



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX
代替 GB/T 30547-2014

高压直流输电系统滤波器用电阻器

Filter resistor for high voltage direct current (HVDC) transmission system

（征求意见稿）

（本草案完成时间：2022-06-27）

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。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – 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 使用条件 3

 4.1 正常使用条件 3

 4.2 特殊使用条件 3

5 技术要求 3

 5.1 电阻值 3

 5.2 额定频率 4

 5.3 最大持续电流 (I_{cont}) 4

 5.4 电感值 (L_h) 4

 5.5 绝缘水平 4

 5.6 暂时电流值 4

 5.7 冲击能量 (W) 4

 5.8 温度限值 5

 5.9 爬电距离 (L_t) 5

6 设计和结构 5

 6.1 一般要求 5

 6.2 结构设计 5

 6.3 电阻器单元 6

 6.4 电阻元件 6

 6.5 支柱绝缘子和套管 6

 6.6 端子 7

 6.7 外壳防护等级 7

 6.8 铭牌 7

7 型式试验 7

 7.1 概述 7

 7.2 型式试验项目 7

 7.3 电阻值测量 8

 7.4 电感值测量 8

 7.5 温升试验 8

 7.6 热负荷试验 10

 7.7 绝缘试验 10

 7.8 抗震试验 12

 7.9 无线电干扰电压试验 12

 7.10 外壳防护等级检查 12

8	出厂试验	12
8.1	概述	12
8.2	出厂试验项目	12
8.3	外观及一般检查	12
8.4	冷态电阻值测量	12
8.5	电感值测量	12
8.6	工频耐压试验	12
9	现场试验	13
9.1	概述	13
9.2	现场试验项目	13
9.3	外观及一般检查	13
9.4	冷态电阻值测量	13
9.5	工频耐压试验（若适用）	13
9.6	绝缘电阻测试	13
10	包装、贮运、安装、运行及维修和技术资料	13
10.1	包装	13
10.2	贮运	14
10.3	安装	14
10.4	运行及维修	14
10.5	技术资料	14
附录 A（资料性）	电阻器设计参数	15
附录 B（资料性）	典型工程的电阻器技术参数示例	16
B.1	三一上直流工程宜都换流站 HP3 交流滤波电阻器技术参数	16
B.2	锦屏—苏南±800 kV 直流工程裕隆换流站 HP3 交流滤波电阻器技术参数	17
B.3	昌吉—古泉±800 kV 距压特高压直流工程古泉站 HP2/12-R2 直流滤波电阻器技术参数	18
附录 C（规范性）	参数计算	20
C.1	额定功率	20
C.2	热态电阻	20

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。

本文件替代GB/T 30547—2014《高压直流输电系统滤波器用电阻器》，与GB/T 30547—2014相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下(技术变化汇总将在报批前进行最终调整)：

- 增加了“标称电流”术语的注，增加了“爬距计算用电压”术语（见 3.6、3.15）；
- 更改“对于直流滤波器用电阻器还应考虑直流电压的影响。”为“直流滤波器用电阻器对地支撑绝缘子的爬电距离计算需叠加直流部分的爬电距离。”（见 5.9）
- 增加了直流滤波器用电阻器对地支撑绝缘子爬电距离的计算公式（见 5.6）；
- 增加了对于“层间支撑绝缘子”的具体要求（见 6.5.2）；
- 增加了对于“对地支撑绝缘子”的具体要求（见 6.5.3）；
- 增加了对于“套管”的具体要求（见 6.5.4）；
- 更改了温升试验时风速的要求（见 7.5.1）；
- 更改“试验应在通过标称电流及最大持续电流下完成”为“试验应在通过标称电流，最大持续电流及暂时等效电流下完成”，增加了温升试验试验电流四个阶段的具体规定（见 7.5.2）；
- 增加了温升试验试验程序两个阶段内容，并修改了温升试验试验程序的 a) 和 b)，增加了“均布三个点，设备距地面 1.5m”的具体要求（见 7.5.3）；
- 更改“电阻元件的温升，不超过设备所用材料允许工作温度，就认为试验合格。”为“电阻元件的温升不超过允许温升限值，且应在 5.8 规定温度限值内，就认为试验合格。”（见 7.5.4）；
- 增加了雷电冲击耐压试验的注，对电阻值不超过 100 Ω 的电阻器单元试验进行补充说明（见 7.7.3）
- 增加了绝缘电阻测试的要求。（见 7.7.4）
- 增加了出厂试验“外观及一般检查”对符合设计图纸的要求。（见 8.3）
- 增加了现场试验“外观及一般检查”对支撑杆的固定要求。（见 9.3）
- 增加了昌吉-古泉±1100kV 特高压直流工程古泉站 HP2/12 低端直流滤波电阻器技术参数示例（见附录 B.3）

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这些专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国高压直流输电设备标准化技术委员会（SAC/TC 333）归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

高压直流输电系统滤波器用电阻器

1 范围

本文件规定了高压直流输电系统滤波器用电阻器的技术要求、设计和结构、型式试验、出厂试验、现场试验、包装、贮运、安装、运行及维修和技术资料等。

本文件适用于 $\pm 1100\text{kV}$ 及以下高压直流输电系统中的交流滤波器用电阻器和直流滤波器用电阻器。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 311.1—2012 绝缘配合 第1部分：定义、原则和规则

