

中华人民共和国国家标准

GB/T 25308—2022

代替 GB/T 25308—2010

高压直流输电系统直流滤波器

DC filters for high voltage direct current (HVDC) transmission system

2022-12-30 发布

2023-07-01 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 2

 4.1 正常使用条件 2

 4.2 特殊使用条件 3

5 参数设计要求 3

 5.1 设计内容 3

 5.2 型式与参数确定 4

 5.3 性能和定值 4

6 设备设计要求 10

 6.1 电容器 10

 6.2 电抗器 12

 6.3 电阻器 13

 6.4 避雷器 13

 6.5 电流互感器 13

 6.6 隔离开关 13

 6.7 接地开关 13

7 其他要求 13

 7.1 防腐蚀层 13

 7.2 母线和连接线 13

 7.3 电气间隙和爬电距离 14

 7.4 抗震要求 14

8 试验 14

 8.1 通则 14

 8.2 例行试验(出厂试验) 15

 8.3 型式试验 18

 8.4 现场试验 23

 8.5 特殊试验 25

9 标志 27

附录 A (资料性) 高压直流输电系统常用直流滤波器结构 28

附录 B (资料性) 直流滤波器在直流系统中的位置 32

附录 C (规范性) 直流滤波器电容器规范 33

附录 D (规范性) 直流滤波器电抗器规范 37

附录 E (规范性) 直流滤波器电阻器规范 41

参考文献 44

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。

本文件代替 GB/T 25308—2010《高压直流输电系统直流滤波器》，与 GB/T 25308—2010 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 更改了“范围”和“规范性引用文件”（见第1章和第2章，2010年版的第1章和第2章）；
- 更改了“直流滤波器”的定义（见3.1，2010年版的3.1），删除了术语“特征谐波”“非特征谐波”和“辅助回路”（见2010年版的3.3、3.4和3.6），增加了术语“[直流]中性母线电容器”和“[直流]平波电抗器”（见3.5和3.6）；
- 更改了“正常使用条件”中安装运行场所的温度和海拔的规定（见4.1.1和4.1.3，2010年版的4.1.1和4.1.3），增加了污秽等级和爬电比距的规定（见4.1.2）、“地震烈度”和“风速”的规定（见4.1.4和4.1.5）；
- 更改了“特殊使用条件”中“高相对湿度”“霉菌生长”和“腐蚀性大气”的规定（见4.2.1～4.2.3，2010年版的4.2.1～4.2.3）；删除了“地震地区”的规定（见2010年版的4.2.4）；
- 增加了直流滤波器参数设计包括“换流器产生的谐波电压的计算”的规定（见5.1）、直流滤波器型式“并联回路谐振频率 f_p ”的说明和三调谐滤波器的内容（见5.2）；
- 将等效干扰电流包含的谐波成分，由“所有谐波”更改为“1次～50次”（见5.3.1.1、5.3.1.2，2010年版的5.3.1）；更改了等效干扰电流计算公式以使其适用于多端系统并将计算涉及的“加权系数”和“耦合系数”分别更改为“加权因数”和“耦合因数”，且更改了相关的“典型通信明线的耦合因数”的规定（见5.3.1.2，2010年版的5.3.1），增加了等效干扰电流限制值的规定（见5.3.1.2）；
- 删除了“直流滤波器性能”中纵向感应电压的内容和噪声加权因数频率曲线（见2010年版的5.3.1）；
- 增加了计算直流滤波器稳态定值时，确定稳态应力和噪声计算用电流应包括的因素（见5.3.2.1）；
- 将高压侧电容器组端点之间的电压计算公式中的字母符号“ k ”“ U_{bN} ”“ U_n ”分别更改为“ k_m ”“ U_{bNH} ”“ U_{nCH} ”并明确释义，更改了直流电压分布不均匀因数的规定（见5.3.2.2.1，2010年版的6.1.1）；
- 更改了计算中性母线电容器电压以及其他设备端点之间电压的规定（见5.3.2.2.1，2010年版的6.1.1）；
- 将确定高压侧电容器端点之间爬电距离的电压计算公式中的字母符号“ U_n ”更改为“ U_{nCH} ”，其他设备端点之间爬电距离的电压计算公式中的字母符号“ U_n ”更改为“ $U_{n,other}$ ”，端点对地爬电距离的电压计算公式中的字母符号“ U_n ”更改为“ $U_{n,ground}$ ”，并明确释义（见5.3.2.2.2，2010年版的5.3.2.1.2）；
- 将避雷器最高持续运行电压计算公式中的字母符号“ $MCOV$ ”“ U_n ”分别更改为“ U_{MCOV} ”“ U_{narr} ”并明确释义（见5.3.3.3.2，2010年版的5.3.2.1.3），增加了避雷器最高持续运行电压的SCCOV计算方法（见5.3.3.3.2）；
- 将电容器/电容器组额定电流计算公式中的字母符号“ I_n ”“ I_{thc} ”分别更改为“ I_{nC} ”“ I_{thC} ”，并明确释义（见5.3.2.3和6.1.3，2010年版的5.3.2.2和6.1.2）；

- 将电抗器额定电流计算公式中的字母符号“ I_n ”“ I_{thl} ”分别更改为“ I_{nL} ”“ I_{thL} ”，用于计算噪声的电流计算公式中的字母符号“ I_n ”更改为“ I_{an} ”，并明确释义(见 5.3.2.3, 2010 年版的 5.3.2.2)，删除了确定稳态应力应包括的因素(见 2010 年版的 5.3.2.2)；
- 更改了直流线路故障后再启动的规定(见 5.3.3.2, 2010 年版的 5.3.3.1)；
- 将直流线路故障后的再启动的次数和再启动电压要求更改为由买方与卖方协商确定(见 5.3.3.2, 2010 年版的 5.3.3.1)；
- 将避雷器持续运行电压计算公式中的字母符号“ U_n ”更改为“ U_{nar} ”并明确释义(见 5.3.3.3.2, 2010 年版的 5.3.3.2.1)；
- 将避雷器参考电压计算公式中的字母符号“ $MCOV_{rms}$ ”更改为“ U_{MCOV} ”并明确释义(见 5.3.3.3.3, 2010 年版的 5.3.3.2.1)；
- 更改了计算低压侧电容器组额定电压的规定(见 6.1.2, 2010 年版的 6.1.1)；
- 更改了滤波电抗器“通用要求”和“额定值”的规定(见 6.2.1 和 6.2.2, 2010 年版的 6.2.1 和 6.2.2)；
- 更改了电阻器“通用要求”和“电流额定值”的规定(见 6.3.1 和 6.3.2, 2010 年版的 6.3.1 和 6.3.2)；
- 更改了电流互感器、隔离开关、接地开关的规定(见 6.5~6.7, 2010 年版的 6.5~6.7)；
- 更改了母线支柱绝缘子机械强度和爬电距离的规定(见 7.2.1, 2010 年版的 8.2.1)；
- 在“结构和导体要求”中增加了“抗震要求”(见 7.4)；
- 更改了试验“通则”的规定(见 8.1, 2010 年版的 7.1.1 和 7.1.2)，将环境空气温度修正的参考温度由 20℃更改为 25℃(见 8.1, 2010 年版的 7.1.2)；
- 更改了“设备”中电容器、电抗器和电阻器试验的规定(见 8.2~8.4, 2010 年版的 7.2)；
- 更改了“现场试验”中电容器、电抗器和电阻器试验的规定(见 8.4.1~8.4.3, 2010 年版的 7.3.1~7.3.3)；
- 更改了滤波器调谐试验“通则”的规定(见 8.4.4.1, 2010 年版的 7.3.4)；
- 增加了电容器、电抗器、电阻器特殊试验的规定(见 8.5)；
- 更改了附录 A、附录 C~附录 E 的内容(见附录 A、附录 C~附录 E, 2010 年版的附录 A、附录 C~附录 E)。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国电力电子系统和设备标准化技术委员会(SAC/TC 60)归口。

本文件起草单位：西安西电电力系统有限公司、南方电网科学研究院有限责任公司、西安高压电器研究院股份有限公司、浙江大学、中国电力科学研究院有限公司、国网安徽省电力有限公司电力科学研究院、西安卓达电器设备有限公司、西安中扬电气股份有限公司。

本文件主要起草人：曹洋、李岩、许钊、黄莹、李媛、张万荣、辛清明、张哲任、杨晓辉、王蔚华、华军团、汪耀辉、张雪冰、冯宇、陈忠、邱伟、黄超。

本文件于 2010 年首次发布，本次为第一次修订。

高压直流输电系统直流滤波器

1 范围

本文件规定了高压直流滤波器的使用条件、参数设计要求、设备设计要求、试验、结构和导体要求、标志等内容。

本文件适用于安装在 $\pm 1\ 100\text{ kV}$ 及其以下电压等级高压直流(HVDC)输电系统中的直流滤波器。

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 1094.1—2013 电力变压器 第1部分:总则

GB/T 1094.2—2013 电力变压器 第2部分:液浸式变压器的温升

GB/T 1094.6—2011 电力变压器 第6部分:电抗器

GB/T 1985 高压交流隔离开关和接地开关

GB/T 13498—2017 高压直流输电术语

GB/T 20840.1 互感器 第1部分:通用技术要求

GB/T 20840.2 互感器 第2部分:电流互感器的补充技术要求

GB/T 20993—2012 高压直流输电系统用直流滤波电容器及中性母线冲击电容器

GB/T 20994—2007 高压直流输电系统用并联电容器及交流滤波电容器

GB/T 25091 高压直流隔离开关和接地开关

GB/T 26216.1 高压直流输电系统直流电流测量装置 第1部分:电子式直流电流测量装置

GB/T 26216.2 高压直流输电系统直流电流测量装置 第2部分:电磁式直流电流测量装置

GB/T 26218.4—2019 污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定 第4部分:直流系统用绝缘子

GB/T 28543—2021 电力电容器噪声测量方法

GB/T 30547—2014 高压直流输电系统滤波器用电阻器

GB/T 50260 电力设施抗震设计规范

3 术语和定义

GB/T 13498—2017 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

直流[谐波]滤波器 DC (harmonic) filter

与直流平波电抗器和直流冲击电容器(如有)配合,主要功能是降低高压直流输电线和/或接地极线路电流或电压波动的滤波器。

[来源:GB/T 13498—2017,9.4]

3.2

(滤波器)支路 (filter) branch

直流谐波滤波器由连接在直流输电系统换流站直流极母线与中性母线之间的多个分支电路并联组成时,其中的任一个分支电路。

3.3

主回路 main circuit

由直流谐波滤波器的一次主设备构成的电路。

注:一次主设备包括电抗器、电容器、电阻器、避雷器、开关。

3.4

调谐频率 tuning frequency

使直流谐波滤波器阻抗呈现纯电阻性时的频率。

3.5

[直流]中性母线电容器 (DC) neutral bus capacitor

在直流中性母线与高压直流换流站接地网之间连接的电容器阵列。

[来源:GB/T 13498—2017,9.10]

3.6

[直流]平波电抗器 (DC) smoothing reactor

在直流侧与单个换流器单元或多个换流器单元串联的,主要用于平滑直流电流和降低暂态电流的电抗器。

[来源:GB/T 13498—2017,9.2]

