - 2) 一次额定电流不小于最大稳态不平衡电流;
 - 3) 应能耐受故障状态下的短路电流和高频放电电流 (必要时装设间隙或避雷器等保护措施);
 - 4) 可按继电保护要求确定准确等级。
- e) 用于高压电容器组不平衡保护的电压互感器, 应符合下列要求:
 - 1) 绝缘水平应按接入处电网电压选择;
 - 2) 一次额定电压不应低于电容器组额定电压;
 - 3) 一次线圈作电容器的放电回路时, 应满足放电容量要求;
 - 4) 可按电压测量要求确定准确等级。
- f) 用于高电压的支持绝缘子、穿墙套管应按电压等级、泄漏距离、机械荷载以及通流容量等技术条件选择和校验。
- g) 辅助电源应包括维持 SVC 运行的所有必要的电源, 如降压变压器、交流配电盘、蓄电池、蓄电池充电器和 UPS 等。电源应足以提供给所有的泵、风机、控制系统、建筑物的冷却、供暖系统和照明设备。

10 其它要求

10.1 安装

- a) 电容器组的绝缘水平，应与电网绝缘水平相配合。当电容器与电网绝缘水平一致时，应将电容器外壳和框架可靠接地；当电容器的绝缘水平低于电网绝缘水平时，应将电容器安装在与电网绝缘水平相一致的绝缘框架上，电容器的外壳应与框架可靠连接。
- b) 电容器套管相互之间和电容器套管至母线或熔断器的连接线，应有一定的松弛度。严禁直接利用电容器套管连接或支承硬母线。单套管电容器组的接壳导线，应采用软导线由接壳端子上引接。
- c) SVC 中铜、铝导体连接应采取装设铜铝过渡接头或镀锡等措施。
- d) 电容器组的框架、框体结构件，电抗器的支架等钢结构件，应采取镀锌或其他有效的防腐措施。
- e) 当电容器装置未设置接地开关时，应设置挂接地线的母线接触面和地线连接端子。
- f) 电容器组的汇流母线应满足机械强度的要求，防止引起熔断器至母线的连接线松弛。

10.2 消防

- a) 电容器室及半露天布置的遮阳棚为丙类生产建筑物，其耐火等级为二级。电容器装置的支架及遮阳棚的支架、盖板均采用非燃烧性材料制作。
- b) 电容器装置与其它生产建筑物或主要电气设备之间的防火距离不应小于 10m，否则应设防火隔墙；当电容器装置与其它生产建筑物毗邻布置时，应设置不开门、窗、洞口的防火隔墙，防火隔墙距两侧的门、窗距离不得小于 2m。

注：电容器防火间距系指设备凸型外缘与建筑物的墙体外缘的距离。

- c) 电容器装置必须就近设置消防设施，并应设有消防通道。
- d) 连接电容器室内的沟管道出入口，应设置防止液体溢流或火势蔓延的保护设施。
- e) 电容器室不宜设置采光玻璃窗。电容器室的门应向外开启；相邻两电容器室之间的防火隔墙如需开门时，应安装乙级防火门，并能向两个方向开启。
- f) 户内晶闸管阀装置的防火要求应满足 GB 50060《3~110kV 高压配电装置设计规范》第 5.4.1 条～第 5.4.8 条的规定。

10.3 采暖通风

- a) 电容器室的通风量应按消除室内余热考虑。余热量包括设备散热量和通过围护结构传入的太阳辐射热。
- b) 电容器室的夏季排风温度应根据电容器的环境温度类别确定，并且不应超过电容器所允许的最高环境空气温度（见表 2）。

表2 电容器允许的最高环境空气温度（℃）

电容器环境温度类别	A	B	C	D
最高环境空气温度	40	45	50	55

- c) SVC 的冷却机室应优先采用自然通风。当采用自然通风不能满足要求时，可采用自然进风、机械排风或加装空调。
- d) 位于集中采暖区的 SVC 控制室，阀厅和冷却机室应设置采暖系统，室内采暖计算温度取 10℃。
- e) 对于日平均温度低于或等于 +5℃ 的天数每年在 70~89 天的地区，SVC 的阀厅宜设置电热采暖。室内采暖计算取 +5℃。设置电热采暖时，不得使用直接裸露在空气中的电阻丝的电加热器具，并且应具有良好的接地措施。
- f) SVC 配电装置室应设置不少于 10 次/小时换气次数的事故排风装置。事故排风机可兼作通风用。事故排风机的开关装在门口便于操作的地方。
- g) 对于夏季外通风计算温度高于或等于 32℃ 的地区，SVC 控制室和阀厅还应设置以降温为主的空调系统。空调机型宜选用风冷式。
- h) SVC 控制室和阀厅的夏季计算热负荷包括以下几项：
 - 1) 围护结构传热量和太阳辐射热量；

2) 电子仪表及电气设备散热量;

3) 照明散热量。

在上述计算中,室内空气计算温度取 35℃。

i) 如果有特殊要求,则可根据电气设备的要求设置采暖和空调系统。

j) 电容器室和 SVC 各个房间的进排风口应有防雨雪和小动物进入的设施。在风沙较大的地区,进风口宜设过滤装置。在严寒地区,进排风口宜有防寒措施。

10.4 供货及服务范围

见附录B。

附 录 A
(规范性附录)
晶闸管阀的损耗计算方法

理论上,测量出单个模块或晶闸管级的损耗,从这些测量就可以计算出阀体的总损耗。然而,用电和(或)热的方法确定损耗实现起来很难。下面的计算方法可以作为一个统一的标准取代上述测量(参考 IEEE std 1031-2000)。

A.1 总损耗

损耗的组成:

$$P_{valve} = P_{cvalve} + P_{Tsw} + P_{vd} + P_{sn} \quad (A.1)$$

式中:

P_{valve} — 晶闸管阀的总损耗

P_{cvalve} — 晶闸管阀的通态损耗

P_{Tsw} — 晶闸管总的开关损耗,等于 $P_{Tswon} + P_{Tswoff}$

P_{vd} — 均压回路损耗

P_{sn} — 吸收回路损耗

A.2 通态损耗

对于晶闸管的每个不同触发角,应按下面的方法来估算晶闸管的电流。

晶闸管通态平均电流:

$$I_{TAV} = I_{TCR} \times \frac{\sqrt{2}}{\pi} \times [\sin(\pi - \alpha) - (\pi - \alpha) \cos(\pi - \alpha)] \quad (A.2)$$

式中:

I_{TAV} — 晶闸管通态平均电流

I_{TCR} — TCR 晶闸管阀全导通时的基波电流有效值

α — TCR 控制角 ($\pi/2 \sim \pi$ 弧度)

晶闸管电流有效值:

$$I_{Trms} = I_{TCR} \times \sqrt{\frac{(\pi - \alpha) \times [1 + 2 \cos^2(\pi - \alpha)] - 1.5 \sin[2(\pi - \alpha)]}{\pi}} \quad (A.3)$$

式中:

I_{Trms} — 晶闸管电流有效值

晶闸管阀的通态损耗计算:

$$P_{cvalve} = 3 \times 2 \times [n \times (U_{TO} \times I_{TAV} + r_T \times I_{Trms}^2) + R_{busbar} \times I_{Trms}^2] \quad (A.4)$$

式中:

n — 阀体中串联的晶闸管个数

U_{TO} — 晶闸管的门槛电压

r_T — 晶闸管的斜率电阻

R_{busbar} — 不考虑晶闸管时的阀端间电路直流电阻

A.3 晶闸管开通时的扩散损耗

TCR 阀开通损耗计算如下：

假设每个触发脉冲的损耗是 0.2 焦耳，尽管具体值由单个晶闸管决定，但在这计算中是一般可以接受的值。

$$P_{Tswon} = 3 \times 2 \times n \times 0.2 \times f$$

式中：

f — 系统基波频率

对于 TSR 和 TSC 的阀，开关损耗一般采用另一个值，按下式：

$$P_{Tsw} = 0.03 \times P_{cvalve} \quad (A.5)$$

A.4 晶闸管的关断损耗

对于 TCR 阀，关断损耗按下式计算：

$$P_{Tswoff} = 3 \times 2 \times Q_{rr} \times \sqrt{2} \times U_1 \times \sin(\alpha) \times f \quad (A.6)$$

式中：

P_{Tswoff} — 晶闸管关断损耗

Q_{rr} — 晶闸管恢复电荷

U_1 — 阀连接电压（基波有效值）

Q_{rr} 定义为：

$$Q_{rr} = k_1 \times (dI_T/dt)^{0.6}$$

式中：

Q_{rr} — 晶闸管恢复电荷

k_1 — 晶闸管型号规定的参数，是通过实验获得的估计值（表示在相应的运行结温下晶闸管存储电荷与关断时的 dI_T/dt 之间的关系）

dI_T/dt — 电流过零点时的上升率，单位为 A/μs

上述方程给出了总损耗的求解方法，其中晶闸管的损耗系数为 $(1-k_Q)$ ，吸收电阻的损耗系数为 k_Q ，这里的 k_Q 是恢复电荷的分配系数。

$$k_Q = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} \quad (A.7)$$

式中：

k_Q — 晶闸管参数。

方程 (A.6) 可以用图 A.1 来表示。

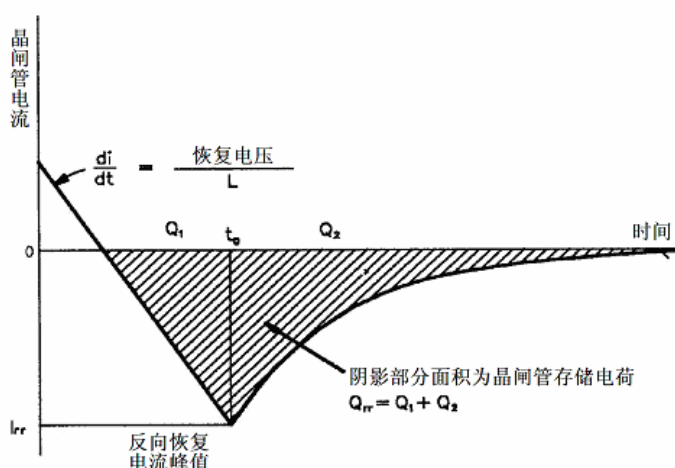


图 A.1 晶闸管储存的电荷

A.5 均压回路损耗

均压回路的损耗取决于晶闸管两端的电压。这个电压由触发角决定，计算式如下：

$$U_{1\alpha} = U_1 \times \sqrt{(2/\pi) \{ \alpha - \pi/2 - [1/2 \times \sin(2\alpha)] \}} \quad (\text{A.8})$$

式中：

$U_{1\alpha}$ — 晶闸管闭锁时的电压（有效值）。

损耗计算式：

$$P_{vd} = 3(U_{1\alpha}^2) / (R_{vd} \times n)$$

式中：

R_{vd} — 均压电阻值（每一级）

A.6 吸收回路损耗

TCR 中，吸收回路损耗可由下式估算：

$$P_{sn} = 3 \times f \times C_{sn} / n \times [\sqrt{2} \times U_1 \times \sin(\alpha)]^2 \times 2.0 \quad (\text{A.9})$$

式中：

C_{sn} — 吸收回路电容值（每一级）

附 录 B
(资料性附录)
供货及服务范围

需要由供方提供的 SVC 设备、材料和服务一般包括下列内容：

- a) SVC 晶闸管阀和阀冷却设备；
- b) 专用变压器、配电装置、断路器、隔离开关、接地开关、电压互感器、电流互感器、避雷器和接地变压器；
- c) 电抗器、电容器、电阻器及成套设备；
- d) SVC 现场控制、保护、报警和监视系统；
- e) 专用维护设备和工具；
- f) 操作和维护人员的培训；
- g) 备件；
- h) 试验和交付服务；
- i) 包括使用说明书在内的文件；

对于交钥匙工程，还要提供以下内容：

- j) SVC 建筑；
- k) SVC 用于安装母线的基础和结构，包括接地及地网的连接。
- l) SVC 站需配备的服务设施，包括配电间、围栏、排水设备、巡视通道和停车场；
- m) 备件

作为 SVC 供货的一部分，供方应同时提供 SVC 装置的全部基本备件。基于 SVC 的特殊设计，提供充足的备件以满足规定的可靠性和利用率要求是供方的责任。

1) 备件交付

将 SVC 交付给用户时应准备备件清单，到质保期结束时再一次核实清单，如有任何不足，应由供方补充，这样到质保期结束时，备件清单的储存应达到 100%的水平。

2) 备件存储

SVC 的备件应在现场储存。SVC 工程的设计应包括适合的存储设施。

具体供货及服务范围由双方合同确定。

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1010.2—2006

高压静止无功补偿装置 第2部分 晶闸管阀的试验

High-voltage static VAR compensator

Part 2 Testing of thyristor valves

2006-09-14 发布

2007-03-01 实施

中华人民共和国发展与改革委员会 发布

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语	1
4 型式试验、出厂试验和选项试验的共同要求	2
4.1 试验一览表	2
4.2 试验目的	3
4.3 型式试验和选项试验的原则	4
4.4 试验条件	4
4.5 型式试验中允许故障的元件数量	5
4.6 试验结果的文件要求	5
5 TCR 和 TSR 阀的型式试验	6
5.1 阀端对地的绝缘强度试验	6
5.2 阀间绝缘强度试验（仅适用于多重阀单元）	7
5.3 阀端间绝缘强度试验	7
5.4 运行试验	10
6 TSC 阀的型式试验	11
6.1 阀端对地绝缘强度试验	11
6.2 阀间绝缘强度试验（仅适用于多重阀单元）	12
6.3 阀端间绝缘强度试验	12
6.4 运行试验	15
7 电磁干扰	18
7.1 试验目的	18
7.2 试验步骤	18
8 出厂试验	18
8.1 外观检查	19
8.2 连接检查	19
8.3 均压/阻尼回路检验	19
8.4 耐受电压检验	19
8.5 辅助设备检验	19
8.6 触发检验	19
8.7 水冷系统压力试验	19
9 TCR 和 TSR 阀的选项试验	19
9.1 过电流试验	19
9.2 恢复期间瞬时正向电压试验	20
9.3 非周期触发试验	20
10 TSC 阀的选项试验	22
10.1 恢复期间瞬时正向电压试验	22
10.2 非周期触发试验	22

前 言

本标准是“高压静止无功补偿装置”系列标准中第2部分，该系列标准共分为5个部分：

- 第1部分：系统设计
- 第2部分：晶闸管阀的试验
- 第3部分：控制系统
- 第4部分：现场试验
- 第5部分：密闭式水冷却装置

本标准主要参照采用了国际电工委员会（IEC）标准 IEC 61954《Power electronic for electrical transmission and distribution systems- Testing of thyristor valves for static VAR compensators》和国标 GB/T ××××-200×《输配电系统的电力电子技术—静止无功补偿器用晶闸管阀的试验》的内容，并总结多年来的实际工程经验编写而成，对其中只规定了范围的数据，给出具体量值。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由中国电力企业联合会归口。

本标准起草单位：

主要起草单位：中国电力科学研究院

参加起草单位：

本标准主要起草人：

本标准由中国电力科学研究院负责解释。

高压静止无功补偿装置 第2部分 晶闸管阀的试验

1 范围

本标准规定了 6kV~66 (63) kV 电压等级的静止无功补偿装置 (SVC) 的晶闸管阀试验。这些晶闸管阀适用于输配电系统用静止无功补偿器 (SVC) 的组成部分即晶闸管控制电抗器 (TCR)、晶闸管投切电抗器 (TSR) 和晶闸管投切电容器 (TSC)。

本标准所涉及的内容包括晶闸管阀的高压部分、晶闸管级和它的均压吸收电路、触发用电源和阀控制及保护等有关部门。

本标准主要应用于单个阀单元 (单相)，也适用于多重阀单元 (多相)，低压阀试验可参照此标准。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单 (不包括勘误的内容) 或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB 311.1-1997	高压输变电设备的绝缘配合 (IEC 71-1-1993, NEQ)
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 (IEC 60071-2-1996, EQV)
GB/T 7354-2003	局部放电测量 (IEC 60270-2000, IDT)
GB/T 16927.1-1997	高电压试验技术 第一部分: 一般试验要求 (IEC 60-1-1989, EQV)
GB/T 16927.2-1997	高电压试验技术 第二部分: 测量系统 (IEC 60-2-1994, EQV)
GB/T ××××.1-200×	高压直流输电晶闸管阀 第一部分: 电气试验 (IEC 60700-1-1998, EQV)
GB/T ××××-200×	输配电系统的电力电子技术—静止无功补偿器用晶闸管阀的试验
IEC 60071-3-1998	绝缘配合 第三部分: 相间绝缘配合、原理、规则和应用导则
IEC 61954-2003	Power electronic for electrical transmission and distribution systems- Testing of thyristor valves for static VAR compensators

3 术语

本标准采用了下列术语。

3.1 晶闸管级 thyristor level

晶闸管阀的组成部分，由一对反并联的晶闸管 (或晶闸管和二极管反并联) 构成，包括辅助电路 (触发、保护、均压、阻尼元件等)。

3.2 晶闸管阀 (TV) thyristor valve

晶闸管级的电气和机械联合体，配有连接、辅助部件和机械结构，它可与 SVC 每相的电抗器或电容器相串联。

3.3 阀结构 valve structure

将阀与地电位或阀与阀之间的绝缘保持在适当的水平上的机械结构。

3.4 阀段 valve section

由数个晶闸管和其它组件构成的电气组合，能用于试验。它呈现与完整阀相同的电气特性，但只具有其部分电压阻断能力。

3.5 阀基电子单元 (VBE) valve base electronics

处在电位上的电子单元，是 SVC 控制系统与晶闸管阀之间的接口。

3.6 均压电路 grade circuits

与各晶闸管级并联的电路，用以使各串联级的电压分布均匀，同时吸收由于不平衡触发产生的电荷。

3.7 电压击穿 (VBO) 保护 voltage break-over protection

晶闸管的一种过电压保护，当电压达到设定的电压值时使晶闸管触发开通。一般采用击穿二极管 (BOD)。

3.8 晶闸管电子电路 (TE) thyristor electronics

在阀电位上执行控制功能的电子电路。接受阀基电子单元的控制信号，并向阀基电子单元回报阀的信息。

3.9 冗余晶闸管级 redundant thyristor levels

晶闸管阀中可以被短接，而仍能满足阀规定的型式试验要求的晶闸管级。

3.10 多重阀单元 multiple valve unit; MVU

几个阀组装在同一个机械结构之中，不允许分开试验（如：三相阀）。

4 型式试验、出厂试验和选项试验的共同要求

4.1 试验一览表

SVC 阀的试验分为型式试验、出厂试验和选项试验。表1中列出 TCR、TSR 和 TSC 阀的试验项目、试验分类以及所在的条款号。

表1 SVC 晶闸管阀试验项目表

试验	条款和子条款		试验对象
	TCR/TSR	TSC	
阀端对地绝缘强度试验			
交流电压试验	5.1.1		阀
交流-直流电压试验		6.1.1	阀
雷电冲击试验	5.1.2	6.1.2	阀
阀间绝缘强度试验（仅对多重阀单元）			
交流电压试验	5.2.1		多重阀单元
交流-直流电压试验		6.2.1	多重阀单元
雷电冲击试验	5.2.2	6.2.2	多重阀单元
阀端间绝缘强度试验			
交流电压试验	5.3.1		阀
交流-直流电压试验		6.3.1	阀
操作冲击试验	5.3.2	6.3.2	阀
运行试验			
周期触发及熄灭试验	5.4.1		阀或阀段
过电流试验		6.4.1	阀或阀段
最小交流电压试验	5.4.2	6.4.2	阀或阀段
温升试验	5.4.3	6.4.3	阀或阀段
电磁干扰			
操作冲击试验	7.2.1	7.2.1	阀

非周期触发试验	7.2.2	7.2.2	阀
出厂试验			
外观检查	8.1	8.1	
连接检查	8.2	8.2	
均压/阻尼回路检查	8.3	8.3	
耐压检查	8.4	8.4	
辅助部件检查	8.5	8.5	
触发检查	8.6	8.6	
冷却系统压力试验	8.7	8.7	
选项试验			
过电流试验	9.1		阀或阀段
恢复期间瞬时正向电压试验	9.2	10.1	阀或阀段
非周期触发试验	9.3	10.2	阀

4.2 试验目的

以下所规定的试验适用于阀（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地之间的冷却系统、触发和监控电路及其连接光纤。阀控制系统和阀基电子单元等设备在阀试验中是必须的，但它们自身不是试验对象。

4.2.1 绝缘强度试验

应进行以下绝缘强度试验：

- 交流电压；
- 交流和直流叠加电压（仅对 TSC 阀）；
- 冲击电压。

4.2.1.1 阀结构试验

规定了阀（其阀端短接）对地以及多重阀单元的阀间电压耐受能力要求的试验。

试验应验证：

- 有足够的距离防止闪络；
- 阀结构（包括冷却管路、光纤以及脉冲传输及分配系统的其它绝缘部件），没有击穿放电；
- 在交流和直流情况下，局部放电的起始和熄灭电压应大于阀结构在稳态运行中出现的最高电压。

4.2.1.2 阀端间试验

验证设计的阀端子之间耐受过电压的能力。

试验应验证：

- 使阀的内部绝缘足以耐受规定的电压；
- 在交流和直流情况下，局部放电的起始和熄灭电压应大于阀在稳态运行中出现的最高电压；
- 过电压保护触发系统(如有)可按预设值动作；
- 在运行条件下晶闸管有足够的 dv/dt 能力。