GB/T 4208—2017 外壳防护等级（IP代码）

GB/T 4797（所有部分） 电工电子产品自然环境条件

GB/T 11022—2020 高压交流开关设备和控制设备标准的共用技术要求

GB/T 11604—2015 高压电气设备无线电干扰试验方法

GB/T 12944 高压穿墙瓷套管

GB/T 13540—2009 高压开关设备和控制设备的抗震要求

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

GB/T 26218.1—2010 污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第1部分：定义、信息和一般原则

GB/T 26218.2 污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第2部分：交流系统用瓷和玻璃绝缘子

GB/T 25096 交流电压高于1000V变电站用电站支柱复合绝缘子 定义、试验方法及接收准则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

交流滤波器电阻器 AC filter resistor

与电容器和电抗器等元件共同组成交流滤波器的无感阻尼设备。

注：通常提供阻尼，起减少滤波器的高频阻抗和滤波器间谐振的作用。

3.2

直流滤波器电阻器 DC filter resistor

与电容器和电抗器等元件共同组成直流滤波器的无感阻尼设备。

注：通常提供阻尼，起减少滤波器的高频阻抗和滤波器间谐振的作用。

3.3

电阻元件 resistor element

由电阻材料及其它材料组成的单个部件。

3.4

电阻器单元 resistor module

由多个电阻元件、连接材料及支撑材料通过串联或者并联方式组装于单个外壳中并有出线端子的组装体。

3.5

最大持续电流 maximum continuous current

最严酷工况下可能出现的持续运行电流（方均根值），包括基波电流和谐波电流。

3.6

标称电流 nominal current

最大持续电流的70%。

注：标称电流也被称为正常工作电流。

3.7

暂时电流 temporary current

系统运行中出现在电阻器上的短时扰动电流。

3.8

标称电阻值 nominal resistance value

系统设计要求的，在标称电流下折算到环境温度25℃的电阻值。

3.9

标称电阻值允差 tolerance of resistance at nominal current

在标称电流下，热态电阻值与标称电阻值的允许偏差。

3.10

冷态电阻值 cold resistance value

无电流条件下，电阻器实测阻值折算到环境温度25℃的值。

3.11

热态电阻值 hot resistance value

电阻器通流后，电阻元件达到热平衡时，电阻器实测阻值折算到环境温度25℃的值。

3.12

最大热态电阻值 maximum hot resistance value

在最大持续电流下，电阻元件达到热平衡时，电阻器实测阻值折算到环境温度25℃的值。

3.13

电阻值最大允差 resistance maximum tolerance

包括电阻器制造及温度变化所引起的电阻值变化在内的与标称电阻值的偏差的最大允许值。

注：温度变化范围指从最低环境温度下无电流时的温度到最高环境温度下通以最大持续电流达到热平衡时的温度。

3.14

冲击能量 impulsion energy

系统运行中突然出现在电阻器上的短时能量。

3.15

爬距计算电压 Creepage calculation voltage

用于计算电阻器高压端对地、低压端对地支柱绝缘子和套管绝缘表面爬电距离的电压。

3.16

热时间常数 thermal time constant

电阻起始温度与环境温度存在温差时，电阻零功率条件下，电阻温度变化了该温差的63.2%所需要的时间。

4 使用条件

4.1 正常使用条件

- a) 周围空气温度不超过 40 ℃，且在 24 h 内测得的温度平均值不超过 35 ℃。最低周围空气温度的优选值为-10 ℃，-25 ℃，-30 ℃和-40 ℃。
- b) 平均相对湿度不大于 95%。
- c) 阳光辐射不超过 1000W/m²。

注1：在一定的阳光辐射条件下，为了不超过规定的温升，必要时，可采取适当的措施，如加盖屋顶、强迫通风，降低/减弱阳光的聚集等，或者使用降容的方法。

注2：阳光辐射的详细资料见GB/T 4797.4。

- d) 海拔不超过 1 000 m。
- e) 周围空气可能受到尘埃、烟、腐蚀性气体、蒸气或盐雾的污染。污秽等级不得超过 GB/T 26218.1—2010 中 8.3 条规定的 d 级。
- f) 应考虑的冰厚度从 1 mm 到 20 mm，但不超过 20 mm。
- g) 距离地面 10m 维持 10min 的风速不超过 34 m/s（相应于圆柱表面上的 700 Pa）。

注3：风的特性见GB/T 4797.5。

- h) 地震烈度不超过 8 度。

4.2 特殊使用条件

可按照GB/T 11022—2020中4.2执行，并做如下补充：

周围空气温度超过40 ℃时，由购买方与制造商协商确定。

覆冰厚度超过20mm时，由购买方与制造商协商确定

5 技术要求

5.1 电阻值

5.1.1 标称电阻值 (R_{nominal})

交流滤波器用电阻器典型阻值为100 Ω、150 Ω、200 Ω、300 Ω、500 Ω、1 000 Ω、1 500 Ω、1 800 Ω、8 000 Ω，直流滤波器用电阻器典型阻值为3 000 Ω、5 700 Ω、8 000 Ω、10 000 Ω。不限于此，如另有要求，可按购买方技术协议中规定。

同时应满足允差范围：-5%~+5%。

5.1.2 冷态电阻值 (R_{cold})

随着温度的变化，电阻值在一定范围内变化，其冷态电阻值 R_{cold} 按公式（1）计算：

$$R_{\text{cold}} = \frac{R_x}{1 + \alpha_{25}(\theta - 25)} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

