



中华人民共和国国家标准

GB/T 25308—2010

高压直流输电系统直流滤波器

D. C. Filters for HVDC transmission system

2010-11-10 发布

2011-05-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国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 正常和特殊使用条件 2

5 设计 3

6 直流滤波器部件设计要求..... 10

7 试验..... 12

8 结构和导体要求..... 19

9 标志..... 19

附录 A（资料性附录） 高压直流输电系统常用直流滤波器(DCF)结构 20

附录 B（资料性附录） 直流滤波器在直流系统中的位置 22

附录 C（规范性附录） 直流滤波器电容器规范 23

附录 D（规范性附录） 直流滤波器电抗器规范 28

附录 E（规范性附录） 直流滤波器电阻器规范 34

前 言

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国电力电子学标准化技术委员会(SAC/TC 60)归口。

本标准主要起草单位:西安高压电器研究院有限责任公司、南方电网技术研究中心。

本标准参加起草单位:机械工业北京电工技术经济研究所、西安电力机械制造公司、浙江大学、南方电网超高压输电公司、西安西电电力电容器研究所、西安西电电力电容器有限责任公司、西南电力设计院电网分公司、西安西电电力整流器有限责任公司、西安电力电子技术研究所、新东北电气(锦州)电力电容器有限公司。

本标准主要起草人:孙伟、黄莹、李璐、张万荣、蔚红旗、黎小林。

本标准参加起草人:荀锐锋、徐政、逍遥、饶宏、朱静、王蔚华、方晓燕、郭天兴、蔺跃宏、苏开云、李岩、田恩文、杨晓辉、周德才、黄超、李福成、戈兴茹、王国利。

高压直流输电系统直流滤波器

1 范围

本标准规定了高压直流滤波器的术语和定义、设计要求、结构、设备选择、试验要求等内容。

本标准适用于安装在 ± 800 kV 及其以下电压等级高压直流(HVDC)输电系统中的无源直流滤波器。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 311.1—1997 高压输变电设备的绝缘配合(neq IEC 60071-1:1993)

GB 1094.1—1996 电力变压器 第1部分:总则(eqv IEC 60076-1:1993)

GB 1094.2—1996 电力变压器 第2部分:温升(eqv IEC 60076-2:1993)

GB 1094.3—2003 电力变压器 第3部分:绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙(IEC 60076-3:2000,MOD)

GB 1094.11—2007 电力变压器 第11部分:干式变压器(IEC 60076-11:2004,MOD)

GB 1208—2006 电流互感器(IEC 60044-1:2003,MOD)

GB 1985—2004 高压交流隔离开关和接地开关(IEC 62271-102:2002,MOD)

GB/T 10229—1988 电抗器(eqv IEC 60289:1987)

GB/T 11024.1—2001 标称电压1 kV以上交流电力系统用并联电容器 第1部分:总则 性能、试验和定额安全要求 安装和运行导则(eqv IEC 60871-1:1997)

GB/T 13498—2007 高压直流输电术语(IEC 60633:1998,IDT)

GB/T 20993—2007 高压直流输电系统用直流滤波电容器

GB/T 22389—2008 高压直流换流站无间隙金属氧化物避雷器导则

IEC 60815:1986 污秽条件下绝缘子使用导则

3 术语和定义

GB/T 13498 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

直流滤波器 DC filter

直流滤波器通常由电容器、电抗器、电阻器等元件组成。与平波电抗器和中性母线电容器(如有时)配合,用于降低高压直流输电线路上和/或接地极引线上的谐波电流。

3.2

滤波器支路 filter branch

直流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,其中的任一支路称为滤波器支路。

3.3

特征谐波 characteristic harmonic

由谐波源本身的工作特性所决定的某些特定次数的谐波,称为该谐波源的特征谐波。对于脉动数

为 p 的换流器来说,换流器在直流侧产生的特征谐波次数为 $k p$, k 为正整数。

3.4

非特征谐波 non-characteristic harmonic

不同于所属谐波源的特征次数的各次谐波,称为该谐波源的非特征谐波。

3.5

主回路 main circuit

由直流滤波器一次主设备构成的电路。

3.6

辅助回路 auxiliy circuit

用以完成测量、控制、保护等辅助功能的二次电路。

3.7

调谐频率 tuning frequency

使直流滤波器阻抗呈现只有纯电阻时的频率。

4 正常和特殊使用条件

4.1 正常使用条件

4.1.1 温度

当指定周围温度时,通常是指滤波器安装地点的干球空气温度。

安装运行地区的环境温度范围可为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在此温度范围内直流滤波器应能够正常运行。

4.1.2 污秽

应根据直流滤波器安装位置,分别对户内式直流滤波器和户外式直流滤波器分别提出各设备外绝缘的爬电比距要求,对于重污秽地区应适当加大爬电比距。原则上与直流场对设备爬电比距的要求一致。

4.1.3 海拔

安装运行地点的海拔高度为实际换流站的海拔高度。对于大于 $1\,000\text{ m}$ 的使用环境,应考虑海拔修正。

注:用于换流站海拔高度高于 $1\,000\text{ m}$ 地区的直流滤波器,各设备设计要求由用户与制造商协商确定。

4.2 特殊使用条件

4.2.1 高相对湿度

可能需要使用特殊设计的绝缘子。

4.2.2 霉菌生长迅速

金属、陶瓷材料及一些油漆与清漆都不助长霉菌生长。当使用杀菌剂时,其毒性保持时间最多几个月。总之在装置中灰尘等落积处霉菌有可能生长发展。

4.2.3 腐蚀性大气

在工业及沿海地区都会遇到腐蚀性大气。应该注意到,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。甚至在户内也可能存在高腐蚀性大气。

4.2.4 地震地区

有些地区地震的概率较高,这将影响安装在这些地区的直流滤波器单元和(或)直流滤波器的机械设计。用户应说明加速度幅值和阻尼值。

5 设计

5.1 设计内容

直流输电系统在运行过程中,换流器会在直流侧产生谐波电压,谐波电压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讯线路产生干扰。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 是任意正整数。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讯线路产生干扰的程度取决以下这些条件:

- 直流线路沿线谐波电流水平;
- 直流线路与附近通讯系统间的相互耦合程度;
- 通讯设备的抗干扰能力。

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讯线路的干扰,就必须在两侧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进行优化选择,以便能满足下列要求:

- 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以下几项工作内容:

- 直流滤波器支路设置方案的确定及各支路元件参数计算;
- 直流滤波器性能计算,具体计算直流极线及接地极引线沿线上等效干扰电流,使其满足系统的要求;
- 直流滤波器稳态定值计算,即:计算直流滤波器元件稳态应力,具体包括计算流过滤器各元件的电流及元件端点间的电压、端点对地电压,为制定滤波器设备规范提供依据;
- 直流滤波器暂态定值计算,计算在短路故障等最苛刻条件下流过电容器、电抗器、电阻器及避雷器的暂态电流,避雷器能耗等。在计算的基础上确定滤波器设备绝缘水平。

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

5.2 直流滤波器型式与参数确定

直流滤波器的型式最常用的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,一般直流滤波器调谐到 12 次、24 次和 36 次,但如果谐波计算结果显示其他次谐波较高时,需针对该次谐波调整滤波器的调谐点。

双调谐滤波器的元件参数主要由其调谐频率 f_1 、 f_2 、高压电容器 C1 的电容值和滤波器中并联回路谐振频率 f_p 决定。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。

确定直流滤波器元件参数是一个反复的过程,先确定一组滤波器元件参数,然后计算滤波器性能(即等效干扰电流),若性能不满足要求,就重新调整直流滤波器元件参数,进行优化,直到直流滤波器性能满足要求为止。滤波器的滤波效果基本上与高压电容器的电容值成正比,对于同样额定电压的电

器,其成本也基本上与其电容值成正比。在直流滤波器中,高压电容器所占费用最大,因而,在滤波性能满足要求情况下,高压电容器的电容值越小越经济。

5.3 性能和定值

5.3.1 直流滤波器性能

对于直流输电系统来说,直流滤波器的性能指标可用下列任一方式确定:

在假设的平行电话线上计算纵向感应电压。通常假设距直流输电线 1 km 处有一条与直流线路平行的 1 km 长的线路,计算该 1 km 长线路上的纵向感应电压。这一表述已在若干直流输电系统中采用。由于感应电压在实际系统中较难测量,这样会对直流滤波器性能验收造成一定的困难,因而,目前较少使用这种方法;