4.2.2 运行试验

验证阀的设计在正常和异常重复情况以及在暂态故障情况下，耐受电压电流联合强度的能力。

在规定的条件下，试验应验证：

- 阀运行正常；
- 开通、关断时电压电流强度都在晶闸管和其它内部电路允许范围内；
- 水冷系统的流量适宜，无元件过热；
- 阀有足够的过电流耐受能力。

4.2.3 电磁干扰试验

验证阀抗电磁干扰的能力。

4.2.4 出厂试验

检验阀制造的正确性，试验应验证：

- 用于阀体的全部材料、部件和分立组件装配正确；
- 阀设备的预期功能和预定的参数都在可接受范围之内；
- 晶闸管级和阀或阀段应具备的耐受电压能力。

4.2.5 选项试验

选项试验是按供需双方协议进行的附加试验，目的与本标准4.2.2条款相同。

4.3 型式试验和选项试验的原则

应采用以下指导原则：

- 为了验证阀的设计满足规定的要求，型式试验应至少在一个阀或在适当数量的阀段上进行，且所有型式试验应在同一个阀或阀段上进行；
- 某些型式试验既可在完整阀也可在阀段上进行，如表1所示；
- 对于在阀段上进行的型式试验，所试验的晶闸管级总数不少于一个阀中晶闸管级的数量；
- 用于型式试验的阀或阀段应先通过全部出厂试验。在全部型式试验完成后，阀和阀段应按出厂试验的标准再次检验；
- 试验选样应是随机的；
- 绝缘强度试验按照 GB/T 16927.1 和 GB/T 16927.2 中适用的部分进行；
- 单项试验可按任意顺序进行；
- 如能证明阀与以前试验的阀相似，供方可提交以前经证实的型式试验报告（至少要等同于合同规定要求）以取代型式试验。

4.4 试验条件

4.4.1 通则

绝缘强度试验应在组装完毕的阀上进行，而某些运行试验既可在整个阀上进行也可在阀段上进行。可在阀段上进行的试验项目如表1所示。

4.4.1.1 绝缘强度试验

阀应组装上除避雷器以外的全部辅助部件，阀电子单元加电，且水冷系统处于实际运行条件下。对于不是试验对象的阀结构中的金属部分（或多重阀单元中的其它阀），试验前应短接在一起并接地。

试验中采用 GB 311.1 中交流工频和雷电冲击的标准值，并执行 GB/T 16927 的标准步骤。当不符合标准规定试验条件时，应采用现场空气密度校正系数 k_d 。 k_d 的值按下式确定：

$$k_d = \frac{b_1}{b_2} \times \frac{273 + T_2}{273 + T_1}$$

式中：

b_1 ——试验室环境大气压力 (N/m²)

T_1 ——试验室环境空气温度 (°C)；

b_2 ——标准参考大气压 101.3 kN/m² (即 101.3 毫巴)，校正到设备安装地点的海拔高度；

T_2 ——设计的阀厅最高空气温度 (°C)。

校正公式如下：

$$U = k_d \times U_0$$

式中：

U_0 ——标准中规定的耐压试验电压值 (V)；

U ——在非标准情况下,校正后电压值(V)。

4.4.1.2 运行试验

在条件允许的情况下,应对整个晶闸管阀进行试验。但在任何情况下,试验阀段的串联晶闸管级数都不能少于3级。

试验时水冷系统的工况除应与实际运行时相同外,还应将流量和温度设置在最不利的值下对阀段进行考验。如果试验中不具备这些条件,可由供需双方协议采用一个修正系数。

4.4.2 试验中阀的温度

4.4.2.1 绝缘强度试验时的阀温度

试验应在室温下进行。

4.4.2.2 运行试验时的阀温度

除非另有规定,试验应该在实际运行中可能产生的最高元件温度的条件下进行。

如果几个部件不能达到温度的最高时,则需要在不同条件下进行。

4.4.3 冗余晶闸管级

4.4.3.1 绝缘强度试验

除非另有规定,短接冗余晶闸管级,对整个阀进行试验。

4.4.3.2 运行试验

运行试验中,冗余晶闸管级不应被短接。试验电压和回路阻抗应根据比例系数 k_n 进行调整。

$$k_n = \frac{N_{tot}}{N_t - N_r}$$

式中:

N_{tot} ——被试品的总的串联晶闸管级数;

N_t ——阀的总的串联晶闸管级数;

N_r ——阀的总的冗余晶闸管级数。

注: 如果阀的晶闸管级数比较少,冗余级数在总级数中占有较大比例,可能会导致阀中的某些组件承受强度过大。

这时可以在运行试验中仍将冗余晶闸管级短接,但试验电压和回路阻抗不再按照比例系数 k_n 进行调整。

4.5 型式试验中允许故障的元件数量

阀和阀段每次试验前应进行检查。任何预先的校核试验以及每项型式试验后也应进行检查以确定在试验过程中是否有晶闸管或辅助元件损坏。型式试验中发现的损坏晶闸管或辅助元件在进行另一项试验之前应修复。

在任何型式试验中允许一个晶闸管级短路损坏。如果某项型式试验项目之后发现有一个晶闸管级短路,则应修复失效级,重复该项试验(见GB/T ××××.1的4.4.1 b))。整个型式试验总共只允许两个晶闸管级短路损坏。

除短路级故障外,在型式试验过程中和事后检验出来的有故障但未导致该级短路的晶闸管级总数不超过两级。

在全部型式试验完成之后短路故障晶闸管级和其它故障晶闸管级的分布应该大体上是随机的,不应显示有任何设计上的缺陷。

4.6 试验结果的文件要求

4.6.1 试验报告

供方应提供阀或阀段全部型式试验的鉴定性试验报告。

供方应提供常规试验结果的记录。

4.6.2 型式试验报告的内容

晶闸管阀应具备型式试验报告。报告应包括:

a) 一般性数据,如:

- 1) 被试设备的标识（如类型、额定参数、图号、制造序号等）；
 - 2) 被试品主要部件标识（如晶闸管、阀电抗器、印刷电路板等）；
 - 3) 试验场所的名称和地点；
 - 4) 必要的相关环境条件（如温度、湿度、绝缘强度试验时的大气压力等）；
 - 5) 参考的试验规范；
 - 6) 试验日期；
 - 7) 负责人姓名和签名；
 - 8) 需方监造员（如有）的签名和授权他的证据（如要求）。
- b) 用于特别试验具体试验电源（如冲击电压发生器、直流电压源等）的描述，比如制造厂名、额定参数、特性等；
 - c) 测量仪器说明，包括保证精度及最后校验日期等；
 - d) 每项试验安排的详细信息（如电路图）；
 - e) 试验步骤的说明；
 - f) 经同意的偏差或放弃意见；
 - g) 结果列表，包括照片、示波图及图形等；
 - h) 元件故障及其它不正常事件的报告；
 - i) 试验结论。

5 TCR 和 TSR 阀的型式试验

5.1 阀端对地的绝缘强度试验

试验时每个晶闸管级应短接。

对于多重阀单元（MVU）中的阀，同一结构中其它阀的每个晶闸管级应短接并接地。试验应对多重阀单元的每个阀分别进行，除非多重阀单元的机械结构布局使之不必要。

5.1.1 交流试验

5.1.1.1 试验目的

见 4.2.1.1。

5.1.1.2 试验值和波形

短时工频耐受电压 U_{ts1} 及局放试验电压 U_{ts2} 可按表 2 确定。

表2 阀端对地绝缘试验电压推荐值

额定电压 (有效值, kV)	试验电压 U_{ts1} (有效值, kV)	试验电压 U_{ts2} (有效值, kV)
6	25	10
10	42	17
15	45	25
20	55	33
35	95	58
66(63)	140	110

5.1.1.3 试验步骤

在阀端和地之间，按照规定的时间段施加规定的试验电压 U_{ts1} 和 U_{ts2} 。

- a) 调节电压，从 U_{ts1} 的 50% 升到 100%；
- b) 保持 U_{ts1} 1 分钟；
- c) 降低电压到 U_{ts2} ；
- d) 维持电压 U_{ts2} 10 分钟，记录局部放电水平，降低电压到零；

- e) 如阀中对局部放电灵敏的元件已经单独得到试验验证, 则在上一步 d) 的最后 1 分钟记录下来的周期局部放电峰值应不大于 200 pC。否则, 周期局部放电峰值应不大于 50 pC;
- f) 起始和熄灭电压的测量应按照 GB/T 7354 进行。

5.1.2 雷电冲击试验

5.1.2.1 试验目的

见 4.2.1.1。

5.1.2.2 试验值和波形

采用标准 1.2/50 μ s 波形。

试验电压峰值应按表 3 确定。

表3 阀端对地雷电冲击试验电压推荐值

额定电压 (有效值, kV)	对地冲击电压 (峰值, kV)
6	60
10	75
15	105
20	125
35	185
66(63)	325

5.1.2.3 试验步骤

试验应分别将三次正极性和三次负极性雷电冲击施加到被短接的阀两端与地之间。

5.2 阀间绝缘强度试验 (仅适用于多重阀单元)

每个阀中的每个晶闸管级都应短接。

试验应对相同结构中的任两个阀间的绝缘都进行验证, 除非多重阀单元的机械结构布局使之不必要。

5.2.1 交流试验

5.2.1.1 试验目的

见 4.2.1.1。

5.2.1.2 试验值和波形

短时工频耐受电压 U_{ts1} 和局放电压 U_{fs2} 见表 2。

5.2.2 雷电冲击试验

5.2.2.1 试验目的

见 4.2.1.1。

5.2.2.2 试验值和波形

采用标准 1.2/50 μ s 波形。

试验电压的峰值见表 3。

5.2.2.3 试验步骤

试验应分别将三次正极性及三次负极性的冲击电压施加到各阀之间。

5.3 阀端间绝缘强度试验

对于多重阀单元中的阀, 这些试验只需在一个阀上进行。相同结构中其它阀的每个晶闸管级应短路并接地。

5.3.1 交流试验

5.3.1.1 试验目的

见 4.2.1.2。

5.3.1.2 试验值及波形

试验电压值 U_{nv1} 取决于阀的保护系统，并且等于 U_{nv11} 和 U_{nv12} 中的较小者。如果 U_{nv11} 和 U_{nv12} 都不能确定，则采用 U_{nv13} 。

U_{nv11} 由阀 VBO 保护触发阈值确定。

U_{nv12} 由避雷器保护动作值确定。

U_{nv13} 由能够发生的最大暂时过电压值确定。

U_{nv11} 、 U_{nv12} 和 U_{nv13} 按下列各式进行计算：

$$U_{nv11} = \frac{k_{s11} \times U_1}{\sqrt{2}}$$

式中：

U_1 ——在配备 VBO 保护情况下阀端之间最大瞬时电压值，且恰好不会引起 VBO 保护触发系统的动作；

k_{s11} ——试验安全系数， $k_{s11}=0.95$ ；

$$U_{nv12} = \frac{k_{s12} \times U_2}{\sqrt{2}}$$

式中：

U_2 ——跨接在阀端间的避雷器（如配备）的保护电压；

k_{s12} ——试验安全系数， $k_{s12}=1.1$ ；

$$U_{nv13} = \frac{k_{s13} \times U_3}{\sqrt{2}}$$

式中：

U_3 ——在给定的最严重瞬时过压条件下，阀端间最大重复电压的峰值，包括熄灭过冲；

k_{s13} ——试验安全系数， $k_{s13}=1.3$ ；

注：上述试验可能因一些阀元件的过热而不能实现。在这种情况下，按供需双方的协议，将1分钟交流耐压试验可由几个较短时间段的试验代替，其最短试验时间为规定的过电压的最大可能持续时间的两倍，但总试验时间不短于1分钟。

局放试验电压 U_{nv2} 应取 U_{nv1} 和 U_{nv21} 中的较小者。 U_{nv21} 由下式确定：

$$U_{nv21} = \frac{k_{s2} \times U_{mv2}}{\sqrt{2}}$$

式中：

U_{mv2} ——最严重稳态运行条件下，阀端间最大重复电压的峰值，包括熄灭过冲；

k_{s2} ——试验安全系数， $k_{s2}=1.2$ ；

本项所列的试验电压 U_{nv1} 和 U_{nv2} 等如果选取有困难，可根据表 4 进行选择。

表4 阀端间交流耐压试验电压推荐值

额定电压 (有效值, kV)	试验电压 U_{nv1} (有效值, kV)	试验电压 U_{nv2} (有效值, kV)
6	10	7.5
10	18	13
15	26.5	19
20	35	25

35	63	45
66(63)	118(113)	82.5(79)

5.3.1.3 试验步骤

在给定的时间段内，在阀两端施加规定的试验电压，阀的一端可接地。

按照 5.1.1.3 的 a) ~f) 进行试验，用 U_{tv1} 代替 U_{ts1} ，用 U_{tv2} 代替 U_{ts2} 。

若有 VBO 触发保护，它应在此项试验中不动作。

5.3.2 操作冲击试验

5.3.2.1 试验目的

见 4.2.1.2。试验的另外目的是验证阀抗电磁干扰的能力（参见 7）。

5.3.2.2 试验值和波形

波形 1：采用接近典型熄灭波形的 20/200 μ s 波形，或是用系统研究所得的近似波形代替。

注：如果设计者或需方已经研究过该参数及系统产生的操作波的波形，应按研究结果进行，包括仿真研究或模型测试以及运行经验的波形数据。

波形 2：采用标准的 250/2500 μ s 波形。

a) 试验 1

验证阀保护触发系统在试验电压值时不动作。

波形 1 和波形 2 的试验电压值 U_{tsv1} 可按下式计算：

$$U_{tsv1} = k_s \times U_{pf}$$

式中：

U_{pf} ——在运行条件下，阀的保护触发系统不动作时阀所必须耐受的冲击电压值；

k_s ——试验安全系数， $k_s=1.05$ 。

b) 试验 2

验证阀的绝缘水平以及阀的保护触发系统能够正确动作。

1) 采用避雷器保护的阀：

波形 1 和波形 2 的预期试验电压值 U_{tsv2} 可按下式计算：

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{cms}$$

式中：

U_{cms} ——避雷器保护水平；

k_s ——试验安全系数， $k_s=1.1$ 。

2) 采用 VBO 保护的阀：

波形 1 和波形 2 的预期试验电压值 U_{tsv2} 可按下式计算：

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{VBO}$$

式中：

U_{VBO} ——当冗余晶闸管级一起运行时，阀的最大 VBO 保护值；

k_s ——安全试验系数， $k_s=1.1$ 。

制造商应说明冗余晶闸管级一起运行时 VBO 保护触发范围的上下限，并通过试验检查触发电压确在此上下限门槛之内。

在阀电子单元没有初始储能的情况下重复此项试验。

注：如果阀的触发电路不从主电路取能，则不需要进行重复试验。

c) 试验 3

验证阀既不用避雷器也不用 VBO 保护时的绝缘水平。

波形 1 和波形 2 的试验电压值 U_{tsv2} 可按下式计算：

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{cms}$$

式中：

U_{cms} ——按 GB 311.1 可预见的操作冲击电压或由绝缘配合研究所确定的电压；

k_s ——试验安全系数， $k_s=1.3$ 。

阀应能耐受试验电压而不发生通断或绝缘击穿。

对无避雷器保护等情况，可根据表 5 选择操作冲击电压峰值。

表5 阀端间操作冲击试验电压推荐值

额定电压 (有效值, kV)	操作冲击电压 (峰值, kV)
6	16.5
10	29
15	43
20	57
35	99
66 (63)	188 (179)

5.3.2.3 试验步骤

阀的一端接地，在阀端间分别施加正负极性操作冲击各三次。

如不改变冲击发生器的极性，也可通过改变阀端位置用单极性的冲击发生器来完成。

特定的附加条件如下：

a) 试验 1：

阀保护触发系统工作，若设计中阀装有避雷器，试验电压低于保护水平，保护或控制系统不应使阀触发。

b) 试验 2：

阀保护触发系统工作，试验电压高于保护水平，如果 VBO 触发是基于检测到的单个晶闸管级电压动作，则试验过程中冗余晶闸管级应处于运行状态。

5.4 运行试验

5.4.1 周期触发和熄灭试验

5.4.1.1 试验目的

此项试验的主要目的是验证晶闸管阀在严酷的电压电流强度下周期性开通和关断的开关能力。试验同时验证晶闸管阀均压/阻尼电路实现其使电压分配均匀的正常运行功能。

如阀设计允许单个保护性触发（如 VBO）连续工作，此项试验也用来验证保护性触发电路自身的可靠动作以及该保护性触发晶闸管级的阻尼电路运行可靠性。

5.4.1.2 试验值和波形

SVC 阀试验应考虑能维持运行的最严重的暂时过电压。

在触发和熄灭过程中，施加在阀和阀段上的电流和电压波形应尽可能接近最严重的暂时过电压，主要是触发后 10~20 μ s 以及电流过零前 0.2 ms 到过零后 1 ms 之间。

下述各种情况的考核应不低于实际运行工况，且应考虑阀端间杂散电容和使晶闸管结达到全面导通所需要的电流和持续的时间：

- 开通和关断时的电压幅值；
- 开通时 di/dt 和电流过零前至少 0.2 ms 时 di/dt ；
- 晶闸管结温。

5.4.1.3 试验步骤

试验应该采用合适的试验电路来完成，以给出相当于运行情况的开通和关断强度。

运行试验过程中，所有影响阀运行工况的辅助系统应投入运行。

理想情况下，试验电压应该符合阀承受的实际电压。由于实际操作的原因，可以采取如下模拟的试验程序。

- 建立最大稳态电压电流条件，维持达到热平衡；
- 按照过负荷特性或控制角可达的最大值来升高电源电压到最大值，试验安全系数为 1.05；
- 在固定最大的控制角条件下，使晶闸管结温达到可能的最大值；
- 回到稳态运行情况。

试验时应测量并核实对应最高阶跃恢复电压的熄灭过冲，保证其低于设计值。

如阀的设计允许单个晶闸管级的 VBO 保护触发连续工作，应在稳态工况下通过长时间闭锁一个晶闸管的正常触发信号使被试元件达到热平衡状态来验证该性能。

注：由于 TSR 阀的短时间过载将是电流过载而不承受电压强度，为了达到试验目的，紧随过载之后的稳态运行应是闭锁状态，以证明过热晶闸管能够承担闭锁电压的能力。

5.4.2 最小交流电压试验

5.4.2.1 试验目的

验证 TCR 阀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。

5.4.2.2 试验步骤

试验应在一个完整的阀或阀段上进行。试验过程如下：

- a) 施加最小短时低电压并且维持 TCR 可控，持续时间为短时低电压持续时间的二倍；
- b) 在最小控制角和最大控制角之间改变控制角；
- c) 在连续或分级降低电压直到电压降到零（或者降低到低电压保护动作水平）情况下，重复试验步骤 b，以验证在电压降低过程中，不会对阀造成危害。

注：根据阀的设计，在以上电压降低过程中，为了获得足够的门极触发功率，需要将电压返回至最小稳态电压。

5.4.3 温升试验

5.4.3.1 试验目的

- a) 验证主要发热元件的温升在规定范围内；
- b) 验证在不同的稳态运行情况下，没有元件和材料由于过热而使工作受到影响；
- c) 验证水冷系统的流量设计合理。

5.4.3.2 试验步骤

这项试验可以在一个阀或阀段上进行。

- a) 将水冷系统的运行条件调到最为严酷的工作条件，如最小流量、最高进水温度等；
- b) 通过大功率试验回路将阀（或阀段）两端的电压或流过的电流调整合适，使元件的损耗为稳态运行损耗的 1.05 倍；
- c) 持续 30 分钟以上使之达到热平衡；
- d) 测量元件的温度，若元件温度不能通过实测来获得，则在合适位置测量，并以此推断该温度。

注 1)：由于一些元件的最大发热可能发生在不同的稳态运行条件，为了确定它们的温升，可改变试验条件多次进行试验；

注 2)：为了检验反并联晶闸管连接母线的通流能力，可把其中一个晶闸管级短接后重复这项试验。

6 TSC 阀的型式试验

6.1 阀端对地绝缘强度试验

每个晶闸管级应短路。

对于多重阀单元（MVU）中的阀，同一结构中其它阀的每个晶闸管级应短接并接地。试验应对多重阀单元的每个阀分别进行，除非多重阀单元的机械结构布局使之不必要。

6.1.1 交流试验

6.1.1.1 试验目的

见 4.2.1.1。

6.1.1.2 试验值和波形

同条款 5.1.1.2。

6.1.1.3 试验步骤

同条款 5.1.1.3。

6.1.2 雷电冲击试验

6.1.2.1 试验目的

见 4.2.1.1。

6.1.2.2 试验值和波形

同条款 5.1.2.2。

6.1.2.3 试验步骤

同条款 5.1.2.3。

6.2 阀间绝缘强度试验（仅适用于多重阀单元）

短接每个阀中的每个晶闸管级。试验应对同一结构中的任意两个阀间的绝缘都进行，除非多重阀单元的机械结构布局使之不必要。

6.2.1 交流试验

6.2.1.1 试验目的

见 4.2.1.1。

6.2.1.2 试验值和波形

同条款 5.1.1.2。

6.2.1.3 试验步骤

同条款 5.1.1.3。

6.2.2 雷电冲击试验

6.2.2.1 试验目的

见 4.2.1.1。

6.2.2.2 试验值和波形

同条款 5.1.2.2。

6.2.2.3 试验步骤

同条款 5.1.2.3。

6.3 阀端间绝缘强度试验

对于多重阀单元的阀，这些试验只需在一个阀上进行。相同结构中其它阀的每个晶闸管级应短接并接地。

6.3.1 交流—直流电压试验

6.3.1.1 试验目的

见 4.2.1.2。

6.3.1.2 试验值和波形

1 分钟试验电压 U_{tv1} 为叠加在直流分量上的正弦波。 U_{tv1} 可按下式计算：

$$U_{tv1} = U_{tac1} + U_{tdc1}$$

$$U_{tac1} = k_{s1} \times U_{ac1} \times \sin(2\pi ft)$$

$$U_{tdc1} = k_{s1} \times U_{dcm1}$$

式中：

U_{dcm1} ——系统扰动阀闭锁后所有快速放电设备如避雷器（衰减时间常数小于 100 ms）已停止动作，电容器组上保留的最大直流电压；

U_{ac1} ——可能出现在阀两端的长期过电压（包括过冲，不包括直流分量）的峰值；

k_{s1} ——试验安全系数；

$k_{s1}=1.1$ ，采用避雷器来限制电压； $k_{s1}=1.3$ ，没有避雷器的情况；

f ——试验频率（50 Hz 或 60 Hz，取决于试验设备）。

30 分钟试验电压 U_{tv2}

U_{tv2} 为正弦波形上叠加一个直流分量。 U_{tv2} 应如下计算：

$$U_{tv2} = U_{tac2} + U_{tdc2}$$

$$U_{tac2} = k_{s2} \times U_{ac2} \times \sin(2\pi ft)$$

$$U_{tdc2} = k_{s2} \times U_{dcm2}$$

式中：

U_{ac2} ——稳态运行时的最大线电压的峰值；

U_{dcm2} ——系统扰动阀闭锁后所有快速放电设备如避雷器（衰减时间常数小于 100 ms）已停止动作，电容器组上保留的最大直流电压；

k_{s2} ——试验安全系数， $k_{s2}=1.2$ ；

f ——试验频率（50 Hz 或 60 Hz，取决于试验设备）。

6.3.1.3 试验步骤

将规定试验电压 U_{tv1} 和 U_{tv2} 按规定时间加到阀的两端，其中一端接地。

按照 5.1.1.3 所述的 a) ~f) 试验步骤进行试验，用 U_{tv1} 取代 U_{ts1} ，用 U_{tv2} 取代 U_{ts2} 。

注：测量交流—直流电压联合局部放电试验的工业经验不多。如测量局放有困难，可在交流和直流情况下分别施加电压 $U_{r2(ac)}$ 和 $U_{r2(dc)}$ 进行局部放电测量。