θ —测试时的环境温度, 单位为摄氏度 (°C)；

R_x —测量电阻值，单位为欧姆 (Ω)；

R_{cold} —25 ℃时的电阻值，单位为欧姆 (Ω)；

α_{25} —25 ℃时电阻材料温度系数，单位为每开尔文 (K⁻¹)。

冷态电阻值允差范围：-5%~+5%。

5.1.3 最大热态电阻值 (R_{hot})

电阻器最大热态电阻值参照公式(1)折算，允差范围为：-10%~+10%。

5.2 额定频率

设计电阻器所规定的基波频率，本文件中为50 Hz。

5.3 最大持续电流 (I_{cont})

电阻器设计允许长期通过的最大持续电流应大于购买方要求值。

5.4 电感值 (L_h)

电阻器设计制造后的电感值，应不大于购买方技术协议中给出的限值。

应满足公式(2)：

$$L_h \leq \frac{0.02 \times R_{\text{nominal}}}{2 \times \pi \times 50 \times n} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

R_{nominal} — 标称电阻值，单位为欧姆 (Ω)；

n — 谐波次数， $n \leq 50$ 。

5.5 绝缘水平

电阻器的绝缘水平应从GB/T 311.1—2012中规定的标准值选取。对于特殊条件，按GB/T 11022—2020中4.2中规定校正。

耐压值不限于此，如另有要求，按双方技术协议中规定。

5.6 暂时电流值

电阻器能承受的暂时电流值应不小于技术协议中的规定值。

通过暂时电流后，电阻元件不应损坏，绝缘性能仍能满足规定要求。

通常包括暂时电流 I_0 、 I_{10} 。在最高环境温度下，假定电阻器开始处在最大持续电流稳定状态，电流在数秒内迅速上升到初始暂时电流 I_0 ，接着经过10min线性降到10min暂时电流 I_{10} ，再经过30min降到最大持续电流 I_{cont} 。 I_0 、 I_{10} 和 I_{cont} 的关系如图1所示。

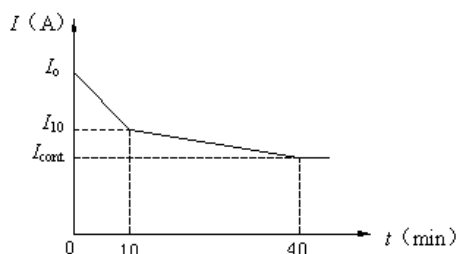


图1 暂时电流示意图

5.7 冲击能量 (W)

在通过暂时电流条件下，电阻器能承受的冲击能量应不小于给定值。

根据公式（3）进行计算、校核：

$$W = C \times m \times \Delta\theta \cdots \cdots \cdots (3)$$

式中：

C —电阻材料比热，单位为焦耳每克开尔文[J/(g·K)]；

m —电阻材料质量，单位为克(g)；

$\Delta\theta$ —允许增加的温升，单位为每开尔文(K⁻¹)。

$\Delta\theta$ 应小于电阻器短时最大允许温度减去暂时电流时的温度。

5.8 温度限值

对于编织元件电阻器短时最大允许温度为450℃，对于片状元件为650℃。编织元件电阻器长期最大允许温度为350℃，片状元件为550℃。

5.9 爬电距离 (l_t)

爬电距离计算电压一般采用相电压，包括高压端对地、低压端对地和高、低两端间。

由购买方选定的爬电比距来确定爬电距离。

交流滤波器电阻器对地支柱绝缘子爬电距离计算见公式（4）：

$$l_t = l_f \times U_f \cdots \cdots \cdots (4)$$

直流滤波器电阻器对地支柱绝缘子的爬电距离计算应叠加直流部分的爬电距离。计算见公式（5）：

$$l_t = l_f \times U_f + l_d \times U_d \cdots \cdots \cdots (5)$$

式中：

l_f —适用于交流电压计算的爬电比距，单位为毫米每千伏(mm/kV)；

l_d —适用于直流电压计算的爬电比距，单位为毫米每千伏(mm/kV)；

U_f —交流爬电计算电压，单位为千伏(kV)；

U_d —直流爬电计算电压，单位为千伏(kV)。

直流滤波器电阻器对地支柱绝缘子的爬电距离也可用购买方指定的方法计算。

6 设计和结构

6.1 一般要求

电阻器应为单相、空气自然冷却和绝缘、户外安装的设计，且至少应考虑下列因素：

- 在运行、安装和维护期间的机械负荷；
- 内部或外部故障对电阻器的电磁力；
- 风力，冰雪负荷；
- 抗震要求；
- 温度和负荷变化引起的伸缩力影响。

6.2 结构设计

——电阻器金属构架应有良好的防腐蚀层，外壳应采用耐腐蚀材料，所采用的外壳材料标准和构架处理工艺应经购买方确认。当使用不锈钢材料作为外壳时，不应喷漆。

——应提供完整的电阻器，包括连接件、支柱绝缘子和固定件。固定件应便于与基础连接，并有接地孔。

- 应当考虑电阻器外壳表面覆冰、覆雪融化后在外壳间、支柱绝缘子、套管等绝缘间隙间形成冰柱的风险，并在结构设计中考虑应对措施。
- 设计时应考虑现场安装、更换、检查和维护方便。
- 外壳及内部的金属支架不允许电位悬浮。
- 对于将中点接到外壳的电阻器，应有测量点，能方便地测量出线端子与外壳之间的电阻值。
- 所有接线应可靠，并且规范。
- 电阻器是发热元件，箱体内空气温度高，设计时应考虑足够的裕度，应按 GB/T 311.1—2012 中 3.3 进行校正。