计算直流线路上最大等效干扰电流。该方法已广泛用于高压直流输电系统直流滤波器设计。

等效干扰电流定义为:线路上所有频率的谐波电流对邻近平行或交叉的通讯线路所产生的综合干扰作用与某个频率的谐波电流所产生的干扰作用相同,这个单频率谐波电流就称作等效干扰电流。计算直流线路中的等效干扰电流时,基波电流与其他谐波电流按同样的方法处理,因此,在以后的叙述中,提到谐波时认为包含基波,把基波看成是特殊的谐波。

计算等效干扰电流时不仅应考虑直接流过直流极导线和接地极线路的谐波电流,而且还应考虑感应到直流线路和接地极线路中的谐波电流。

等效干扰电流包括所有谐波成分,从(1~50)次(即:50 Hz~2 500 Hz)的噪声加权残余电流,按照式(1)进行计算:

$$I_{eq}(x) = \sqrt{I_e(x)_R^2 + I_e(x)_I^2} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- $I_{eq}(x)$ ——沿线路走廊的任何点,噪声加权至 800 Hz 时的等效干扰电流,mA;
- $I_e(x)_R$ ——整流站换流器谐波电压源产生的等效干扰电流均方根值,mA;
- $I_e(x)_I$ ——逆变站换流器谐波电压源产生的等效干扰电流均方根值,mA;
- x ——沿线路走廊的相对位置。

由整流站换流器或逆变站换流器的谐波电压所产生的沿线各点的等效干扰电流可按式(2)计算:

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

式中:

- $I_r(n,x)$ ——在沿线路走廊位置‘x’的 n 次谐波残余电流均方根值,mA;
- $P(n)$ ——n 次谐波的噪声加权系数,见表 2;
- n ——谐波次数;
- H_i ——耦合系数,表示典型明线耦合阻抗对频率的标么化关系,见表 1。

表 1 典型明线网络的耦合系数

频率/Hz	耦合系数(H_i)
40~500	0.70
600	0.80
800	1.00
1 200	1.30
1 800	1.75

表 1 (续)

频率/Hz	耦合系数(H_f)
2 400	2.15
3 000	2.55
3 600	2.88
4 200	2.95
4 800	2.98
5 000	3.00
注：对于其他频率， H_f 的值将采取线性插值方法求取。	

由于受直流线路干扰影响的主要是通讯明线，因而采用 H_f 来代表耦合阻抗与频率的关系。

加权系数是为了考虑人耳和电话设备对频率的敏感性而引入的系数。在国际上不同地区采用不同的加权系数。加权系数有两个定义：

① 1960 年 12 月 12 日发表由 IEEE 定义的，目前在美国和加拿大北美地区广泛使用的 C-MESSAGE 加权系数；

② 1963 年由 CCITT 定义的，在欧洲和其他地方广泛使用的噪声加权系数 P ，见表 2。我国主要采用 CCITT 的噪声加权系数。

表 2 依据 CCITT 的噪声加权系数

频率/Hz	加权系数	频率/Hz	加权系数	频率/Hz	加权系数
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

噪声加权系数(Psophometric weighting factor)频率曲线见图 1。

由换流器的谐波电压在线路沿线任意点产生的 n 次谐波残余电流如式(3)所示：

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

式中：

$I_r(n, x)$ ——在沿线路走廊位置“ x ”处的 n 次谐波残余电流的方均根值, mA；

$I_p(n, i, x)$ ——在位置 x 处流过导体 i 的 n 次谐波电流均方根矢量值, mA；

i ——导体编号；

nc ——在线路走廊中导体总数, 包括直流极线、接地极引线及其各自的架空地线。

计算时考虑以下几种直流系统运行方式：

——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在工程招标文件中给出。

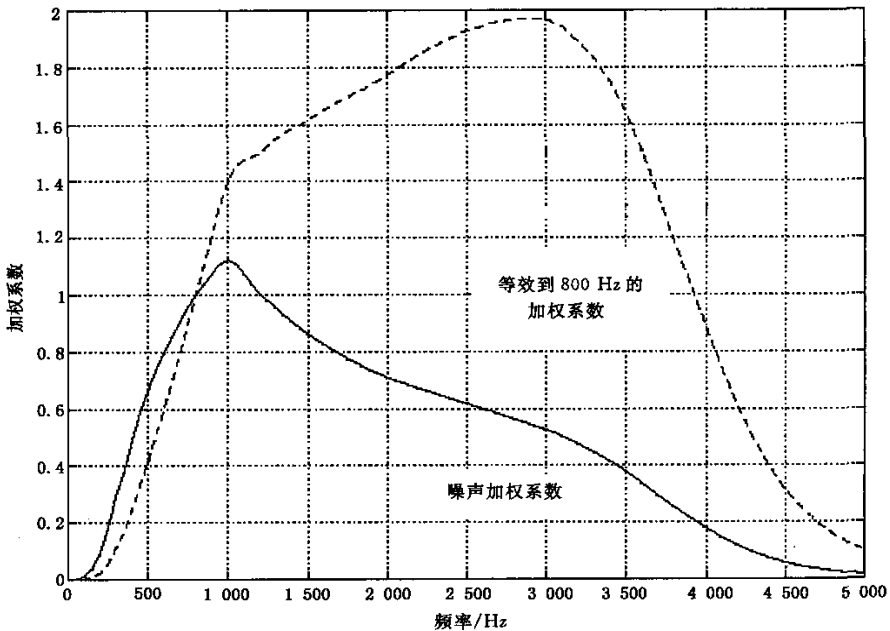


图 1 噪声加权系数频率曲线

5.3.2 直流滤波器稳态计算

稳态定值是指直流滤波器元件、避雷器在稳态及短时运行条件下的应力。这里所说的滤波器元件应力就是指流过滤波器元件的电流、各元件端点间的电压及端点对地电压。稳态定值计算就是求在各种稳态及短时运行工况下有关滤波器元件的电流、电压最大值。计算结果为制定滤波器元件(电容器、电抗器、避雷器)设备规范提供依据。

计算直流滤波器稳态定值时, 应考虑非理想因素的影响, 如直流滤波器各元件、系统负序电压及频率偏差等。

5.3.2.1 电压

5.3.2.1.1 直流滤波器高压电容器端点之间的电压

高压电容器端点之间的电压按式(13)计算,其他元件(低压电容器、电抗器、避雷器)上的峰值电压也按式(13)计算,只是令 $U_{dc}=0$ 。中性母线电容器上的电压可按式(13)计算,但是, U_{dc} 应改为中性母线电压 $U_{dc, neutral}$ 。

5.3.2.1.2 确定爬电距离的电压

决定电容器及电抗器端点之间、其他元件端点之间、端点对地爬电距离的电压计算公式见式(4)、式(5)和式(6):

高压(HV)电容器端点之间:

$$U_{creepage, dc} = \sqrt{U_{dc, max}^2 + \sum_{n=1}^{50} U_n^2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

U_{dcmax} ——最大直流运行电压。

其他元件端点之间:

$$U_{creepage, rms} = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} U_n^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

端点对地:

$$U_{creepage, dc} = \sqrt{U_{dc, neutral}^2 + \sum_{n=1}^{50} U_n^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

计算端点对地电压时,公式(6)中 U_n 为端点对地各次谐波电压。

5.3.2.1.3 避雷器最大持续运行电压(MCOV)

避雷器最大持续运行电压按式(7)计算:

$$MCOV = \sum_{n=1}^{50} U_n \quad \dots\dots\dots (7)$$

5.3.2.2 电流

电容器额定电流按式(8)计算:

$$I_{thc} = \sum_{n=1}^{50} I_n \quad \dots\dots\dots (8)$$

电抗器额定电流按式(9)计算:

$$I_{thl} = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} I_n^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中:

I_n —— n 次谐波电流。

用于噪声计算的电流:

用于计算电容器、电抗器噪声的电流按式(10)计算:

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

式中:

I_n —— n 次谐波电流。

确定直流滤波器稳态应力算例时应考虑以下因素:

- 交流系统稳态频率偏差;
- 不同的直流极线及地极引线长度;
- 标书中规定的线路;
- 线路长度缩短 10%;
- 线路长度加长 10%;
- 不同的直流系统运行模式;
- 额定直流电压,功率正送;
- 降低直流电压,功率正送;
- 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;
- 直流滤波器元件参数偏差;
- 直流滤波器元件参数取额定值;
- 直流滤波器元件参数取最大值;
- 直流滤波器元件参数取最小值。

5.3.3 直流滤波器暂态定值计算

直流滤波器暂态定值计算,就是求在故障情况下,滤波器元件可能受到的最大暂态应力。暂态定值计算包括:计算故障情况下流过滤波器各元件的暂态电流,确定滤波器避雷器参数,确定滤波器元件的保护及绝缘耐受水平。