4 使用条件

4.1 正常使用条件

4.1.1 温度

安装运行场所的环境温度范围应为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4.1.2 污秽

应根据直流滤波器安装运行场所,对户内式和户外式直流滤波器各设备分别提出外绝缘的爬电比距要求,与直流场对各设备爬电比距的要求一致。

污秽等级和爬电比距的规定分别见 GB/T 26218.4—2019 的 6.2 和附录 B。

4.1.3 海拔

安装运行场所的海拔不应超过 1 000 m。

对于海拔高于 1 000 m 的情况,应进行海拔修正。修正方法见 GB/T 311.1—2012 的附录 B。

4.1.4 地震烈度

安装运行场所的地震烈度不应超过 8 度。

4.1.5 风速

安装运行场所的风速不应超过 34 m/s。

4.2 特殊使用条件

4.2.1 高相对湿度

以下情况属于高相对湿度：

- 在 24 h 内测得的相对湿度的平均值超过 95%；
- 在 24 h 内测得的水蒸气压力的平均值超过 2.2 kPa；
- 月相对湿度平均值超过 90%；
- 月水蒸气压力平均值超过 1.8 kPa。

4.2.2 霉菌生长

肉眼明显看到的稀疏长霉面积不应超过设备表面积的 5%。

4.2.3 腐蚀性大气

在某些安装场所可能会遇到腐蚀性大气(例如某些工业区、沿海地区)。甚至在户内也可能存在高腐蚀性大气。在较高温度的气候下,这种大气的作用要比在温和的气候下更为严重。

5 参数设计要求

5.1 设计内容

直流输电系统运行过程中,换流器会在直流侧产生谐波电压,进而在直流极线和接地极引线上产生谐波电流。谐波电流将对直流极线和接地极引线附近的通信线路产生干扰。一个脉波数为 p 的换流器,在直流侧产生 kp 次的特征谐波(k 是正整数)。除特征谐波之外,换流器还会产生其他非特征谐波。

直流线路中的谐波电流对邻近通信线路产生干扰的程度取决于：

- 直流线路沿线的谐波电流水平；
- 直流线路与附近通信系统间的相互耦合程度；
- 通信设备的抗干扰能力。

为减小注入直流线路的谐波电流,减小直流输电系统对沿线通信线路的干扰,在必要的情况下需在换流站直流侧装设滤波系统。直流侧滤波系统主要由直流滤波器、平波电抗器和中性母线电容器组成。一般来说,直流线路为电缆的直流输电系统不需要装设直流滤波器,采用架空线路的直流输电系统需要装设直流滤波器。直流滤波器、平波电抗器和中性母线电容器的参数应优化选择,以便满足：

- 将直流线路中的等效干扰电流限制到可接受的水平；
- 避免直流系统在工频和低次谐波频率附近发生谐振。

直流滤波器设计主要包括：

- 直流滤波器支路设置方案的确定及各支路设备参数的计算；
- 换流器产生的谐波电压的计算；
- 直流滤波器性能计算,包括直流极线及接地极引线沿线上的等效干扰电流的计算；
- 直流滤波器稳态定值计算(即直流滤波器设备稳态应力计算),包括流过直流滤波器各设备的电流及设备端点间的电压、端点对地电压的计算；
- 直流滤波器暂态定值计算,包括在短路故障等最苛刻条件下流过直流滤波器各设备的暂态电流、避雷器能耗等的计算。在计算的基础上确定直流滤波器各设备的绝缘水平。

如果在性能计算中发现直流滤波器与线路之间在某些谐波频率下发生明显的谐振,宜考虑采用阻尼式滤波器。

5.2 型式与参数确定

最常用的直流滤波器型式是双调谐滤波器和三调谐滤波器,其结构型式见附录 A。直流滤波器在直流系统中的位置见附录 B。

直流滤波器支路设置由谐波计算结果确定。一般来说,直流滤波器调谐到 12 次、24 次和 36 次。如果谐波计算结果显示其他次的谐波,应相应调整直流滤波器的调谐点。

双调谐滤波器的设备参数主要由其调谐频率 f_1 和 f_2 、高压侧电容器组 C_1 的电容和直流滤波器中并联回路谐振频率 f_p 决定。并联回路谐振频率 f_p 是低压侧电容器组 C_2 和低压电抗器 L_2 的并联谐振频率。电抗器 L_1 和 L_2 在对应频率下的品质因数对滤波效果也有一定影响。

三调谐滤波器的设备参数主要由其调谐频率 f_1 、 f_2 、 f_3 、高压侧电容器组 C_1 的电容和介于两个调谐频率之间的并联回路调谐频率 f_{p1} 和 f_{p2} 决定。并联回路谐振频率 f_{p1} 是低压侧电容器组 C_2 和低压电抗器 L_2 的并联谐振频率,并联回路谐振频率 f_{p2} 是低压侧电容器组 C_3 和低压电抗器 L_3 的并联谐振频率。电抗器 L_1 、 L_2 和 L_3 在对应频率下的品质因数对滤波效果也有一定影响。

确定直流滤波器设备参数是一个反复调整和优化的过程。先确定一组直流滤波器设备参数,然后计算直流滤波器性能(即计算等效干扰电流)。如果性能不满足要求,调整直流滤波器设备参数,直到直流滤波器性能满足要求。直流滤波器的滤波效果基本上与高压侧电容器组的电容成正比。对于额定电压相同的电容器,其成本也基本上与其电容成正比。在直流滤波器中,高压侧电容器组费用的占比最大。

5.3 性能和定值

5.3.1 直流滤波器性能

5.3.1.1 通则

对于直流输电系统来说,直流滤波器的性能指标可用直流线路上最大等效干扰电流确定。

等效干扰电流规定为,线路上 1 次~50 次频率的谐波电流对邻近平行或交叉的通信线路所产生的综合干扰作用与某单个频率的谐波电流所产生的干扰作用相同时,该频率的谐波电流。计算等效干扰电流亦即计算 50 Hz~2 500 Hz 的噪声加权残余电流,基波电流与谐波电流按同样方法处理(亦即将基波视为特殊的谐波)。

计算等效干扰电流时,不仅应包括直接流过直流极导线和接地极线路的谐波电流,还应包括感应到直流线路和接地极线路中的谐波电流。

5.3.1.2 等效干扰电流的计算

等效干扰电流由公式(1)计算。

$$I_{eq}(x) = \sqrt{I_e(x)_I^2 + I_e(x)_{II}^2 + \cdots + I_e(x)_N^2} \quad \cdots \cdots (1)$$

式中:

$I_{eq}(x)$ ——线路走廊沿线任何位置 x 处,噪声加权至 800 Hz 时的等效干扰电流,单位为毫安(mA);

$I_e(x)_I$ ——换流站 I 的换流器谐波电压源产生的等效干扰电流方均根值,单位为毫安(mA);

$I_e(x)_{II}$ ——换流站 II 的换流器谐波电压源产生的等效干扰电流方均根值,单位为毫安(mA);

$I_e(x)_N$ ——换流站 N 的换流器谐波电压源产生的等效干扰电流方均根值,单位为毫安(mA);

x ——线路走廊沿线的相对位置。

某个换流站的换流器谐波电压在线路走廊沿线位置 x 处产生的等效干扰电流由公式(2)计算。

$$I_e(x) = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} [I_r(n, x) \cdot P(n) \cdot H_f]^2} \dots\dots\dots (2)$$

- 式中：
- $I_e(x)$ ——换流器谐波电压源产生的等效干扰电流方均根值,单位为毫安(mA)；
 - $I_r(n, x)$ ——线路走廊沿线位置 x 处的 n 次谐波残余电流方均根值,单位为毫安(mA)；
 - H_f ——考虑到受直流线路干扰影响的主要是通信明线,用于表示典型通信明线耦合阻抗与频率的标么化关系的耦合因数,见表 1；
 - $P(n)$ —— n 次谐波的噪声加权因数,见表 2；
 - n ——谐波次数。

表 1 典型通信明线的耦合因数

频率 Hz	耦合因数 H_f	频率 Hz	耦合因数 H_f	频率 Hz	耦合因数 H_f
50	0.70	900	1.08	1 750	1.71
100	0.71	950	1.11	1 800	1.75
150	0.72	1 000	1.15	1 850	1.78
200	0.73	1 050	1.19	1 900	1.82
250	0.74	1 100	1.23	1 950	1.85
300	0.75	1 150	1.26	2 000	1.88
350	0.75	1 200	1.30	2 050	1.92
400	0.76	1 250	1.34	2 100	1.95
450	0.77	1 300	1.38	2 150	1.98
500	0.78	1 350	1.41	2 200	2.02
550	0.79	1 400	1.45	2 250	2.05
600	0.80	1 450	1.49	2 300	2.08
650	0.85	1 500	1.53	2 350	2.12
700	0.90	1 550	1.56	2 400	2.15
750	0.95	1 600	1.60	2 450	2.18
800	1.00	1 650	1.64	2 500	2.22
850	1.04	1 700	1.68	2 550	2.25
注：对于其他频率, H_f 的值采取线性插值方法得到。					

表 2 CCITT^a 规定的噪声加权因数

频率 Hz	加权因数 $P(n)^b$	频率 Hz	加权因数 $P(n)^b$	频率 Hz	加权因数 $P(n)^b$
50	0,000 71	1 050	1,109	2 050	0,698
100	0,008 91	1 100	1,072	2 100	0,689
150	0,035 5	1 150	1,035	2 150	0,679
200	0,089 1	1 200	1,000	2 200	0,670
250	0,178	1 250	0,977	2 250	0,661
300	0,295	1 300	0,955	2 300	0,652
350	0,376	1 350	0,928	2 350	0,643
400	0,484	1 400	0,905	2 400	0,634
450	0,582	1 450	0,881	2 450	0,625
500	0,661	1 500	0,861	2 500	0,617
550	0,733	1 550	0,842	2 550	0,607
600	0,794	1 600	0,824	2 600	0,598
650	0,851	1 650	0,807	2 650	0,590
700	0,902	1 700	0,791	2 700	0,580
750	0,955	1 750	0,775	2 750	0,571
800	1,000	1 800	0,760	2 800	0,562
850	1,035	1 850	0,745	2 850	0,553
900	1,072	1 900	0,732	2 900	0,543
950	1,109	1 950	0,720	2 950	0,534
1 000	1,122	2 000	0,708	3 000	0,525
^a 国际电电话咨询委员会。					
^b 噪声加权因数 $P(n)$ 是考虑到人耳和电话设备对频率的敏感性而引入的因数。					

换流器谐波电压在线路走廊沿线任意位置 x 处产生的 n 次谐波残余电流由公式(3)计算。

$$I_r(n,x)=\sum_{i=1}^{n_c}I_p(n,i,x) \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- $I_r(n,x)$ ——线路走廊沿线位置 x 处的 n 次谐波残余电流方均根值,单位为毫安(mA)；
- $I_p(n,i,x)$ ——线路走廊沿线位置 x 处,流过导体 i 的 n 次谐波电流方均根值,单位为毫安(mA)；
- i ——导体编号；
- n_c ——线路走廊中的导体总数,包括直流极线、接地极引线及其各自的架空地线。