6.3 电阻器单元

6.3.1 电阻值

电阻器单元的电阻值 (R_n) 从完整相电阻值推算得来，计算见公式 (6)：

$$R_n = \frac{R}{n} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

R_n —电阻器单元电阻值，单位为欧姆 (Ω)；

R —完整相电阻值，单位为欧姆 (Ω)；

n —电阻器单元串联数。

电阻器单元阻值的允差和整相电阻器阻值的允差相同。

6.3.2 绝缘水平

电阻器单元两个出线端间的雷电/操作冲击耐受电压 ($U_{\text{peak},n}$) 为完整相电阻器两个出线端间雷电/操作冲击耐受电压 (U_{peak}) 除以单元串联数，计算见公式 (7)：

$$U_{\text{peak},n} = \frac{U_{\text{peak}}}{n} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$U_{\text{peak},n}$ —电阻器单元两个出线端间雷电/操作冲击耐受电压，单位为千伏 (kV)。

U_{peak} —电阻器两个出线端间雷电/操作冲击耐受电压，单位为千伏 (kV)；

6.4 电阻元件

电阻元件的要求如下：

- a) 应确保在各种工作电流下电气和机械稳定可靠。
- b) 电阻材料应采用抗氧化、耐腐蚀、耐高温、温度系数低、加工性能好的合金材料，并需经购买方确认。
- c) 应采用电感小的无感制作工艺。
- d) 电阻元件之间连接应可靠。
- e) 电阻元件的支撑和固定应采取措施，以消除高温对其产生的影响。

6.5 支柱绝缘子和套管

电阻器支柱绝缘子和套管应能承受所在位置的电压，并能满足机械强度和爬电距离要求，见表1。

表1 不同部位使用的支柱绝缘子和套管的推荐类型

部位	推荐的类型	参照标准
对地支柱绝缘子	瓷、瓷涂PRTV-II、	GB/T 26218.2
	复合	GB/T 25096
层间支柱绝缘子	瓷	GB/T 26218.2
套管	瓷	GB/T 12944

6.6 端子

电阻器出线端子除满足载流要求外，应保证机械强度。
出线端子应长期耐受以下应力不变形：
——水平纵向分量：不小于 2 000 N；
——水平横向分量：不小于 1 000 N；
——垂直分量：不小于 1 000 N。
——弯矩：不小于 400 N·m。
出线端子位置应满足整体布置要求。

6.7 外壳防护等级

应符合GB/T 4208—2017第5章和第6章的规定，一般为IP23级。

6.8 铭牌

在电阻器单元外壳明显可见的位置，应有耐腐蚀性材料制作的铭牌，铭牌上有下列信息：

- a) 制造厂商及商标；
- b) 产品型号及名称；
- c) 标称电阻值， Ω ， R_{nominal}/n ；
- d) 冷态电阻值， Ω ， R_{cold}/n ；
- e) 最大持续电流，A；
- f) 端子间的雷电/操作冲击耐压 (BIL/SIL)，kV， U_{peak}/n ；
- g) 频率（谐波频率），Hz；
- h) 重量，kg；
- i) 产品编号；
- j) 制造日期。

7 型式试验

7.1 概述

型式试验是为了确定电阻器在设计和制造方面是否满足本文件中所规定的性能和要求。
试验可在电阻器单元上进行。除非另有规定，每一台拟用来做型式试验的电阻器应为出厂试验合格的电阻器。
同一试品全部试验合格后，就判定通过试验。
型式试验应在具有相同设计的电阻器上进行，或对在设计和工艺上有可能影响型式试验所检验的性能方面没有差异的电阻器上进行。

7.2 型式试验项目

型式试验项目包括：

- a) 电阻值测量；
- b) 电感值测量；
- c) 温升试验；
- d) 热负荷试验；
- e) 绝缘试验；
- f) 抗震试验；
- g) 无线电干扰电压试验；
- h) 防护等级检查。

7.3 电阻值测量

7.3.1 概述

用准确度不低于0.5级的仪器测量电阻器阻值。

7.3.2 冷态电阻值

应在温升试验前、热负荷试验后分别测量冷态电阻值。

受试电阻器应在试验环境中静置，当电阻元件表面温度与环境温度之差不超过2 K时，测量两出线端子间电阻值。

将所测数据按公式（1）折算为环境温度25℃的电阻值，其值应在规定的允差范围之内，并且温升试验前、热负荷试验后阻值变化率（ ΔR ）应不超过 $\pm 2\%$ 。计算见公式（8）：

$$\Delta R = \left| \left(\frac{R_{\text{cold},n,a}}{R_{\text{cold},n,b}} - 1 \right) \times 100\% \right| \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$R_{\text{cold},n,b}$ 一温升试验前阻值折算值，单位为欧姆（ Ω ）。

$R_{\text{cold},n,a}$ 一温升试验后阻值折算值，单位为欧姆（ Ω ）；

7.3.3 热态电阻值

温升试验时，分别测量标称电流和最大持续电流下电阻器两端电压 U_{test} 及流过的电流 I_{test} ，按公式（9）计算出热态电阻值，再按公式（1）折算为环境温度25℃的电阻值。

$$R_{\text{hot},n} = m^2 \times \frac{U_{\text{test}}}{I_{\text{test}}} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