5.3.3.1 直流滤波器暂态定值计算工况

在确定特高压直流输电系统直流滤波器设备暂态应力时,至少必须考虑三种典型故障类型:直流极线对地短路;直流极线上侵入操作波;直流线路故障后的再启动。

a) 直流极线对地短路

高压电容器被预充电至直流母线避雷器操作冲击保护水平。电容器充电之后,将电容器高压端对地短路,即:滤波器通过一个故障等效电感放电。由于故障点位置不同,该电感的取值也将随之变化。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,可以获得滤波器元件及避雷器的放电电流及吸收能量等。低压电容器预充电对计算结果没有明显影响,因而在计算时低压电容器可不充电。可以对故障等效电感取不同的值,以找出最苛刻情况下滤波器元件及避雷器所承受的应力,取值范围在几个 μH 到几个 mH 之间。

b) 直流极线上侵入操作波

在直流极母线上施加一个 $(250/2\ 500)\mu\text{s}$ 的标准操作波,操作波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重新启动,这样,如果故障点还未消失,再启动的时候,就会使故障重现,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,必须考虑直流线路或直流母线故障后保护重新启动时产生的能量。除首次故障之外,考虑 4 次直流保护的重新启动。计算时,首次故障前直流线路电压假设为直流极线的 SIPL,也就是说

DCF 中高压电容器予充电至 SIPL, 然后对地短路。接着有 4 次重新启动, 在前 3 次重新启动中, 直流线路电压假设为最大直流运行电压, 在第 4 次重新启动中, 直流线路电压假设为降压运行值。

5.3.3.2 避雷器参数的选择

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, 以及低压电抗器两端子之间和高压电抗器两端子之间。如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。

避雷器的选择需考虑以下因素:

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

5.3.3.2.1 计算避雷器最大持续运行电压(MCOV)及参考电压(U_{ref})

避雷器的参考电压不应低于被保护设备应该承受的额定稳态运行电压及短时运行电压。施加于直流滤波器避雷器上的电压包括基波及谐波, 对于避雷器 F1(见 A. 1)来说还包括直流电压。计算避雷器的最大持续运行电压(MCOV), 需考虑最严重的基波和谐波电压组合。用式(11)可求出避雷器的持续运行电压:

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

式中:

- $U_{arr}(t)$ ——避雷器的 MCOV;
- $U_{dc, neutral}$ ——中性母线直流电压;
- n ——谐波次数;
- U_n ——谐波电压;
- ω_0 ——基波角速度;
- t ——时间;
- φ_n ——每次谐波的初相角。

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基波及所有被考虑的谐波, 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), 大小等于施加于避雷器上的直流电压、基波及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。避雷器的最大持续运行电压在前面滤波器稳态应力计算时求出。

对于滤波器避雷器, 最大持续运行电压方均根值(直流、基波和谐波电压的算术和)与参考电压(U_{ref})方均根值之间的关系见式(12):

$$U_{ref} = \frac{MCOV_{rms}}{k_f} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中, 系数 k_f 与主导频率有关, 需要与避雷器厂家协商确定, 一般为 0.6~0.8。

按避雷器的持续运行电压(MCOV)求出的避雷器参考电压(U_{ref}), 还需对避雷器放电电流及吸收能量进行校验。

5.3.3.3 避雷器放电电流和吸收能量

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, 通过计算可以求出避雷器的

放电电流及能量。

确定避雷器参数的步骤是一个反复调整优化的过程。采用不同的避雷器参考电压(U_{ref}),经过多次反复计算,才能最终确定避雷器参数。

5.3.4 绝缘水平

保护水平和耐受水平应通过以下方式确定:

- 按照 5.3.3.1 三种故障工况计算出避雷器的保护水平;
- 在避雷器保护水平上加上绝缘裕度,可确定出最终的滤波器元件耐受水平。

6 直流滤波器部件设计要求

6.1 电容器

设计要求:

直流滤波电容器组的额定值。

6.1.1 额定电压

高压电容器组额定电压见式(13):

$$U_{bN} = k \times U_{dc} + \sqrt{2} \times \sum_{n=1}^{50} U_n \dots\dots\dots (13)$$

式中:

- U_{dc} ——电容器组的最大持续直流电压;
 - U_n ——第 n 次谐波电压(方均根值);
 - k ——直流电压分布不均匀系数,一般取 1.1~1.3。
- 直流滤波器用低压电容器组额定电压的确定见 GB/T 11024.1。

6.1.2 额定电流

额定电流由式(14)给出:

$$I_{bN} = \sum_{n=1}^{50} I_n \dots\dots\dots (14)$$

式中:

I_n ——第 n 次谐波电流(方均根值)。

6.1.3 额定容量

额定容量由式(15)给出:

$$Q_{bN} = \sum_{n=1}^{50} Q_n \dots\dots\dots (15)$$

式中:

Q_n —— n 次谐波产生的容量。

6.1.4 电容器单元的最大持续直流电压(U_d)

电容器单元的最大持续直流电压(U_d)由式(16)给出:

$$U_d = \frac{U_{dc}}{S} \dots\dots\dots (16)$$

式中:

U_{dc} ——电容器组的最大持续直流电压;

S ——电容器组中电容器单元的串联段数。

6.1.5 电容器单元的额定电压(U_N)

电容器单元的额定电压(U_N)由式(17)给出:

$$U_N = \frac{U_{bN}}{S} \dots\dots\dots (17)$$

式中:

U_{bN} ——电容器组的额定电压;

S ——电容器组中电容器单元的串联段数。

6.1.6 电容器单元的额定电流(I_N)

电容器单元的额定电流(I_N)由式(18)给出:

$$I_N = \frac{I_{bN}}{P} \dots\dots\dots (18)$$

式中:

I_{bN} ——电容器组的额定电流;

P ——电容器串联段中电容器单元的并联数。

进一步内容见附录 C。

6.2 电抗器

6.2.1 额定值

滤波器电抗器额定电压为电抗器两端的基波电压(方均根值)和各次谐波电压(方均根值)的算术和。滤波器电抗器的额定电流为基波电流和各次谐波电流的方均根值。

6.2.2 直流滤波器电抗器的一般要求

通常采用低噪音的干式空心电抗器。

用于直流滤波器的电抗器,其结构应根据 GB/T 10229 的规定进行设计,绝缘等级应为 B 级干式。

直流滤波器电抗器在相应的负载条件和相应的环境温度下其热点温升应满足:

——直流滤波器电抗器连续额定负载:热点温升 ≤ 70 K;

——直流滤波器电抗器短时过载:热点温升 ≤ 90 K。

直流滤波器电抗器在连续额定负载下热点温度最高不应超过 110 ℃,短时过负载下热点温度最高不应超过 130 ℃。

电抗器应具有足够的机械强度以便在运行中和安装中能承受规定的机械应力而不损坏或降低使用寿命。

电抗器装有吊孔,便于快速安装和更换。如果需要,可配有载调节抽头,便于滤波器的初始调谐。

空气冷却、空气绝缘的电抗器应适合户外安装,采用的安装方式应使得相间或滤波器臂之间的相互耦合不会对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。

进一步内容见附录 D。

6.3 电阻器

6.3.1 额定值

电阻器的额定电流(方均根值)为基波和各次谐波电流的均方根值。

6.3.2 一般要求

直流滤波器电阻器采用无感设计。

电阻器上配有吊孔便于快速安装和更换,同时提供防鸟害的保护措施。

电阻器的结构具有足够的强度,以便在运行和安装中能承受所规定的机械力而不发生损坏或降低使用寿命。

进一步内容见附录 E。

6.4 避雷器

直流滤波器避雷器宜选用无间隙金属氧化物避雷器。

选择金属氧化物避雷器时,应考虑到避雷器的连接方式、可能出现的过电压倍数等。

金属氧化物避雷器应符合 GB/T 22389 的有关规定。

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有电流互感器。

电流互感器应满足 GB 1208 的要求。

6.6 隔离开关

隔离开关具备开断额定谐波电流的能力。

隔离开关性能应满足 GB 1985 的要求。

6.7 接地开关

直流滤波器高低压侧均应装设接地开关。

接地开关性能应满足 GB 1985 的要求。

7 试验

7.1 试验要求

7.1.1 概述

本节给出了对直流滤波器整体及元件的试验要求。直流滤波器的试验分为构成直流滤波器各元件的试验及直流滤波器的现场试验,其中,元件试验包括:例行试验、型式试验及特殊试验,应符合各自相应的标准。