等效干扰电流计算时考虑以下直流系统类型：

- 双极；
- 单极大地回线；
- 单极金属回线。

对于每一个高压直流输电系统,直流线路上的等效干扰电流限制值宜不大于 6 000 mA,可根据具体工程线路走廊的实际情况调整。

5.3.2 直流滤波器稳态定值计算

5.3.2.1 通则

稳态定值是指直流滤波器设备在稳态及短时运行条件下的应力,即流过直流滤波器设备的电流、各设备端点间的电压及端点对地电压。稳态定值计算的目的是得到稳态及短时运行工况下,上述电流、电压的最大值,为制定直流滤波器设备的规范提供依据。

计算直流滤波器稳态定值时,应包括非理想因素的影响,例如直流滤波器各设备、系统负序电压及频率偏差等。确定直流滤波器稳态应力时应包括以下因素:

- 交流系统稳态频率偏差;
- 线路长度偏差;
- 直流电压偏差;
- 额定直流电压,功率正送;
- 额定直流电压,功率反送;
- 降低直流电压,功率正送;
- 降低直流电压,功率反送;
- 直流滤波器支路投入的不同组合(考虑直流滤波器支路退出);
- 直流滤波器全部投入运行;
- 任一直流滤波器支路退出运行;
- 直流滤波器设备参数偏差。

确定直流滤波器各设备的噪声计算用电流时,无需考虑交流系统稳态频率偏差、线路长度偏差、降电压运行、直流滤波器设备参数偏差,仅计算在额定直流电压、功率正送工况下,直流滤波器全部投入运行时,流过直流滤波器各设备的谐波电流。

5.3.2.2 电压

5.3.2.2.1 直流滤波器高压侧电容器组端点之间的电压

高压侧电容器组端点之间的电压由公式(4)计算。

$$U_{bNH} = k_m U_{DC} + \sqrt{2} \cdot \sum_{n=1}^{50} U_{nCH} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- U_{bNH} —— 高压侧电容器组端点之间的电压;
- U_{DC} —— 电容器组的最高持续直流电压;
- U_{nCH} —— 高压侧电容器组端点之间的第 n 次谐波电压(方均根值);
- k_m —— 直流电压分布不均匀因数。一般取 $k_m = 1.05 \sim 1.1$ (户内)或 $k_m = 1.2 \sim 1.3$ (户外)。

如果将公式(4)中的 U_{DC} 更换为中性母线直流电压 $U_{DC,neutral}$,且 U_{nCH} 更换为中性母线电容器组端点之间的第 n 次谐波电压(方均根值) $U_{n,neutral}$,中性母线电容器组端点之间的电压也可由公式(4)计算。

如果将公式(4)中的 U_{nCH} 更换为其他设备(诸如低压侧电容器组、电抗器、电阻器、避雷器)端点之间的第 n 次谐波电压(方均根值) $U_{n,other}$ 且令 $U_{DC} = 0$,相应地,其他设备上端点之间的电压也可由公式(4)计算。

5.3.2.2.2 确定爬电距离的电压

确定电容器组及电抗器端点之间、其他设备端点之间、端点对地的爬电距离的电压分别由公式(5)、

公式(6)、公式(7)计算。

高压侧电容器组端点之间：

$$U_{\text{creepage,DC}} = \sqrt{U_{\text{DCmax}}^2 + \sum_{n=1}^{50} U_{n\text{CH}}^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$U_{\text{creepage,DC}}$ ——确定高压侧电容器端点之间爬电距离的电压；

U_{DCmax} ——最高直流运行电压；

$U_{n\text{CH}}$ ——高压侧电容器组端点之间的第 n 次谐波电压(方均根值)。

其他设备端点之间：

$$U_{\text{creepage,rms}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} U_{n,\text{other}}^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$U_{\text{creepage,rms}}$ ——确定其他设备端点之间爬电距离的电压；

$U_{n,\text{other}}$ ——其他设备端点之间的第 n 次谐波电压(方均根值)。

端点对地：

$$U_{\text{creepage,ground}} = \sqrt{U_{\text{DC,neutral}}^2 + \sum_{n=1}^{50} U_{n,\text{ground}}^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$U_{\text{creepage,ground}}$ ——确定端点对地爬电距离的电压；

$U_{\text{DC,neutral}}$ ——中性母线直流电压；

$U_{n,\text{ground}}$ ——其他设备端点对地的第 n 次谐波电压(方均根值)。

5.3.2.3 电流

电容器组额定电流(I_{thC})由公式(8)计算。

$$I_{\text{thC}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} I_{nC}^2} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

I_{nC} ——电容器组端点之间的第 n 次谐波电流(方均根值)。

电抗器额定电流(I_{thL})由公式(9)计算。

$$I_{\text{thL}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} I_{nL}^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

I_{nL} ——电抗器端点之间的第 n 次谐波电流(方均根值)。

用于计算电容器、电抗器噪声的电流(I_{audible})由公式(10)计算。

$$I_{\text{audible}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} I_{an}^2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

I_{an} ——用于噪声计算的第 n 次谐波电流(方均根值)。

5.3.3 直流滤波器暂态定值计算

5.3.3.1 概述

暂态定值是指直流滤波器设备在故障情况下可能承受的最大暂态应力,即故障情况下流过直流滤波器各设备的暂态电流。暂态定值计算的目的是确定直流滤波器避雷器参数,确定直流滤波器设备的

保护及绝缘水平。

5.3.3.2 直流滤波器暂态定值计算工况

在确定高压直流输电系统直流滤波器各设备暂态应力时,至少应包括三种典型故障类型。

- a) 直流极线对地短路:高压侧电容器预充电至直流母线避雷器操作冲击保护水平。然后,将该电容器高压端对地短路,即直流滤波器通过一个故障等效电感放电。该电感的取值将随故障点的位置而变化。直流滤波器避雷器、换流站内的接地网、中性母线电容器及中性母线避雷器为故障电流提供回路。通过计算,获得直流滤波器设备及避雷器的放电电流及吸收能量等。低压侧电容器预充电对计算结果没有明显影响,因而在计算时可不充电。对故障等效电感取不同的值(取值范围为几个微亨到几个毫亨),以找出最苛刻情况下直流滤波器设备及避雷器所承受的应力。
- b) 直流极线上侵入操作波:在直流极母线上施加一个 250/2 500 μ s 的标准操作冲击波,其峰值应等于直流极母线避雷器操作冲击保护水平。
- c) 直流线路故障后的再启动:直流线路对地故障之后,直流线路保护会尝试几次再启动。如果故障点还未消失,再启动时会使故障重现,从而增加避雷器的吸收能量。因此,确定避雷器的吸收能量时,应包括直流线路或直流母线故障后保护再启动时产生的能量。
再启动次数和再启动电压要求由买方与卖方协商确定。

5.3.3.3 避雷器参数的选择

5.3.3.3.1 通则

直流滤波器支路通常设有避雷器。对于双调谐滤波器,避雷器通常接于高压电抗器的高压端子与地之间、低压电抗器两端子之间以及高压电抗器两端子之间。如果选择三调谐直流滤波器支路,避雷器通常接于高压电抗器的高压端和电流互感器的低压端之间,以及低压电抗器的两端子之间。

避雷器的选择应包括以下因素:

- 被保护设备期望的最高绝缘水平;
- 避雷器最高持续运行电压(U_{MCOV}),包括谐波成分;
- 直流滤波器放电时,在避雷器上出现的最大峰值电流;
- 直流滤波器放电时,避雷器吸收的能量。

5.3.3.3.2 避雷器最高持续运行电压

施加在直流滤波器避雷器上的电压包括各次谐波。对于避雷器 F_1 (见 A.1)来说,还包括直流电压。计算避雷器最高持续运行电压(U_{MCOV})时,应包括最严重的谐波电压组合。避雷器的持续运行电压可由公式(11) 计算。

$$U_{arr}(t) = U_{DC, neutral} + \sum_{n=1}^{50} U_{narr} \cos(n\omega_0 t + \varphi_n) \dots\dots\dots (11)$$

- 式中:
- $U_{arr}(t)$ ——避雷器持续运行电压;
 - $U_{DC, neutral}$ ——中性母线直流电压;
 - n ——谐波次数;
 - U_{narr} ——避雷器端点之间的第 n 次谐波电压(方均根值);
 - ω_0 ——基波角速度;
 - t ——时间;

φ_n ——第 n 次谐波的初相角。

对于与电抗器并联的避雷器来说, $U_{DC, neutral}$ 取为零。

不同运行情况下, 初相角(φ_n)是变化的。一个保守的方法是, 对所有被考虑的谐波, 初相角(φ_n)都取为零。这就得到了一个峰值电压 ($t=0, 2\pi/\omega_0, 4\pi/\omega_0$ 等), 幅值等于施加于避雷器上的直流电压、谐波电压幅值的算术和。实际相角不可能全部为零, 因而施加于避雷器上的电压幅值要低得多。这种考虑是非常保守的。

避雷器最高持续运行电压可由公式(12)给出的各次谐波电压算术和计算。

$$U_{MCOV} = \sum_{n=1}^{50} U_{narr} \dots\dots\dots (12)$$

式中:

U_{MCOV} ——避雷器最高持续运行电压(方均根值);

U_{narr} ——避雷器端点之间的第 n 次谐波电压(方均根值)。

避雷器最高持续运行电压也可按照统计峰值持续运行电压的 SCCOV 计算方法得到, 计算方法如下。

根据直流滤波器各设备的谐波电压频谱选择主要次谐波, 并采用随机函数产生相应谐波的初始相位, 计算各主要次谐波叠加后的峰值。为保证精度, 应采用足够多的计算次数(不宜少于 10 000 次)。将各次计算的最大幅值进行正态拟合, 并计算其概率分布。

5.3.3.3.3 避雷器放电电流和吸收能量

直流滤波器避雷器的参考电压(U_{ref})与最高持续运行电压的关系见公式(13)。

$$U_{ref} = \frac{U_{MCOV}}{k_f} \dots\dots\dots (13)$$

式中:

U_{MCOV} ——避雷器最高持续运行电压(方均根值);

k_f ——与调谐频率有关的因数。应与避雷器制造厂协商确定, 一般为 0.6~0.8。

避雷器的参考电压不应低于被保护设备应承受的额定稳态运行电压及短时运行电压。

避雷器参考电压越低, 放电电流就越大。对于初步选定的避雷器参数, 可根据典型故障工况对避雷器的放电电流及能量进行校核。

确定避雷器参数的步骤是一个反复调整和优化的过程。应采用不同的避雷器参考电压(U_{ref})进行计算, 最终确定避雷器参数。

5.3.4 绝缘水平

绝缘水平应通过以下方式确定:

——按照 5.3.3.2 中的三种故障类型计算避雷器的保护水平;

——在避雷器保护水平上加上绝缘裕度, 确定最终的直流滤波器设备绝缘水平。

6 设备设计要求

6.1 电容器

6.1.1 通则

电容器的设计和结构应符合附录 C 的规定。

电容器的损耗角正切 $\tan\delta$ 由买方和卖方协商确定。

6.1.2 电容器组的额定电压

高压侧电容器组额定电压见 5.3.2.2.1。
低压侧电容器组额定电压由公式(14)和公式(15)计算,取计算结果的较大值。

$$U_{bNL} = \sum_{n=1}^{50} U_{nCL} \dots\dots\dots (14)$$

或

$$U_{bNL} = \frac{U_{SIWL}}{4.3} \dots\dots\dots (15)$$

式中:
 U_{bNL} ——低压侧电容器组额定电压;
 U_{nCL} ——低压侧电容器组端点之间的第 n 次谐波电压(方均根值);
 U_{SIWL} ——电容器组的操作冲击耐受水平(峰值)。