U_{test} 一试验电压，单位为伏特（V）；

I_{test} 一试验电流，单位为安培（A）；

m 一电流改接线后并联组倍数。

热态电阻值应符合5.1的规定。

7.4 电感值测量

在额定谐波频率下测量电感值，所测电感值应符合5.4的规定。

7.5 温升试验

7.5.1 概述

温升试验可在电阻器单元上进行,安装条件与实际状态相似,并应在风速不大于3.3m/s(2级轻风)的环境下进行,电阻器本身发热引起的气流除外。

如果试验电源输出电压有限制,可改变受试设备内部接线方式,如将串联连接改成并联连接,应保证通过电阻元件的电流不变,总功率不变,保证温升试验的等效性。改接线后的电阻值和试验电流值会改变,计算受试设备的热态电阻值时,应根据改线情况进行换算。

试验时,将电阻元件与外壳连接线断开,外壳接地,试验结束后,受试设备恢复原状态。

7.5.2 试验电流

试验应在通过标称电流,最大持续电流及暂时等效电流下完成,施加电流波形如图2所示,分为四个阶段。第一阶段(0~ t_1),施加标称电流($0.7 \times I_{\text{cont}}$),保证温度稳定,通流时间不小于30min;第二阶段($t_1 \sim t_2$),施加 $I_0 \sim I_{10}$ 的等效积分电流 I_{eq1} ,通流时间不小于10min;第三阶段($t_2 \sim t_3$),施加 $I_{10} \sim I_{\text{cont}}$ 的等效积分电流 I_{eq2} ,通流时间不小于30min;第四阶段($t_3 \sim t_4$),施加最大持续电流 I_{cont} ,通流时间不小于30min。

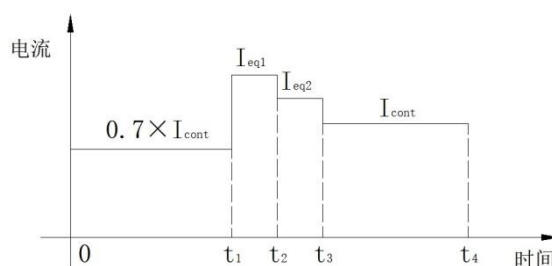


图2 温升试验过程

在规定的频率范围内,对于电阻值变化小于1%的电阻器,试验电流应按照技术参数表中电流值;对于电阻值变化大于1%的电阻器,试验电流应按公式(10)计算得出。

$$I_t = \sqrt{\frac{I_F^2 \times R_F + \sum_{n=2}^{50} (I_n^2 \times R_n)}{R_t}} \quad (10)$$

式中:

- I_t —等效试验电流,单位为安培(A);
- R_t —试验电流频率下的电阻值,单位为欧姆(Ω);
- I_F —在基频下的电流值,单位为安培(A);
- R_F —在基频下的电阻值,单位为欧姆(Ω);
- I_n —最大连续 n 次谐波电流,单位为安培(A);
- R_n —在第 n 次谐波下的电阻值,单位为欧姆(Ω)。

7.5.3 试验程序

温升试验应与本文件中规定的热态电阻值计算和热负荷试验一起进行。

受试电阻器电流达到试验值,持续通流不低于15min,待电阻元件温度稳定,在2min内温度变化不超过5K时,确定为达到稳定状态。通常情况下,持续通流时间达到受试设备热时间常数的5倍时就会达到稳定状态。

环境温度测量宜采用温度计,在距离受试电阻器外表面约1m、距地面1.5m处,周围均布三个测量点。

受试电阻器各处温度测量采用热电偶或红外线测温仪,应采取措施防止温度计或热电偶受热气体的过分影响。

试验程序为:

- a) 接通电源,缓慢升高电压,使电流上升达到第一阶段标称电流值 $0.7 \times I_{\text{cont}}$,待电阻元件温度达到稳定状态后,持续通流时间不少于 30min,每隔 15min 测量记录被测点温度,读取电压 U_{test} 值和电流 I_{test} 值。
- b) 继续缓慢升压,使电流达到第二阶段 I_{eq1} ,持续通流时间 10min,每隔 5min 测量记录被测点温度。
- c) 缓慢调整电压,使电流达到第三阶段 I_{eq2} ,持续通流时间 30min,每隔 15min 测量记录被测点温度。
- d) 缓慢调整电压,使电流达到第四阶段最大持续电流值 I_{cont} ,待电阻元件温度达到稳定状态后,持续通流时间不少于 30min,每隔 15min 测量记录被测点温度,读取电压 U_{test} 值和电流 I_{test} 值。

试验电流允许变化范围 $\pm 2\%$ 。

测温点应包含,但不限于下列各点:

- 电阻元件,测温点位于中间元件上端位置;
- 内部绝缘子,电阻箱内上端绝缘子外表面;
- 套管,电阻箱内套管外表面;
- 电阻元件的金属支撑件,支撑件中部上端位置;
- 排出空气,百叶窗中部上端位置;
- 顶蓬,内部中间位置。

7.5.4 试验结果的判定

电阻元件的温升不超过允许温升,且最高环境温度与温升值之和不高5.8规定温度限值。

按公式(9)计算热态电阻值 $R_{\text{hot},n}$,按附录C中的第3章计算,并折算为环境温度25℃的电阻值,其值应符合5.1的规定。

7.6 热负荷试验

热负荷试验电流应不小于最大持续电流,持续时间不小于60min。热负荷试验可与温升试验最后阶段合并进行。

热负荷试验断电后应立即记录温度-时间曲线,计算电阻热时间常数。

试验完毕,待冷却后,若电阻元件没有龟裂和变形,则产品合格。

电阻器放置适当长时间,待冷却到环温后,恢复到原接线,测量电阻值 R_{colddb} ,并记录周围环境温度。

试验后电阻值 R_{colddb} 与温升试验前冷态电阻值 R_{coldba} 变化率应符合7.3.2的规定。

7.7 绝缘试验

7.7.1 概述

电阻器的绝缘试验分工频耐受电压试验、雷电冲击耐受电压试验、操作冲击耐受电压试验和绝缘电阻测试。试验时周围的大气条件和大气条件修正系数应该按GB/T 16927.1—2011中4.2、4.3和4.4的规定。