7.1.2 试验条件

直流滤波器的全部试验和测量,除另有规定者外,均应在下列条件下进行:

环境空气温度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如需校正,则以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时之值为准。

试验时,滤波器的温度应与环境空气温度一致,滤波器在不通电状态下在恒定的环境空气温度中放置适当长的时间后,即认为滤波器的温度与空气温度一致。

试验时的环境空气温度应作记录。

试验和测量所使用的交流电压的频率应为 (50 ± 0.5) Hz,其波形应为总电压畸变率不大于2%的正弦波。

7.2 元件试验

7.2.1 电容器

7.2.1.1 例行试验

7.2.1.1.1 外观检查

GB/T 20993—2007 中的 2.3 适用。

7.2.1.1.2 电容测量

1) 测量程序

GB/T 20993—2007 中的 2.4.1 适用。

2) 电容偏差

GB/T 20993—2007 中的 2.4.2 适用。

7.2.1.1.3 电容器损耗角正切($\tan\delta$)测量

1) 测量程序

GB/T 20993—2007 中的 2.5.1 适用。

2) 损耗要求

GB/T 20993—2007 中的 2.5.2 适用。

7.2.1.1.4 端子间电压试验

GB/T 20993—2007 中的 2.6 适用。

7.2.1.1.5 端子与外壳间交流电压试验

GB/T 20993—2007 中的 2.7 适用。

7.2.1.1.6 内部均压电阻测量

GB/T 20993—2007 中的 2.8 适用。

7.2.1.1.7 密封性试验

GB/T 20993—2007 中的 2.9 适用。

7.2.1.1.8 短路放电试验

GB/T 20993—2007 中的 2.10 适用。

7.2.1.2 型式试验

7.2.1.2.1 热稳定性试验

7.2.1.2.1.1 概述

本试验是用来:

- 确定电容器在过负荷条件下的热稳定性；
- 确定电容器获得损耗测量再现性的条件。

7.2.1.2.1.2 测量程序

GB/T 20993—2007 中的 2.11.2 适用。

7.2.1.2.2 端子与外壳间交流电压试验

GB/T 20993—2007 中的 2.12 适用。

7.2.1.2.3 端子与外壳间雷电冲击电压试验

GB/T 20993—2007 中的 2.13 适用。

7.2.1.2.4 短路放电试验

GB/T 20993—2007 中的 2.14 适用。

7.2.1.2.5 电容随频率和温度的变化曲线测量

GB/T 20993—2007 中的 2.15 适用。

7.2.1.2.6 极性反转试验

GB/T 20993—2007 中的 2.16 适用。

7.2.1.2.7 电容器损耗角正切($\tan\delta$)测量

GB/T 20993—2007 中的 2.17 适用。

7.2.1.2.8 局部放电试验

GB/T 20993—2007 中的 2.18 适用。

7.2.1.2.9 内部熔丝的隔离试验

GB/T 20993—2007 中的 2.19 适用。

7.2.1.2.10 套管及导电杆受力试验

GB/T 20993—2007 中的 2.20 适用。

7.2.2 电抗器

通用试验条件 GB/T 10229—1988 中的 33.1 适用。

试验结果需要温度修正时,参考温度为 6.2.2 中定义的温度值。试验对象为一台完整的电抗器,包括附件。

7.2.2.1 例行试验

7.2.2.1.1 绕组电阻的测量

GB 1094.1—1996 中的 10.2 适用。

7.2.2.1.2 电感测量

GB/T 10229—1988 中的 33.4 适用。

对于设有分接头的电抗器,应在最大、最小和额定电感抽头位置测量电抗器的电感值,其他可调电抗器,在极限调节情况下进行测量。

7.2.2.1.3 感应耐压试验

GB/T 10229—1988 中的 33.5 适用。

7.2.2.1.4 品质因数的测量

GB/T 10229—1988 中的 33.6 适用。

7.2.2.1.5 损耗测量

GB/T 10229—1988 中的 33.7 适用。

7.2.2.2 型式试验

7.2.2.2.1 温升试验

GB/T 10229—1988 中的 33.8 适用。

7.2.2.2.2 雷电冲击试验

GB/T 1094.3—2003 中的第 12 章适用。

本试验仅适用于装有分接头的电抗器、其他可调电抗器及装有或准备装外罩的电抗器。

对于装有分接头的电抗器,在最大及最小电感抽头位置进行试验,其他可调电抗器,则在最大及最小极限调节值下进行试验。

7.2.3 电阻器

7.2.3.1 例行试验

7.2.3.1.1 电阻值的测量

环境温度下,在直流及工频下分别测量电阻值,可忽略负载。测量结果加上温升引起的电阻变化,电阻值还应确保在规定的误差范围之内。

7.2.3.1.2 工频耐压试验

在电阻网与外罩之间施加 1 min 工频耐受电压。试验时电阻网与外罩壳之间的连接应断开。

如果对电阻组件进行试验,试验电压应按式(19)和式(20)确定:

$$U_{\text{test}} = \frac{U}{2 \times n} \times k \text{ (电阻器中点与外罩壳连接)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$U_{\text{test}} = \frac{U}{n} \times k \text{ (电阻器中点不与外罩壳连接)} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中:

U —— 整个电阻的工频耐压;

n —— 整个电阻中串联的组件数;

k —— 考虑组件之间电压非线性分配系数。

7.2.3.2 型式试验

7.2.3.2.1 电感值测量

在滤波器支路额定调谐频率下测量电阻器的电感值,电感值应在规定的范围之内。

7.2.3.2.2 电阻值测量

- a) 冷态电阻值。在直流、工频及额定谐波频率下分别测量电阻值,温度校正之后,其值在工程技术数据规定的误差范围之内。温升试验前、后,分别在环境温度下测量电阻值,电阻值的变化不允许超过±2%。
- b) 热态电阻值。标称电流下的电阻值应在工程技术数据规定的误差范围之内,最大持续电流下的电阻值应在技术数据规定的误差范围之内。

通过测量电阻器两端电压及流过电阻器的电流可以计算出电阻值。

7.2.3.2.3 温升试验

在额定频率下,对于电阻值变化小于±1%的电阻器,试验电流按工程技术数据中的数值。

在额定频率下,对于电阻值变化大于±1%的电阻器,试验电流应按下列规定确定。

——标称和最大连续电流;

试验应在标称电流及最大连续电流下完成。

——短时电流。

短时电流线性升降时,校验电阻器的定值。校验可通过试验,或试验所得的时间常数通过计算进行。时间常数可以通过施加适当的过负荷电流测量得到。

等效的试验电流按式(21)计算得到:

$$I_t^2 R_t = I_F^2 \times R_F + \sum_{n=2}^{50} I_{Hn}^2 \times R_{Hn} \dots\dots\dots (21)$$

式中:

- I_t ——等效试验电流(50 Hz);
- R_t ——在试验电流频率下的电阻值;
- R_F ——在基波频率下的电阻值;
- I_F ——最大连续基波电流;
- I_{Hn} ——最大连续 n 次谐波电流;
- R_{Hn} ——在 n 次谐波下的电阻值。

在常温及与安装环境相类似的条件下完成试验。试验持续时间为在温度达到稳态值情况下再加 0.5 h,但持续时间最短不小于 1 h。

温度测量点(但不限于这些)包括:

- 实际电阻元件;
- 内部绝缘子;
- 套管;
- 电阻网的金属支撑材料;
- 顶棚;
- 排气网;
- 排出空气;
- 环境温度。

稳定状态规定为 5 倍时间常数后的状态,测量点由用户与制造商双方协商决定。电阻元件的平均温升由热运行试验的实测数据计算得到。平均温度的计算方法提交给用户,并得到认可。

最高温度不能超过工程技术数据的规定值。在试验结束时测量温度,并且校正到 20 ℃。

7.2.3.2.4 雷电冲击耐压试验

下列雷电冲击波加到电阻器的高压端子上,低压端子接地。

——半电压,正、负极性各 1 次;

——全电压,正、负极性各 15 次。

波形采用标准雷电冲击波,即 $(1.2/50)\mu\text{s}$ 。如果由于电阻值小,无法得到适合的波形,优先保证波前时间,但波尾时间不能短于 5 μs 。对电阻模块进行试验,试验电压规定见式(22):

$$U_{\text{test}} = \frac{U}{n} \times k \dots\dots\dots (22)$$

式中:

U ——整个电阻的雷电冲击电压;

n ——整个电阻中串联的组件数;

k ——考虑组件之间电压非线性分配系数。

7.3 直流滤波器现场试验

7.3.1 电容器试验

直流滤波器用电容器应进行下列各项试验。

7.3.1.1 外观检查

GB/T 20993—2007 中的 2.3 适用。

7.3.1.2 绝缘电阻测量

GB/T 20993—2007 中的 2.22 适用。

7.3.1.3 电容测量

GB/T 20993—2007 中的 2.23 适用。

7.3.1.4 耐压试验

GB/T 20993—2007 中的 2.24 适用。

7.3.1.5 电容器损耗角正切($\tan\delta$)测量

GB/T 20993—2007 中的 2.25 适用。

7.3.1.6 耐压后复测电容值

GB/T 20993—2007 中的 2.26 适用。

7.3.2 电抗器试验

直流滤波器的电抗器应进行下列各项试验。

7.3.2.1 绕组直流电阻测量

实测直流电阻值与同温下出厂试验值相比,应无明显差别。

7.3.2.2 电感测量

实测电感值与出厂试验值相比,应无明显差别。

7.3.2.3 支柱绝缘子绝缘电阻测量

应用 2 500 V 兆欧表测量支柱绝缘子的绝缘电阻,绝缘电阻值不应低于 500 M Ω 。

7.3.3 电阻器试验

直流滤波器的电阻器应进行下列各项试验。

7.3.3.1 直流电阻测量

实测直流电阻值与同温下出厂试验值相比,应无明显差别。

7.3.3.2 绝缘电阻测量

实测绝缘电阻值与出厂试验值相比,应无明显差别。

7.3.4 滤波器调谐试验

对于品质因数等于或大于 10 的滤波器来说,安装完毕之后都需要进行滤波器的冷态调谐,换流站直流滤波器也不例外。通过调整滤波器元件参数,补偿元件制造公差及温度引起的元件值偏差,从而确保滤波器在整个运行温度范围之内都处于较理想的调谐状态,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,调整电感值,实现滤波器的调谐。各别情况下,通过调配电容器组中的各台电容器,改变电容器组总的电容值,实现滤波器的调谐。

7.3.4.1 调谐方法

可采用两种不同的方法实现对滤波器的调谐,分别为相角测量法和阻抗幅值测量法。相角测量法较为常用,若不特别说明,以后所说的测量方法均指相角测量法。

7.3.4.1.1 相角法

测量滤波器回路阻抗相角,当相角等于零时,滤波器就处于最佳调谐状态。

7.3.4.1.2 阻抗幅值法

测量滤波器回路阻抗幅值,当阻抗幅值达到最小(串联回路)或达到最大(并联回路)时,滤波器就处于最佳调谐状态。

电容器的电容值随温度的变化而变化,因此,在滤波器调试时,要补偿环境温度变化引起的电容值变化,这可借助于调谐图来实现。调谐图显示出了一个滤波器的调谐频率随环温变化而变化的关系。调谐图可以在滤波器开始调试之前绘出来。

在更换滤波器电抗器或大部分电容器后,应重新对滤波器支路进行调谐。

测量滤波器的调谐频率,应符合设计的要求。

7.3.5 滤波器通电试验

测量直流滤波器总电流、分支电流和不平衡电流,并与设计值相比较。

8 结构和导体要求

8.1 防腐蚀层

直流滤波器各分设备及其构架的金属外露表面应有可靠的防腐蚀层。

8.2 母线和连接线

8.2.1 主回路母线和连接线

主回路母线的长期允许电流应不小于 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应不小于 1.5 倍单台电容器额定电流；其余连接线按相应电路的额定工作电流或机械强度来选择；

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；

母线及连接线的材料、连接和布置方式应能满足直流滤波器在正常运行及事故情况下的机械强度要求；

母线支持绝缘子的机械强度、爬电距离应能满足相应的使用条件要求。

8.2.2 辅助电路连接线

连接线的截面应符合有关标准规定；

连接线的连接应牢固，不应自由晃动，布线应整齐、美观；

连接线的额定电压不得低于相应电路的额定工作电压。

8.3 电气间隙和爬电距离

直流滤波器内的各种电器设备的电气间隙和爬电距离应符合有关标准的规定。

9 标志

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

附录 A

(资料性附录)

高压直流输电系统常用直流滤波器(DCF)结构

A.1 双调谐滤波器(DT)

A.1.1 双调谐滤波器(DT)原理接线示意图

见图 A.1 和图 A.2。

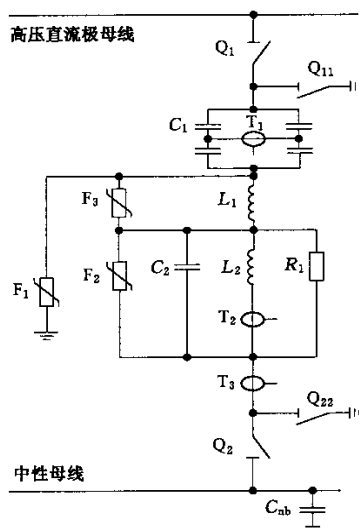


图 A.1 双调谐滤波器(DT)原理接线示意图(方案 1)

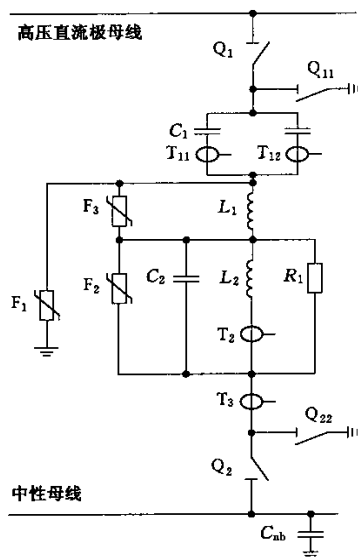


图 A.2 双调谐滤波器(DT)原理接线示意图(方案 2)

A.2 三调谐滤波器(TT)

高压直流输电系统三调谐滤波器有 3 个串联谐振频率,可以同时吸收三种不同频率的谐波,经过等效变换相当于 3 个单调谐滤波器,减少了滤波器支路数,基波损耗较小,与 3 个单调谐相比,电路元件承受电压小,绝缘水平相应降低,具有显著的优势,而且投资少,经济性好,因此有广阔的发展前景,日益受到关注。

三调谐滤波器(TT)原理接线示意图见图 A.3 和图 A.4。

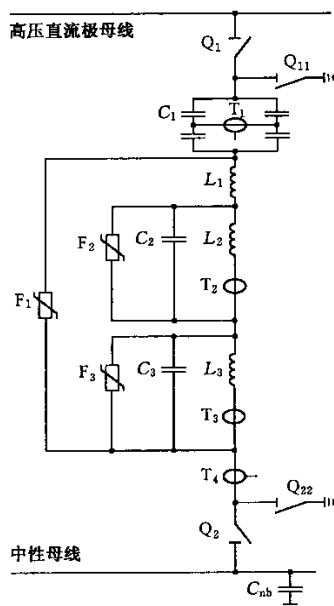


图 A.3 三调谐滤波器(TT)原理接线示意图(方案 3)

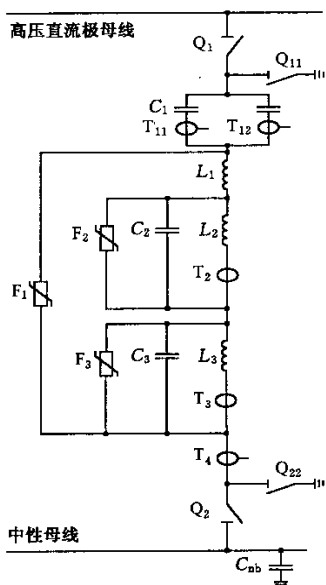


图 A.4 三调谐滤波器(TT)原理接线示意图(方案 4)

附录 B
(资料性附录)