6.1.3 电容器组的额定电流

电容器组的额定电流由公式(16)计算。

$$I_{bN} = \sum_{n=1}^{50} I_{nC} \dots\dots\dots (16)$$

式中:
 I_{bN} ——电容器组额定电流;
 I_{nC} ——电容器组端点之间的第 n 次谐波电流(方均根值)。

6.1.4 电容器组的额定容量

电容器组的额定容量由公式(17)计算。

$$Q_{bN} = \sum_{n=1}^{50} Q_n \dots\dots\dots (17)$$

式中:
 Q_{bN} ——电容器组额定容量;
 Q_n ——对应于第 n 次谐波的容量。

6.1.5 电容器单元的最高持续直流电压

电容器单元的最高持续直流电压由公式(18)计算。

$$U_d = \frac{U_{DC}}{S} \dots\dots\dots (18)$$

式中:
 U_d ——电容器单元最大持续直流电压;
 U_{DC} ——电容器组的最高持续直流电压;
 S ——电容器组中的电容器单元串联段数。

6.1.6 电容器单元的额定电压

电容器单元的额定电压由公式(19)计算。

$$U_N = \frac{U_{bN}}{S} \dots\dots\dots (19)$$

式中：

U_N ——电容器单元额定电压；

U_{bN} ——电容器组的额定电压；

S ——电容器组中的电容器单元串联段数。

6.1.7 电容器单元的额定电流

电容器单元的额定电流由公式(20)计算。

$$I_N = \frac{I_{bN}}{P} \dots\dots\dots (20)$$

式中：

I_N ——电容器单元额定电流；

I_{bN} ——电容器组的额定电流；

P ——电容器组中的电容器单元并联数。

6.2 电抗器

6.2.1 通则

滤波电抗器通常采用低噪声的干式空心电抗器，其结构应符合 GB/T 1094.6—2011 及附录 D 的规定。

滤波电抗器起决定性作用的参数是热稳定电流和确定爬电距离的最高电压。

6.2.2 额定电压

滤波电抗器的额定电压为电抗器两端的各次谐波电压(方均根值)的算术和。由公式(21)计算。

$$U_{rated} = \sum_{n=1}^{50} U_{nL} \dots\dots\dots (21)$$

式中：

U_{rated} ——电抗器额定电压；

U_{nL} ——电抗器端点之间的第 n 次谐波电压(方均根值)。

6.2.3 热稳定电流

滤波电抗器的热稳定电流(即电抗器额定电流)为各次谐波电流(方均根值)的方和根值。由公式(22)计算。

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} I_{nL}^2} \dots\dots\dots (22)$$

式中：

I_{nL} ——电抗器端点之间的第 n 次谐波电流(方均根值)。

6.2.4 确定爬电距离的最高电压

确定爬电距离的最高电压由公式(23)计算。

$$U_{creep} = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} U_{nL}^2} \dots\dots\dots (23)$$

式中：

U_{creep} ——确定电抗器爬电距离的最大电压；

U_{nL} ——电抗器端点之间的第 n 次谐波电压(方均根值)。

6.3 电阻器

6.3.1 通则

用于直流滤波器的电阻器采用干式单台的无感设计,空气绝缘,空气自然对流冷却,其结构应符合 GB/T 30547—2014 及附录 E 的规定。

6.3.2 电流额定值

电阻器的最大持续电流为各次谐波电流(方均根值)的方和根值。

6.4 避雷器

直流滤波器避雷器宜选用符合 GB/T 22389 规定的无间隙金属氧化物避雷器,设备选型要求应包括连接方式、可能出现的过电压倍数等。

6.5 电流互感器

根据直流滤波器保护、测量的需要,通常在每个直流滤波器支路安装电流互感器。

电流互感器应符合 GB/T 20840.1、GB/T 20840.2、GB/T 26216.1 和 GB/T 26216.2 的规定。

6.6 隔离开关

隔离开关的额定电流按支路中各次谐波电流的方和根确定,计算同电抗器热稳定电流[见公式(22)]。

隔离开关的性能应符合 GB/T 1985 和 GB/T 25091 的规定。

6.7 接地开关

直流滤波器的高压侧和低压侧均应装设接地开关。

接地开关的性能应符合 GB/T 1985 和 GB/T 25091 的规定。

7 其他要求

7.1 防腐蚀层

直流滤波器各设备及其构架的金属外露表面应有可靠的防腐蚀层。

7.2 母线和连接线

7.2.1 主回路母线和连接线

主回路母线的长期允许电流不应小于 1.5 倍额定电流,单台电容器单元之间的连接线长期允许电流不应小于 1.5 倍单台电容器组额定电流,其余连接线按相应电路的额定工作电流或机械强度选择。

母线及连接线的材料、连接和布置方式应满足直流滤波器在正常运行及故障情况下的机械强度要求。

母线及连接线的连接应牢固,不变形,接触良好,布置整齐、美观。

母线支柱绝缘子的机械强度、爬电距离应满足正常使用要求。

7.2.2 辅助电路连接线

辅助电路连接线的截面积应符合有关标准的规定。

辅助电路连接线的额定电压不应低于相应电路的额定工作电压。

辅助电路连接线的连接应牢固,布线整齐、美观,不应自由晃动。

7.3 电气间隙和爬电距离

直流滤波器各设备的电气间隙和爬电距离应符合有关标准的规定。

7.4 抗震要求

如果直流滤波器安装运行场所的地震烈度超过 8 度,买方应说明加速度幅值和阻尼值,卖方应提供直流滤波器各设备的抗震计算报告。其中,电容器组及塔架应根据 GB/T 50260 的规定设计,并满足抗震要求。

8 试验

8.1 通则

8.1.1 试验分类

本章给出了构成直流滤波器的电容器、电抗器和电阻器设备以及直流滤波器整体的试验要求。

试验分为例行试验(对于电阻器,为出厂试验)、型式试验、现场试验和特殊试验。

例行试验(出厂试验)由卖方在交货前对每一台设备进行。

型式试验应分别对电容器、电抗器和电阻器中有代表性的设备进行,或由买方和卖方协商确定。如果类似产品以前进行过型式试验,应提供以前的型式试验报告以及关于设计差异的详细资料。该报告经买方认可后,可代替进行新的型式试验。

特殊试验经买方和卖方协商一致后方可进行。

8.1.2 试验条件

除非另有规定,直流滤波器的全部试验和测量应在环境空气温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行。如果修正,以 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时之值为准,但买方和卖方另有协议时除外。如果电容器在不通电状态下,在恒定环境温度中放置了适当长的时间,可认为电容器的介质温度与环境温度相同。

试验和测量所使用的交流电压的频率应为 $(50 \pm 0.5)\text{ Hz}$,波形为正弦波,电压总谐波畸变率不大于 2%。

如果安装场所的海拔高于 1 000 m,各设备的外绝缘试验电压应按照 GB/T 311.1—2012 的规定修正。

海拔超过 1 000 m 时,海拔每增加 500 m,电抗器温升试验的温升限值减少 2.5%(除非卖方和买方另有协议)。如果类似产品以前进行过温升试验,应提供以前的温升试验报告以及关于设计差异的详细资料。该报告经买方认可后,可代替进行新的温升试验。

无特殊说明时,电抗器试验在制造厂进行。试验中可能影响电抗器性能的任何外部零件和附件均应安装于所在位置。除绝缘试验外,所有特性试验均应在额定条件下进行。

8.1.3 试验判据

在耐压试验中,电容器任何一个元件损坏,应视为电容器组未通过试验。在其他试验中,如果任何一项参数不满足设计要求,应视为电容器组未通过该项试验。

电抗器电感测量的实测值与例行试验得到的值的偏差不应超过订货时的约定。

电抗器支柱绝缘子绝缘电阻的实测值不应低于 $500\text{ M}\Omega$ 。

8.2 例行试验(出厂试验)

8.2.1 电容器例行试验

8.2.1.1 高压侧电容器例行试验

8.2.1.1.1 试验项目

高压侧电容器例行试验项目见表 3。

表 3 高压侧电容器例行试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	外观检查	8.2.1.1.2
2	电容测量	8.2.1.1.3
3	电容器损耗角正切($\tan\delta$)测量	8.2.1.1.4
4	端子间电压试验	8.2.1.1.5
5	端子与外壳间交流电压试验	8.2.1.1.6
6	内部均压电阻测量	8.2.1.1.7
7	密封性试验	8.2.1.1.8
8	内部熔丝的放电试验	8.2.1.1.9

8.2.1.1.2 外观检查

检查应符合 GB/T 20993—2012 中 5.3 的规定。

8.2.1.1.3 电容测量

测量应符合 GB/T 20993—2012 中 5.4 的规定。

8.2.1.1.4 电容器损耗角正切($\tan\delta$)测量

测量应符合 GB/T 20993—2012 中 5.5 的规定。

8.2.1.1.5 端子间电压试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.6 的规定。

8.2.1.1.6 端子与外壳间交流电压试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.7 的规定。

8.2.1.1.7 内部均压电阻测量

测量应符合 GB/T 20993—2012 中 5.8 的规定。

8.2.1.1.8 密封性试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.9 的规定。

8.2.1.1.9 内部熔丝的放电试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.10 的规定。

8.2.1.2 低压侧电容器例行试验

8.2.1.2.1 试验项目

低压侧电容器例行试验项目见表 4。

表 4 低压侧电容器例行试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	外观检查	8.2.1.2.2
2	电容测量	8.2.1.2.3
3	电容器损耗角正切($\tan\delta$)测量	8.2.1.2.4
4	端子间电压试验	8.2.1.2.5
5	端子与外壳间交流电压试验	8.2.1.2.6
6	内部放电器件检验	8.2.1.2.7
7	密封性试验	8.2.1.2.8
8	内部熔丝的放电试验	8.2.1.2.9
9	局部放电试验	8.2.1.2.10

8.2.1.2.2 外观检查

检查应符合 GB/T 20994—2007 中 2.3 的规定。

8.2.1.2.3 电容测量

测量应符合 GB/T 20994—2007 中 2.4 的规定。

8.2.1.2.4 电容器损耗角正切($\tan\delta$)测量

测量应符合 GB/T 20994—2007 中 2.5 的规定。

8.2.1.2.5 端子间电压试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.6 的规定。

8.2.1.2.6 端子与外壳间交流电压试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.7 的规定。

8.2.1.2.7 内部放电器件检验

检验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.8 的规定。

8.2.1.2.8 密封性试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.9 的规定。

8.2.1.2.9 内部熔丝的放电试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.10 的规定。

8.2.1.2.10 局部放电试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.11 的规定。

8.2.2 电抗器例行试验

8.2.2.1 试验项目

电抗器例行试验项目见表 5。

表 5 电抗器例行试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	绕组电阻测量	8.2.2.2
2	电感测量	8.2.2.3
3	损耗和品质因数测量	8.2.2.4
4	绕组过电压试验	8.2.2.5