对直流部件的正负极性均应进行试验。

表 6 为阀端间交流—直流耐压试验电压推荐值。

表6 阀端间交流—直流耐压试验电压推荐值

额定电压 (有效值, kV)	交流/直流试验电压 U_{tv1} (有效值/直流, kV)	交流/直流试验电压 U_{tv2} (有效值/直流, kV)
6	11/21	8.5/12
10	18/35	14/20
15	28.5/53	21/29
20	37.5/70	28/39
*35	66/123	48/68
*66 (63)	119/231 (115/220)	92/128 (88/123)

注：*目前不推荐使用35kV及以上电压等级TSC。

6.3.1.4 替代试验步骤

交流—直流电压联合试验可以由分开的交流电压试验和直流电压试验替代。

6.3.1.4.1 交流电压试验

在两个互连的阀端和地之间，按照规定的时间段施加规定的试验电压 $U_{t1(ac)}$ 和 $U_{t2(ac)}$ 。

$$U_{t1(ac)} = k_{s1} \times (U_{ac1} + U_{dcm1}) / \sqrt{2}$$

$$U_{t2(ac)} = k_{s2} \times (U_{ac2} + U_{dcm2}) / \sqrt{2}$$

按照6.1.1.4.1所述的a)～f) 试验步骤进行试验。

注：上述试验可能因一些阀元件的过热而不能实现。在这种情况下，按供需双方的协议，可将1分钟交流耐压试验由几个较短时间段的试验代替，其最短试验时间为规定的过电压的最大可能持续时间的两倍，但总试验时间不短于1分钟。

表7为阀端间交流耐压试验电压推荐值。

表7 阀端间交流耐压试验电压推荐值

额定电压 (有效值, kV)	试验电压 $U_{t1(ac)}$ (有效值, kV)	试验电压 $U_{t2(ac)}$ (有效值, kV)
6	25	7.5
10	42	13
15	63	19
20	84	25
*35	147	45
*66 (63)	282 (270)	82.5 (79)

注：*目前不推荐使用35kV及以上电压等级TSC。

6.3.1.4.2 直流电压试验

按照 6.3.1.3 所述的交流—直流电压联合试验方法进行直流电压试验，用 $U_{t1(dc)}$ 取代 U_{tv1} ，用 $U_{t2(dc)}$ 取代 U_{tv2} 。

$$U_{t1(dc)} = k_{s1} \times \sqrt{\left(\frac{U_{ac1}}{\sqrt{2}}\right)^2 + U_{dcm1}^2}$$

$$U_{t2(dc)} = k_{s2} \times \sqrt{\left(\frac{U_{ac2}}{\sqrt{2}}\right)^2 + U_{dcm2}^2}$$

应在直流电压的正负极性下进行试验。

表 8 为阀端间直流耐压试验电压推荐值。

表8 阀端间直流耐压试验电压推荐值

额定电压 (有效值, kV)	试验电压 $U_{t1(dc)}$ (直流, kV)	试验电压 $U_{t2(dc)}$ (直流, kV)
6	23	15
10	39	25
15	59	36
20	78	48
*35	139	83
*66 (63)	258 (248)	156 (149)

注：*目前不推荐使用 35kV 及以上电压等级 TSC。

6.3.2 操作冲击试验

6.3.2.1 试验目的

参见 4.2.1.2。

验证带有 VBO 电路的阀 VBO 保护触发不动作时的耐受能力。这项试验还检查避雷器保护水平与阀保护触发电压门槛值的配合。另外一个目的是为了验证阀抗电磁干扰能力（参见 7）。

6.3.2.2 试验值和波形

6.3.2.2.1 波形

波形 1：采用接近典型熄灭波形的 20/200 μs 波形，或是用系统研究所得的近似波形代替。

注：如果设计者或需方已经研究过该参数及系统产生的操作波的波形，应按研究结果进行，包括仿真研究或模型测试以及运行经验的波形数据。

波形 2：采用标准的 250/2500 μs 波形。

试验值根据下列情况确定：

a) 有避雷器保护的阀：

波形 1 和波形 2 的试验电压值可按下式计算：

$$U_{tsv} = k_s \times U_{cms}$$

式中：

U_{cms} ——避雷器的操作冲击保护水平；

k_s ——试验安全系数， $k_s=1.1$ 。

b) 没有避雷器保护的阀

波形 1 和波形 2 的试验电压值可按下式计算：

$$U_{tsv} = k_s \times U_{cms}$$

式中：

U_{cms} ——按 GB 311.1-1997 或绝缘配合研究的操作冲击可预见电压值；

k_s ——试验安全系数， $k_s=1.3$ 。

阀应能耐受试验电压而不发生投切或绝缘击穿。

6.3.2.3 试验步骤

将规定幅值与波形的操作波电压加到阀端之间，阀的一端可接地，每个极性施加三次。也可通过改变阀端的连线用单极性的冲击发生器来进行试验。

试验时阀的保护触发应不动作。

6.4 运行试验

6.4.1 过电流试验

验证阀在两端电压非过零时被触发所产生的过电流工况下，阀的设计是否合适。

6.4.1.1 后续闭锁过电流

6.4.1.1.1 试验目的

验证阀的设计是否能够耐受由过电流引起晶闸管结温升高后的电压强度。正向和反向电压都需验证。

6.4.1.1.2 试验值和波形

试验中需再现的最重要的参数是重加电压的幅值和时间(包括正向和反向)以及相应的晶闸管结温。 di/dt 和阶跃恢复电压也要正确再现。

TSC 支路的电路图如图 1 所示。试验电流波形应包含一或两个这样的脉冲：其电流峰值至少同随后允许闭锁的过电流最大峰值相等。考虑了触发时刻和脉冲个数后，最严重情况的过电流和相应重加电压阶跃和峰值按下列工况顺序由系统研究决定：

a) 在 SVC 控制和保护系统允许的最高系统电压值时，阀应闭锁。

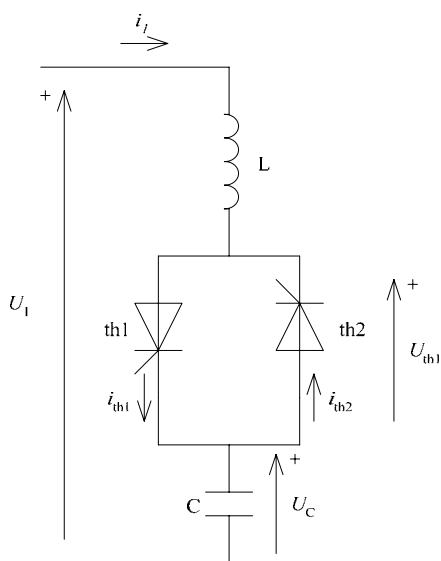
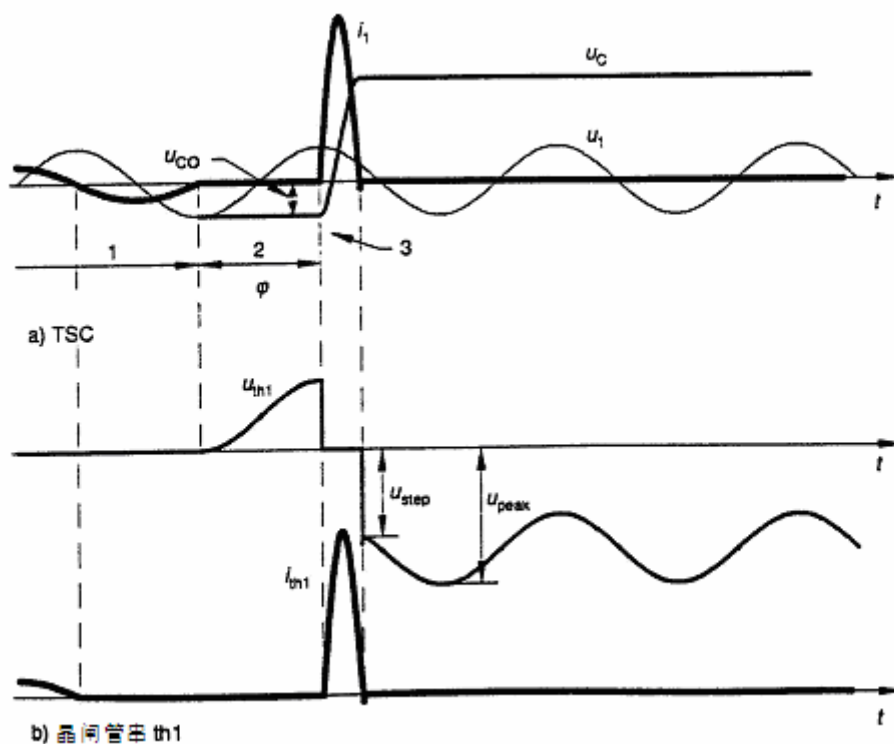


图1 TSC 支路

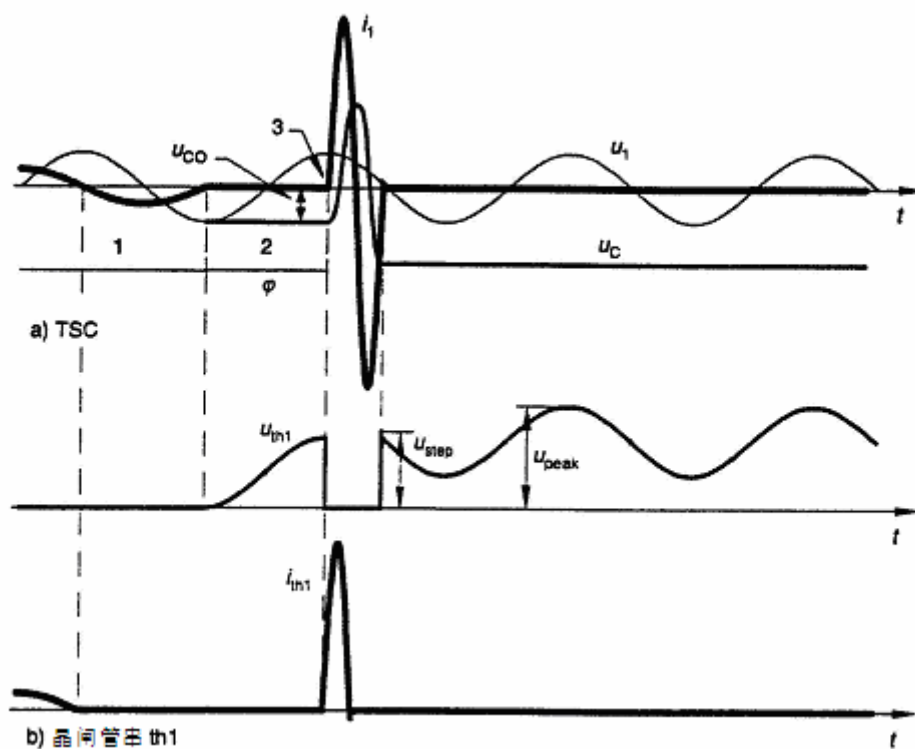


图中：1——正常运行
 2——闭锁
 3——阀触发
 U_{Co} ——电容器 C 充电电压
 φ ——晶闸管串 th_2 的导通角

图2 单向过电流

b) 在电容器充好电的情况下，阀应在上述系统电压值或其端间电压即要达到最大值时触发。如阀有过压保护触发系统，阀应在保护设置的限值触发。电流的峰值由阀的触发时刻决定。

- c) 为了确定阀的最大反向电压强度（图 2），阀应在电流第一次过零时闭锁。阶跃电压应在阀闭锁后直接确定，但不包括阀电流熄灭过冲。电压峰值应由一个基波周期内的最大后继电压峰值确定。
- d) 为了确定阀的最大正向电压强度（图 3），阀应在电流第二次过零时闭锁。阶跃电压应在阀闭锁后直接确定，但不包括阀电流熄灭过冲。电压峰值应由一个基波周期内的最大后继电压峰值确定。



图中：1——正常运行

2——闭锁

3——阀触发

U_{CO} ——电容器 C 充电电压；

φ ——晶闸管串 th_2 的导通角。

图3 双向过电流

试验电流的频率应该尽量接近实际 TSC 回路的谐振频率。

如果阀电压受所采用的避雷器保护，则应在试验回路加入特制的避雷器，该避雷器的参数按照被试品晶闸管级数量确定。

6.4.1.1.3 试验步骤

过电流试验可由振荡电路实现，它由电抗器、电容器和给其供电的工频电源组成，或者通过合适的联合试验回路实现。

试验应该在晶闸管阀的两个导通方向上进行。

a) 使阀(或阀段)导通预热到最高稳态温度；

b) 使阀(或阀段)受到最严重的过电流和由 6.4.1.1.2 所确定的重加电压。

注：为了满足试验目的，可进行单向或双向过流试验，或者两者都做。

6.4.1.2 无后续闭锁过电流

6.4.1.2.1 试验目的

验证阀在实际工况下可能受到由最严重过电流所引起的热效应和电磁力作用时，阀的设计是否合适。

6.4.1.2.2 试验值和波形

试验电流波形应是阻尼的正弦电流振荡波或适当含有电流峰值的波形表示，其 I_t 和晶闸管结温不小于实际工况时的值。

试验电流的频率应接近实际 TSC 电路的谐振频率。

6.4.1.2.3 试验步骤

过电流试验可由振荡电路实现，其电路由电抗器、电容器和给它们供电的工频电源组成，或者通过合适的联合试验回路实现。

试验应该在晶闸管阀的两个导通方向上进行。

- a) 使阀(或阀段)预热到最大稳态温度；
- b) 使阀(或阀段)受到过电流。

6.4.2 最小交流电压试验

6.4.2.1 试验目的

验证 TSC 阀的触发系统在规定的最小交流电压和规定运行条件下是否正常运行。

6.4.2.2 试验步骤

见 5.4.2.2。

6.4.3 温升试验

6.4.3.1 试验目的

见 5.4.3.1。

6.4.3.2 试验步骤

见 5.4.3.2。

7 电磁干扰

7.1 试验目的

验证阀抗电磁干扰能力。

- a) 不产生晶闸管误触发；
- b) 不出现故障晶闸管级的错误位置信息或晶闸管电子电路的干扰信号传递给控制和保护系统。

7.2 试验步骤

可通过操作冲击和非周期触发试验验证晶闸管阀抗电磁干扰能力。

试验阀的空间布置应尽量与实际运行时一样。

7.2.1 操作冲击试验

该试验是作为 TCR/TSR 和 TSC 阀型式试验（分别为 5.3.2.1 和 6.3.2.1）的一部分进行的。

试验时与阀交换信息的地电位部分应带电工作，如阀基电子部件。

通过试验的判据是阀不产生误触发信号和错误信号回报。

7.2.2 非周期触发试验

试验时晶闸管电子电路带电。

试验时与阀交换信息的地电位部分应带电工作，如阀基电子部件。

被试阀的两端加额定电压，试验应在接近电压正极性或负极性峰值的情况下触发晶闸管阀，两种电压极性下均做此试验。

通过试验的判据是阀不产生误触发信号和错误信号回报。

注：在许多情况下非周期触发试验的目的可由其它试验来完成，例如 TCR 可通过 VBO 触发的操作冲击试验，而 TSC 可通过过电流试验。

8 出厂试验

所规定的出厂试验是要求的最少应做的试验项目，供方应提供满足试验目的的详细试验过程。

8.1 外观检查

- a) 检查全部材料和元件是否损坏并且安装是否正确；
- b) 检查安装部件的有关参数是否与设计一致；
- c) 检查阀内部的空气距离和爬电距离符合要求。

8.2 连接检查

- a) 检查全部通电主回路接线是否正确；
- b) 检查晶闸管紧固力是否合适；
- c) 检查接线端子的配线是否正确。

8.3 均压/阻尼回路检验

检查均压/阻尼回路的参数（电阻值和电容值），确保电压在串联晶闸管上分布均匀。

8.4 耐受电压检验

检查晶闸管级能否承受阀所设计的最大电压值。

8.5 辅助设备检验

检验每个晶闸管级上的辅助设备（如监视和保护回路）以及整个阀（或阀段）的公共部件是否功能正常。

8.6 触发检验

检验晶闸管级的触发是否正常。

8.7 水冷系统压力试验

- a) 检查是否有泄漏；
- b) 在整个阀的及其分支中的流量是否合适；
- c) 检查压差。

9 TCR 和 TSR 阀的选项试验

9.1 过电流试验

9.1.1 后续闭锁过电流试验

9.1.1.1 试验目的

验证当晶闸管的结温度达到晶闸管阀控制或保护所允许的最大值时阀的关断能力，如过电流后续闭锁的能力。试验应考虑过电流后阀闭锁时存在直流分量的情况。

注：若此项试验的目的可由周期触发和关断试验（5.4.1）来达到，则该项试验可取消。

9.1.1.2 试验值和波形

阀受到的重加电压波形近似于运行中的熄灭波形。重加电压可由单独的脉冲发生器产生，也可由试验电路自身产生。

波形 1：采用接近典型熄灭波形的 20/200 μs 波形，或是用系统研究所得的近似波形代替。

波形 1 的值按下式计算：

$$U_{tsv} = k_s \times U_{cms}$$

式中：

U_{cms} ——由避雷器或 VBO 所确定的阀最低保护水平，或在没有过压保护的情况下阀所保证的耐压水平；

k_s ——试验安全系数， $k_s=0.9$ 。

注：如果设计者或需方已经研究过该参数及系统产生的操作波的波形，应按研究结果进行，包括仿真研究或模型测试以及运行经验的波形数据。

9.1.1.3 试验步骤

- a) 建立并维持最大的稳态电流条件，直至达到稳态结温时热平衡；
- b) 在阀上加适当的电流使结温升到阀保护和控制所允许的最大值；
- c) 在典型的 di/dt 下关闭阀；
- d) 在阀上加熄灭过冲电压。

9.1.2 无后续闭锁过电流试验

9.1.2.1 试验目的

验证在阀的电流超过其设计限值的故障条件下，在 SVC 跳闸之前，阀耐受过电流无后续闭锁的能力。

9.1.2.2 试验值和波形

试验电流应根据给定最坏情况下过电压产生的电流峰值及其产生的热效应确定。在阀的两个导通方向都应进行试验。试验持续时间由 SVC 保护系统决定。

9.1.2.3 试验方法

试验回路由一个工频电流源、试验对象和一个串联电抗组成，也可采用其它电路。试验结束时不需要对阀加电压。

- a) 阀或阀段预热，使晶闸管结温达到最高稳态运行时的温度；
- b) 在阀上加规定的电流波形。

9.2 恢复期间瞬时正向电压试验

9.2.1 试验目的

验证在电流熄灭后的任何时刻发生正向操作电压冲击时阀不损坏。

注：为了使阀能够承受此类事件而具有的外部保护应该参与试验。

9.2.2 试验值和波形

波形 1：采用接近典型熄灭波形的 20/200 μs 波形，或是用系统研究所得的近似波形代替。其值按下式计算：

$$U_{tsv} = k_s \times U_{cms}$$

式中：

U_{cms} ——由避雷器或 VBO 所确定的阀最低保护水平，或在没有过压保护的情况下阀所保证的耐压水平；

k_s ——试验安全系数， $k_s=0.9$ 。

注：如果设计者或需方已经研究过该参数及系统产生的操作波的波形，应按研究结果进行，包括仿真研究或模型测试以及运行经验的波形数据。

在电流关断之后，冲击电压将改变阀电压的极性，使刚好停止导通的晶闸管正偏。

9.2.3 试验步骤

- a) 在阀上加适当的电流使其在晶闸管结上完全导通且关闭时的 di/dt 与实际一致；
- b) 在最大稳态结温下闭锁阀；
- c) 使阀或阀段承受高于规定的可预见冲击电压。

应该在不低于阀电流熄灭至反向完全恢复的时间段的 5 倍时间后施加冲击电压。

试验应对阀导通的两个方向均进行。

9.3 非周期触发试验

9.3.1 试验目的

该项试验不但可验证晶闸管和附属电路对在非周期情况下导通时耐受电压和电流的能力，还可验证阀抗电磁干扰的能力（参见 7）。

注：若此项试验的目的可由阀端间操作冲击试验（5.3.2）来达到，则该此项试验可取消。

9.3.2 试验值和波形

在室温条件下, 试验在完整阀上进行。

试验电路应向阀加操作冲击电压且使阀在冲击电压的峰值时导通。在阀触发之后, 试验电路的主要作用是再现导通时正确的阀电流。重要的时间段是导通的最初 $10\mu\text{s}\sim 20\mu\text{s}$ 之间。

选择能代表电源阻抗的冲击发生器, 以便产生的导通电流脉冲至少与实际工况下电路杂散电容的放电电流相同。

开通强度和试验电路取决于阀所采用的暂态过电压的保护方法。

以下试验均采用标准的 $250/2500\mu\text{s}$ 波形。

试验值根据不同情况确定。

a) 用避雷器保护的阀

试验电压值按下式计算:

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{cms}$$

式中:

U_{cms} ——避雷器保护水平;

k_s ——试验安全系数, $k_s=1.0$ 。

所选择的冲击发生器的阻抗不仅取决于由电路杂散电容放电所产生的导通电流, 还取决于由避雷器动作所产生的导通电流。

可通过下列两种方法来实现:

- 1) 并联电容器法: 用一个电容与被试阀并联, 被试阀产生的放电电流至少与预计避雷器动作所产生的导通电流一样严重;
- 2) 避雷器法: 将避雷器连接在阀的两端, 试验电压加在包括 TCR 电抗器的电感外, 当避雷器电流达到预计值时, 阀触发导通。

由于受到冲击发生器实际尺寸的限制, 避雷器法仅适合于低电压阀。

当避雷器有电流时, 若阀具有防止瞬时触发保护系统, 则不必考虑避雷器的通流。因而试验电压 U_{cms} 可降到使避雷器不导通的最大电压。

b) 用 VBO 保护的阀

试验电压值按下式计算估算:

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{VBO} \quad (\text{波形 2})$$

式中:

U_{VBO} ——最低 VBO 保护电压水平;

k_s ——试验安全系数, $k_s=0.95$ 。

若能证实由 VBO 引起的触发与正常触发等效, 则该试验可省略, 因为试验目的已经在阀端间操作冲击试验中得到验证 (见 5.3.2)。

c) 无保护的阀

试验电压值按下式计算:

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{cms} \quad (\text{波形 2})$$

式中:

U_{cms} ——按 GB311.1, 或由绝缘配合研究确定的预计操作冲击电压值;

k_s ——试验安全系数, $k_s=1.3$ 。

9.3.3 试验步骤

阀的一端接地。

在阀的另一端加三次操作冲击电压。阀应在操作冲击电压峰值处被触发导通。施加相反极性的电压

重复试验（或换到阀的另一端）。

10 TSC 阀的选项试验

10.1 恢复期间瞬时正向电压试验

10.1.1 试验目的

验证阀在电流关断后的任何时刻施加正向操作电压时不会损坏。

注：为了使阀能够承受此类事件而具有的外部保护应该参与试验。

10.1.2 试验值和波形

波形 1：采用接近典型熄灭波形的 20/200 μs 波形，或是用系统研究所得的近似波形代替。其值按下式计算：

$$U_{tsv} = k_s \times U_{cms}$$

式中：

U_{cms} ——由避雷器所确定的阀最低保护水平，或在没有过压保护的情况下阀所保证的耐压水平；

k_s ——试验安全系数， $k_s=0.9$ 。

注：如果设计者或需方已经研究过该参数及系统产生的操作波的波形，应按研究结果进行，包括仿真研究或模型测试以及运行经验的波形数据。

在电流熄灭之后，冲击电压将改变阀电压的极性，使刚好停止导通的晶闸管正偏。

10.1.3 试验步骤

- 在阀上加适当的电流使其在晶闸管结上完全导通且关闭时的 di/dt 与实际一致；
- 在最大稳态结温下闭锁阀；
- 使阀或阀段承受高于规定的可预见冲击电压。

应该在不低于阀电流熄灭至反向完全恢复的时间段的 5 倍时间后施加冲击电压。

试验应对阀导通的两个方向均进行。

10.2 非周期触发试验

10.2.1 试验目的

该项试验不但可验证晶闸管和附属电路对在非周期情况导通时耐受电压和电流的能力，还可验证阀抗电磁干扰的能力（参见 7）。

注：许多情况下，此项试验的目的可由过电流试验（6.4.1）实现，此时该项试验可取消。

10.2.2 试验值和波形

在室温条件下，试验在完整阀上进行。

试验电路应能向阀加操作冲击电压且使阀在冲击电压的峰值时导通。在阀触发之后，试验电路的主要作用是再现导通时正确的阀电流。重要的时间段是导通的最初 10 μs ~20 μs 之间。

选择能代表电源阻抗的冲击发生器，以便产生的导通电流脉冲至少与实际工况下电路杂散电容的放电电流相同。

导通强度和所要求的试验电路取决于阀所采用的避免暂态过电压的保护方法。

以下试验均采用波形 2：标准的 250/2500 μs 波形。

试验值根据不同情况确定。

- 用避雷器保护的阀

试验电压值按下式计算：

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{cms} \quad (\text{波形 2})$$

式中：

U_{cms} ——避雷器保护水平；

k_s ——试验安全系数， $k_s=1.0$ 。

所选择的冲击发生器的阻抗不仅取决于由电路杂散电容放电所产生的导通电流，还取决于由避雷器动作所产生的导通电流。

可通过下列两种方法来实现：

- 1) 并联电容器法：用一个电容与被试阀并联，被试阀产生的放电电流至少与预计避雷器动作所产生的导通电流一样严重；
- 2) 避雷器法：将避雷器连接在阀的两端，试验电压加在包括 TSC 电抗器的电感外，当避雷器电流达到预计值时，阀触发导通。

由于受到冲击发生器实际尺寸的限制，避雷器法仅适合于低电压阀。

当避雷器有电流时，若阀具有防止瞬时触发保护系统，则不必考虑避雷器的通流。因而试验电压 U_{cms} 可降到使避雷器不导通的最大电压。在过电流试验（6.4.1）中已经证实过此项试验目的的情况下，此项试验可取消。

b) 无保护的阀

试验电压值按下式计算：

$$U_{tsv2} = k_s \times U_{cms}$$

式中：

U_{cms} ——按 GB311.1，或由绝缘配合研究确定的预计操作冲击电压值；

k_s ——试验安全系数， $k_s=1.3$ 。

10.2.3 试验步骤

阀的一端接地。

在阀不接地的一端加三次操作冲击电压。阀必须在操作冲击电压峰值处被触发导通。施加相反极性的电压重复试验（或调换阀端的接线）。

ICS29.240.01
F21
备案号: 18576-2006

DL

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1010.3—2006

高压静止无功补偿装置 第3部分 控制系统

High-voltage static VAR compensator

Part 3 Control system

2006-09-14 发布

2007-03-01 实施

中华人民共和国发展与改革委员会 发布

目 次

前 言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语	2
4 通用技术要求	3
4.1 环境要求	3
4.2 电源的技术要求	4
4.3 额定参数	4
4.4 通道负载	5
4.5 测量精度	5
4.6 过载能力	5
4.7 绝缘性能	5
4.8 振动、冲击与碰撞试验	6
4.9 耐湿热性能环境试验	6
4.10 电磁兼容性能	6
4.11 结构和外观	6
4.12 可靠性	7
5 功能及性能要求	7
5.1 总则	7
5.2 调节	7
5.3 SVC 保护	9
5.4 监控	10
5.5 VBE	12
5.6 触发系统	12
5.7 通信功能	12
6 试验方法	12
6.1 试验条件	12
6.2 结构和外观检查	12
6.3 装置功能试验	12
6.4 动模或实时数字仿真	12
6.5 过载能力试验	12
6.6 绝缘性能试验	12
6.7 振动、冲击与碰撞试验	12
6.8 耐湿热性能环境试验	12
6.9 电磁兼容性能试验	12
6.10 连续通电试验	13
7 检验规则	13
7.1 检验分类	13
7.2 合格判定	13

7.3 主要缺陷	13
8 标志和资料附件	13
8.1 标记	13
8.2 资料附件	14
9 包装、运输、存储	14
9.1 包装	14
9.2 运输	14
9.3 贮存	14

前 言

本标准是“高压静止无功补偿装置”系列标准中的第3部分，该系列标准共分为5个部分：

- 第1部分：系统设计
- 第2部分：晶闸管阀的试验
- 第3部分：控制系统
- 第4部分：现场试验
- 第5部分：密闭式水冷却装置

本标准中对高压无功补偿装置控制系统的通用技术条件、性能要求、结构和试验进行了规定，包括控制系统的调节、监测、保护和触发部分。本标准目前尚无对应的国际标准。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由中国电力企业联合会归口。

本标准起草单位：

主要起草单位：中国电力科学研究院

参加起草单位：

本标准主要起草人：

本标准由中国电力科学研究院负责解释。

高压静止无功补偿装置 第3部分 控制系统

1 范围

本标准适用于输电系统和配电系统中使用晶闸管的静止无功补偿装置（以下简称“SVC”）控制系统的设计。SVC可应用于6kV及以上电力系统，其中晶闸管控制的支路可直接挂接于6~66（63）kV系统。

本标准规定了SVC控制系统的设计原则，对SVC控制系统的调节、监控、保护和触发系统的通用技术条件、功能和性能提出了基本要求。

本标准主要是针对晶闸管控制电抗器（TCR）型和晶闸管投切电容器（TSC）型SVC编制，适当兼顾晶闸管投切电抗器（TSR）型SVC的某些要求。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB 191-2000	包装贮运图示标志
GB/T 2423.4-1993	电工电子产品基本环境试验规程试验 Db： 交变湿热试验方法
GB/T 2887-2000	电子计算机场地通用规范
GB/T 3047.4-1986	高度进制为 44.45mm 的插箱、插件的基本尺寸系列
GB 4208-93	外壳防护等级（IP 代码）
GB/T 7261-2000	继电器及装置基本试验方法
GB 9361-88	计算站场地安全要求
GB/T 11287-2000	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 11920-89	电站电气部分集中控制装置通用技术条件
GB/T 13384	电工电子产品应用环境条件
GB/T 13730-92	地区电网数据采集与监控系统通用技术条件
GB 14285-93	继电保护和安全自动装置技术规程
GB/T 14537-93	量度继电器和保护装置的冲击与碰撞试验
GB/T 14598.3-1993	电气继电器 第五部分： 电气继电器的绝缘试验
GB/T 14598.9-2002	度量继电器和保护装置的电气骚扰试验 辐射电磁场骚扰试验
GB/T 14598.10-1996	度量继电器和保护装置的电气干扰试验 快速瞬变干扰试验
GB/T 14598.13-1998	度量继电器和保护装置的电气干扰试验 1MHz 脉冲群干扰试验
GB/T 14598.14-1998	度量继电器和保护装置的电气干扰试验 静电放电试验
GB/T 15291-1994	半导体器件 第 6 部分 晶闸管
GB 16836-2003	度量继电器和保护装置安全设计的一般要求

JB 3336-83	电站设备自动化装置通用技术条件
DL/T 478-2001	静态继电保护及安全自动装置通用技术条件
IEEE std 1031-2000	IEEE Guide for the functional specification of transmission static var compensators

3 术语

本标准采用下列术语。

3.1 静止无功补偿装置 (SVC) static var compensator

由静止元件构成的并联可控无功功率补偿装置,通过改变其容性或(和)感性等效阻抗来调节输出,以维持或控制电力系统的特定参数(典型参数是电压、无功功率)。

3.2 晶闸管控制电抗器 (TCR) thyristor controlled reactor

由晶闸管控制的并联电抗器,通过控制晶闸管阀的导通角使其等效感抗连续变化。

3.3 晶闸管投切电容器 (TSC) thyristor switched capacitor

由晶闸管投切的并联电容器,通过晶闸管阀的开通或关断使其等效容抗成级差式变化。

3.4 晶闸管投切电抗器 (TSR) thyristor switched reactor

由晶闸管投切的并联电抗器,通过晶闸管阀的开通或关断使其等效感抗成级差式变化。

3.5 晶闸管级 thyristor level

晶闸管阀的组成部分,由一对反并联的晶闸管(或晶闸管和二极管反并联)构成,包括辅助电路(触发、保护、均压、阻尼元件等)。

3.6 晶闸管阀 (TV) thyristor valve

晶闸管级的电气和机械联合体,配有连接、辅助部件和机械结构,它可与 SVC 每相的电抗器或电容器相串联。

3.7 晶闸管电子电路 (TE) thyristor electronics

在阀电位上执行控制功能的电子电路。接受阀基电子单元的控制信号,并向阀基电子单元回报阀的信息。

3.8 阀基电子单元 (VBE) valve base electronics

处在阀电位的电子单元,是 SVC 控制系统与晶闸管阀之间的接口。

3.9 闭锁 blocking

控制系统不发出触发信号,使晶闸管阀处于关断状态。

3.10 误通 false firing

无论由于何种原因,在不正确的时刻造成的晶闸管阀的开通。

3.11 电压/电流特性 (V/I) voltage/current characteristic

SVC 在连接点处的稳态电流与电压之间的关系。

3.12 控制范围 control range

在连接点处由 SVC 提供的无功电流或无功功率的感性至容性最大变化范围。

3.13 滞后运行 lagging operation

SVC 吸收容性无功,等效于并联电抗器。

3.14 超前运行 leading operation

SVC 发出容性无功,等效于并联电容器。

3.15 参考电压 reference voltage

SVC 运行在既不发出、也不吸收无功功率时的电压。

3.16 斜率 (SL) slope

在 SVC 的线性可控范围内,其电压—电流特性的斜率,即电压变化对电流变化(标幺值)的百分

数。

3.17 电压击穿 (VBO) 保护 voltage break-over protection

晶闸管的一种过电压保护, 当电压达到设定的电压值时使晶闸管触发开通。一般采用击穿二极管 (BOD)。

3.18 响应时间 response time

当输入阶跃控制信号后, SVC 输出达到要求输出值的 90% 所用的时间, 且期间没有产生过冲 (图 1)。

注: 由于电压变化范围较小, 难以获得清晰的变化曲线, 一般可以用无功功率电流变化曲线来说明响应时间。

3.19 镇定时间 settling time

当输入阶跃控制信号后, SVC 输出达到要求输出值的 $\pm 5\%$ 范围内所用的时间 (图 1)。

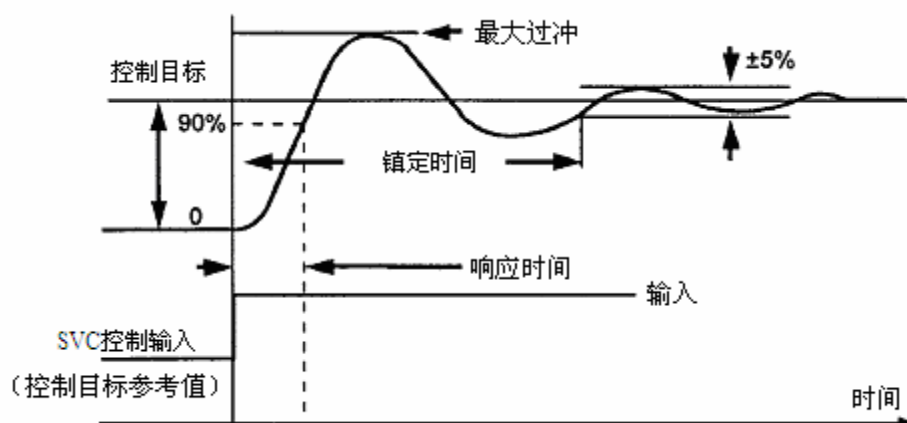


图1 响应时间和镇定时间定义

4 通用技术要求

4.1 环境要求

4.1.1 大气条件

4.1.1.1 正常工作的大气条件

- a) 环境温度 $-5 \sim +40^{\circ}\text{C}$
- b) 相对湿度 $10\% \sim 90\%$
- c) 海拔高度 小于 2000 米

4.1.1.2 基准大气条件

确定产品基本性能及准确度或作仲裁试验时的环境条件:

- a) 环境温度 20°C
- b) 相对湿度 65%
- c) 大气压力 101.3kPa

4.1.1.3 允许试验的大气条件

- a) 温度 $15 \sim 35^{\circ}\text{C}$
- b) 相对湿度 $45\% \sim 75\%$
- c) 海拔高度 小于 2000 米

注: 空调场所的试验温度在其装置的技术条件中规定。

4.1.2 储存、运输极限环境温度

储存、运输环境温度的极限值为 $-25^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$, 短时间内 (不超过 24h) 可达到 $+70^{\circ}\text{C}$ 。在不施加任何激励量的条件下, 装置不应出现不可逆变化, 即当温度恢复至 4.1.1.1 所规定的条件下应能正常

工作。

4.1.3 周围环境要求

- a) 不允许存在超过 4.10 规定的电磁干扰；
- b) 场地应符合 GB 9361 中 B 类安全要求的规定；
- c) 使用地点不出现超过 GB/T 14537 规定的严酷等级为 1 级的振动；
- d) 无爆炸危险的介质，周围介质中不应含有能腐蚀金属、破坏绝缘和表面涂覆层的介质及导电介质，不允许有明显的水气，不允许有严重的霉菌存在；
- e) 本标准规定的装置不承受太阳辐射、雨和水的冲洗，适应室内的有气候防护的环境；
- f) 接地电阻应符合 GB/T 2887 中 4.4 的规定。

4.1.4 特殊使用条件

当超出 4.1.1、4.1.2、4.1.3 规定的条件时，由需方与供方商定。

4.2 电源的技术要求

4.2.1 交流电源

4.2.1.1 交流电源额定电压为 220V、380V，电压偏差等级为 $\pm 1\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $-15\% \sim +10\%$ 、 $-20\% \sim +15\%$ 。

4.2.1.2 交流电源额定频率为 50Hz，频率偏差等级为 $\pm 0.2\text{Hz}$ 、 $\pm 0.5\text{Hz}$ 、 $\pm 2.5\text{Hz}$ 。

4.2.1.3 交流电源电压谐波总畸变率等级为 2%、5%、10%、20%。

4.2.1.4 三相电源电压应平衡。如产品标准中未作具体规定，其试验允许误差的要求为：

- a) 三相电源的电压不平衡度不超过 2%；
- b) 相电压之间的相位差应相同，允许角差为 2° ；
- c) 相电流之差不大于各相电流的平均值的 1%；
- d) 相电流相位差，允许角差为 2° 。

4.2.2 直流电源

4.2.2.1 直流电源额定电压为 110V、220V；电压偏差等级为 $\pm 0.3\%$ 、 $\pm 1\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $-15\% \sim +10\%$ 、 $-20\% \sim +15\%$ 、 $-25\% \sim +30\%$ 。

4.2.2.2 直流电源电压纹波系数等级为 0.2%、1%、5%、15%。

4.2.2.3 直流电源电压波动范围为额定电压的 80%~110%（115%）。

注：括号内的数值为根据需方或制造单位的需要和可能来确定的数值。

4.2.3 不间断电源（UPS）

交流电源失电后，UPS 应维持系统正常工作至少 20min（建议切换时间小于 20ms），有特殊要求时，由需方与供方商定。

4.2.4 电源影响

在正常试验大气条件下，按 4.2.1、4.2.2、4.2.3 条规定的参数中任一项的选定极限变化（其余为额定值），装置应可靠工作，性能及参数符合技术要求。

4.3 额定参数

4.3.1 交流回路

4.3.1.1 交流电压

交流额定电压：100/3V、 $100/\sqrt{3}\text{V}$ 、100V。

4.3.1.2 交流电流

交流额定电流：1A、5A。

4.3.2 直流回路

直流额定电压：24V、48V、110V、220V。

4.3.3 额定频率

工频交流额定频率为 50Hz。

4.4 通道负载

交流电压通道：小于 1VA/相

交流电流通道：0.2VA/相（额定电流 1A）
1VA/相（额定电流 5A）

4.5 测量精度

4.5.1 开关量

开关量的时间分辨率应小于等于 1ms。

4.5.2 调节用模拟量

a) 电压

在 0.5~1.2pu 时的测量和转换量值误差应不超过 0.3%，角度误差不超过 0.1°。

b) 电流

在 0.05~1.2pu 时的测量和转换量值误差应不超过 0.5%，角度误差不超过 0.5°。

c) 无功功率

在负荷电流为 0.1~1.2pu 时误差不超过 2%。

d) 无功电流

无功电流的测量在负荷电流为 0.05pu 以上时，误差不超过 2%。

以上误差限值不包括高压电压、电流互感器的误差。

4.5.3 保护和监控用模拟量

电流在 20 倍额定值时的综合测量误差不超过 10%。

4.6 过载能力

4.6.1 过载能力参数

a) 交流电流回路：2 倍额定电流，连续工作；10 倍额定电流，允许 10s；40 倍额定电流，允许 1s。

b) 交流电压回路：1.2 倍额定电压，连续工作；1.4 倍额定电压，允许 10s。

施加过载电流的时间允许延长，但一般不超过 5s。时间的换算可以按下式：

$$k_t = k \sqrt{\frac{1}{t}}$$

式中：

k ——1s 内允许的过载电流的倍数；

k_t —— t (s) 内允许的过载电流的倍数。

4.6.2 过载能力的评价标准

装置经受过电流或过电压后，应无绝缘损坏、液化、炭化或烧焦等现象，相关电气性能应符合 4.5、

4.7 的要求。

4.7 绝缘性能

4.7.1 大气条件

除非另有规定，考核绝缘性能的大气条件均应符合 4.1.1.3 规定的范围。

4.7.2 绝缘电阻

用空载电压为直流 500V 的测试仪器测量各回路之间的绝缘电阻，应符合以下规定：

a) 所有导电回路与地（或与地有良好接触的金属框架）之间的绝缘电阻应不小于 20MΩ。

b) 无电气联系的各导电回路之间的绝缘电阻应不小于 20MΩ。

4.7.3 电介质强度

装置应能承受 GB/T 14598.3 中规定的电介质强度试验要求。

4.7.4 冲击电压

装置各导电回路与地（或与地有良好接触的金属框架）之间，交流回路与直流回路之间，对于额定绝缘电压大于 60V 的回路，应能承受 1.2/50 μ s、试验电压为 5kV 的标准雷电波的短时冲击电压试验；对于额定绝缘电压小于 60V 的回路，应能承受 1.2/50 μ s、试验电压为 1kV 的标准雷电波的短时冲击电压试验，装置允许闪络，但不应出现绝缘击穿或损坏。