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配置方案。

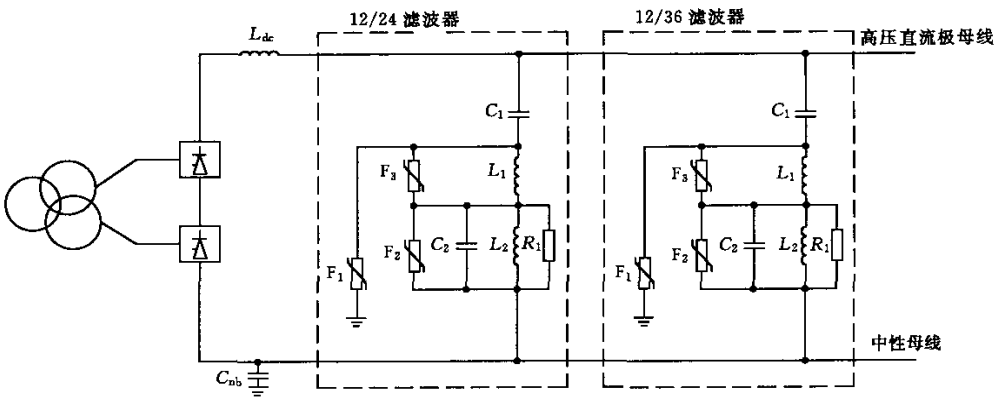


图 B.1 直流滤波器接线图

附录 C
(规范性附录)
直流滤波器电容器规范

C.1 电气要求

C.1.1 额定电压

按 6.1.1 的规定。

C.1.2 绝缘水平

直流滤波电容器的绝缘水平见表 C.1。

表 C.1 直流滤波电容器的绝缘水平

额定电压/kV	设备最高电压/kV	雷电冲击 耐受电压/kV	操作冲击 耐受电压/kV	雷电冲击截波 耐受电压/kV
由具体工程确定				

中性母线电容器绝缘水平由具体工程计算确定。

C.1.3 额定电流

按 6.1.2 的规定。

C.1.4 用于噪声计算的电流

按 5.3.2.2 的规定。

C.1.5 暂态应力

按 5.3.3 的规定。

C.1.6 过负荷

GB/T 20993—2007 中的第 5 章适用。

C.1.7 额定电容

直流滤波电容器和中性母线电容器的额定电容由具体工程计算确定。

C.1.8 电容偏差

高压电容器 C_1 、低压电容器 C_2/C_3 、中性母线电容器的偏差不大于工程文件规定值。

C.1.9 5 min 后剩余电压

要求 5 min 后 $C_1/C_2/C_3$ 剩余电压不大于工程文件规定值。

C.2 设计和结构要求

电容器按 GB/T 11024.1 的规定进行设计、选取额定值参数并进行试验。

C.2.1 电容器组

GB/T 20993—2007 中的 3.1 适用。

C.2.2 电容器台架

GB/T 20993—2007 中的 3.2 适用。

C.2.3 电容器单元

GB/T 20993—2007 中的 3.3 适用。

C.2.4 保护

GB/T 20993—2007 中的 3.4 适用。

C.2.5 噪声

GB/T 20993—2007 中的 3.5 适用。

C.2.6 机械设计

GB/T 20993—2007 中的 3.6 适用。

C.2.7 绝缘子

GB/T 20993—2007 中的 3.7 适用。

C.2.8 端子

GB/T 20993—2007 中的 3.8 适用。

C.2.9 爬电距离

GB/T 20993—2007 中的 3.9 适用。

C.2.10 无线电干扰(RIV)设计

GB/T 20993—2007 中的 3.10 适用。

C.2.11 焊接

GB/T 20993—2007 中的 3.11 适用。

C.2.12 表面处理

GB/T 20993—2007 中的 3.12 适用。

C.3 安全要求

C.3.1 放电器件

GB/T 20993—2007 中的 6.1 适用。

C.3.2 外壳连接

GB/T 20993—2007 中的 6.2 适用。

C.3.3 环境保护

GB/T 20993—2007 中的 6.3 适用。

C.3.4 其他安全要求

GB/T 20993—2007 中的 6.4 适用。

C.4 标志

C.4.1 电容器单元铭牌

GB/T 20993—2007 中的 7.1 适用。

C.4.2 电容器组铭牌

GB/T 20993—2007 中的 8.1 适用。

C.4.3 警告牌

GB/T 20993—2007 中的 7.2 和 8.2 适用。

C.5 故障率和损耗

保证电容器单元的最大故障率为 0.1%/年,损耗角正切 $\tan\delta$ 由双方协商确定。

C.6 可靠性

电容器单元的 MTBF(Mean Time Between Failure); 8.16×10^6 h。

C.7 试验

C.7.1 试验要求

C.7.1.1 概述

本章给出了对电容器单元的例行试验、型式试验和现场试验要求及对电容器组的特殊试验要求。

C.7.1.2 试验条件

除对特殊的试验或测量另有规定外,电容器介质的温度应在 $+5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。

当必须进行校正时,使用的参考温度为+20℃,但制造商和用户之间另有协议时除外。

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,则可认为电容器的介质温度与环境温度相同。

如果安装在高于1 000 m处,其外绝缘试验电压按GB 311.1进行校正。

C.7.1.3 试验总则

耐压试验中任何一个元件损坏,都将视为整台电容器未通过试验;在其他试验中,如果任何一项参数不满足设计要求,都将视为整台电容器未通过该试验。

C.7.2 试验分类

试验分为:例行试验、型式试验、现场试验和特殊试验。

C.7.2.1 例行试验

按7.2.1.1的规定。

C.7.2.2 型式试验

按7.2.1.2的规定。

C.7.2.3 特殊试验

C.7.2.3.1 最高内部热点温度试验

GB/T 20993—2007中的2.27适用。

C.7.2.3.2 抗震试验

GB/T 20993—2007中的2.28适用。

C.7.2.4 现场试验

现场试验主要是用户在安装前所需进行的试验,此项试验的目的是检验电容器在运输中是否有受到损伤,以确保要安装的电容器是良好的。

按7.3.1的规定。

C.7.2.5 特殊试验

除完成上述相应试验外,按用户与制造商双方协议进行以下校核:

C.7.2.5.1 外部电晕

应对是否满足无外部电晕的技术要求予以校核。

如无其他判据时,测到的无线电干扰电压(RIV)不高于 $2\,500\,\mu\text{V}$ 可认为满足要求。取高压端子与地间的最大持续电压 U_{a} 乘以 $1.1/\sqrt{2}$ 倍的工频交流电压为试验电压。

而端子间的外部连接方式选自制造商提出的方案。

C.7.2.5.2 噪音干扰

噪音干扰应满足设计要求。

如进行现场噪音干扰试验,可用噪声频谱分析仪进行测量,读取各点噪音干扰测值中的最高值。也

可提出电容器组的噪音水平的计算报告及按已运行的相似电容器组的现场实测结果的对比分析报告。

C.8 直流滤波器电容器技术参数

直流滤波器电容器技术参数见表 C.2。

表 C.2 直流滤波器电容器技术参数

电容器技术要求	单 位
25 ℃ 介质温度下额定电容值(C_N)	μF
制造误差	%
温度从最低到最高电容值变化范围	%
额定谐波频率	Hz
电压:	
电容器组额定电压,持续(U_{Nb})	kV
最大持续直流电压(U_{dc})	kV
主要谐波	n/kV
最小爬距:	
端子之间	mm
高压端对地	mm
低压端对地	mm
外部电晕试验电压	kV
电流:	
额定电流	A
最大连续电流下的主要谐波	n/A
噪声要求:	
用于噪声计算的主要谐波电流	n/A
最大噪声水平	dB
绝缘水平:	kV
操作冲击耐受水平(SIWL):	kV
高压端对地	kV
两端之间	kV
低压端对地	kV
雷电冲击耐受水平(LIWL):	kV
高压端对地	kV
低压端对地	kV

附 录 D
(规范性附录)
直流滤波器电抗器规范

D.1 设计

电抗器采用户外、单相、干式空芯设计,采用耐风雨的人造树脂和纤维玻璃进行包装。

电抗器的设计应当使得允许快速安装和更换时能便利升降。电抗器应能在不受损坏和损失设备寿命的情况下承受运行中的机械应力。这些负荷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。

制造商应当提供绝缘子和置于坚实的基础上的支撑结构,采用金属加固,但不能构成电气的闭环。

绝缘子和支撑构件应足够高以提供对安装电抗器的基础的必要的磁间隔。

制造商应当提供关于对附近物件的必要的磁间隔的材料。

D.1.1 电抗器应力

对于电抗器来说,起决定性作用的参数是:热稳定电流和确定爬距的最大电压。计算公式如下:

电抗器热稳定电流见式(D.1):

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} I_n^2} \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

式中:

I_n ——通过电抗器的第 n 次谐波电流。

额定电压见式(D.2):

$$U_{\text{rated}} = \sum_{n=1}^{50} U_n \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

式中:

U_n ——第 n 次谐波电压。

确定爬距的最大电压见式(D.3):

$$U_{\text{creep}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} U_n^2} \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

U_n ——第 n 次谐波电压。

D.1.2 绝缘子

电抗器应当安装在绝缘子上。绝缘子应为棕色,釉面瓷。绝缘子应按照 IEC 60815 进行设计。

绝缘子应按低压电抗器的额定连续运行电压进行设计和型式试验。

在所附的技术数据中应给出绝缘子的最小公称爬电距离。

D.1.3 调谐

在所附的技术数据中说明了用于滤波器调谐的电抗器分接头。制造商仍可提出其他得到规定的调谐范围的方法。该调谐范围应当考虑制造误差。

D.1.4 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,端子厚度应降至 10 mm 或 3/8 in。端子机械负荷应不小于:

沿轴线方向:2 000 N;

沿径向:1 000 N;

沿侧面:500 N。

D.1.5 可听噪声

电抗器设计应尽可能避免在主要的声音频带上可能出现的机械谐振。

如果在所附技术数据中提供了最大允许的声音功率水平要求,应当按如下提交所完成的计算:

制造商应当向用户提供每一种电抗器类型的声音功率水平。在所附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音功率水平。

如果认为计算出的声音功率水平危及到整个换流站的噪声水平,用户可以要求安装噪声削减设备,减少一定的噪声,或者在以后的阶段再提供这种设备。在这种情况下,可能采用一种有效的噪音拟制技术,如:采用有顶盖及底的外罩,在绕组中设有吸音器。供货商还可以提出其他方法或其他方法的组合,以消减噪声。

D.1.6 电抗器外罩

如果电抗器带外罩或准备了外罩,外罩的设计应作为整个电抗器设计的整体的一部分。特别应考虑下列设计要求:

——在所有指定的运行条件和环境温度条件下,应当保证电抗器的冷却;

——所使用的材料最好是可以自熄灭的,如达不到的话,至少采用阻燃材料。对于声音吸收材料尤其如此,以使得炭化发展的危险最小。

外罩内部电气连接的设计中应特别注意,比如,在现场安装后,需用红外线相机测温的连接处。

在运输前,这些连接应按说明书要求紧固,或者,为了运输方便,而采用各部件分开运输,应当提供详细的安装指南。

D.2.2.2 中的一些型式试验,应当在完整组装的带外罩和其他安装了噪声削减设备及其附件的电抗器上进行。

对于以后再提供外罩的情况,要求提供一份基于相同电抗器的试验和考虑了附加安装设备影响的足够安全裕度的认证报告。

另一种更进一步的办法是在试验中采用一个简化的带假外罩和其他噪声削减设备的试验物。这种认证报告或临时办法,一经批准,将作为和现场组装的电抗器一样的完整试验接受。

如果外罩或其他附件,对杂散磁场的影响到了使得其对电感和品质因数有影响的程度,应对一个完整安装的电抗器进行所有型式和例行试验。在这些试验的基础上,决定其他元件的例行试验中的修正参数。

D.1.7 地震要求

地震要求按实际工程要求确定。

D.1.8 冲击电流性能

电抗器应能承受所附技术数据中规定的冲击电流产生的机械和热应力。

D.1.9 温升

热点和温升的最大值在 D.2.2.2.3 中定义。

D.1.10 损耗

每一电抗器的损耗应在参考温度和额定电感值下进行计算。计算应基于测量结果。技术数据中给出了损耗计算中采用的谐波电流。

D.1.11 表面处理

表面处理要求应与高压直流系统设备的通用表面处理要求相符合。主回路装置的通用要求中给出了环境条件和其他工程特定要求。所有外表面应漆成淡灰色。

D.1.12 焊接

焊接应符合高压直流系统设备的焊接要求。

D.1.13 铭牌

铭牌上的信息应依照 GB/T 10229 中对滤波器电抗器和阻尼电抗器的要求。除此之外,应给出滤波器电抗器的绝缘热等级。

D.1.14 环境

电抗器安装在直流场户外。环境条件见具体工程主回路装置的通用要求。

D.1.15 冷却

电抗器采用空气的自然对流方式冷却。

D.2 试验

D.2.1 试验要求

在无特殊说明时,试验在厂方进行或在实验室里进行。试验中凡能够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。除绝缘耐受试验以外的所有特性试验,均以额定条件为基础。

试验顺序为直流电阻,电感,损耗测量,绝缘耐受试验,直流电阻(重复),电感(重复),损耗测量(重复)。

型式试验,除非经过用户和制造商协议,否则将在多个电抗器中逐个进行。

特殊试验按照用户的要求,对一个或整数倍的电抗器进行。

温升试验的温升限值在超过工作高度 1 000 m 时每 500 m 减少 2.5%(除非在制造商和用户有其他协议)。如果制造商能证明温升试验材料和一个相同的应用单元一样,温升试验可以不做。

D.2.2 试验项目

- 例行试验;
- 型式试验;
- 特殊试验;
- 现场试验。

D.2.2.1 例行试验

通用试验条件按 GB/T 10229—1988 中 33.1 的规定。

D.2.2.1.1 绕组电阻的测量

按 7.2.2.1.1 的规定。

D.2.2.1.2 电感测量

按 7.2.2.1.2 的规定。

D.2.2.1.3 感应耐压试验

按 7.2.2.1.3 的规定。

D.2.2.1.4 品质因数的测量

按 7.2.2.1.4 的规定。

D.2.2.1.5 损耗测量

按 7.2.2.1.5 的规定。

D.2.2.2 型式试验

应向用户提交对类似器件以前进行的型式试验的试验认可报告,以及供货商的关于设计中的异同的详细资料以便得到用户的批准。该技术报告,一经批准,将被接受,从而代替进行新的型式试验。这些型式试验报告和技术报告应在检查和试验计划中提到。

通用试验条件按 GB/T 10229—1988 中 33.1 的规定。

D.2.2.2.1 电感和电阻值随频率变化的测量

应在额定电感和便利的环境温度下测量滤波器电抗器随频率变化的电感和电阻值。对电感值,频率变化范围为 50 Hz~3 000 Hz;对电阻值,频率为 3 000 Hz。测量值应校正至最大运行温度,并用于等值试验电流的计算。

D.2.2.2.2 电感测量

按 7.2.2.1.2 的规定。

D.2.2.2.3 温升试验

按 7.2.2.2.1 的规定。

如果电抗器带外罩或准备了外罩或其他噪声削减设备,应对整个电抗器,包括装在其上的外罩、其他噪声削减设备和附件一起进行试验。

在用户同意的基础上,对以后再安装外罩的电抗器,可采用认证报告中推导出的安全系数的形式,或通过采用一个仿制的外罩和其他噪声削减设备,把额外安装上的设备的影响在试验中考虑进去。

等效试验电流按照式(D.4)计算:

$$I_t^2 R_t = \sum_{n=2}^m I_{Hn}^2 \times R_{Hn} \quad \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

I_t ——等效试验电流;

I_{Hn} ——额定连续 n 次谐波电流;

R_t ——修正到最大运行温度,试验电流频率下的绕组电阻;

R_{Hn} ——修正到最大运行温度, n 次谐波频率下的绕组电阻;

m ——最高谐波次数。

对绕组的温升没有直接影响的损耗不应包括进去。

应在便利的环境温度下进行试验。所加试验电流的时间应为使得温度达到稳态情况的时间再加上 0.5 h,但不得少于 1 h。

应在最后阶段测量温度,并修正到最大环境温度。

试验电流一切断,按 GB 1094.2—1996 中 5.5 的规定,立即进行冷却期间的电阻测量,以决定绕组的平均温升。对例行试验,D.2.2.1 中采用的每一种类型的电抗器,平均温升加上 25 °C 就是其参考温度。

在试验的基础上,并且按照主回路装置的通用规定,以最大干球温度为环境温度,对下列情况的温度限制进行校验:

a) 在稳态环境温度条件下,如技术数据中所附,包括谐波的额定连续电流。

对 B 级和 F 级绝缘来说,可接受的最高热点温度分别是 110 °C 和 130 °C,平均温升分别不超过 70 °C 和 85 °C。

b) 施加如技术数据中所规定的包括谐波在内的额定连续电流,直到达到稳态温度,接着施加包括谐波在内的额定短时 30 min 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 °C 和 155 °C,这是 GB 1094.11 的正常绝缘系统温度。对 B 级和 F 级绝缘,平均温升分别不超过 90 °C 和 105 °C。

c) 施加如技术数据中所规定的包括谐波在内的额定连续电流,直到达到稳态温度,接着施加包括谐波在内的额定短时 10 min 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 °C 和 155 °C,这是 GB 1094.11 的正常绝缘系统温度。对 B 级和 F 级绝缘,平均温升分别不超过 90 °C 和 105 °C。