7.7.2 工频耐压试验

试验在电阻器单元上进行，将电阻元件与外壳连接线断开，试验电压加到任一出线端子上，外壳接地。按GB/T 16927.1—2011第6章规定进行试验。

试验电压升到规定的工频耐受电压值，持续时间1min。

试验期间应无击穿也不发生闪络。

中点与外壳连接电阻器的试验电压（ U_{test} ）按照公式（11）确定：

$$U_{\text{test}} = \frac{U}{2 \times n} \times k \dots\dots\dots (11)$$

中点不与外壳连接电阻器的试验电压（ U_{test} ）按照公式（12）确定：

$$U_{\text{test}} = \frac{U}{n} \times k \dots\dots\dots (12)$$

式中：

U —电阻器工频耐压值，单位为千伏（kV）；

k —电压不均匀分布系数，通常取1.05。

7.7.3 雷电冲击耐压试验

试验在电阻器单元上进行，将试验电压加到任一出线端子，另一出线端子接地。试验方法按GB/T 16927.1—2011第7章规定进行试验。

电压波形采用标准雷电冲击波，即1.2/50 μs ，试验次数：半电压下正、负极性各1次；全电压下正、负极性各15次。

试验过程中应无击穿也不发生闪络。

试验电压（ U_{test} ）应按公式（13）确定：

$$U_{\text{test}} = \frac{U_{\text{LI}}}{n} \times k \dots\dots\dots (13)$$

式中：

U_{LI} —电阻器两端间雷电冲击电压，单位为千伏（kV）；

k —电压不均匀分布系数，通常取1.05。

对于电阻值过小的电阻器单元，试验电压波形可由制造商和购买方协商确定。

7.7.4 操作冲击耐压试验（若适用）

试验在电阻器单元上进行，将试验电压加到任一出线端子，另一出线端子接地。试验方法按GB/T 16927.1—2011第8章规定进行试验。

电压波形采用标准操作冲击波，即250/2500 μs ，试验次数：半电压下正、负极性各1次；全电压下正、负极性各15次。

试验过程中应无击穿也不发生闪络。

试验电压（ U_{test} ）应按公式（14）确定：

$$U_{\text{test}} = \frac{U_{\text{SI}}}{n} \times k \dots\dots\dots (14)$$

式中：

U_{SI} —电阻器两端间操作冲击电压，单位为千伏（kV）；

k —电压不均匀分布系数，通常取1.05。

对于电阻值过小的电阻器单元，试验电压波形可由制造商和购买方协商确定。

7.7.5 绝缘电阻测试

试验可采用2500V兆欧表，将电阻元件与外壳连接线断开，外壳接地，试验电压施加于电阻器单元出线端子与外壳之间，绝缘电阻不小于300M Ω 。

7.8 抗震试验

试验可按GB/T 13540—2009的规定进行。

电阻器应能承受规定地震烈度的作用而不损坏。

可模拟产品结构进行抗地震性能的计算分析，验证电阻器的抗震性能符合要求。

7.9 无线电干扰电压试验

本项试验仅适用于高压端对地爬距计算用电压为126/ $\sqrt{3}$ kV及以上的电容器。

试验按GB/T 11604—2015中的规定进行，无线电干扰电压不大于2500 μ V。

7.10 外壳防护等级检查

按GB/T 4208—2017第12章和第13章的规定进行，应满足6.7的规定。

8 出厂试验

8.1 概述

交货前对每一台电阻器单元进行出厂试验。

8.2 出厂试验项目

出厂试验项目包括：

- a) 外观及一般检查；
- b) 冷态电阻值测量；
- c) 电感值测量；
- d) 工频耐压试验。

8.3 外观及一般检查

外观及一般检查包括：

- a) 电阻器外观不应有明显划痕和变形；
- b) 铭牌应牢固，参数正确；
- c) 观察门应开启、关闭灵活，紧固件无漏装、无松动；
- d) 套管、绝缘子表面应无损伤；
- e) 检查外形尺寸和安装尺寸，应符合设计确认图纸要求。

8.4 冷态电阻值测量

用准确度不低于0.5级的仪器测量电阻值 R_x ，记录受试电阻器所处地点的环境温度。

将所测数据按公式（1）折算为环境温度25℃的电阻值，其值应在规定的允差范围之内。

8.5 电感值测量

按7.4进行。

8.6 工频耐压试验

按7.7.2进行。

9 现场试验

9.1 概述

为确保投运前的可靠性，电阻器安装后，应进行现场试验。

9.2 现场试验项目

试验项目包括：

- a) 外观及一般检查；
- b) 冷态电阻值测量；
- c) 工频耐压试验（若适用）。
- d) 绝缘电阻测试

9.3 外观及一般检查

检查内容包括：

- a) 电阻器外观不应有明显划痕和变形；
- b) 套管、绝缘子表面应无损伤；
- c) 按图纸检查整体安装、接线应正确、可靠；
- d) 电阻器内部应无杂物，观察门支撑杆固定到位。