8.2.2.2 绕组电阻测量

测量应符合 GB/T 1094.1—2013 中 11.2 的规定。

8.2.2.3 电感测量

测量应符合 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.5 的规定。

对于装有分接头的电抗器,应分别测量各分接头调至不同位置的电感。其他可调电抗器宜在主要调节位置进行电感测量。

8.2.2.4 损耗和品质因数测量

测量应符合 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.6 的规定。

8.2.2.5 绕组过电压试验

试验应符合 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.7 的规定。

8.2.3 电阻器出厂试验

8.2.3.1 试验项目

电阻器出厂试验项目见表 6。

表 6 电阻器出厂试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	外观及一般检查	8.2.3.2
2	冷态电阻测量	8.2.3.3
3	电感测量	8.2.3.4
4	工频耐压试验	8.2.3.5

8.2.3.2 外观及一般检查

检查应符合 GB/T 30547—2014 中 8.3 的规定。

8.2.3.3 冷态电阻测量

测量应符合 GB/T 30547—2014 中 8.4 的规定。

8.2.3.4 电感测量

测量应符合 GB/T 30547—2014 中 7.4 的规定。

8.2.3.5 工频耐压试验

试验应符合 GB/T 30547—2014 中 8.6 的规定。

8.3 型式试验

8.3.1 电容器型式试验

8.3.1.1 高压侧电容器型式试验

8.3.1.1.1 试验项目

高压侧电容器型式试验项目见表 7。

表 7 高压侧电容器型式试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	热稳定性试验	8.3.1.1.2
2	端子与外壳间交流电压试验	8.3.1.1.3
3	端子与外壳间雷电冲击电压试验	8.3.1.1.4
4	短路放电试验	8.3.1.1.5
5	电容随温度的变化曲线测量	8.3.1.1.6
6	极性反转试验	8.3.1.1.7
7	电容器损耗角正切(tanδ)随温度变化曲线测量	8.3.1.1.8
8	局部放电试验	8.3.1.1.9
9	内部熔丝的隔离试验	8.3.1.1.10
10	套管及导电杆受力试验	8.3.1.1.11

8.3.1.1.2 热稳定性试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.11 的规定。

8.3.1.1.3 端子与外壳间交流电压试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.12 的规定。

8.3.1.1.4 端子与外壳间雷电冲击电压试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.13 的规定。

8.3.1.1.5 短路放电试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.14 的规定。

8.3.1.1.6 电容随温度的变化曲线测量

测量应符合 GB/T 20993—2012 中 5.15 的规定。

8.3.1.1.7 极性反转试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.16 的规定。

8.3.1.1.8 电容器损耗角正切($\tan\delta$)随温度变化曲线测量

测量应符合 GB/T 20993—2012 中 5.17 的规定。

8.3.1.1.9 局部放电试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.18 的规定。

8.3.1.1.10 内部熔丝的隔离试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.19 的规定。

8.3.1.1.11 套管及导电杆受力试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.20 的规定。

8.3.1.2 低压侧电容器型式试验

8.3.1.2.1 试验项目

低压侧电容器型式试验项目见表 8。

表 8 低压侧电容器型式试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	热稳定性试验	8.3.1.2.2
2	高温下电容器损耗角正切($\tan\delta$)测量	8.3.1.2.3
3	端子与外壳间交流电压试验	8.3.1.2.4
4	端子与外壳间雷电冲击电压试验	8.3.1.2.5
5	短路放电试验	8.3.1.2.6

表 8 低压侧电容器型式试验项目（续）

序号	试验项目	试验依据
6	内部熔丝的隔离试验	8.3.1.2.7
7	电容随频率和温度的变化曲线测量	8.3.1.2.8
8	套管及导电杆受力试验	8.3.1.2.9

8.3.1.2.2 热稳定性试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.12 的规定。

8.3.1.2.3 高温下电容器损耗角正切(tanδ)测量

测量应符合 GB/T 20994—2007 中 2.13 的规定。

8.3.1.2.4 端子与外壳间交流电压试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.14 的规定。

8.3.1.2.5 端子与外壳间雷电冲击电压试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.15 的规定。

8.3.1.2.6 短路放电试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.16 的规定。

8.3.1.2.7 内部熔丝的隔离试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.17 的规定。

8.3.1.2.8 电容随频率和温度的变化曲线测量

测量应符合 GB/T 20994—2007 中 2.18 的规定。

8.3.1.2.9 套管及导电杆受力试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.19 的规定。

8.3.2 电抗器型式试验

8.3.2.1 试验项目

电抗器型式试验项目见表 9。

表 9 电抗器型式试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	电感测量	8.2.2.3
2	损耗和品质因数测量	8.2.2.4
3	温升试验	8.3.2.2
4	雷电冲击试验	8.3.2.3

8.3.2.2 温升试验

试验应符合 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.8 的规定。

如果电抗器带外罩或其他降噪装置,应对整个电抗器(包括安装就位的外罩、其他降噪装置和附件)一起进行试验。

对后装外罩的电抗器,应在买方同意的基础上,在试验中考虑安装就位的外罩的影响。

等效试验电流由公式(24)计算。

$$I_t^2 R_t = \sum_{n=2}^m I_{Hn}^2 \cdot R_{Hn} \dots\dots\dots (24)$$

式中:

- I_t ——等效试验电流;
- I_{Hn} ——额定连续 n 次谐波电流;
- R_t ——修正到最高运行温度,试验电流频率下的绕组电阻;
- R_{Hn} ——修正到最高运行温度, n 次谐波频率下的绕组电阻;
- m ——最高谐波次数。

温升试验时,试验场地的冷却空气温度宜介于 5℃ 与电抗器设计所依据的最高环境温度之间。施加试验电流的时间应为使温度达到稳态的时间再增加 0.5 h,但不应少于 1 h。

进行型式试验的每一种规格的电抗器应在最后阶段测量温度,并修正到最高环境温度。

应按照 GB/T 1094.2—2013 中 7.6 的规定,在试验断电后,立即测量冷却期间的电阻,以确定绕组的平均温度。

应在试验的基础上,以最高干球温度为环境温度对下列情况的温度限值进行校核。

- a) 在稳态环境温度条件下,施加技术数据中的包括谐波的额定电流。
对 B 级和 F 级绝缘来说,可接受的最高热点温度分别是 110℃ 和 130℃,平均温升分别不超过 70 K 和 85 K。
- b) 施加技术数据中规定的包括谐波在内的额定电流,直到达到稳态温度。接着施加 30 min 短时电流。
对 B 级和 F 级绝缘来说,可接受的最高热点温度分别是 130℃ 和 155℃,平均温升分别不超过 90 K 和 110 K。
注:可接受的最高热点温度见 GB/T 1094.11—2007 中的表 2 给出的绝缘系统温度。
- c) 施加技术数据中规定的包括谐波在内的额定电流,直到达到稳态温度。接着施加 10 min 短时电流。
对 B 级和 F 级绝缘来说,可接受的最高热点温度分别是 130℃ 和 155℃,平均温升分别不超过 90 K 和 110 K。

8.3.2.3 雷电冲击试验

试验应符合 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.9 的规定。

对于装有分接头的电抗器,在各分接头位置进行试验。其他可调电抗器宜在主要调节位置进行试验。

如果电抗器带外罩或其他降噪装置,应对整个电抗器(包括安装就位的外罩、其他降噪装置和附件)一起进行试验。

对后装外罩的电抗器,应在买方同意的前提下,在试验中考虑安装就位的外罩的影响。

试验应采用 1.2/50 μs 标准雷电冲击脉冲。对于低电感电抗器,可能难以得到 1.2/50 μs 标准雷电冲击脉冲波形。在这种情况下,经买方同意,可采用更大差额的脉冲,且应优先考虑适当的波前时间。

8.3.3 电阻器型式试验

8.3.3.1 试验项目

电阻器型式试验项目见表 10。

表 10 电阻器型式试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	电阻测量	8.3.3.2
2	电感测量	8.2.3.4
3	温升试验	8.3.3.3
4	热负荷试验	8.3.3.4
5	绝缘试验	8.3.3.5
6	抗震试验	8.3.3.6
7	无线电干扰电压试验	8.3.3.7
8	外壳防护等级检查	8.3.3.8

8.3.3.2 电阻测量

测量应符合 GB/T 30547—2014 中 7.3 的规定。

8.3.3.3 温升试验

试验应符合 GB/T 30547—2014 中 7.5 的规定。

8.3.3.4 热负荷试验

试验应符合 GB/T 30547—2014 中 7.6 的规定。

8.3.3.5 绝缘试验

试验应符合 GB/T 30547—2014 中 7.7 的规定。

8.3.3.6 抗震试验

试验应符合 GB/T 30547—2014 中 7.8 的规定。

8.3.3.7 无线电干扰电压试验

试验应符合 GB/T 30547—2014 中 7.9 的规定。

8.3.3.8 外壳防护等级检查

检查应符合 GB/T 30547—2014 中 7.10 的规定。

8.4 现场试验

8.4.1 电容器现场试验

8.4.1.1 高压侧电容器现场试验

8.4.1.1.1 试验项目

高压侧电容器现场试验项目见表 11。

表 11 高压侧电容器现场试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	外观检查	8.2.1.1.2
2	端子与外壳间绝缘电阻测量	8.4.1.1.2
3	电容测量	8.4.1.1.3
4	端子与外壳间交流电压试验	8.4.1.1.4

8.4.1.1.2 端子与外壳间绝缘电阻测量

测量应符合 GB/T 20993—2012 中 5.23 的规定。

8.4.1.1.3 电容测量

测量应符合 GB/T 20993—2012 中 5.24 的规定。

8.4.1.1.4 端子与外壳间交流电压试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.25 的规定。

8.4.1.2 低压侧电容器现场试验

8.4.1.2.1 试验项目

低压侧电容器现场试验项目见表 12。

表 12 低压侧电容器现场试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	外观检查	8.2.1.2.2
2	绝缘电阻测量	8.4.1.2.2
3	电容测量	8.4.1.2.3
4	耐压试验	8.4.1.2.4
5	电容器损耗角正切($\tan\delta$)测量	8.2.1.2.4
6	耐压后复测电容	8.4.1.2.3

8.4.1.2.2 绝缘电阻测量

测量应符合 GB/T 20994—2007 中 2.20 的规定。

8.4.1.2.3 电容测量

测量应符合 GB/T 20994—2007 中 2.21 的规定。

8.4.1.2.4 耐压试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.22 的规定。

8.4.2 电抗器现场试验

8.4.2.1 试验项目

电抗器现场试验项目见表 13。

表 13 电抗器现场试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	绕组直流电阻测量	8.4.2.2
2	电感测量	8.4.2.3
3	支柱绝缘子绝缘电阻测量	8.4.2.4

8.4.2.2 绕组直流电阻测量

测量应符合 GB/T 1094.1—2013 中 11.2 的规定。

8.4.2.3 电感测量

测量应符合 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.5 的规定。

8.4.2.4 支柱绝缘子绝缘电阻测量

使用不低于 2 500 V 兆欧表测量支柱绝缘子的绝缘电阻。

8.4.3 电阻器现场试验

8.4.3.1 试验项目

电阻器现场试验项目见表 14。

表 14 电阻器现场试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	外观及一般检查	8.4.3.2
2	冷态电阻测量	8.2.3.3
3	工频耐压试验	8.2.3.5