4.8 振动、冲击与碰撞试验

装置应能承受 GB 7261 第 16.3 条规定的严酷等级为 1 级的振动耐久能力试验。试验后，无紧固件松动脱落及结构件损坏。

装置应能承受 GB 7261 第 17.5 条规定的严酷等级为 1 级的冲击耐久能力试验。试验后，无紧固件松动脱落及结构损坏。

装置应能承受 GB 7261 第 18 章规定的严酷等级为 1 级的碰撞试验。试验后，无紧固件松动脱落及结构件损坏。

控制系统由多个功能独立的单元构成时，可对单个单元进行试验。

4.9 耐湿热性能环境试验

装置应能承受 GB 7261 第 21 章规定的湿热试验。最高试验温度+40℃，最大湿度 95%，试验时间为 2d，每一周期历时 24h 的交变湿热试验，在试验结束前 2h 内，根据 4.7.2 条的要求，测量各导电电路对外露非带电金属部分及外壳之间、电气上无联系的各回路之间的绝缘电阻值应不小于 1.5M Ω ，介质强度不低于第 4.7.3 条规定的介质强度试验电压幅值的 75%。

控制系统由多个功能独立的单元构成时，可对单个单元进行试验。

4.10 电磁兼容性

4.10.1 承受辐射电磁干扰的能力

装置应能承受 GB/T 14598.9 中 4.1.1 规定的严酷等级为 III 级的辐射电磁场干扰试验，试验期间及试验后的装置的性能应符合条款 5 规定的性能要求。

4.10.2 承受快速瞬变干扰的能力

装置的电源输入、采集输入以及通信端口应能承受 GB/T 14598.10 中 4.1 规定的严酷等级为 III 级的快速瞬变干扰试验，试验期间及试验后的装置的性能应符合条款 5 规定的性能要求。

4.10.3 承受脉冲群干扰的能力

装置的电源输入、采集输入以及通信端口应能承受 GB/T 14598.13 中 3.1.1 规定的严酷等级为 III 级的 1MHz 和 100kHz 脉冲群干扰试验，试验期间及试验后的装置的性能应符合条款 5 规定的性能要求。

4.10.4 承受静电放电干扰的能力

装置的人机界面、控制按键及控制系统的开门把柄应能承受 GB/T 14598.14 中 4.2 规定的严酷等级为 III 级的静电放电干扰试验，试验期间及试验后的装置的性能应符合条款 5 规定的要求。

4.11 结构和外观

4.11.1 机箱、插件的尺寸

机箱插件的尺寸应符合 GB/T 3047.4 的规定。

4.11.2 外壳防护

外壳防护应符合 GB 4208 中规定的外壳防护等级 IP20 的要求(户外使用的装置应符合 GB 4208 中规定的外壳防护等级 IP54 的要求)。

4.11.3 电气间隙和爬电距离

装置内两带电导体之间以及带电导体与裸露不带电导体之间的最小距离，均应符合 GB 16836 中 5.3.4 的规定。

4.11.4 着火危险的防护

着火危险的防护应符合 GB 16836 中 5.5 的规定。

4.11.5 防静电及防辐射电磁场干扰的防护措施

装置的不带电金属部分应在电气上连为一体，并具有可靠的接地点。

4.11.6 安全标志

装置应有安全标志，安全标志应符合 GB16836 中 5.7.5、5.7.6 的规定。

4.12 可靠性

4.12.1 SVC 控制系统的可靠性指标应服从 SVC 的整体可靠性指标的要求。

4.12.2 SVC 控制系统年可可靠性指标应大于 99.9%。

5 功能及性能要求

5.1 总则

5.1.1 SVC 控制器控制各部件的运行状态，使 SVC 满足设计的要求，达到各预定的目标，例如 SVC 运行范围，电压无功控制，增加系统阻尼，优化无功潮流，改善功率因数等。

5.1.2 应具备自动调节计算、监视、保护、通信、启动、停止顺序控制、文件记录等功能。

5.2 调节

5.2.1 调节功能要求

应保证在电压和无功控制调整目标下，使 SVC 各支路断路器、隔离开关、冷却系统、保护装置和有关的安全系统协调运行。

5.2.2 稳态控制输出

应规定考核点稳态运行的电压上限和下限，在此范围内 SVC 控制器按正常运行调节无功输出。无功输出的稳态受控范围在规定的最大容性与最大感性无功之间。

5.2.3 短时间运行输出

SVC 控制器在系统过电压和低电压情况下，控制 SVC 按预定策略能够短时提供的无功输出。

5.2.4 同步信号要求

同步信号是 SVC 调节计算、触发控制的基础，应考虑如下因素：

- a) 电源电压的扰动
- b) 系统谐波
- c) 系统严重短路故障
- d) 系统频率和相角的变化
- e) 系统短路故障消除后快速再次同步

5.2.5 基本控制方式

5.2.5.1 电压控制方式

电压控制方式是 SVC 调节单元基本的控制方式。参考电压值 V_{ref} 在运行中应保持不变，直到重新设置。参考电压范围可设置，一般为 0.90~1.10p.u.。其 V-I 特性如图 2 所示。

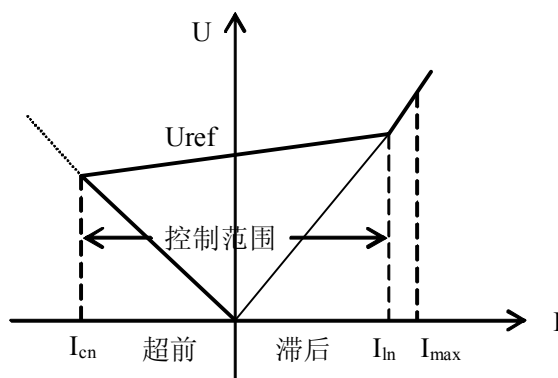


图2 SVC 的 V/I 特性

SVC进行电压调整补偿时，其SVC的V-I特性斜率的取值范围为0~10%。较小的斜率可获得较精确的电压稳定效果。较大的斜率影响电压稳定效果，但可减少SVC的额定容量以及减少SVC进入调节容量极限的次数。对于多个SVC运行在同一母线时，可设定适当的斜率优化各SVC无功输出的分配。

TSC一组电容投入前后电压的差值称为死区，它由系统特性和电容容量所确定。

5.2.5.2 无功控制方式

无功控制方式可有下列类型。

a) 无功功率控制方式

在此方式下，负荷的无功量与SVC输出之差，应在一个规定的范围内，即总无功不超过一个定值，这个值根据系统要求确定，称为调节死区。

在有TSC的系统无功控制呈级差式改变，其死区由TCR限制，控制器应协调分配TSC与TCR的无功输出。

b) 无功电流控制方式

控制器可略去电压对无功的影响而按总无功电流控制。对无功功率控制的要求也适合按无功电流控制的要求。对三相控制的SVC，无功电流量取代数和，对分相控制的按各相无功电流分别采集和控制。

c) 功率因数控制方式

控制器应按无功电度（表）计量和电度表计量校正控制范围。对于固定功率因数应至少设定 ± 0.03 的死区。

功率因数在负荷电流为0.1p.u.以下不作为控制条件，在负荷电流达到0.1p.u.及以上，一般可按整定值 $\pm 15\%$ 控制，但对纯TSC型SVC应留有足够的死区以防止出现投切振荡。

5.2.5.3 联合控制方式

电压控制方式和无功控制方式是控制器的基本控制模式，电压和无功可以单独控制也可联合控制，或加权联合控制。

5.2.5.4 输电系统暂态控制

SVC应用于输电网时，应实现暂态控制功能，加强系统故障恢复后的第一摆特性，提高输电系统暂态稳定极限。

5.2.5.5 阻尼振荡控制

SVC应用于输电网时，应对系统振荡提供正阻尼，以抑制系统振荡。

5.2.6 其他控制方式

为了满足电力系统或需方的特殊需求，SVC的控制器可能需要增加某些特殊控制功能。以下的各项补充控制方式是经常采用的，在标准中作为选项，SVC的供货方和需方对这些选项在合同中确定。

5.2.6.1 慢速无功调节功能

在电压控制方式中，用慢速调节无功，在电压快速调节达到稳定后，无功调节仍在进行，直到达到无功较合适的水平，此时已偏离按电压调节的斜率。对于这种调节，必须允许有一个死区，SVC的无功调节不能超过死区的范围，死区可以在运行中整定。SVC的暂态调节仍然服从斜率。

5.2.6.2 TCR 直流电流控制

当系统电压存在二次谐波时，TCR可能产生直流分量输出电流，使变压器进入饱和状态，SVC控制器应防止这种现象的发生。

5.2.6.3 负序控制

负序控制的目的是使电流的负序分量减少。负序控制的补偿程度可以选择，但是负序控制应服从电压允许的范围。

5.2.6.4 手动调节方式

手动调节用于：

a) SVC 系统调试

b) 参数整定

c) 其他目的

5.2.7 调节单元的保护性控制功能

5.2.7.1 保护性控制

保护性控制是正常调节控制的补充，目的是限制某些系统参数在安全的范围之内。应根据 SVC 实际运行点的系统情况选择。

5.2.7.2 低电压控制功能

系统电压低于正常电压，而高于设定的低电压限值（一般取 0.5~0.7p.u.）时，SVC 应快速强补；

5.2.7.3 次级电压限制

对于采用降压变接入系统的 SVC，SVC 母线电压称为次级电压。SVC 应具备对次级电压限制的功能。

5.2.7.4 TCR 电流限制

在电压超过最高运行电压时，对稳态 TCR 电流应有限制。控制器应具备 TCR 主回路在电压超高情况下限制输出的功能。

5.2.7.5 TSC 过电流保护性控制功能

由于误触发引起 TSC 受到强过电流冲击，在冲击发生后 SVC 控制器应具备保护阀组不受损坏的功能。

5.2.7.6 TSC 过电压保护性控制功能

SVC 控制器应具备通过设定晶闸管触发的适当逻辑，防止过电压情况下 TSC 阀组损坏的功能。

5.3 SVC 保护

5.3.1 一般规定

5.3.1.1 SVC 保护应符合 SVC 设备安全可靠运行的要求，满足可靠性、选择性、灵敏性和快速性的要求，保护定值和延时的选择应与上级保护配合，防止越级动作。

5.3.1.2 对于输电系统用 SVC 装置宜采用微机双重保护配置。

5.3.2 滤波器及固定电容器组保护

5.3.2.1 应对 SVC 系统中的补偿电容器组和滤波器的下列故障及异常运行方式作出有选择性的切除或发出信号：

- a) 针对电容器组过负荷及引线、套管的短路故障，应装设电流保护，保护分为速断和过流两段；
- b) 单台电容器内部故障及其引出线的短路；
- c) 电容器组内部故障，按电容器组的不同接线方式，分别采用下列类型保护：
 - 1) 单星形接线的电容器组可采用开口三角零序电压保护；
 - 2) 多段串并联星形接线的电容器组可采用桥式差电流保护或电压差动保护；
 - 3) 双星形接线的电容器组可采用中性点不平衡电流保护。
- d) 电容器组应具有过电压保护，延时动作于跳闸；
- e) 电容器组应具有失电压保护，延时动作于跳闸；

5.3.2.2 对于滤波器，除应考虑以上规定的条款外，还应应对以下故障及异常运行方式选择并设置相应的保护：

- a) 电网频率负偏差可能引起谐波谐振，可设置低周波保护，按设定的过流倍数启动；
- b) 避免由于滤波支路的非正常运行方式所产生的谐波放大，可设置联锁跳闸。

5.3.2.3 电流速断保护定值按最小运行方式下电容器组端部发生两相短路考虑，考虑一定灵敏度系数，动作时限按大于电容器组充电涌流时间考虑。

5.3.2.4 过流保护定值按电容器组长期允许的最大工作电流整定，动作后带时限切除故障电容器组。

5.3.2.5 对单台电容器内部故障，应设置保护，可设置内熔丝或外熔断器，外熔断器应有动作指示，其熔丝的额定电流可取电容器额定电流的 1.5~2 倍。

5.3.2.6 电容器组过压保护动作值应根据电容器组设计参数选取，使长时间单个电容器电压不大于其

额定耐受的 1.1 倍。

5.3.2.7 欠压保护的定值可根据情况设定，动作后切除电容器组。

5.3.2.8 自动投切回路应有防止本支路继电保护跳闸时误投入的闭锁回路，并应设置闭锁解除开关。

5.3.3 晶闸管控制电抗器（TCR）与晶闸管投切电抗器（TSR）保护

5.3.3.1 应对 TCR 或 TSR 的下列故障及异常运行方式作出有选择性的切除或发出信号：

- a) 针对并联电抗器的单相接地和匝间短路及其引出线的相间短路和单相接地短路，应装设电流保护，保护分为速断和过流两段；
- b) 电抗器应具有过负荷保护，延时动作于信号；
- c) 电抗器应具有过电压保护，延时动作于跳闸；
- d) 电抗器应具有欠电压保护，闭锁晶闸管阀的触发输出；
- e) TCR 或 TSR 单相 PT 断线，延时动作于跳闸；
- f) TCR 或 TSR 控制回路断线，动作于信号。

5.3.3.2 速断保护动作电流值可按最小运行方式下，电抗器端部两相短路时灵敏系数为 2 整定，动作后瞬时切除电抗器。

5.3.3.3 过流保护。动作值按避开最大可能的负荷电流整定。动作后带时限切除电抗器。

5.3.3.4 自动投切回路应有防止继电保护跳闸时误投 TCR 或 TSR 的闭锁回路，并应设置操作解除命令。

5.3.3.5 TCR 的晶闸管级必须具有过电压保护，在出现过电压时，或若干个晶闸管丢失触发脉冲时，应向晶闸管提供强制触发。

5.3.3.6 晶闸管开通阶段，当晶闸管电流非正常过零时，应具有晶闸管自动重触发功能。

5.3.4 晶闸管投切电容器组（TSC）保护

应对 TSC 的下列故障及异常运行方式作出有选择性的切除或发出信号：

- a) 针对电容器组的过负荷及引线、套管的短路故障，应装设电流保护，保护分为速断和过流两段，延时动作于跳闸；
- b) 单台电容器内部故障及其引出线的短路，延时动作于跳闸；
- c) TSC 通常采用三角形接法，对于电容器组内部故障，应采用桥式差电流保护或电压差动保护，延时动作于跳闸；
- d) TSC 应具有过电压保护，延时动作于跳闸；
- e) TSC 应具有失电压保护，延时动作于跳闸。

其它保护可参照 5.3.2。

5.4 监控

5.4.1 一般规定

5.4.1.1 应对 SVC 装置一次、二次设备进行实时检测，并对检测结果进行显示和记录。

5.4.1.2 应配置就地及远方监控操作站，实时显示各监控内容，实现 SVC 系统的就地和远方操作。

5.4.1.3 主要监视功能

- a) 重要的运行状态应在就地站控和远方站显示；
- b) 报警信号必须传到就地站控和远方；
- c) 监视并显示内部和外部的故障。时间分辨率不大于 1ms，事件信息应存储，并在访问时可随机取出；
- d) 扰动显示最少记录 12 个事件，包括电流和电压扰动事件，时间分辨率不大于 1ms。记录数据可以通过一定的通讯方式远方查阅。

5.4.1.4 站控和遥控的手动功能：

- a) 紧急操作，在现场和系统发生紧急事件而自动装置没有立即动作的情况，站控操作人员必须干预；

- b) 就地和远方能设置或调整某些控制参数，或重新整定保护定值。
- c) 操作员的界面分为不同级别，并各有专用口令，对操作、软硬件的访问按级别进行，并记录。

5.4.2 水冷系统监控

水冷系统的设计应保证阀组在运行期间处于允许的温度范围。水冷系统应具有独立的监控单元，能实时检测并上传其运行参数、异常状态。水冷系统监控动作于告警或退出相关 SVC 支路，以保证主设备安全。

5.4.2.1 水—水冷却系统

- a) 应对水—水冷却系统的以下运行参数进行测量、显示和实时上传：
 - 1) 冷却水流量；
 - 2) 供水压力；
 - 3) 回水压力；
 - 4) 供水温度；
 - 5) 回水温度；
 - 6) 阀厅温度；
 - 7) 阀厅湿度；
 - 8) 冷却水电阻率（或导电率）；
 - 9) 去离子水电阻率（或导电率）；
 - 10) 缓冲罐压力；
 - 11) 缓冲罐液位；
 - 12) 循环泵运行状态。
- b) 应对水—水冷却系统的故障和异常运行方式发出信号告警，可能对阀产生严重危害时，应退出阀所在支路，具体要求见本系列标准第 5 部分“密闭式水冷却系统”：

5.4.2.2 水—风冷却系统

- a) 水—风冷却系统除应对水—水冷却装置中列出的各种状态量进行测量、显示和实时上传外，还应包括水风换热器风机运行状态。
- b) 水—风冷却系统除应对水—水冷却系统中的各种故障和异常运行方式进行处理外，还应应对以下情况发出信号告警：
 - 1) 风机故障或过载；
 - 2) 风机变频器故障。
- c) 水—风冷却系统请求 SVC 停运的条件可参考水—水冷却系统。

5.4.3 本体监控

SVC 控制系统应具备自诊断功能，应对下列故障及异常运行方式发出信号告警：

- a) 通讯异常；
- b) UPS 异常；
- c) 供电电源异常。

5.4.4 晶闸管阀监控

5.4.4.1 为保证晶闸管元件正常运行，冷却系统必须在晶闸管阀带电之前投入，阀带电期间禁止停运冷却系统。

5.4.4.3 应连续监视运行中的晶闸管元件，检出故障晶闸管元件，提供每次故障时间和故障晶闸管元件在阀组中的位置。

5.4.4.4 应连续监视运行中的晶闸管，提供晶闸管元件后备触发动作的时间和对应晶闸管元件在阀组中的位置，并记录动作次数，如果动作过于频繁应给出信号或跳闸操作。

5.4.4.5 阀监测系统应根据预设的阀冗余数量给出告警或跳闸操作，以保证阀组安全。

5.4.4.6 可对阀的温度进行实时监视，温度过高给出告警或跳闸操作。

5.5 VBE

5.5.1 应保证在任何情况下送往阀组的触发信号的完整性,即采用编码方式应保证编码数据的完整性,采用非编码方式应保证触发脉冲的宽度符合设计要求。

5.5.2 对触发信号的输出通道宜采用冗余设计,当某通道故障时可自动切入备用通道,阀组触发不受影响,通道故障事件应上报。

5.5.3 应采取措施防止出现阀组的单方向触发。

5.5.4 VBE 供电电源应实时监视,应防止电源故障时发出触发信号,以及电源能量不足时发出触发信号。

5.6 触发系统

5.6.1 触发的基本要求

触发信号必须有足够的能量和足够陡度的波形前沿。必须防止由控制系统的误动作,或电力系统扰动引起的误触发。

5.6.2 自动重触发

采用窄脉冲方式的触发系统应设置自动重触发功能,以防止晶闸管提前关断。

5.6.3 后备触发

后备触发作为正常触发的补充,在晶闸管元件承受的电压接近其额定阻断电压时动作。

5.7 通信功能

对已有的电网SCADA系统,SVC可与其通讯联接,采用的通讯规约应遵循标准的远动通讯规约,对非标准的通讯规约由SVC供方与上级自动化系统供应商协商解决。

6 试验方法

6.1 试验条件

6.1.1 除另有规定外,各项试验均在 4.1.1.3 规定的试验的标准大气条件下进行。

6.1.2 除另有规定外,周围环境应符合 4.1.3 规定的要求。

6.1.3 被试装置和测试仪表必须良好接地。

6.2 结构和外观检查

按 4.11 和 GB/T 7261 中第 4 章的要求逐项进行检查,具体方法由企业的产品标准规定。

6.3 装置功能试验

采用继电保护试验设备、示波器等对装置进行试验,必要时还需进行电力系统动态模拟试验,试验方法和试验项目由产品标准规定,装置的功能应符合商定的技术要求及本标准条款 5 的要求。

6.4 动模或实时数字仿真

应用于输电网的 SVC 应按照本标准条款 5.2 的要求或商定的调节控制要求进行物理动模或实时数字仿真试验。

6.5 过载能力试验

按 4.6 的规定,对装置进行过载能力试验。装置经受过载试验后应无绝缘损坏。

6.6 绝缘性能试验

根据 4.7 的要求,按 GB/T 7261 中第 20 章的规定,对装置进行绝缘电阻测量、绝缘强度试验。

6.7 振动、冲击与碰撞试验

根据 4.8 的要求,按 GB/T 7261 的规定,对装置进行震动冲击与碰撞试验。

6.8 耐湿热性能环境试验

按 GB/T 2423.4 规定的试验方法对装置进行交变湿热试验。

6.9 电磁兼容性性能试验

6.9.1 辐射电磁场干扰试验

根据 4.10.1 的要求,按 GB/T 14598.9 的规定,对装置进行辐射电磁场干扰试验。

6.8.2 快速瞬变干扰试验

根据 4.10.2 的要求，按 GB/T 14598.10 的规定，对装置进行快速瞬变干扰试验。

6.8.3 脉冲群干扰试验

根据 4.10.3 的要求，按 GB/T 14598.13 的规定，对装置进行脉冲群干扰试验。

6.8.4 静电放电干扰试验

根据 4.10.4 的要求，按 GB/T 14598.14 的规定，对装置进行静电放电干扰试验。

6.10 连续通电试验

装置在完成调试后，应进行时间为 72h（常温）的连续通电试验。通电试验的具体要求由产品标准规定。试验方法由企业的产品标准规定。

7 检验规则

7.1 检验分类

装置的检验分为出厂试验和型式试验两种。试验项目列于表 1。

表1 试验项目

序号	项 目 名 称	技术要求	试验方法	出厂试验	型式试验	备注
a	结构和外观检查	4.11	6.2	√	√	
b	装置功能试验	④	6.3	√	√	
c	电力系统模拟试验	⑤	6.4	√①	√①	
d	过载能力试验	4.6	6.5		√	
e	绝缘性能试验	4.7	6.6	√②	√	
f	振动、冲击与碰撞试验	4.8	6.7		√	
g	耐湿热性能环境试验	4.9	6.8		√	
h	电磁兼容性能试验	4.10	6.9		√③	
i	连续通电试验	6.10	6.10	√	√	
① 应用于输电系统 SVC。 ② 只进行绝缘电阻测量和耐压试验。 ③ 新产品定型鉴定前做。 ④ 按照商定的技术要求确定，未商定时按照条款 5 所规定的最低要求进行。 ⑤ 按照商定的技术要求确定。						