9.4 冷态电阻值测量

按8.4进行。

9.5 工频耐压试验（若适用）

按7.7.2进行。

9.6 绝缘电阻测试

按7.7.5进行。

对电阻器支柱绝缘子，试验电压施加于绝缘子两端，绝缘电阻不小于300M Ω 。

10 包装、贮运、安装、运行及维修和技术资料

10.1 包装

电阻器的外包装应坚固、牢靠，适于长途运输，能多次搬运和装卸，并在包装箱的侧面以运输常用的标记和图案标明起吊位置，以便于装卸搬运。标志应清晰整齐，并保证不因运输或贮存长久而模糊不清，标志应有下列内容：

- a) 工程名称/合同号；
- b) 到货地址；
- c) 收货人；
- d) 货物及部件名称；
- e) 箱号/件号；

- f) 毛重/净重(千克);
 - g) 体积(长×宽×高, 以毫米表示)。
 - h) 包装箱上应明显地标有“小心轻放”、“向上”、“防雨”等字样或标记。
- 对需单独运输的电阻器用零部件应装入完好的包装箱内。

10.2 贮运

临时存放时电阻器壳置于户外, 但应保证地面坚实、平整, 并做好防雨、防尘措施。
长期存放时应置于干燥、通风、没有腐蚀性气体的户内。
电阻器运输过程中不得受剧烈冲撞, 不得倒置, 应防止外力损伤, 套管和绝缘子宜单独包装运输。

10.3 安装

如果电阻器不是组装后发运的, 运输单元应当清晰地加以标记, 并有总装图样和零部件明细:

- a) 应有安全开箱和起吊所需资料;
- b) 应按安装使用说明书规定程序安装就位;
- c) 安装后检查应按本文件 9.3 和 9.4 规定。

10.4 运行及维修

运行前应按第9章进行现场试验, 购买方应按制造厂提供的安装使用说明书要求, 在停电检修期间对设备清理检查, 并做好记录。

10.5 技术资料

包括:

- a) 装箱清单;
- b) 产品合格证;
- c) 出厂试验报告;
- d) 支柱绝缘子、套管的出厂试验报告、型式试验报告;
- e) 安装使用说明书;
- f) 图纸资料。

附 录 A
(资料性)
电阻器设计参数

电阻器设计参数见表A.1。

表A. 1 设计参数表

序号	名 称		单位	保证值
1	制造商		—	
2	电阻型式		—	
3	每相电阻器单元数		—	
4	电阻器安装位置		—	
5	25℃时的冷态电阻值		Ω	
6	标称电阻值		Ω	
7	直流电阻值		Ω	
8	电感值		mH	
9	额定值 (包括谐波)	最大持续电流	A	
		电压	kV	
		功率	kW	
		功率/组件	kW	
10	电阻的基本冲击绝缘水平 (BIL/SIL)		—	—
	端子对外壳 (BIL/SIL)		kV	
	电阻端子间 (BIL/SIL)		kV	
11	最大持续电流下温升		—	—
	热点温升		K	
	平均温升		K	
12	冲击能量增加的温升		K	
13	电阻丝质量		kg	
14	频率特性曲线 (50 Hz~3 000 Hz)		—	

附 录 B
(资料性)

典型工程的电阻器技术参数示例

B.1 三一上直流工程宜都换流站 HP3 交流滤波电阻器技术参数

见表B.1。

表B.1 宜都换流站 HP3 交流滤波电阻器技术参数

序号	名 称	单位	要求值
1	标称电阻值	Ω	1 800
1.1	标称电阻值允差	%	± 5
1.2	最大允差	%	± 10
2	谐振频率	Hz	150
3	谐振频率下的电感值	mH	< 3.2
4	电 流		
4.1	最大持续电流, I_{cont} (方均根值)	A	42.4
	主要谐波 I_n (方均根值)	n/A	3/37.1
			4/2.7
			5/17.5
			6/4
			7/7.8
			8/3.5
4.2	暂时电流	A	9/2.8
4.2	暂时电流	A	
4.2.1	最大暂时电流, 初始, I_0 (方均根值)	A	42.6
4.2.2	最大暂时电流, 持续 10min, I_{10} (方均根值)	A	42.4
4.3	标称电流 I_{nominal} (方均根值)	A	$= 0.7 \times I_{\text{cont}} \approx 29.7$
4.4	最小电流 I_{min} (方均根值)	A	0
5	暂态电流 I_{crest} (方均根值)	kA	0.22
	时间	μs	6
6	冲击能量	kJ	581
	时间	ms	-
7	电阻与外壳间工频耐受电压, 60 s	kV	230
8	雷电波耐受水平		
	——高压端对地	kV	550
	——两端间	kV	550
	——低压端对地	kV	125

序号	名 称	单位	要求值
9	操作波耐受水平		
	——两端间	kV	400
10	爬电距离		
10.1	爬电距离计算用电压		
	——高压端	kV	76.2
	——低压端	kV	-
	——两端间	kV	76.2
10.2	最小爬电比距	mm/kV	43

B.2 锦屏—苏南±800 kV 直流工程裕隆换流站 HP3 交流滤波电阻器技术参数

见表B.2。

表B.2 裕隆换流站 HP3 交流滤波电阻器技术参数

序号	名 称	单位	要求值
1	标称电阻值	Ω	1 331
1.1	标称电阻值允差	%	± 5
1.2	最大允差	%	± 10
2	谐振频率	Hz	150
3	谐振频率下的电感值	mH	< 10
4	电流		
4.1	最大持续电流, I_{cont} (方均根值)	A	36
	主要谐波 I_n (方均根值)	n/A	3/31.5 5/15.78 7/6.3 4/1.86 11/1.39 6/1.09 1/1.4。
4.2	暂时电流	A	
4.2.1	最大暂时电流, 初始, I_0 (方均根值)	A	
4.2.2	最大暂时电流, 持续 10min, I_{10} (方均根值)	A	36.5
4.3	标称电流 I_{nominal} (方均根值)	A	$= 0.7 \times I_{\text{cont}} \approx 25.2$