D.2.2.2.4 雷电冲击试验

按 7.2.2.2.2 的规定。

仅对带分接头的电抗器,其他类型的可调谐电抗器和带外罩或准备了外罩的电抗器进行该试验。

应在最大、最小电抗器电感抽头和其他可调电抗器的最大、最小极限调节值下进行试验。

如果电抗器带外罩或准备了外罩或其他噪声削减设备,应对整个电抗器,包括装在其上的外罩、其他噪声削减设备和附件一起进行试验。

在用户批准的基础上,对以后再安装外罩的电抗器,可采用认证报告中推导出的安全系数的形式,或通过采用一个仿制的外罩和其他噪声削减设备,把额外安装上的设备的影响在试验中考虑进去。

把低压端接地,在高压端分别施加正极性和负极性电压进行试验。

波形应为标准雷击脉冲(1.2/50)μs。对于低电感电抗器,可能难以得到标准波形。在这种情况下,经用户同意,可以采用更大的公差。此时,应优先考虑适当的波头时间。

D.2.2.3 特殊试验

如用户有要求,协商试验内容和方法。

D.2.2.4 现场试验

现场试验包括:

- 外观检查；
- 绕组电阻测量；
- 绕组电感测量；
- 主要谐波频率下的品质因数 Q 。

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

电抗器技术要求	单 位
额定调谐频率	Hz
调谐频率下的额定电感	mH
电抗容差	%
调节范围：	
不包括制造容差的最小范围偏差	%
抽头每档最大调节量	%
额定调谐频率下的品质因数	
额定电流	A
额定连续运行电流(方均根值)，包含谐波。	A
主要谐波电流(方均根值)	n/A
30 s 短时电流	A
主要谐波	n/A
额定涌流电流	kA
第一个峰值	kA
谐振频率	Hz
时间常数	ms
用于爬距计算的额定连续运行电压	kV
高压端子对地(方均根值)	kV
跨电抗器(方均根值)	kV
低压端子对地(方均根值)	kV
最小爬距	mm/kV
雷电冲击耐受水平：	kV
高压端子对地	kV
跨电抗器	kV
低压端子对地	kV
操作冲击耐受水平：	kV
高压端子对地	kV

附录 E
(规范性附录)
直流滤波器电阻器规范

E.1 技术要求

E.1.1 机械设计

电阻器外罩应采用抗腐蚀材料。电阻器钢框架至少应为镀锌的钢。侧面、顶蓬、防鸟保护的盖板以及电阻器排气网应采用不锈钢,至少应为等效的钢。

对于立方体模块电阻器,每个电阻器的两个相对的面板应装有活叶,以便于快速查看模块内部。

对于管状型设计的电阻器,应采取预先措施,以便于快速查看。

电阻器和/或电阻器模块应配备起吊眼,以便于快速安装及替换。

电阻器应安装在支架上,支架不是供货的一部分。固定支架的绝缘子及连接板应在供货范围之内。

电阻器模块内部的实际电阻器金属支架不允许电位悬浮。

电阻器为单相,忽略电感。

如果可能,电阻值应在 50 Hz~3 000 Hz 频率范围内不受频率影响。如果不可能,电阻值应在额定频率下是有效的。标称电阻值定义为在标称电流及环境温度为 25 ℃ 下的电阻值。

电阻器的电阻值误差应包括:制造公差及从最低环温下的最小电阻电流到最高环温下的最大电流范围内的温度变化。

电阻器的标称电阻值的偏差定义为标称电流及环温为 25 ℃ 下的值。

对于中点与外罩相连的电阻器,应采取预先措施,以便于测量套管与外罩之间的电阻值。对于管状设计的电阻器及串联的电阻器段,应采取预先措施以便于测量每一段的电阻值。

E.1.2 电阻模块

如果电阻器为模块设计,每个模块的电阻值应从整个电阻器的阻值推导出来。

供货商给出的误差水平对于模块的阻值是有效的。

电阻器模块应屏蔽起来,以防止外部直径 12 mm 或更大的物体进入屏蔽网。电阻器应保护起来免受水花影响。保护角度定义为:水花以竖直方向到最大 60 度夹角方向下落时都不能有足以引起危害的水量进入外罩。另外,在任何运行方式下,从任何方向进入的雨水都不能造成有害的影响。

E.1.3 保护

电流超过最大连续电流及短时电流时,电阻器应受到保护,这是 DCF 保护方案的一部分。为了合理的保护,供应商应提供下列有关电阻器的信息:

- 电阻器的实际质量,单位为千克(kg);
- 电阻器的热时间常数,单位为秒(s);
- 对于网状电阻器,提供总质量,单位为千克(kg);
- 对于网状电阻器,提供总质量的时间常数,单位为秒(s)。

E.1.4 材料

电阻器供应商应提供实际电阻丝合金的详细信息,并说明潮气、盐及空气等不会对电阻丝合金造成

腐蚀。更多的信息还包括：

- 包括绝缘子及实际电阻合金在内的所有材料在持续电流下的最大允许运行温度；
- 包括绝缘子及实际电阻合金在内的所有材料在短时电流下的最大允许运行温度；
- 实际电阻材料的成分；
- 实际电阻材料温度系数相对于温度的函数关系；
- 实际电阻材料的热容量。

E. 1.5 绝缘子及套管

电阻器应安装在绝缘子上,绝缘子为棕色的瓷绝缘子。绝缘子应合理设计,并按照它所在位置处所承受的电压,采用合理的耐受电压进行型式试验。依照最大运行电压,绝缘子及套管的最小爬电比距不应小于 54 mm/kV。

E. 1.6 端子

与外部连接的端子应与端子排一起提供。
模块之间内部连接端子包括在供货范围在内。

E. 1.7 冷却

电阻器为空气绝缘,空气自然对流冷却。

E. 1.8 短路电流性能

电阻器在经受规定的暂态及短时电流时应能够承受所遭受的机械及热应力。

E. 1.9 表面处理

表面处理要求应满足高压直流系统设备的通用表面处理要求。

E. 1.10 焊接

焊接应符合高压直流系统设备的焊接要求。

E. 1.11 无线电干扰电压(RIV)

电阻器在规定的用于计算爬电距离的最大运行电压下运行时不应出现外部电晕。

E. 1.12 铭牌

铭牌的安装位置应便于人们站在地上阅读。铭牌应采用耐气候影响的材料制作,文字应难以消除。铭牌应包含下列信息：

- 制造厂商；
- 序号；
- 设备类型(直流滤波器电阻器)；
- 最大持续运行电流下的功率；
- 标称电阻值；
- 短时电流及持续时间；
- 在 25 °C 空载条件下的电阻值；
- 端子间的雷电冲击耐受电压；
- 频率(基波及额定谐波频率)；

- 制造年份；
- 重量。

E.2 试验

E.2.1 例行试验

例行试验是为了检验材料和结构中的缺陷。对每台制成的设备进行,不会损坏试品的性能和可靠性,以保证产品与已通过型式试验的设备相一致。根据协议,任一项例行试验都可以在现场进行。

E.2.1.1 电阻值的测量

按 7.2.3.1.1 的规定。

E.2.1.2 工频耐压试验

按 7.2.3.1.2 的规定。

E.2.2 型式试验

E.2.2.1 电感值测量

按 7.2.3.2.1 的规定。

E.2.2.2 电阻值测量

按 7.2.3.2.2 的规定。

E.2.2.3 温升试验

按 7.2.3.2.3 的规定。

E.2.2.4 雷电冲击耐压试验

按 7.2.3.2.4 的规定。

E.3 直流滤波器电阻器技术要求

直流滤波器电阻器技术参数见表 E.1。

表 E.1 直流滤波器电阻器技术参数

电阻器技术要求	单 位
额定谐波频率	Hz
额定电流和频率下的额定电阻(环境温度 20 ℃)	Ω
额定电阻公差*	± %
额定谐波频率时的最大电感	μH
电流额定值	A
包括谐波的最大连续电流,(方均根值)	A

表 E. 1 (续)

电阻器技术要求	单 位
谐波电流频谱 ^b , 稳态, (方均根值)	n/A
包括谐波的最大持续电流下的运行温度	℃
包括谐波的最大暂时电流, (方均根值)	A
暂时谐波电流频谱, (方均根值)	n/A
持续时间	min
包括谐波的最大暂时电流下的运行温度	℃
暂态电流 ^c	kA
幅值, peak	kA
峰值时间	μs
能量	kJ
额定交流电压(包括谐波), (方均根值)	kV
雷电冲击耐受水平(LIWL):	
高压端对地	kV
低压端对地	kV
高压端对低压端	kV
操作冲击耐受水平(SIWL):	
高压端对地	kV
低压端对地	kV
高压端对低压端	kV
施加的对地交流试验电压(50 Hz, 1 min), (方均根值)	kV
^a 规定的公差应该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 电阻器必须持久地耐受最大持续电流后的暂态电流。	