7.2 合格判定

进行型式试验时，如未发现有主要缺陷，则判定试品为合格。

7.3 主要缺陷

装置的主要缺陷是指设计缺陷、需经更换重要元器件后才能消除，或一般情况下不可能修复的缺陷（易损件除外）；其余的缺陷作为一般缺陷，但一般缺陷数量大于等于 3 时视为主要缺陷。

8 标志和资料附件

8.1 标记

8.1.1 每台装置应在显著部位设置持久明晰的标志和铭牌，其内容包括：

- a) 制造厂全称及商标
- b) 产品型号、名称

- c) 制造年、月和出厂编号
 - b) 装置的额定值及主要参数
- 8.1.2 包装箱上应用不易洗刷或脱落的涂料作如下标记：
- a) 发货厂名、产品型号、名称
 - b) 收货单位名称、地址、到站
 - c) 包装箱外形尺寸及毛重
 - d) “防潮”、“向上”、“小心轻放”等标记
- 8.1.3 产品执行的标准应明示。
- 8.1.4 标志和标示应符合 GB 191 的规定。
- 8.2 资料附件
- 随同装置一起供应的应有：
- a) 装置文件、资料清单及文件资料
 - b) 装置的电气原理图及接线图
 - c) 产品出厂合格证书
 - d) 按备品清单或合同规定提供的备品、备件（如元器件、易损件、测试插件、接线座、预制导线等）、安装附件、专用工具等
 - e) 装箱清单
 - f) 必要时，还应提供维修、调试所必须的仪表、电气元件的说明书
- 9 包装、运输、存储
- 9.1 包装
- 9.1.1 产品包装前的检查
- a) 产品的附件、备品、合格证和有关技术文件是否齐备；
 - b) 产品外观有无损坏；
 - c) 产品表面有无灰尘。
- 9.1.2 包装的一般要求
- 9.1.2.1 装置包装时应用塑料制品作为内包装，周围用防震材料垫实放于外包装箱内。
- 9.1.2.2 包装箱应符合 GB/T 13384 的规定，按照装箱文件及资料清单、装箱清单如数装箱；随同装置出厂的合格证和有关技术文件应装入防潮文件袋中，再放入包装箱内、
- 9.1.2.3 装置的包装应能满足按 GB/T 4798.2 规定的运输要求。
- 9.2 运输
- 装置的运输应符合 GB 4798.2 的规定。
- 9.3 贮存
- 9.3.1 贮存装置的场所应干燥、清洁、空气流通，并能防止各种有害气体的侵入，严禁与有腐蚀作用的物品存放在同一场所。
- 9.3.2 包装好的装置应保存在相对湿度不大于 85%，周围空气温度为 $-25^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$ 的场所。
-

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1010.4—2006

高压静止无功补偿装置 第4部分 现场试验

High-voltage static VAR compensator

Part 4 Field tests

2006-09-14 发布

2007-03-01 实施

中华人民共和国发展与改革委员会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语	1
4 现场试验	3
4.1 概述	3
4.2 设备及子系统试验	3
4.3 系统调试试验	7
4.4 验收试验	10

前 言

本标准是“高压静止无功补偿装置”系列标准中的第4部分，该系列标准共分为5个部分：

- 第1部分：系统设计
- 第2部分：晶闸管阀的试验
- 第3部分：控制系统
- 第4部分：现场试验
- 第5部分：密闭式水冷却装置

本标准主要是参考国内外的相关标准、规定，总结多年来的实际工程经验编写而成。本标准目前尚无对应的国际标准。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由中国电力企业联合会归口。

本标准起草单位：

主要起草单位：中国电力科学研究院

参加起草单位：

本标准主要起草人：

本标准由中国电力科学研究院负责解释。

高压静止无功补偿装置 第4部分 现场试验

1 范围

本标准适用于输电系统和配电系统中使用晶闸管的静止无功补偿装置（以下简称“SVC”）新建工程的现场试验。SVC可应用于6kV及以上电力系统，其中晶闸管控制的支路可直接挂接于6~66（63）kV系统。对于扩建、改建工程可以参照本标准相关部分执行。

本标准包括了SVC以及与它相配套的各种辅助设备在现场安装中和安装后的试验和验收。对现场进行的常规试验、现场交接、验收试验和带电试运行等试验项目和内容做了原则规定，分为设备及子系统试验、系统调试试验和验收试验三个部分。每个SVC工程均有其特殊性，应针对具体工程条件和要求使用本标准，必要时应作相应的补充。

本标准主要是针对晶闸管控制电抗器（TCR）型和晶闸管投切电容器（TSC）型SVC编制，适当兼顾晶闸管投切电抗器（TSR）型SVC的某些要求。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB4824—2004	工业、科学和医疗（ISM）射频设备电磁骚扰特性 限值和测量方法（CISPR 11:2003，IDT）
GB/T 12325	电能质量 供电电压允许偏差
GB 12326	电能质量 电压波动和闪变
GB/T 14549	电能质量 公用电网谐波
GB/T 15543	电能质量 三相电压允许不平衡度
GB 50150—97	电气装置安装工程 电气设备交接试验标准
IEEE std 1303-1994	IEEE Guide for Static VAR Compensator Field Tests

3 术语

本标准采用了下列术语。

3.1 静止无功补偿装置（SVC） static var compensator

由静止元件构成的并联可控无功功率补偿装置，通过改变其容性或（和）感性等效阻抗来调节输出，以维持或控制电力系统的特定参数（典型参数是电压、无功功率）。

3.2 晶闸管控制电抗器（TCR） thyristor controlled reactor

由晶闸管控制的并联电抗器，通过控制晶闸管阀的导通角使其等效感抗连续变化。

3.3 晶闸管投切电容器（TSC） thyristor switched capacitor

由晶闸管投切的并联电容器，通过晶闸管阀的开通或关断使其等效容抗成级差式变化。

3.4 晶闸管投切电抗器（TSR） thyristor switched reactor

由晶闸管投切的并联电抗器，通过晶闸管阀的开通或关断使其等效感抗成级差式变化。

3.5 滤波（固定）电容器（FC） filter/fixed capacitor

由电容器和电抗器（有时还有电阻器）适当组合而成的并联装置，兼有无功补偿、滤波和调压功能。

3.6 晶闸管级 thyristor level

晶闸管阀的组成部分，由一对反并联的晶闸管（或晶闸管和二极管反并联）构成，包括辅助电路（触发、保护、均压、阻尼元件等）。

3.7 晶闸管阀 (TV) thyristor valve

晶闸管级的电气和机械联合体，配有连接、辅助部件和机械结构，它可与 SVC 每相的电抗器或电容器相串联。

3.8 晶闸管电子电路 (TE) thyristor electronics

在阀电位上执行控制功能的电子电路。接受阀基电子单元的控制信号，并向阀基电子单元回报阀的信息。

3.9 阀基电子单元 (VBE) valve base electronics

处在电位上的电子单元，是 SVC 控制系统与晶闸管阀之间的接口。

3.10 闭锁 blocking

控制系统不发出触发信号，使晶闸管阀处于关断状态。

3.11 控制系统 control system

对 SVC 进行调节、保护、触发和监测等单元的总称。

3.12 响应时间 response time

当输入阶跃控制信号后，SVC 输出达到要求输出值的 90% 所用的时间，且期间没有产生过冲（图 1）。

注：由于电压变化范围较小，难以获得清晰的变化曲线，一般可以用无功电流变化曲线来说明响应时间。

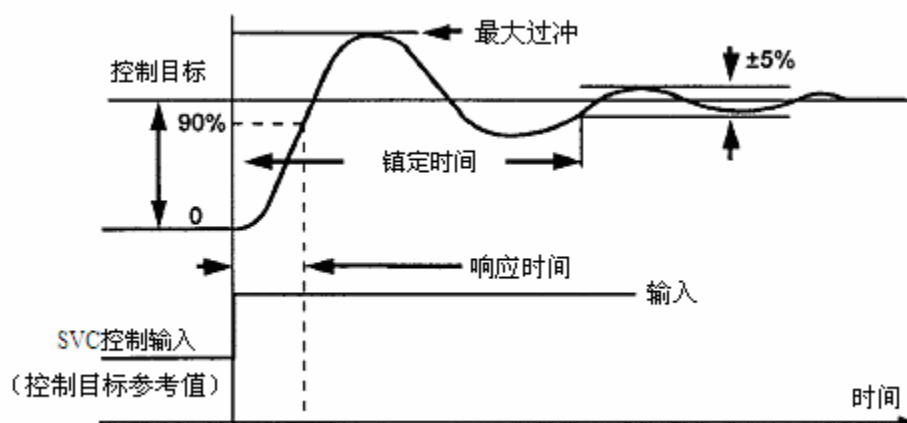


图1 响应时间和镇定时间定义

3.13 镇定时间 settling time

当输入阶跃控制信号后，SVC 输出达到要求输出值的 $\pm 5\%$ 范围内所用的时间（图 1）。

3.14 电压/电流特性 (V/I) voltage/current characteristic

SVC 在连接点处的稳态电流与电压之间的关系。

3.15 控制范围 control range

在连接点处由 SVC 提供的无功电流或无功功率的感性至容性最大变化范围。

3.16 滞后运行 lagging operation

SVC 吸收容性无功，等效于并联电抗器。

3.17 超前运行 leading operation

SVC 发出容性无功，等效于并联电容器。

3.18 参考电压 reference voltage

SVC 运行在既不发出、也不吸收无功功率时的电压。

3.19 斜率 (SL) slope

在 SVC 的线性可控范围内, 其电压—电流特性的斜率, 即电压变化对电流变化 (标么值) 的百分数。

3.20 电压击穿 (VBO) 保护 voltage break-over protection

晶闸管的一种过电压保护, 当电压达到设定的电压值时使晶闸管触发开通。一般采用击穿二极管 (BOD)。

3.21 公共连接点 (PCC) point of common coupling

电力系统中一个以上用户的连接处。

3.22 考核点 (CP) check point

供用电双方合同规定的指标衡量点。

3.23 降容运行 derated operation

设备或系统运行在比原有设计更有限的性能水平上。降低定额运行通常是在预防故障或由于系统部件发生故障时实施。

3.24 带电试验 energization test

任何一种需给 SVC 装置或部分设备加系统电压的试验。

3.25 试运行 trial operation

系统调试试验的一部分, 在系统正式运行前, 将 SVC 装置投入工作状态, 考核其稳定性、调节平滑性和运行可靠性。

3.26 常规设备 conventional equipment

SVC 装置内除控制系统、晶闸管阀及其冷却系统外的其它常用设备。

4 现场试验**4.1 概述**

现场试验分成以下几个步骤:

- 设备及子系统试验
- 系统调试试验
- 验收试验

设备及子系统试验是指在 SVC 主电路带电前所有可能做的现场试验, 如有需要, 可以对个别设备单独进行高压耐压试验, 或对控制系统或其它设备使用交流或直流低压控制电源。设备及子系统试验应由供方负责完成。

系统调试试验是指在 SVC 主电路带电情况下完成的对 SVC 规定性能进行检验的现场试验。系统调试试验应在供方负责、需方协助的原则下, 由双方共同完成。

验收试验是指在 SVC 系统调试试验完成后, 需方对 SVC 规定性能再次进行验证的现场试验。验收试验应由需方负责完成, 或由需方监督供方完成。

所有现场试验程序应按照设备及子系统试验、系统调试试验和验收试验的次序完成。验收试验中与系统调试试验重复的试验项目, 经供方和需方协商并认可该试验结果, 在验收试验中可不再重复进行该试验项目。

4.2 设备及子系统试验**4.2.1 设备及子系统试验概述**

设备及子系统试验是 SVC 主电路带电试验前对 SVC 中的所有常规设备和子系统的现场检查和试验, 包括对 SVC 常规设备、晶闸管阀、阀冷却设备、控制系统和滤波器/电容器组等的试验以及 SVC 全系统的低压通电试验。

4.2.2 常规设备**4.2.2.1 常规设备检查**

SVC 装置内常规设备在试验前都应完成基本检查, 包括设备到达现场后的检查、安装检查 (包括紧固件是否牢固、接线方式及接地是否正确以及绝缘是否清洁无损等)、电气与机械调整等。

4.2.2.2 常规设备试验

依照合同技术规范或现行国家标准 GB 50150 等对常规设备进行交接试验。SVC 装置内常规设备包括变压器、隔离开关和接地开关、断路器、互感器、放电装置、熔断器、避雷器、电容器、电抗器、电阻器、辅助电源、穿墙套管、绝缘子、母线、电缆（动力和控制的）及加热、通风、空调等设备。常规设备的防火和监测系统也应得到检验。

4.2.3 晶闸管阀

晶闸管阀包括 SVC 整个阀结构及与其相连的户内母线、穿墙套管、互感器、冷却管路、触发和检测信号传输系统、阀基电子单元（VBE）和晶闸管电子电路（TE）。

4.2.3.1 阀基电子单元、晶闸管电子电路和光纤的检查

检查晶闸管电子电路上 TE 板接插以及和晶闸管的连接是否正确、可靠；测量从阀基电子单元到晶闸管电子电路的（或相反方向）每一根光纤的衰减；检查每根光纤连结是否正确；验证监视回报信号已发送并被正确接收。

4.2.3.2 冷却回路的检查

检查在所有并联路径中冷却回路无阻塞、无泄漏；检查冷却回路的连结。

4.2.3.3 阀定压机构的检查

确认晶闸管弹簧压紧以保证晶闸管与散热器之间接触良好，符合设计要求，确认导线螺栓连结牢固。

4.2.3.4 电路阻抗的检查

测量每对阀两端的电阻（R）和电容（C）或检验 RC 阻尼回路的连通性。

4.2.3.5 接口的检查

在晶闸管阀的单个设备和安装检查均已完成，相关文件（图纸、手册、试验计划、检验单、软件一览、功能框图等）有效，根据相关图纸逐一检验所有设备端子间相互连接的正确性及可靠性。

4.2.3.6 阀的低压触发与监测试验

阀在低电压工作状态下的触发与监测试验通常用以检验晶闸管阀（TV）、晶闸管电子电路（TE）和阀基电子单元（VBE）工作的正确性。

a) 低压触发试验

将晶闸管阀或部分晶闸管阀接入低压交流回路，保证晶闸管和晶闸管电子电路能够正常工作。控制系统以低压交流回路的电压信号作为控制电压，由阀基电子单元对晶闸管阀发出触发信号。逐一观察每个阀两端电压信号、触发信号和阀电流信号，对这些信号进行比较，确保每相阀接收到的触发信号满足阀两端电压相位和电流极性的要求。

b) 监测试验

在晶闸管阀被控制系统触发导通的状态下，在阀基电子单元检查阀回报信号，确定其正确回报阀的工作状态，保证每一个晶闸管和晶闸管电子监测回报电路的完整性和正确性。

4.2.4 阀冷却设备

阀冷却设备包括阀外围的全部冷却回路（即管道、泵、热交换器、过滤器、净化器、控制器、仪表、阀门及风机等），在某些试验中，还应包括阀体内部冷却配水回路。

4.2.4.1 安装检验

阀冷却设备一般预先装配，并进行一部分出厂试验，在现场进行组装调试。对于现场安装的完善性与正确性应借助检验单、图表、图纸及说明书进行可视检查。检查内容包括冷却系统相关设施（如安装螺栓）、间隙（为振动、热膨胀、排气等预留）、窗孔、过道及维修空间、警告及标志信号、照明、漏水收集、地板及其它。应核对冷却介质和易耗品（如冷却水、过滤器、去离子树脂等）的完整性和质量以及替代品、备品等。

冷却设备安装检验后进行管路冲洗，水冷却系统第一次注入的水质（如 PH 值等）应注意进行跟踪，进行冲洗操作，包括所有分支管道、晶闸管阀、热交换器等。反复启动及停止水泵，重复地操作阀门，直至在过滤器里没有杂质颗粒残留为止。

4.2.4.2 冷却电源检查

记录电源输入电压，观察输入电压消失时的报警信号。

4.2.4.3 冷却辅助设备检查

检查全部自动操作的阀门、闸门等部件的动作和位置，检查备用设备。

4.2.4.4 水泵及风机检查

检查水泵及风机旋转方向；检查其启动状况；检查旋转的水泵供电电源停电时备用水泵的启动状况；记录电动机的启动和运行电流；检查所有三相电动机在人为使之单相运行时的过载跳闸时间；检查水泵及风机运行时的噪声和振动情况。

4.2.4.5 去离子器检查

检查去离子器维持冷却剂电阻率的性能。

4.2.4.6 表计检查

对冷却设备上的所有表计进行校准并检查其是否正常工作。

4.2.4.7 热交换器检查

对热交换器以及所有管路、焊接处、连接处的压力状况进行检查。

4.2.4.8 绝缘强度试验

与主机热负载直接相连的主水管道应满足相应电压等级的绝缘强度之外，其它带电部件与地（外壳）之间的绝缘电阻不低于 $10\text{M}\Omega$ ，带电部件与地（外壳）之间应能承受 2000V 的工频试验电压，持续时间为 1 分钟。

4.2.4.9 可触及金属部分接地电阻测量

通过测量控制柜体主接地点与可能触及的金属部分的接地电阻，以验证接地的可靠性。测量前应断开控制柜的电源，并扫清测量点的油污。采用毫欧表（2.5 级）或电桥等测量仪器。试验时，采用直接测量法，将仪表的端子分别与接地端子和柜壳或应与接地的导电金属件连接。所有可触及金属部分与接地点之间的电阻应不大于 0.1Ω ，接地点应有明显的标志。

4.2.4.10 控制与保护性能试验

对阀冷却设备控制器进行检查，包括对控制保护定值、传感器、仪器指示数以及报警等进行检查和校准，对控制器的检测系统、压力、室内温度和湿度读数及其他相关系统进行检验。根据通讯协议要求检查水冷却系统控制器与 SVC 控制系统的通讯并进行远程控制性能试验。

检测冷却设备的电气回路在冷却系统出现异常情况时，能否起到控制和保护作用。按下列试验项目检验：

- a) 循环水泵的切换试验
- b) 冷却水的温度信号报警试验
- c) 冷却水流量报警试验
- d) 冷却水压力报警试验
- e) 交流电源失压报警试验
- f) 缓冲罐水位报警试验
- g) 电阻率报警试验
- h) 缓冲罐液位异常下降报警试验
- i) 阀厅温湿度及露点相关试验
- j) 控制器与主机通讯试验

4.2.4.11 管路耐压与密封性试验

将主水进出口管道连接成回路，管道施加 $0.8\text{--}1.2\text{Mpa}$ 的水压，保持一小时，各管道应无破裂、渗水等现象。如缓冲水箱为气压罐体，应进行密封性试验：施加工作压力 1.5-2 倍的气压保持 12 小时，压降不大于初始气压的 5%。

4.2.4.12 连续运行试验

在各单项试验合格之后，应进行整机连续运行试验。试验时，分别将主副水管道接通，接通电源，开启整机运行。调整管道各阀门，使主水流量、压力、水质等达到并维持在额定值，观察电机、水泵、风机、热交换器等主要部件。连续运行时间 72 小时，在试验期间应无异常现象发生，主水无泄漏。记录水冷却系统连续运行期间的参数。

4.2.5 控制系统

SVC 控制系统包括 SVC 调节、保护、监控和阀基电子单元等所有二次控制与保护装置。

4.2.5.1 电源检查

记录电源的输入电压并确保控制系统电源指示的正确，观察在失去工作电源时备用电源的启动情况，观察在失去电源时报警信号正确动作情况，确保在最高和最低的规定电压下的控制性能。

4.2.5.2 保护整定值检查

检查所有继电保护单元整定值与设计值一致。

4.2.5.3 绝缘性能试验

用空载电压为直流 500V 的测试仪器测量各回路之间的绝缘电阻，应符合以下规定：

- a) 所有导电回路与地（或与地有良好接触的金属框架）之间的绝缘电阻应不小于 $20M\Omega$ 。
- b) 无电气联系的各导电回路之间的绝缘电阻应不小于 $20M\Omega$ 。

4.2.5.4 互感器接口试验

应检验所有与 SVC 控制相关的互感器的变比和接线，同时检验电缆与端子的连接是否正确和牢固，加电试验应采取安全措施防止反送。

4.2.5.5 监测接口试验

应检验所有与 SVC 控制相关的控制系统输入节点信号的正确性。如电源丢失、断路器或隔离开关断开、晶闸管损坏和冷却系统故障等监控和报警信号是否送到控制系统并显示正确。

4.2.5.6 控制接口试验

应检验所有与 SVC 控制相关的控制系统输出节点信号动作的正确性。通过控制系统输出断路器、有载分接开关、水冷系统启动/停机等控制命令，检验电缆与端子的连接点，在对应的控制箱里检验这些相应信号动作的正确性。

4.2.5.7 VBE 和 TE 接口试验

控制系统通过 VBE 对所有触发通道和 TE 进行晶闸管的触发和监测试验，检查阀的触发和回报的正确性，该试验与 4.2.3.6 相同。

4.2.5.8 通讯接口试验

如 SVC 控制系统设有后台管理人机界面，或控制系统和变电站综合自动化系统间存在通讯接口，则应从控制系统的输入接口注入电压、电流信号和断路器开关节点信号，检验人机界面的指示是否正确；同时从人机界面发出控制命令，检验控制系统的执行是否正确。通过该试验测试控制系统通讯接口工作的正确性和可靠性。

4.2.6 电容器/滤波器组

滤波器包括调谐滤波器和高通滤波器两种基本型式。除了不同类型滤波器的调谐有差异外，检验滤波器的方法是相同的。

对于调谐滤波器（单调谐或双调谐滤波器），测量每相元件的电容、电感和电阻。通过计算和测试，画出阻抗频率特性，找出滤波器谐振点。当滤波器谐振点与设计值存在偏差时，可通过调整元件参数（如电抗器感抗值）将滤波器调谐到设计的特征频率。