序号	名 称	单位	要求值
4.4	最小电流 I_{\min} (方均根值)	A	0
5	暂态电流 I_{crest} (方均根值)	kA	0.29
	时间	μs	-
6	冲击能量	kJ	279.8
	时间	ms	-
7	电阻与外壳间工频耐受电压, 60 s	kV	230
8	雷电波耐受水平		
	——高压端对地	kV	500
	——两端间	kV	550
	——低压端对地	kV	125
9	操作波耐受水平		
	——两端间	kV	450
10	爬电距离		
10.1	爬电距离计算用电压		
	——高压端	kV	48
	——低压端	kV	-
	——两端间	kV	48
10.2	最小爬电比距	mm/kV	43

B.3 昌吉-古泉±800kV 距压特高压直流工程古泉站 HP2/12-R2 直流滤波电阻器技术参数

见表B.3。

表B.3 古泉站 HP2/12-R2 直流滤波电阻器技术参数

序号	名 称	单位	要求值
1	标称电阻值	Ω	9560
1.1	标称电阻值允差	%	5
1.2	最大允差	%	10
2	谐振频率	Hz	100/600
3	谐振频率下的电感值	mH	<5
4	电流		
4.1	最大持续电流, I_{cont} (方均根值)	A	29.5
	主要谐波 I_n (方均根值)	n/A	2/28.78 12/6.02 6/2.38 3/1.52

序号	名 称	单位	要求值
			14/0.39 10/0.35
4.2	暂时电流		
4.2.1	最大暂时电流，初始， I_0 （方均根值）	A	29.8
4.2.2	最大暂时电流，持续 10min， I_{10} （方均根值）	A	30.0
4.3	标称电流 I_{nominal} （方均根值）	A	$I_{\text{cont}} \times 0.7$
5	暂态电流 I_{crest} （方均根值）	kA	0.087
	时间	μs	100
6	冲击能量	kJ	800
	时间	ms	-
7	雷电波耐受水平		
	——高压端对地	kV	1319
	——两端间	kV	1279
	——低压端对地	kV	600
8	操作波耐受水平		
	——高压端	kV	1099
	——两端间	kV	998
	——低压端	kV	550
9	爬电距离		
9.1	爬距计算用电压		
	两端间（交流）	kV	273.4
	高压端对地（交流）	kV	273.4
	高压端对地（直流）	kV	40
	低压端对地（交流）	kV	13.7
	低压端对地（直流）	kV	40
10	RIV 试验电压	kV	304

附录 C

(规范性)

参数计算

C.1 额定功率

电阻器在最大持续电流时所消耗的功率 P_N ，由公式 (C.1) 给出：

$$P_N = I_{\text{cont}}^2 \times R_{\text{nominal}} \quad \text{..... (C.1)}$$

C.2 热态电阻

热态电阻由公式 (C.2) ~ (C.5) 给出：

$$R_{\text{hot},n} = m^2 \times \frac{U_{\text{test}}}{I_{\text{test}}} \quad \text{..... (C.2)}$$

$$R_{\text{correct},n} = R_{\text{hot},n} \times [1 + \alpha(\theta_{\text{test},\text{amb}} - 25)] \quad \text{..... (C.3)}$$

$$R_{\text{min},n} = R_{\text{correct},n} \times [1 + \alpha(\theta_{\text{min},\text{amb}} - 25)] \quad \text{..... (C.4)}$$

$$R_{\text{max},n} = R_{\text{correct},n} \times [1 + \alpha(\theta_{\text{max},\text{amb}} - 25)] \quad \text{..... (C.5)}$$

热态电阻值范围由公式 (C.6) ~ (C.9) 给出：

标称电流时，电阻值范围：

$$R_{\text{min},n} \geq 0.95 \times R_{\text{nominal},n} \quad \text{..... (C.6)}$$

$$R_{\text{max},n} \geq 1.05 \times R_{\text{nominal},n} \quad \text{..... (C.7)}$$

最大持续电流时，电阻值范围：

$$R_{\text{min},n} \geq 0.9 \times R_{\text{nominal},n} \quad \text{..... (C.8)}$$

$$R_{\text{max},n} \geq 1.1 \times R_{\text{nominal},n} \quad \text{..... (C.9)}$$

式中：

I_{test} — 试验电流，单位为安培 (A)；

U_{test} — 试验时电压值，单位为伏特 (V)；

$R_{\text{hot},n}$ — 热态电阻计算值，单位为欧姆 (Ω)；

$R_{\text{correct},n}$ — 热态电阻校正值，单位为欧姆 (Ω)；

$R_{\text{min},n}$ — 最低环温时热态电阻值，单位为欧姆 (Ω)；

$R_{\text{max},n}$ — 最高环温时热态电阻值，单位为欧姆 (Ω)；

$\theta_{\text{test},\text{amb}}$ — 试验时环境温度，单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)；

$\theta_{\text{min},\text{amb}}$ — 最低环境温度，单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)；

$\theta_{\text{max},\text{amb}}$ — 最高环境温度，单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)；

m — 改接线后并联组倍数。