8.4.3.2 外观及一般检查

检查应符合 GB/T 30547—2014 中 9.3 的规定。

8.4.4 直流滤波器调谐试验

8.4.4.1 通则

对于品质因数等于或大于 10 的直流滤波器,安装完毕之后应进行冷态调谐。通过调整直流滤波器电感,确保直流滤波器在整个运行温度范围之内满足滤波性能要求。

一般情况下,通过改变电抗器分接头位置,调整电感,实现直流滤波器的调谐。个别情况下,通过调配电容器组中的电容器单元,改变电容器组的总电容,实现直流滤波器的调谐。

8.4.4.2 调谐方法

8.4.4.2.1 概述

通常采用相角测量法和阻抗幅值测量法两种不同的方法实现直流滤波器的调谐。

8.4.4.2.2 阻抗相角测量法

测量直流滤波器回路阻抗相角。当相角等于零时,直流滤波器处于最佳调谐状态。

8.4.4.2.3 阻抗幅值测量法

测量直流滤波器回路阻抗幅值。当阻抗幅值达到最小(对于串联回路)或达到最大(对于并联回路)时,直流滤波器处于最佳调谐状态。

在直流滤波器调试时,应补偿环境温度变化引起的电容变化(可借助调谐图实现)。调谐图给出了一个直流滤波器的调谐频率随环温变化而变化的关系。调谐图可在直流滤波器开始调试之前绘制。

在更换滤波电抗器或大部分电容器后,应重新对直流滤波器支路进行调谐。

测量直流滤波器的调谐频率,应符合设计要求。

8.4.5 直流滤波器通电试验

测量直流滤波器总电流、支路电流和高压侧电容器组 C_1 不平衡电流。

8.5 特殊试验

8.5.1 电容器特殊试验

8.5.1.1 高压侧电容器特殊试验

8.5.1.1.1 试验项目

高压侧电容器特殊试验项目见表 15。

表 15 高压侧电容器特殊试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	最高内部热点温度试验	8.5.1.1.2
2	外部电晕	8.5.1.1.3
3	可听噪声	8.5.1.1.4

8.5.1.1.2 最高内部热点温度试验

试验应符合 GB/T 20993—2012 中 5.21 的规定。

8.5.1.1.3 外部电晕

电容器组在户外、晴天、夜晚的环境中不应有可见电晕。

试验采用工频交流电压,其方均根值为电容器组最高持续直流电压 U_{DC} 的 1.1 倍。如果无其他判据,测得的无线电干扰电压(RIV)不高于 2 500 μV 可认为满足要求。

8.5.1.1.4 可听噪声

可听噪声应按照 GB/T 28543—2021 的规定测量。

8.5.1.2 低压侧电容器特殊试验

8.5.1.2.1 试验项目

低压侧电容器特殊试验项目见表 16。

表 16 低压侧电容器特殊试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	热稳定试验的附加试验	8.5.1.2.2
2	最高内部热点温度试验	8.5.1.2.3
3	低温下的局部放电试验	8.5.1.2.4
4	外壳耐爆能量试验	8.5.1.2.5
5	抗震试验	8.5.1.2.6
6	耐久性试验	8.5.1.2.7
7	外部电晕	8.5.1.1.3
8	可听噪声	8.5.1.1.4

8.5.1.2.2 热稳定试验的附加试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.23 的规定。

8.5.1.2.3 最高内部热点温度试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.24 的规定。

8.5.1.2.4 低温下的局部放电试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.25 的规定。

8.5.1.2.5 外壳耐爆能量试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.26 的规定。

8.5.1.2.6 抗震试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.27 的规定。

8.5.1.2.7 耐久性试验

试验应符合 GB/T 20994—2007 中 2.28 的规定。

8.5.2 电抗器特殊试验

8.5.2.1 试验项目

电抗器特殊试验项目见表 17。

表 17 电抗器特殊试验项目

序号	试验项目	试验依据
1	短路电流试验	8.5.2.2
2	声级测定	8.5.2.3
3	外施耐压试验	8.5.2.4
4	涌流耐受试验	8.5.2.5
5	机械谐振试验	8.5.2.6

8.5.2.2 短路电流试验

试验应符合 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.10 的规定。

8.5.2.3 声级测定

试验应符合 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.11 的规定。

8.5.2.4 外施耐压试验

试验应符合 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.12 的规定。

8.5.2.5 涌流耐受试验

试验应符合 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.13 的规定。

8.5.2.6 机械谐振试验

试验应符合 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.16 的规定。

9 标志

直流滤波器应装设有表明其名称和类型的标识牌，直流滤波器各设备应配有符合相应标准的铭牌。

附录 A
(资料性)

高压直流输电系统常用直流滤波器结构

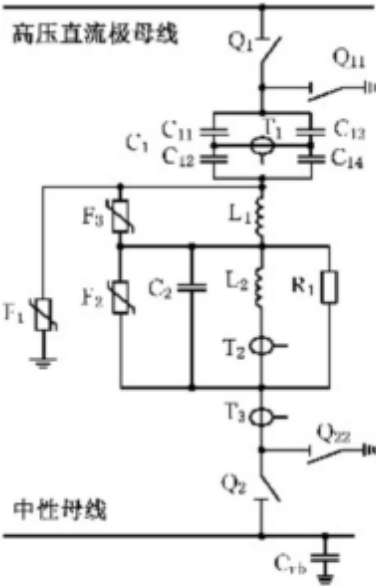
A.1 概述

直流滤波器设备包括电容器、电抗器、电阻器和避雷器等。
直流滤波器接线中的电阻器是否需要以及避雷器的连接方式由最终设计确定。
以下给出几种典型的滤波器原理接线方案。

A.2 双调谐(DT)滤波器

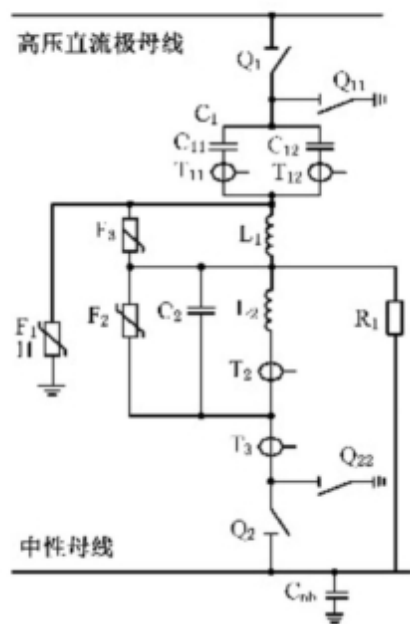
双调谐滤波器相当于两个并联的单调谐滤波器,但是通过一个单独的合成滤波器实现的。与在调谐频率下有相同滤波效果的两个单调谐滤波器相比,双调谐滤波器能更好地衰减两个调谐频率间的谐波,且只有一个高压电容器组和一个高压电抗器,其他设备都在低压下运行,占地面积小、保护成本低。

图 A.1、图 A.2 是两种典型的双调谐滤波器原理接线方案。



标引序号说明：
 Q_1 、 Q_2 —— 隔离开关；
 Q_{11} 、 Q_{22} —— 接地开关；
 C_1 、 C_2 、 C_{vb} —— 电容器组(其中, C_1 由电容器 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{14} 构成)；
 L_1 、 L_2 —— 电抗器；
 R_1 —— 电阻器；
 F_1 、 F_2 、 F_3 —— 避雷器；
 T_1 、 T_2 、 T_3 —— 电流测量装置。

图 A.1 典型双调谐(DT)滤波器原理接线方案 1



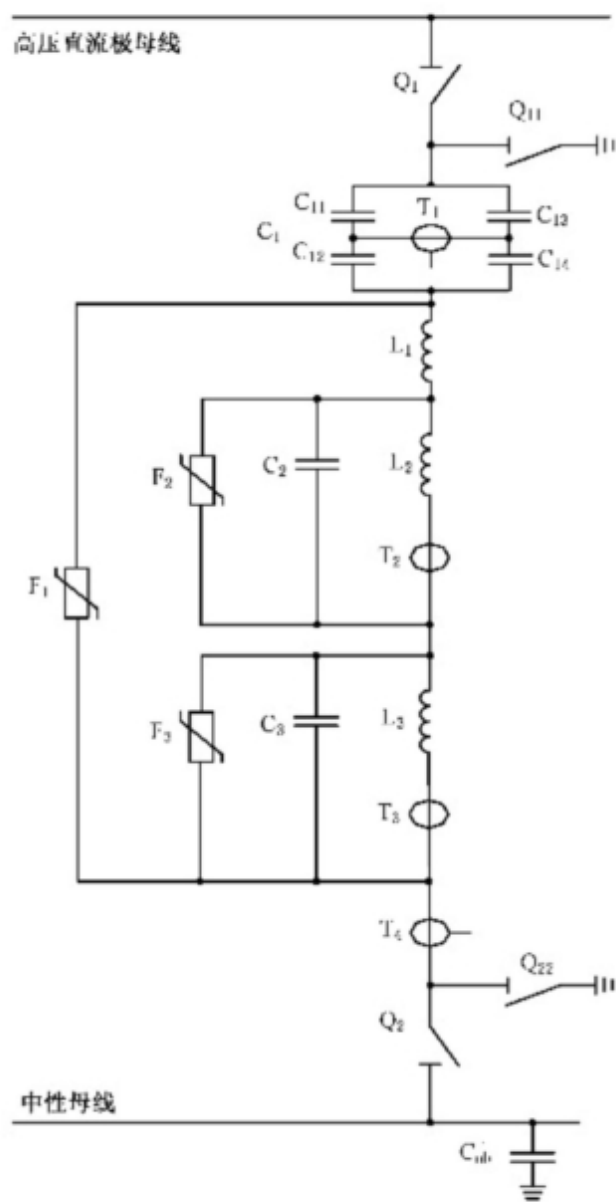
- 标引序号说明：
- $Q_1、Q_2$ —— 隔离开关；
 - $Q_{11}、Q_{22}$ —— 接地开关；
 - $C_1、C_2、C_{nb}$ —— 电容器组(其中, C_1 由电容器 $C_{11}、C_{12}$ 构成)；
 - $L_1、L_2$ —— 电抗器；
 - R_1 —— 电阻器；
 - $F_1、F_2、F_3$ —— 避雷器；
 - $T_{11}、T_{12}、T_2、T_3$ —— 电流测量装置。

图 A.2 典型双调谐(DT)滤波器原理接线方案 2

A.3 三调谐(TT)滤波器

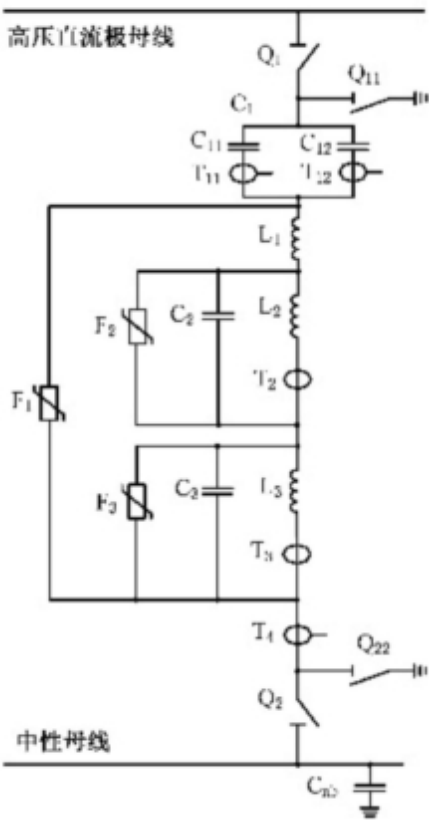
三调谐滤波器有三个串联谐振频率,能同时吸收三种不同频率的谐波,经过等效变换相当于三个单调谐滤波器,减少了滤波器支路数,损耗较小。与三个单调谐滤波器相比,设备承受电压低,绝缘要求相应降低。