对于高通滤波器，去掉并联电阻器，按调谐滤波器的方法进行元件参数的测试，并将谐振点调谐到设计的特征频率。

4.2.7 SVC 低压通电试验

SVC 在正式通电之前应进行低压通电试验，以保证任何安装或试验前的错误都能以最小的设备损坏风险检查出来。在低压通电试验中，SVC 控制、同步及控制系统的稳定性在低电压下得到检验，触发回路全部相位关系的正确性得到保证，晶闸管阀基电子单元及晶闸管电子电路的故障警报可靠性得到检查。低压通电试验是 SVC 装置整个系统在加全电压之前的最全面的检验，分为继电保护传动试验和调节监控低压试验。

4.2.7.1 继电保护传动试验

从控制系统端子注入电压或电流信号，检验 SVC 所有支路（滤波器/电容器支路、TCR 支路或 TSC 支路等）的各种保护和报警功能，确认继电保护单元的整定值合理、动作逻辑正确、跳闸回路完好。

4.2.7.2 调节监控低压试验

将一个与系统高压相序相同的三相低电压接入 SVC 母线，如果在 SVC 变压器低压侧通电，在高压侧应采取安全措施防止反送电。

SVC 的某些部分应在低电压环境下进行调整,如控制系统母线电压 PT 输入信号可用与试验电压同相位的三相交流电压替代;晶闸管阀组仅使用部分晶闸管以保证阀组能够正常工作;SVC 控制系统部分输入信号处理环节和部分操作闭锁逻辑应进行修改,保证 SVC 控制系统在低电压环境下正常工作。

试验中 SVC 试验电流通过下式计算:

$$I_{test} = Q_{nom} \frac{V_{test}}{(V_{nom})^2}$$

式中:

Q_{nom} ——SVC 各支路额定电压下的额定无功功率

I_{test} ——SVC 各支路试验电压下的最大试验电流

V_{test} ——SVC 低压试验的试验电压

V_{nom} ——SVC 额定电压

调节监控低压试验应尽可能试验更多的 SVC 功能,包括测量 TCR、TSC、滤波器电流、滤波器不平衡电流并推算到全电压水平下,通过低压负荷或电压阶跃响应来完成控制器的动态响应试验。

4.3 系统调试试验

4.3.1 系统调试试验概述

系统调试试验是在 SVC 主电路带电情况下现场检验 SVC 规定性能的试验。试验前应按现场安全规定进行相应的准备工作,包括落实保障试验安全的措施、试验时的通讯、开操作票等。系统调试试验必须在成功完成设备及子系统试验之后才能进行。系统调试试验分为三个试验步骤:

——通电试验

——运行(操作)和性能试验

——试运行

4.3.2 通电试验

4.3.2.1 通电试验概述

通电试验的主要项目包括:通电前检查、初通电试验和运行启动试验。

4.3.2.2 通电前检查

通电前最后的检查应保证拉开所有的接地刀闸,临时接地已被拆除,松动的母线连接处已被复原。应作适当的检测以保证所有闭锁装置与保护电路的功能都已恢复。在通电之前应该再度强调所有安全事项。

通电前应专门检查系统接地状况,这项检查保证所有的设备接地、接地变压器和系统接地的安装与连接符合设计图纸要求。

4.3.2.3 初通电试验

初通电试验前,现场运行人员应做出安排,保证电网能吸收或发出所要求的无功功率,保证电网运行方式能够满足可能发生的无功变化。如果无法达到这一要求,试验时应降低无功功率的输出。

滤波器支路应按照先低后高的次序逐一给各次滤波器组送电,以避免产生谐振过电压,如果电网条件允许,所有滤波器最后可同时送电。滤波器送电时,应记录母线电压变化,防止出现过电压现象,并校核电力系统短路容量值。

TCR、TSC 或 TSR 支路应在晶闸管阀未加触发脉冲时进行初通电试验,即晶闸管处于闭锁状态时送电,以检验阀的电压承受能力以及 **回报** 系统。

电容器/滤波器、TCR、TSC 或 TSR 支路的送电时间应不少于 5 分钟,在确定支路一切工作正常后才可退出。初通电试验可以重复多次,间隔时间应保证电容器完全放电。

4.3.2.4 启停顺序试验

设计有紧急停止功能的 SVC,应首先进行紧急停止功能试验,验证其工作的可靠性。然后按设计的启动和停止顺序,手动和自动投切各支路,验证每一支路的可控性和 SVC 的闭锁及解除闭锁能力。

4.3.3 运行和性能试验

4.3.3.1 连续运行范围试验

SVC 的连续运行范围试验用以检验 SVC 在连续工作模式下能工作在设计的最大容性无功功率到最大感性无功功率。

SVC 在装置额定电压下输出的实际无功功率可用测量值按下列公式确定：

$$Q_{act} = Q_{mea} \left[\frac{V_{nom}}{V_{mea}} \right]^2$$

式中：

Q_{act} ——SVC 在装置额定电压下输出的实际无功功率

Q_{mea} ——测量的无功功率

V_{nom} ——SVC 的额定电压

V_{mea} ——测量的母线电压

4.3.3.2 电压特性试验

SVC 的斜率是在 SVC 控制范围内电压变化的标幺值和电流变化的标幺值之比（见图 2）。

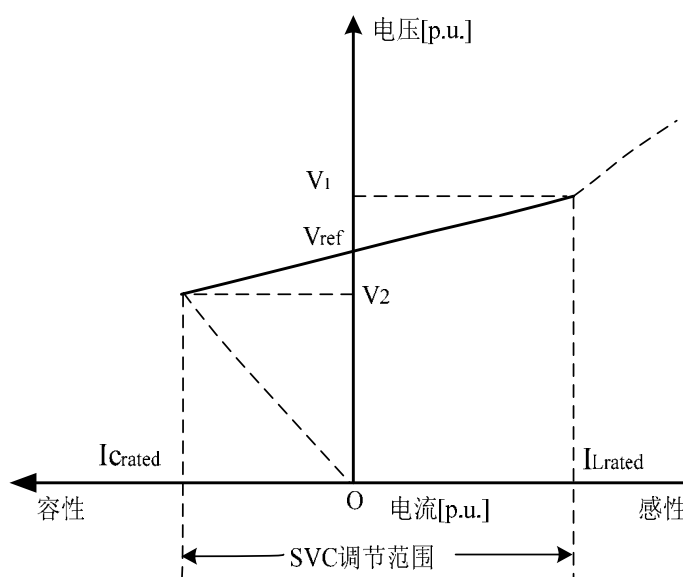


图2 静止无功补偿装置的斜率

图中：

I_{Crated} ——额定容性电流

I_{Lrated} ——额定感性电流

V_1 ——在额定感性电流时的被控电压

V_2 ——在额定容性电流时的被控电压

V_{ref} ——参考电压

SVC 的斜率可按下式求出：

$$V_{SL(inductive)} = \left[\frac{V_1 - V_{ref}}{V_{ref}} \right] * 100\%$$

$$V_{SL(capacitive)} = \left[\frac{V_{ref} - V_2}{V_{ref}} \right] * 100\%$$

式中：

$V_{SL(inductive)}$ ——是感性斜率；

$V_{SL(capacitive)}$ ——是容性斜率。

总斜率 = $V_{SL(inductive)} + V_{SL(capacitive)}$

用于控制系统电压的 SVC 装置，其斜率特性应用测量和计算进行验证。在电压控制运行模式下，SVC 的无功功率输出采用改变参考电压 V_{ref} 来调节，直到获得 SVC 最大感和容性输出。

对于最大感性输出的电压特性的斜率，可按下式求出：

$$V_{SL} = \left[\frac{V_{mea} - V_{ref}}{V_{ref}} \right] * 100\%$$

对于最大容性输出的电压特性的斜率，可按式(1)求出：

$$V_{SL} = \left[\frac{V_{ref} - V_{mea}}{V_{ref}} \right] * 100\%$$

式中：

V_{SL} ——斜率百分比值

V_{mea} ——SVC 最大无功功率输出时被测母线电压，用基准电压标幺值 (p.u.) 表示

V_{ref} ——参考电压，用基准电压标幺值 (p.u.) 表示。SVC 的斜率值应调整到合同技术规范中的规定值。

4.3.3.3 负载特性试验

用于补偿系统无功负荷的 SVC 装置，补偿负荷无功功率的特性应通过试验进行验证。在无功控制运行模式下，SVC 的无功功率输出特性的检验采用改变负荷或者投切滤波器、TSC 或 TSR 支路的方法实现。SVC 对负荷无功补偿的特性应在它的全部连续运行的规定范围内。

4.3.3.4 动态特性试验

用于电压控制的 SVC 装置，采用阶跃变化参考电压值 V_{ref} ，以检验 SVC 系统的动态特性。如果可能，应保留系统最小短路水平时 SVC 的响应记录。特别是在最小短路水平时 SVC 不应失去稳定，而在最大短路水平时保持良好的响应。

用于无功控制的 SVC 装置，采用阶跃变化参考无功值 Q_{ref} ，获得在改变扰动时 SVC 的响应记录。

4.3.3.5 特殊的控制功能试验(可选)

所有规定的特殊控制功能都应进行试验（如固定电容器组或电抗器组的投切、变压器有载分接开关的调节等）。对于某些已设计好的特殊运行条件或系统条件，应模拟自动关停。

4.3.3.6 备用设备试验

应对所有备用设备进行试验，在通电工作状态下完成切换操作，以检验转换时间及抗干扰能力。对电源回路转换以及冷却与辅助系统转换作出评价。

条件许可时，可对备用设备进行模拟故障试验，以保证双重故障时 SVC 装置依次关停或紧急关停。

4.3.3.7 降容运行试验(可选)

降低额定无功输出运行试验应在 SVC 分支回路退出工作的情况下进行，应记录并估算减小的无功功率输出。对于各种退出运行条件下的联锁性能也应进行检验。

4.3.3.8 谐波及其它技术指标的测量

在 SVC 装置投入和退出状态，分别测量 SVC 接入点的谐波电流、谐波电压畸变率和各滤波器支路的谐波电流。根据合同要求，对电压波动和闪变、三相不平衡度、电压偏差以及调相调压的效果等进行测试（参见 4.4.5）。检验滤波器吸收谐波的效果，验证滤波器设计是否在安全范围之内。

4.3.3.9 噪声干扰的测量

在 SVC 装置投入和退出状态，可对下列系统干扰进行选择测量，验证是否满足合同技术规范的要求。

- a) 音频噪声 (AN)
- b) 无线电干扰 (RI)
- c) 电视干扰 (TVI)
- d) 电力线载波 (PLC)
- e) 电话线载波 (TLC)

具体测量方法参照 GB4824 执行。

4.3.3.10 温升试验

对 SVC 满负载状态下温升状况进行检查并检验设备内部或母线连接处的潜在发热点。

试验应持续进行直到所有设备及冷却系统的温度达到并保持平衡，该读数应校正到大气环境最高温度，并符合合同技术规范中的要求。

对设备、母线、接地连接处、围栏等应进行红外线测温，以发现潜在发热点、连结不紧处或传导性发热。

温升试验记录应完整保留。

4.3.3.11 损耗评估

SVC 总损耗由设备的工厂试验数据和现场直接测量数据，通过计算来确定。应在不同的运行点确定损耗，包括在 SVC 额定工况、零无功功率以及最大容性和最大感性无功功率输出等工况，特殊运行点、所有设备均工作的工况也应包括在计算内。SVC 损耗占全部无功功率输出的比例应在合同技术规范规定的范围之内。

下列设备的损耗应列入 SVC 损耗中，其中 a)～e) 应根据谐波和环境状态，基于工厂测量和附加计算确定损耗。f)～h) 应在现场通过辅助配电断路器或设备终端处直接测量确定损耗。

- a) 电力变压器
 - 空载损耗
 - 负载损耗
 - 谐波损耗
- b) TCR/TSR 支路
 - 晶闸管阀损耗
 - 电抗器损耗
- c) TSC 支路
 - 晶闸管阀损耗
 - 电容器损耗
 - 电抗器损耗
- d) 机械式投切电容器或电抗器
 - 电容器损耗
 - 电抗器损耗
- e) 滤波器
 - 电抗器损耗，包括谐波损耗
 - 电容器损耗，包括谐波损耗
 - 电阻器损耗，包括谐波损耗
- f) 冷却系统
 - 水泵电力消耗
 - 风机电力消耗
 - 处理冷却介质电力消耗
- g) 控制系统
 - 控制电力
- h) 辅助系统
 - 建筑物的电力消耗
 - 辅助变压器损耗
 - 接地变压器损耗

有关损耗的计算，参照本系列标准第 1 部分（系统设计 8.6 条）。

4.3.4 试运行

试运行的时间应在最后的验收试验前确定，试运行时间至少 72 小时。在投入电网后，验证 SVC 装置具有按设计和合同技术规范书所规定的功能。如果 SVC 出现故障退出运行使得试运行中断，试运行试验必须重新进行。

4.4 验收试验

4.4.1 验收试验概述

验收试验是供方完成系统调试试验并提交试验报告后，需方为验证 SVC 性能有权再次进行的试验。只有成功完成所有系统调试试验，才能进行验收试验。SVC 的验收试验是建立在以往试验已被证实以及有据可查的基础上，验收试验中与系统调试试验重复的试验项目，经供方和需方协商，在验收试验中可不再重复进行。

验收试验一般包括下列类别：

- 静态试验（稳态试验）
- 动态试验
- 控制试验
- 电能质量测试
- 调节效果测试
- 其它项目测试

4.4.2 静态（稳态）试验

对以下 SVC 常规控制功能进行验证：

- a) 控制顺序
 - 1) 启动/停止
 - 2) 紧急停止
 - 3) 保护停止
 - 4) 控制模式选择
 - 无功功率输出恒定
 - 系统电压恒定
 - 零无功输出
 - 5) 操作转换
 - 就地/遥控
 - 手动/自动
- b) 控制范围和控制能力
 - 1) SVC 无功功率输出（就地/遥控）
 - 2) 参考电压调节能力（就地/遥控）
 - 3) 斜率调节能力（就地/遥控）
 - 4) 斜率线性度
 - 5) 电流限制作用
- c) 控制模式
 - 1) 设定参考无功功率值 Q_{ref} 并检验无功功率输出恒定
 - 2) 设定参考电压值 V_{ref} 并检验系统电压恒定

4.4.3 动态性能试验

应通过系统扰动检验 SVC 的动态性能，扰动应力求在正常的控制调节范围内使运行点偏移但不越限，同时监视 SVC 的响应时间。

下列实际运行条件能够对系统动态性能提供有价值的试验数据：

- a) 输电线投入和退出运行，附近电容器组充电或变压器组带载。
- b) SVC 投入或退出运行。
- c) 利用参考量（ V_{ref} , Q_{ref} ）的阶跃变化，使 SVC 在全部范围内运行，SVC 对系统运行的影响。
- d) 为了评估暂态及可能的谐振现象，在正常启动和停止 SVC、投切每个滤波器支路、在 SVC 不同运行范围内抽样测量，记录每个滤波器支路中的电流波形及母线电压波形。

记录并保留以上试验的数据或波形，作为 SVC 装置评估和以后测量的参考。

4.4.4 控制试验（可选）

合同技术规范所规定的特殊控制功能，如电容器组的投切、变压器有载分接开关的调节、备用设备的自动检测等，在实际的运行状态下都应被验证。

4.4.5 电能质量测试

4.4.5.1 谐波的测试

对电力系统用 SVC 应测量母线的谐波电压和注入系统的谐波电流，同时还要测量变压器一次侧和二次侧的谐波电压和电流。应注意谐波潮流的方向、滤波作用、是否存在谐波放大、谐波器运行的安全

性校验等。

对工业用户 SVC 应在合同技术规范中要求的母线和公共连结点测量谐波。

滤波器组可以采用不同组合，谐波测量应根据国家标准 GB/T 14549 或合同技术规范规定进行。

4.4.5.2 闪变和电压波动的测试(可选)

在 SVC 相关母线上，通过专用的闪变仪测量闪变，通过录制电压方均根值曲线检验电压波动。应根据国标或合同技术规范进行闪变和电压波动的测量和评估。相关的国家标准：GB 12326。

4.4.5.3 三相不平衡度的测试(可选)

对于三相对称运行的 SVC，应在系统平衡情况下测量 SVC 三相稳定的导通角，进行对称性试验。

对于具有平衡化功能的 SVC，应根据国标或合同技术规范进行三相平衡度的测量和评估。相关的国家标准：GB/T 15543。

4.4.5.4 电压偏差的测试(可选)

对于指定母线的电压稳定状况应根据国标或合同技术规范规定的电压允许偏差用测量数据加以验证。相关的国家标准：GB/T 12325。

4.4.6 调节效果测试

SVC 的调节作用主要反映在对电力系统的调压和调相上，即稳定母线电压和提高系统运行功率因数。SVC 的调节效果应用现场测量（和计量）数据予以验证，并符合合同技术规范的规定。

4.4.7 其它项目测试

用户认为有必要的其它测试项目，应进行测试。

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1010.5—2006

高压静止无功补偿装置 第 5 部分 密闭式水冷却装置

High-voltage static VAR compensator

Part 5 Closed-loop water cooling system

2006-09-14 发布

2007-03-01 实施

中华人民共和国发展和改革委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语	1
4 技术要求	2
4.1 正常工作条件	2
4.2 异常工作条件	2
4.3 外观	2
4.4 绝缘强度	2
4.5 接地	2
4.6 主水性能	2
4.7 冷却能力	3
4.8 换热器部件	3
4.9 系统配置和控制保护	3
4.10 噪声	4
4.11 耐压和渗漏	4
4.12 年利用率	4
5 试验要求	4
5.1 一般检查	4
5.2 绝缘试验	4
5.3 可触及金属部分与主接地点之间电阻的测量	4
5.4 主水电阻率试验	4
5.5 压力试验	5
5.6 水力性能试验	5
5.7 单相阀水流量试验	5
5.8 热工性能试验	5
5.9 噪声测量试验	5
5.10 控制及保护性能试验	5
5.11 电磁兼容试验	6
5.12 连续运行试验	6
5.13 水质性能试验	6
5.14 仪表校验	6
5.15 通讯试验	7
6 制造工艺	7
6.1 选材	7
6.2 焊接及安装	7
6.3 清洗	7
7 检验规则	7
7.1 试验分类	7

7.2 试验项目	7
8 包装、运输、贮存	8
8.1 包装	8
8.2 随机文件	8
8.3 运输	8
8.4 贮存	8
9 水冷装置型号规格	8
附录 A （资料性附录） 热工性能试验	9
附录 B （资料性附录） 水冷装置型号规格	11

前 言

本标准是“高压静止无功补偿装置”系列标准中的第 5 部分，该系列标准分为 5 个部分：

- 第 1 部分：系统设计
- 第 2 部分：晶闸管阀的试验
- 第 3 部分：控制系统
- 第 4 部分：现场试验
- 第 5 部分：密闭式水冷却装置

本标准主要是参考国内外的相关标准、规定，总结多年来的实际工程经验编写而成。本标准目前尚无对应的国际标准。

本标准的附录 A、B 为资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由中国电力企业联合会归口。

本标准起草单位：

主要起草单位：中国电力科学研究院

参加起草单位：

本标准主要起草人：

本标准由中国电力科学研究院负责解释。

高压静止无功补偿装置 第5部分 密闭式水冷却装置

1 范围

本标准适用于输电系统和配电系统中使用的静止无功补偿装置（以下简称“SVC”）的子系统——密闭式水冷却装置（以下简称“水冷装置”），SVC可应用于6kV及以上电力系统，其中晶闸管控制的支路可直接挂接于6~66（63）kV系统。

本标准规定了SVC水冷装置的系统构成、主要技术参数、功能、保护、工艺以及试验要求等。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 2682-1981	电工成套装置中的指示灯和按钮的颜色
GB3797-89	装有电子器件的电控设备
GB/T 14598.10-1996	电气继电器 第22部分：量度继电器和保护装置的电气干扰试验第四篇：快速瞬变干扰试验（IEC 255-22-4-1992，IDT）
GB/T 14598.13-1998	量度继电器和保护装置的电气干扰试验 第1部分：1MHZ脉冲群干扰试验（IEC 255-22-1-1988，EQV）
GB/T 14598.14-1998	量度继电器和保护装置的电气干扰试验 第2部分：静电放电试验（IEC 255-22-2-1996，IDT）
GB 50235-1997	工业金属管路工程施工及验收规范
DL/T 801-2002	大型发电机内冷水质及系统技术要求
JB/T 2932-1999	水处理设备技术条件

3 术语

本标准采用下列术语。

3.1 纯水 pure water

指将水中强电解质去除，同时将硅酸等弱电解质降低至一定程度的水。

3.2 传热系数 heat transfer coefficient

单位时间内，当平壁两侧流体的温度差为1K时，平壁一侧的流体通过固体平壁的每单位面积所能传给另一侧流体的总热量。

3.3 对数平均温差 average temperature difference in logarithm

换热器一端的温差减去另一端的温差，再除以这两个温差比的自然对数，具体计算公式见附录A。

3.4 主冷却水（主水） primary cooling water

在水冷装置管路（包括晶闸管阀冷却管路）内循环流动，用来作为晶闸管阀热转移介质的纯水。

3.5 副冷却水（副水） secondary cooling water

在水—水冷却方式中，用来冷却主水的水。

3.6 去离子 deionize

采用离子交换的方式将水中的阴阳离子去除的过程。

3.7 冷却容量 cooling capacity

在一定的主副换热介质对数平均温差的条件下，水冷装置能够冷却的晶闸管阀产生的损耗热量。

3.8 试运行试验 trial testing

是指在进行 SVC 系统调试试验时，水冷装置作为其子系统而进行的试验。

4 技术要求

4.1 正常工作条件

- a) 晶闸管阀厅温度为+15℃~+35℃，相对湿度不大于 60%。
- b) 水冷装置的其他室内部分的环境温度为+5℃~+35℃，相对湿度不大于 90%。
- c) 海拔高度不超过 2000 米。
- d) 一般采用双路电源供电，电压变化不超过额定电压的±10%，频率变化不超过额定频率的±1%。
- e) 运行地点无导电或爆炸性尘埃，无腐蚀金属或破坏绝缘的气体或蒸汽。
- f) 水冷装置工作区应无剧烈的振动或冲击。
- g) 采用水-水冷却方式时，副冷却水应满足下列要求：
 - 1) 悬浮物质不大于 30mg/l；
 - 2) pH 值为 6~9；
 - 3) 硬度不超过德国度 12（相当于每升中含有 0.12g 的 CaO）；
 - 4) 进口压力不小于 0.15Mpa；
 - 5) 进水温度为+5℃~+32℃。