三调谐滤波器原理接线方案见图 A.3 和图 A.4。



- 标引序号说明：
- Q_1 、 Q_2 —— 隔离开关；
 - Q_{11} 、 Q_{22} —— 接地开关；
 - C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_{nb} —— 电容器组（其中， C_1 由电容器 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{14} 构成）；
 - L_1 、 L_2 、 L_3 —— 电抗器；
 - F_1 、 F_2 、 F_3 —— 避雷器；
 - T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 —— 电流测量装置。

图 A.3 典型三调谐(TT)滤波器原理接线方案 1



标引序号说明：

Q_1 、 Q_2 —— 隔离开关；

Q_{11} 、 Q_{22} —— 接地开关；

C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_{n2} —— 电容器组（其中， C_1 由电容器 C_{11} 、 C_{12} 构成）；

L_1 、 L_2 、 L_3 —— 电抗器；

F_1 、 F_2 、 F_3 —— 避雷器；

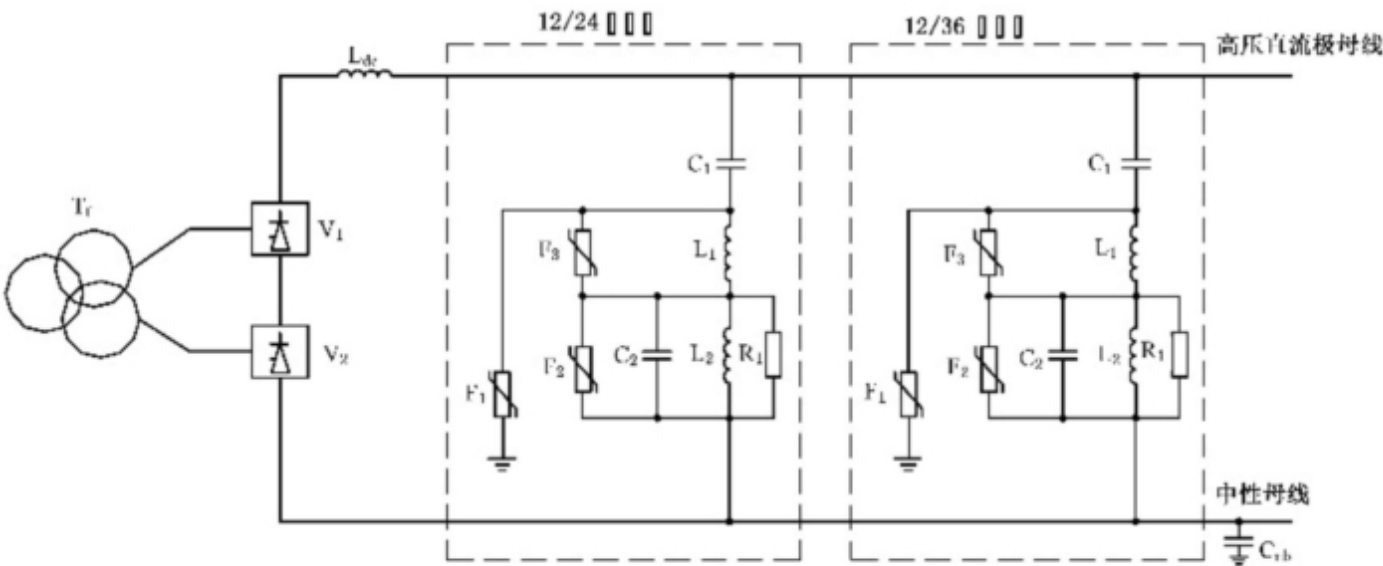
T_{11} 、 T_{12} 、 T_2 、 T_3 、 T_4 —— 电流测量装置。

图 A.4 典型三调谐(TT)滤波器原理接线方案 2

附录 B
(资料性)

直流滤波器在直流系统中的位置

直流滤波器通常安装在高压直流极母线与中性母线之间。图 B.1 给出了典型的直流滤波器接线图。



- 标引序号说明：
- T_r —— 变压器；
 - $V_1、V_2$ —— 换流阀；
 - $C_1、C_2、C_{nb}$ —— 电容器组；
 - $L_1、L_2、L_{dc}$ —— 电抗器；
 - R_1 —— 电阻器；
 - $F_1、F_2、F_3$ —— 避雷器。

图 B.1 直流滤波器接线图

附 录 C
(规范性)
直流滤波器电容器规范

C.1 技术要求

C.1.1 电气要求

C.1.1.1 电容器组的额定电压

电容器组的额定电压应符合 6.1.2 的规定。

C.1.1.2 电容器组的额定电流

电容器组的额定电流应符合 6.1.3 的规定。

C.1.1.3 电容器组的额定容量

电容器组的额定容量应符合 6.1.4 的规定。

C.1.1.4 电容器单元的最高持续直流电压

电容器单元的最高持续直流电压应符合 6.1.5 的规定。

C.1.1.5 电容器单元的额定电压

电容器单元的额定电压应符合 6.1.6 的规定。

C.1.1.6 电容器单元的额定电流

电容器单元的额定电流应符合 6.1.7 的规定。

C.1.1.7 绝缘水平

绝缘水平(包括额定电压、设备最高电压、雷电冲击耐受电压和操作冲击耐受电压)应由具体工程系统研究结果确定。

C.1.1.8 用于噪声计算的电流

用于噪声计算的电流应符合 5.3.2.3 的规定。

C.1.1.9 暂态应力

暂态应力应符合 5.3.3 的规定。

C.1.1.10 过负荷

过负荷应符合 GB/T 20993—2012 中第 8 章的规定。

C.1.1.11 额定电容及其允许误差

额定电容及其允许误差应由具体工程系统研究结果确定。

C.1.1.12 10 min 后剩余电压

电容器退出运行 10 min 后,电容器组剩余电压不应超过额定电压的 10%,电容器单元剩余电压不应高于 50 V。

C.1.2 设计和结构要求

C.1.2.1 通用要求

设计和结构应按照 GB/T 20993—2012 的规定进行设计、选取额定值参数并进行试验。

C.1.2.2 电容器组

电容器组应符合 GB/T 20993—2012 中 6.1 的规定。

C.1.2.3 电容器台架

电容器台架应符合 GB/T 20993—2012 中 6.2 的规定。

C.1.2.4 电容器单元

电容器单元应符合 GB/T 20993—2012 中 6.3 的规定。

C.1.2.5 保护

保护应符合 GB/T 20993—2012 中 6.4 的规定。

C.1.2.6 可听噪声

可听噪声应符合 GB/T 20993—2012 中 6.5 的规定。

C.1.2.7 机械设计

机械设计应符合 GB/T 20993—2012 中 6.6 的规定。

C.1.2.8 绝缘子

绝缘子应符合 GB/T 20993—2012 中 6.7 的规定。

C.1.2.9 端子

端子应符合 GB/T 20993—2012 中 6.8 的规定。

C.1.2.10 爬电距离

爬电距离应符合 GB/T 20993—2012 中 6.9 的规定。

C.1.2.11 无线电干扰(RIV)设计

无线电干扰(RIV)设计应符合 GB/T 20993—2012 中 6.10 的规定。

C.1.2.12 焊接

焊接应符合 GB/T 20993—2012 中 6.11 的规定。

C.1.2.13 表面处理

表面处理应符合 GB/T 20993—2012 中 6.12 的规定。

C.1.3 安全要求

C.1.3.1 放电器件

放电器件应符合 GB/T 20993—2012 中 9.1 的规定。

C.1.3.2 外壳连接

外壳连接应符合 GB/T 20993—2012 中 9.2 的规定。

C.1.3.3 环境保护

环境保护应符合 GB/T 20993—2012 中 9.3 的规定。

C.1.3.4 其他安全要求

其他安全要求应符合 GB/T 20993—2012 中 9.4 的规定。

C.1.4 故障率和可靠性

卖方应保证电容器单元的最大故障率不超过 $0.1\%/a$ 。

卖方应保证电容器可靠性,电容器单元的平均无故障时间(MTBF)不应少于 8.76×10^6 h。

C.1.5 标志

C.1.5.1 电容器组的说明书或铭牌

电容器组的说明书或铭牌应符合 GB/T 20993—2012 中 10.2 的规定。

C.1.5.2 电容器单元的铭牌

电容器单元的铭牌应符合 GB/T 20993—2012 中 10.1 的规定。

C.1.5.3 电容器单元的警告牌

电容器单元警告牌应符合 GB/T 20993—2012 中 10.3 的规定。

C.2 试验

C.2.1 例行试验

高压侧电容器例行试验应符合 8.2.1.1 的规定。

低压侧电容器例行试验应符合 8.2.1.2 的规定。

C.2.2 型式试验

高压侧电容器型式试验应符合 8.3.1.1 的规定。

低压侧电容器型式试验应符合 8.3.1.2 的规定。

C.2.3 现场试验

高压侧电容器现场试验应符合 8.4.1.1 的规定。

低压侧电容器现场试验应符合 8.4.1.2 的规定。

C.2.4 特殊试验

高压侧电容器特殊试验应符合 8.5.1.1 的规定。

低压侧电容器特殊试验应符合 8.5.1.2 的规定。

C.3 直流滤波器电容器组技术参数

直流滤波器电容器组应给出表 C.1 中的技术参数。

表 C.1 直流滤波器电容器组技术参数

序号	技术参数		单位
1	电 容	25 ℃ 介质温度下额定电容 (C_N)	μF
		允许误差	%
		温度从最低到最高时,电容的变化范围	%
2	调谐频率		Hz
3	电 压	电容器组额定电压,稳态(U_{bN})	kV
		最高持续直流电压(U_{DC})	kV
		谐波次数/谐波电压	n/kV
		外部电晕试验电压	kV
4	电 流	额定电流	A
		谐波次数/最大连续电流下的谐波电流	n/A
5	噪 声	谐波次数/用于噪声计算的谐波电流	n/A
		最大噪声水平	dB
6	最小爬电距离	高压端对地	mm
		端子间	mm
		低压端对地	mm
7	操作冲击耐受水平(SIWL)	高压端对地	kV
		端子间	kV
		低压端对地	kV
8	雷电冲击耐受水平(LIWL)	高压端对地	kV
		低压端对地	kV