4.2 异常工作条件

凡不满足 4.1 要求的均视为异常工作条件，技术要求由需方和供方商定。

4.3 外观

- a) 水冷装置各部件应安装端正、整齐，无明显偏差、松动现象。
- b) 容器和管路不得有明显凹陷，焊缝无明显夹渣，疤痕。
- c) 涂漆应均匀，不得有脱落、流挂、划痕、裂缝等缺陷。
- d) 指示灯和按钮的颜色应符合 GB/T 2682 的规定。

4.4 绝缘强度

4.4.1 水冷装置的控制器、电动机等低压电气设备与地（外壳）之间的绝缘电阻不低于 10MΩ。

4.4.2 低压设备与地（外壳）之间应能承受 2000V 的工频试验电压，持续时间为 1 分钟。

4.5 接地

所有可触及金属部分与接地点之间的电阻应满足 GB3797 条款 3.10.7.1 的要求。

4.6 主水性能

4.6.1 主水水质

大功率电力电子半导体发热器件冷却水采用密闭式循环的纯水，其中部分冷却水经旁路由离子交换器去离子，经离子交换器的出水应满足 DL/T 801 条款 3.1 的要求。系统补给水也应为纯水。当主水温度为 25℃ 时，水质应符合表 V-1 的规定。

表1 水质要求

	电阻率 (MΩ·cm)	pH 值	含氧量 (PPM)
主水水质	>1	6.8-8.0	≤100
离子交换器出水	>5	6.8-8.0	≤100
系统补给水	>0.2	6-9	不作要求

注：根据需方现场的使用情况，水质要求可以进行适当的调整。有时为防冻，可能在水中加一定比例的添加剂。

当向装置注入补给水或装置停机重新启动时，在额定的流量下，经水冷装置的离子交换器处理不超

过 3 小时，主水水质应达到上述要求。

4.6.2 主水流量

根据晶闸管阀的耗散功率及其至主冷却水的最高热阻并考虑 1.1~1.3 倍裕度来确定主水流量。

4.6.3 主水的温度

主水的出水温度和入水温度应根据水冷系统的现场运行环境温度及晶闸管阀温度要求来确定其范围。晶闸管阀运行时入水温度应不低于露点温度，并且出水与入水的温差应不高于 10°C。

4.7 冷却能力

在额定冷却容量情况下，主副换热介质的对数平均温度差不大于以下值：

- a) 水—水换热型取 5K；
- b) 水—风换热型取 8K。

4.8 换热器部件

换热器部件的传热系数在额定流速下应符合下列规定：

- a) 水—水换热器不低于 3500W/(m²·K)；
- b) 水—风换热器不低于 65W/(m²·K)。

4.9 系统配置和控制保护

4.9.1 水冷装置主要包括所有相互连接的管路，管路配件，循环泵，加热器，补水装置，缓冲罐，热交换器，过滤器，去离子设备，仪表，控制及保护系统以及其他必要的设备。

4.9.2 水冷装置采用充密封气体的缓冲水箱，或高位水箱的密闭式内循环系统，水箱设置水位指示，并具备膨胀系统冷却水缓冲的功能。

4.9.3 水冷装置设置两台循环泵，一用一备，单台工作泵应能满足系统最大设计流量，保证循环冷却水以恒定的流速通过发热器件。循环泵必须密封完好，不能漏水。

4.9.4 水冷装置包括一个用于维持冷却水高纯度的辅助去离子支路，该支路应包含由离子交换树脂构成的混床、精密过滤器和调节纯水流量的调节阀。系统根据被冷却设备的具体需要可设置由脱氧树脂构成的脱氧床，也可根据需要设置两套旁路离子交换器，采用一用一备工作方式。

4.9.5 水冷装置须设置补水装置，并根据系统情况设置手动或自动补水功能。

4.9.6 水冷装置采用水—水或水—风等热交换器将热量从封闭的主水系统传送到副换热介质中。

- a) 水—水热交换器应采取措施保证主水和副水不会发生混合；
- b) 水—风热交换器至少应设置一台备用风机。

4.9.7 水冷装置须设置循环冷却水压力、流量、温度、电阻率、阀厅露点温度、水箱水位等各参数的在线监测仪表。仪表应符合相关电磁兼容标准。

4.9.8 当主水温度低于阀厅露点温度时，冷却系统应能根据需要对主水进行加热。在寒冷地区，循环冷却水应采取防冻措施。

4.9.9 水冷装置应具备自动气水分离及排气功能。

4.9.10 水冷装置应设置 50-200μm 精密过滤器，若有特殊要求，由供方提供过滤精度。

4.9.11 水冷装置能监控自身运行和循环冷却水的情况，并向 SVC 装置发出故障报警信号，分为告警和跳闸两种等级。具体报警信号如下：

- a) 告警
 - 循环水泵的非正常切换；
 - 散热风机的非正常切换；
 - 循环冷却水温度低；
 - 循环冷却水温度高；
 - 循环冷却水流量低；
 - 循环冷却水压力高；
 - 循环冷却水压力低；

离子交换器出水电阻率低；
 循环冷却水电阻率低；
 缓冲水箱水位低；
 缓冲水箱气压低；
 阀厅露点温度告警。

b) 跳闸

两台循环水泵全停；
 循环冷却水温度超高；
 循环冷却水流量超低；
 循环冷却水压力超低；
 循环冷却水电阻率超低；
 缓冲水箱水位超低；
 动力电源失压；
 控制电源掉电；
 控制系统故障。

4.9.12 水冷装置应具备信号远传功能，监测信息能通过标准接口与 SVC 控制系统进行通讯，用于控制的信号应采用可靠的方式上传。

4.9.13 水冷装置控制器在正常运行条件下，应能对泵定期进行切换，循环工作，并具有简便的人机操作界面。

4.9.14 控制系统应具有漏水检测功能，当漏水量大于由需方和供方商定的数值时，应能向 SVC 控制系统发送报警信号。

4.10 噪声

水冷装置的室内部分其噪声不应超过 78dB，室外部分噪声不应超过 86dB，总体噪声控制指标应符合当地的环保标准要求。

4.11 耐压和渗漏

整个水冷装置的密闭式循环管路，在最大设计压力下长时间运行，应无破裂或漏水现象。

4.12 年利用率

水冷装置的年利用率不低于 99.5%。

5 试验要求

5.1 一般检查

按 4.3 的要求进行直观检查；
 检查泵、风机、测量仪表等组件的功能；
 检查电气部分的电气配线、焊接、标志和编号等是否符合设计文件及有关标准的规定。

5.2 绝缘试验

按本标准的 4.4 的规定进行。

5.3 可触及金属部分与主接地点之间电阻的测量

5.3.1 测量前应断开控制柜的电源，并清除测量点的油污。

5.3.2 测量仪器：毫欧表（2.5 级）。

5.3.3 试验时，采用直接测量法，将仪表的端子分别与接地端子和柜壳或应与接地的导电金属件连接。测量值符合 4.5 的要求，则认为合格。

5.4 主水电阻率试验

5.4.1 本试验通过测量主水电阻率上升时间，考核水冷装置的去离子能力。

5.4.2 测量仪器：电导仪（1 级）、流量计（0.5 级）

5.4.3 测量程序

- a) 接通主水管路，并将电导仪、流量计接入其中；
- b) 开启水泵，调节管路阀门，使主水流量达到规定值；
- c) 开启离子交换器，使去离子水流量达到规定值，并同时开始计时，观察主水电阻率上升情况；
- d) 在 3 小时内，主水电阻率达到规定值。

5.5 压力试验

5.5.1 水压试验

对水冷装置的所有管路施加设计压力的 1.2~1.5 倍水压，保持一小时，各管路无破裂或漏水现象。

5.5.2 气压试验

如缓冲水箱为气压罐体，应进行密封性试验：施加工作压力 1.5~2 倍的气压保持 12 小时，压力变化不大于初始气压的 5%

5.6 水力性能试验

5.6.1 水力性能试验的目的是测量水冷装置工作时的主水出水压力、流量及二者间的关系。

5.6.2 试验仪器：水压计（0.4 级）、流量计（0.5 级）

5.6.3 测量程序

- a) 将水压计和流量计接入主水回路，开启主水泵，调整阀门阀位，使主水的进水压力和出水压力差为额定压力损失，测量其流量。流量在 1.0~1.3 倍额定流量范围内，则认为合格；
- b) 调节阀门，测量并记录不同压力下的流量值，测量点数不少于 5 个；
- c) 绘一直角坐标系，横坐标示流量值，纵坐标示压力值，将所测的结果绘入坐标系中，得到被测装置的水力特性曲线。

5.7 单相阀水流量试验

5.7.1 单相阀水流量试验的目的是测量水冷装置正常工作时的主水是否均匀分配到各相阀中。

5.7.2 试验仪器：流量计（0.5 级）

5.7.3 测量程序

将流量计接入主水回路和各相阀支路中，开启主水泵，调整阀门阀位，使主水流量达到额定流量，记录各相阀的流量，若各相阀的流量值差值小于 5% 则认为合格。

5.8 热工性能试验

本试验主要是通过测量对数平均温差和传热系数两项指标，考核水冷装置的换热性能。

试验方法见附录 A。

5.9 噪声测量试验

5.9.1 测试时，环境噪声的水平至少应比装置的噪声低 6dB，且距被测装置 3m 内没有声音反射面（地面除外）。

5.9.2 从正对产品面，距离产品外壳 1m，高度为产品高度的一半处开始，环绕产品每间隔 1m 取一个参考点。将传声话筒置于参考点上测量一次噪声。取各点的算术平均值作为装置的实测噪声。噪声值应符合 4.10 的规定。

5.10 控制及保护性能试验

5.10.1 本试验的目的是检测水冷装置在正常运行时，是否执行正确控制，在异常情况下是否实现正确的报警功能。

5.10.2 测量仪器：水冷装置上配置的在线仪表。

5.10.3 测量程序

按下列试验项目检验水冷装置的控制和保护性能：

- a) 循环水泵的切换试验
- b) 冷却水的温度控制及越限报警试验
- c) 冷却水流量报警试验

- d) 冷却水压力报警试验
- e) 交流电源失压报警试验
- f) 缓冲罐水位报警试验
- g) 电阻率报警试验
- h) 缓冲罐液位异常下降报警试验
- i) 阀厅温湿度及露点相关试验
- j) 控制器与 SVC 控制系统通讯试验

以上试验符合 4.9 相应的规定, 则认为合格。

5.11 电磁兼容试验

本试验主要是确保水冷系统的供电电源回路、采集回路和控制回路在受到快速瞬变干扰或脉冲群干扰或静电放电干扰时不会出现误动、拒动、死机等现象。

5.11.1 快速瞬变干扰试验

- a) 试验的严酷等级: III 级, 即快速瞬变试验发生器的开路电压为 $2\text{kV}\pm 10\%$;
- b) 试验部位: 控制器电源输入、采集输入以及与主控制器的通信端口;
- c) 试验设备: 电磁兼容试验成套设备;
- d) 试验合格判据: 控制器不出现死机、复位、误报警及跳闸等现象;
- e) 试验方法依据 GB/T 14598.10。

5.11.2 脉冲群干扰试验

- a) 干扰试验波的特性参数: 频率: 1MHz , 允许偏差 $\pm 10\%$; 电压幅值: $2500\text{V}\pm 10\%$, 共模干扰;
- b) 试验部位: 控制器电源输入、采集输入以及与主控制器的通信端口;
- c) 试验设备: 电磁兼容试验成套设备;
- d) 试验合格判据: 控制器不出现死机、复位、误报警及跳闸等现象;
- e) 试验方法依据 GB/T 14598.13。

5.11.3 静电放电试验

- a) 试验类型及严酷等级: 采取空气放电的方式, 试验的严酷等级为 3 级, 即试验电压为 8kV ;
- b) 试验部位: 试验部位: 控制器的人机界面及控制器的开门把柄;
- c) 试验设备: 静电放电仪;
- d) 试验合格判据: 控制器不出现死机、复位、误报警及跳闸等现象;
- e) 试验方法依据 GB/T 14598.14。

5.12 连续运行试验

5.12.1 为保证水冷装置的可靠性, 在各单项试验合格之后, 应进行整机连续运行试验。

5.12.2 试验时, 开启整机运行, 调整管路各阀门, 使主水流量、压力、电阻率等达到并维持在额定值, 观察电机、水泵、风机热交换器等主要部件, 在试验期间应无异常现象发生, 无泄漏。

5.12.3 连续运行试验时间出厂试验为 6 小时, 现场连续运行试验为 72 小时, 在试验过程中应记录水冷装置运行参数。现场连续运行试验完成以后, 才允许进行试运行试验, 以检验水冷系统是否满足设计要求。

5.13 水质性能试验

5.13.1 试验通过测量去离子水的电阻率、PH 值、溶解氧, 考核水冷装置辅助去离子支路去离子性能。

5.13.2 测量仪器: 电导仪 (1 级)、PH 计 (1 级)、溶解氧仪 (1 级)。

5.13.3 测量程序

- a) 接通去离子水管路, 并将电导仪、PH 计、溶解氧仪接入其中;
- b) 开启离子交换器, 稳定后记录参数, 符合 4.6.1 表 1 数值则认为合格。

5.14 仪表校验

水冷装置出厂前应对所有仪表，例如压力、流量、温度、电阻率、水位等仪表进行校验，并提供符合国家计量要求的仪表校验报告。

5.15 通讯试验

根据 SVC 控制系统通讯接口要求，进行水冷装置的通讯与远程控制功能试验。

6 制造工艺

6.1 选材

应采用化学性能稳定的管路材质，满足 JB/T2932 水处理设备技术条件条款 8 防腐要求，避免因接触液体的管路材质中离子的过度析出污染水质，以保证循环冷却水的高电阻率以及离子交换树脂的使用寿命。管路结合面应满足 DL/T 801 条款 5.6 的要求。

6.2 焊接及安装

- a) 金属焊接须按照 GB 50235 的条款 5.1.11 的要求进行焊接；
- b) 对焊的焊口需干净、正圆、平直以及配合良好；
- c) 水冷装置管路应采用可靠的连接方式及密封材料；
- d) 预制后的管路组件安装时不得承受过大的拉伸或挤压力，所有管路必须伸展自如，以保证在热胀冷缩过程中不致引起管接头及管支撑破坏；
- e) 水冷装置管路设备应在洁净的环境下进行装配；
- f) 水冷装置管路及设备安装牢固，焊接平整，水平及垂直方向公差符合标准。

6.3 清洗

- a) 清洗方式：直流冲洗清污→开放式动态循环清洗
- b) 清洗工艺：水冲洗→酸洗→脱脂→水循环清洗
- c) 清洗监测项目
 - 水质外表感官
 - 温度
 - 电阻率
 - pH 值

7 检验规则

7.1 试验分类

水冷装置的试验分出厂试验、型式试验和现场试验。装置进行出厂试验前，内部各种单元是经过检验合格的产品。

7.2 试验项目

型式试验和出厂试验的项目见表 2。

表2 型式试验和出厂试验项目

序号	试验项目	试验分类		章节
		型式	出厂	
1	一般检验	√	√	5.1
2	绝缘试验	√	√	5.2
3	连接电阻的测量	√	√	5.3
4	主水电阻率试验	√	√	5.4
5	压力试验	√	√	5.5
6	水力性能试验	√	√	5.6
7	单相阀水流量试验	√		5.7

8	热工性能试验	√		5.8
9	噪声测量	√		5.9
10	控制及保护性能试验	√	√	5.10
11	电磁兼容试验	√		5.11
12	连续运行试验	√	√	5.12
13	水质性能试验	√		5.13
14	仪表校验试验		√	5.14
15	通讯试验			5.15

8 包装、运输、贮存

8.1 包装

产品的包装应符合包装运输规范的有关要求，保证产品在运输和存放过程中不受机械损伤，并有防雨防尘能力。

8.2 随机文件

- a) 产品合格证书；
- b) 使用维护所必需的电气原理图、装配图、接线图及说明书；
- c) 备用件一览表及主要外购部件说明书；
- d) 装箱清单。

8.3 运输

产品在运输过程中，不应有剧烈振动、撞击和倒放，运输温度应在 $-25^{\circ}\text{C}\sim+55^{\circ}\text{C}$ 之间。

8.4 贮存

产品短期（一般不超过3个月）贮存，温度应保持在 0°C 以上，可保留机内纯水，若长期存放则应将纯水放出，离子交换器中的离子交换树脂应单独存放，并保证其不脱水。

9 水冷装置型号规格

见附录B。

附 录 A
(资料性附录)
热工性能试验

热工性能试验

本试验主要通过测量对数平均温差和传热系数两项指标，考核水冷装置的换热性能。

试验中采用电加热器作为模拟热负载，电加热器的功率随被测水冷装置的功率不同而不同，其值应符合表 A.1 规定。

表 A. 1

冷却容量 kW	10~30	40~63	80~125	160~200	250~315
电加热器功率 kW	≥10	≥15	≥20	≥30	≥40

A. 1 水—水换热型水冷装置的试验

测量仪器：温度计（误差不大于±0.2℃）四支，流量计（0.5级）二台。

测量程序：

- a) 接通水冷装置的主副水管路，并分别串接入流量计，四支温度计分别装在热交换器的主副水进出口处。
- b) 开启水泵，调整主水流量至规定值；开启电加热器，待主水温度上升至高于副水温度 10℃时，开通副水，并调节阀门，使其流量达到规定值。观察各点温度，待其相对稳定后，开始记录各点的温度值。连续观察 10min，记下温度有变化时的各点温度，分别代入下式（1）计算对数平均温差 ΔT_m ：

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln[(T_{h2} - T_{c2}) / (T_{h1} - T_{c1})]} \quad (1)$$

式中：

ΔT_m ——对数平均温差，K；

T_{h1} ——热交换器主水进水温度，K；

T_{h2} ——热交换器主水出水温度，K；

T_{c1} ——热交换器副水出水温度，K；

T_{c2} ——热交换器副水进水温度，K；

- c) 根据主水进出口温度按下式（2）计算换热量。

$$Q = cq_m \Delta T \quad (2)$$

式中：

Q ——主水流过热交换器的换热量，kW；

c ——主水的比热，kJ/(kg·K)；

q_m ——主水的质量流量，kg/s；

ΔT ——主水进出口温差，K。

- d) 根据下式计算换热器的传热系数：

$$K = \frac{Q}{FA \cdot \Delta T_m} \quad (3)$$

式中：

K ——传热系数，kW/(m²·K)

Q ——换热量，kW；

A ——换热面积, m ;

$\Delta \bar{T}_m$ ——b 中测得的几组 ΔT_m 的算术平均值;

F ——修正因子, 此处 $F=1$ 。

e) 由 d 中算出的传热系数 K 值应符合 4.8 的规定, 则认为合格。

A.2 水—风换热水冷装置的试验

测量仪器: 温度计 (误差不大于 $\pm 0.2^\circ\text{C}$) 四支、流量计 (0.5 级) 一台。

测量程序:

- 接通水冷装置的主水管路, 串接入流量, 四支温度计分别装在主水进出口和风道进出口处;
- 开启水泵, 调整主水流量至规定值; 开启电加热器, 待主水温度上升至高于周围空气温度 10°C 时, 开启风扇。观察各点温度, 待其相对稳定后, 开始记录各点的温度值, 连续观察 10min, 记下温度变化时的各点温度, 分别代入式 (1) 中计算对数平均温差 ΔT_m ;
- 按 (2) 式计算换热量;
- 按 (3) 式计算热交换器的传热系数。式中 F 的值按图 V-1 选取;
- 由 d 中算出的传热系数 K 值应符合 4.8 的规定, 则认为合格。

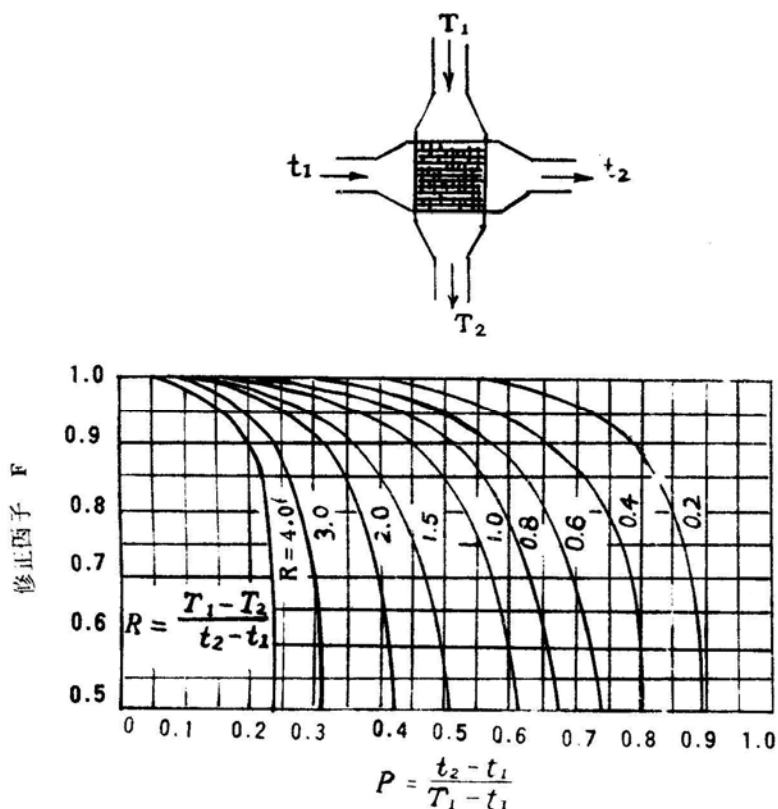


图 A.1 单流程叉流式热交换器的修正因子曲线