附 录 D
(规范性)
直流滤波器电抗器规范

D.1 技术要求

D.1.1 电气要求

D.1.1.1 额定电压

额定电压应符合 6.2.2 的规定。

D.1.1.2 热稳定电流

热稳定电流应符合 6.2.3 的规定。

D.1.1.3 确定爬电距离的最高电压

确定爬电距离的最高电压应符合 6.2.4 的规定。

D.1.1.4 冲击电流性能

电抗器应承受技术数据中规定的冲击电流产生的机械应力和热应力。

D.1.1.5 损耗

每一台电抗器的损耗应在 25 ℃ 和额定电感下进行计算。计算应基于技术数据中给出的损耗计算中采用的谐波电流。

D.1.2 设计和结构要求

D.1.2.1 通则

电抗器的设计应便于快速安装和更换。如果需要,可配有调节分接头,便于直流滤波器的初始调谐。

电抗器应在不受损坏和不损失设备寿命的情况下,承受运行中的机械应力。这些应力包括电抗器外部故障时的电磁应力,风、雪和冰荷以及由于环境温度和负荷变化引起的膨胀和收缩产生的应力。

电抗器应具有足够的机械强度,以便在运输、安装和运行中承受规定的机械应力而不损坏或降低使用寿命。

电抗器应具有耐候性。空气冷却、空气绝缘的电抗器应适合户外安装。

卖方应提供绝缘子以及置于坚实的基础上的支撑结构,并采用金属加固。绝缘子和支撑结构应足以提供对电抗器安装基础的必要的防磁间隔,使得相间的相互耦合不会对直流滤波器性能产生不利影响。安装时,应充分注意防止任何磁导材料或导体材料形成的闭合回路因位于电抗器磁场内而发生过热现象。

电抗器绝缘等级不应低于 B 级。必要时,应选用 F 级。

D.1.2.2 绝缘子

电抗器应安装在绝缘子上。绝缘子应按照 GB/T 26218.4—2019 的要求设计。

技术数据中应给出绝缘子的最小公称爬电距离。

D.1.2.3 调谐

如果电抗器有用于直流滤波器调谐的分接头,应在技术数据中说明。卖方可提出其他调整调谐范围的方法,但应得到买方认可。该调谐范围应包括制造误差。

D.1.2.4 端子

与外部连接的端子排应与高压直流设备端子的形状相一致。为降低涡流,端子厚度宜不小于 10 mm。端子机械负荷不应小于:

- 垂直方向:2 000 N;
- 水平纵向:1 000 N;
- 水平横向:500 N。

D.1.2.5 可听噪声

电抗器的设计应尽可能避免在主要的噪声频率上出现机械谐振。

如果技术数据中提供了最大允许声功率水平要求,应提交噪声计算报告。卖方应提供每一种类型电抗器的声功率水平。在技术数据中给出了用于可听噪声计算的谐波电流。计算过程应与高压直流换流站滤波器噪声要求中的一致。还可基于对运行中的类似电抗器的现场测量计算声功率水平。

如果认为计算出的声功率水平危及到整个换流站的噪声水平,可安装降噪装置。

D.1.2.6 电抗器外罩

如果电抗器带外罩,外罩的设计应作为整个电抗器设计的整体的一部分。特别应包括下列设计要求。

- 在所有指定的运行条件和环境温度条件下,保证电抗器的冷却。
- 使用的材料是可自熄灭的。如果达不到要求,至少采用阻燃材料。声音吸收材料尤其如此,使得炭化发展的危险最小。

外罩内部电气连接应可靠,避免造成局部过热。运输前,这些连接应按说明书要求紧固。如果为了运输方便,采用各部件分开运输,应提供详细的安装说明书。

如果外罩或其他附件对杂散磁场的影响达到影响电感和品质因数的程度,应对一台完整安装的电抗器进行所有型式试验和例行试验。

D.1.2.7 地震要求

地震要求应按照实际工程要求确定。

D.1.2.8 温升

温升应符合 GB/T 1094.6—2011 中 9.7 的规定。

D.1.2.9 表面处理

电抗器的外罩和构架应采用防腐材料或涂料,以具有良好的防腐特性。所采用的表面处理标准和工艺经由买方确认。

D.1.2.10 焊接

焊接应光滑,避免虚焊、裂缝及其他任何缺陷。

D.1.3 铭牌

铭牌上的信息应符合 GB/T 1094.6—2011 中对滤波电抗器的要求。

D.1.4 环境

环境条件应符合具体工程主回路装置的通用要求。

D.2 试验

D.2.1 例行试验

电抗器例行试验应符合 8.2.2 的规定。

D.2.2 型式试验

电抗器型式试验应符合 8.3.2 的规定。

D.2.3 现场试验

电抗器现场试验应符合 8.4.2 的规定。

D.2.4 特殊试验

电抗器特殊试验应符合 8.5.2 的规定。

D.3 直流滤波器电抗器技术要求

直流滤波器电抗器技术参数见表 D.1。

表 D.1 直流滤波器电抗器技术参数

序号	技术参数		单位
1	调谐频率		Hz
2	电感	额定电感	mH
		允许偏差	%
3	分接头每档最大调节量		%
4	调谐频率下的品质因数		—
5	电流	额定电流(方和根值),包含谐波	A
		谐波次数/谐波电流(方均根值)	<i>n</i> /A
		30 s 短时电流(方和根值)	A
		30 s 短时电流中的谐波次数/谐波电流(方均根值)	<i>n</i> /A
		10 min 短时电流(方和根值)	A
		10 min 短时电流中的谐波次数/谐波电流(方均根值)	<i>n</i> /A
		30 min 短时电流(方和根值)	A
		30 min 短时电流中的谐波次数/谐波电流(方均根值)	<i>n</i> /A
		额定涌入电流(峰值)	kA

表 D.1 直流滤波器电抗器技术参数（续）

序号	技术参数		单位
5	电 流	额定涌入电流的第一个峰值	kA
		噪声计算用谐波电流,谐波次数/谐波电流(方均根值)	n/A
6	声功率水平		dB
7	最小爬电比距		mm/kV
8	爬电距离计算用电压	高压端对地	kV
		端子间	kV
		低压端对地	kV
9	雷电冲击耐受水平	高压端对地	kV
		端子间	kV
		低压端对地	kV
10	操作冲击耐受水平	高压端对地	kV

附录 E
(规范性)
直流滤波器电阻器规范

E.1 技术要求

E.1.1 电气要求

E.1.1.1 电流额定值

电阻器的电流额定值应符合 6.3.2 的规定。

E.1.1.2 短路电流性能

电阻器在经受规定的暂态及短时电流时,应承受所产生的机械应力及热应力。

E.1.2 设计和结构要求

E.1.2.1 通用要求

电阻器外罩应采用耐腐蚀性好的不锈钢材料。电阻器钢框架应采用热镀锌或至少为镀锌的钢。侧板、顶蓬、百叶窗以及电阻器防护网应采用不锈钢材料,或至少为等效的钢。

卖方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。

电阻器单元应便于现场安装、更换。每台电阻器单元应至少安装两个用于检查和维护、有铰链的观察门。

外壳及内部的金属支架不允许电位悬浮。

对于将中点接到外罩的电阻器,应有便于测量套管与外罩之间的电阻的测量点。

电阻器外壳防护等级应为 IP23 级。

电阻器应承受系统故障下出现的短时扰动电流引起温度和负荷变化对电阻器性能的影响。

电阻器应确保在各种工作电流下电气和机械稳定可靠,运行和安装中承受规定的机械力而不损坏或降低使用寿命。

电阻器箱体内空气温度较高,设计裕度应按 GB/T 311.1—2012 中 3.3 的规定修正,以满足绝缘要求。

E.1.2.2 电阻器单元

根据功率和绝缘水平,电阻器可由几台尺寸相同的电阻器单元组成。每台电阻器单元的冷态电阻可从整台电阻器的电阻得到,且其电阻的公差水平应和整台电阻器电阻的公差水平相同。

电阻器单元两出线端子间的雷电冲击耐受电压可从整台电阻器两端子间雷电冲击耐受电压推算得到。

E.1.2.3 电阻材料

电阻材料应符合如下要求:

- 确保在各种工作电流下电气和机械稳定可靠;
- 抗氧化、耐高温、温度系数低,不因高温而使电阻超差,不被潮气和含有酸碱性质成份的空气腐蚀。

注：电阻材料的规定见 GB/T 30547—2014。

卖方应提供实际电阻材料的比热容。

E.1.2.4 保护

电阻器中的电流超过最大连续电流时,电阻器应受到保护。电阻器中的电流超过短时电流时,电阻器也应受到保护。卖方应提供下列有关电阻器的信息:

——电阻材料的实际质量,单位为千克(kg);

——电阻材料的热时间常数,单位为秒(s);

——电阻元件的总质量,单位为千克(kg);

注:电阻元件的规定见 GB/T 30547—2014。

——电阻元件的热时间常数,单位为秒(s)。

E.1.2.5 支柱绝缘子和套管

支柱绝缘子和套管应符合 GB/T 30547—2014 中 6.5 的规定。

E.1.2.6 端子

端子应符合 GB/T 30547—2014 中 6.6 的规定。

E.1.2.7 表面处理

电阻器的外罩应采用不锈钢材料,钢框架采用热镀锌工艺处理,以具有良好的防腐特性。所采用的表面处理标准和工艺经由买方确认。

E.1.2.8 焊接

焊接应光滑,避免虚焊、裂缝及其他任何缺陷。

E.1.2.9 无线电干扰电压(RIV)

电阻器在耐受规定的爬电距离计算用电压时,不应出现外部电晕,且无线电干扰电压(RIV)不高于 $2\,500\,\mu\text{V}$ 。

E.1.3 铭牌

铭牌应符合 GB/T 30547—2014 中 6.8 的规定。

E.2 试验

E.2.1 出厂试验

电阻器出厂试验应符合 8.2.3 的规定。

E.2.2 型式试验

电阻器型式试验应符合 8.3.3 的规定。

E.2.3 现场试验

电阻器现场试验应符合 8.4.3 的规定。

E.3 直流滤波器电阻器技术参数

直流滤波器电阻器技术参数见表 E.1。

表 E.3 直流滤波器电阻器技术参数

序号	技术参数		单位
1	调谐频率		Hz
2	电阻	标称电阻(环境温度 25 ℃)	Ω
		允许公差 ^a	± %
3	调谐频率时的最大电感		mH
4	电流	电流额定值(方和根值)	A
		包括谐波的最大持续电流(方和根值)	A
		谐波电流频谱 ^b , 稳态(方均根值)	n/A
		暂时谐波电流频谱(方均根值)	n/A
		持续时间	min
5	暂态电流 ^c	幅值	kA
		持续时间	μs
6	能量		kJ
7	爬电距离计算用电压	高压端对地	kV
		端子间	kV
		低压端对地	kV
8	最小爬电比距		mm/kV
9	雷电冲击耐受水平(LIWL)	高压端对地	kV
		端子间	kV
		低压端对地	kV
10	操作冲击耐受水平(SIWL)	高压端对地	kV
		端子间	kV
		低压端对地	kV
11	端子间工频交流电压		kV
^a 规定的公差包括制造公差和随环境温度及工作温度的电阻变化。 ^b 谐波电流用各个谐波电流的次数和方均根值表示。 ^c 电阻器持久地耐受最大持续电流后的暂态电流。			

参 考 文 献

- [1] GB/T 1094.11—2007 电力变压器 第 11 部分:干式变压器
 - [2] GB/T 22389 高压直流换流站无间隙金属氧化物避雷器导则
-