



中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z XXXXX. 4—XXXX/IEC TR 62001-4:2021

高压直流系统 交流滤波器规范和设计 评估导则 第4部分：设备

High-voltage direct current (HVDC) systems—Guidance to the specification and
design evaluation of AC filters—Part4:Equipment

(IEC TR 62001-4:2021, MOD)

(征求意见稿)

(本草案完成时间：2023-12)

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 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 稳态额定值	错误!未定义书签。
4.1 概述	错误!未定义书签。
4.2 计算方法	错误!未定义书签。
4.3 交流电网条件	错误!未定义书签。
4.4 失谐的影响	错误!未定义书签。
4.5 用于额定值计算的电网阻抗	错误!未定义书签。
4.6 停运	错误!未定义书签。
5 暂态应力和额定值	错误!未定义书签。
5.1 概述	错误!未定义书签。
5.2 操作冲击研究	错误!未定义书签。
5.3 快波前波形研究	错误!未定义书签。
5.4 绝缘配合	错误!未定义书签。
6 损耗	错误!未定义书签。
6.1 背景	错误!未定义书签。
6.2 交流滤波器元件损耗	错误!未定义书签。
6.3 电抗器和电阻器损耗	错误!未定义书签。
6.4 估算损耗的准则	错误!未定义书签。
7 设计问题和特殊应用	错误!未定义书签。
7.1 概述	错误!未定义书签。
7.2 性能方面	错误!未定义书签。
7.3 额定值方面	错误!未定义书签。
7.4 特殊滤波器	错误!未定义书签。
7.5 现有站附近新建高压直流换流站的影响	错误!未定义书签。
7.6 冗余和备件	错误!未定义书签。
8 保护	错误!未定义书签。
8.1 简介	错误!未定义书签。
8.2 概述	错误!未定义书签。
8.3 滤波器组和滤波器分组的总体保护	错误!未定义书签。
8.4 独立滤波器元件的保护	错误!未定义书签。
8.5 人员保护	错误!未定义书签。
9 可听噪声	错误!未定义书签。

9.1 概述..... 错误!未定义书签。

9.2 交流滤波器产生声音的元件..... 错误!未定义书签。

9.3 噪声要求..... 错误!未定义书签。

9.4 降低噪声..... 错误!未定义书签。

10 抗震要求..... 错误!未定义书签。

10.1 概述..... 错误!未定义书签。

10.2 负载的技术规范..... 错误!未定义书签。

10.3 验证方法..... 错误!未定义书签。

10.4 机械设计改良实例..... 错误!未定义书签。

11 设备设计和试验参数..... 错误!未定义书签。

11.1 概述..... 错误!未定义书签。

11.2 电容器..... 错误!未定义书签。

11.3 电抗器..... 错误!未定义书签。

11.4 电阻器..... 错误!未定义书签。

11.5 避雷器..... 错误!未定义书签。

11.6 互感器..... 错误!未定义书签。

11.7 滤波器开关设备..... 错误!未定义书签。

附录 A（资料性） 抗震响应频谱实例（来自 IEEE Std 693-2005）..... 错误!未定义书签。

参考文献..... 65

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。

本文件是GB/T XXXXX《高压直流系统 交流滤波器规范和设计评估导则》的第4部分。

本文件修改采用IEC TR 62001-4:2021《高压直流系统 交流滤波器规范和设计评估导则 第4部分：设备》，文件类型由IEC的技术报告调整为我国的国家标准化指导性技术文件。

本文件与IEC TR 62001-4:2021的技术性差异[这些差异涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直单线 (d) 进行了标示]如下：

——修改了公式(15)（见4.2.4.4）；

——增加了电容器电气数据宜遵循的标准要求（见11.2.3）；

——增加了电阻器试验宜遵循的标准要求（见11.4.4）。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国电力电子系统和设备标准化技术委员会（SAC/TC60）归口。

本文件起草单位：西安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、国网经济技术研究院有限公司、西安高压电器研究院股份有限公司、西安西电电力电容器有限责任公司等。

本文件主要起草人：

引 言

高压直流输电作为解决大容量、长距离送电和异步联网的重要手段，在我国能源优化配置和大区联网中发挥着重要作用。

高压直流系统交流滤波器是高压直流输电系统的重要组成部分。随着高压直流输电技术发展，对交流滤波器的基本要求、性能、组成设备都提出了更高的要求。在传统采用电网换相换流器的直流输电工程基础上，又提出了针对柔性直流输电工程谐波的要求。编制GB/TXXXXX旨在为我国高压直流输电工程建设提供全面的指导，拟由五个部分组成。

- 第1部分：概论。目的在于给出采用电网换相换流器的高压直流（HVDC）系统交流滤波器规范、允许畸变限值、谐波产生、滤波器配置、滤波性能计算、滤波器投切、无功控制和业主规定参数及要求。
- 第2部分：性能。目的在于给出基于电流干扰的标准，现场测量和验证。
- 第3部分：建模。目的在于给出换流器谐波相互作用、已存在的谐波、交流网络阻抗建模、交流滤波器性能仿真。
- 第4部分：设备。目的在于给出交流滤波器及其元件的稳态和暂态额定值、功率损耗、可听噪声、设计问题和特殊应用，滤波器保护、抗震要求、设备设计和试验参数。
- 第5部分：柔性直流输电工程交流侧谐波及相应谐波限值。目的在于解决柔性直流输电工程相关的滤波器设计具体问题。

高压直流系统 交流滤波器规范和设计评估导则

第4部分：设备

1 范围

本文件提供了高压直流（HVDC）系统交流滤波器的基本数据（例如额定值、损耗、设计、特殊应用、保护、抗震要求、结构设计和试验参数）的指导。

本文件涵盖了谐波畸变及可听频率骚扰的敏感频率范围内的交流侧滤波，不包含设计应用于电力线载波（PLC）和无线电干扰频谱的滤波器。

本文件涉及传统的交流滤波器技术和电网换相换流器（LCC）高压直流，但其中大部分也适用于电压源换流器（VSC）高压直流的任何滤波设备。

注：电压源换流器（VSC）高压直流也称为柔性直流。

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。

IEC 60076-6 电力变压器 第6部分：电抗器（Power transformers—Part 6: Reactors）

注1：GB/T 1094.6—2011 电力变压器 第6部分：电抗器（IEC 60076-6:2007, MOD）

IEC 60099-4 避雷器 第4部分：交流无间隙金属氧化物避雷器（Surge arresters—Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems）

注2：GB/T 11032—2020 交流无间隙金属氧化物避雷器（IEC 60099-4:2014, MOD）

IEC 60099-5 避雷器 第5部分：选择和使用导则（Surge arresters—Part 5: Selection and application recommendations）

注3：GB/T 28547—2012 交流金属氧化物避雷器选择和使用导则（IEC 60099-5:2000, NEQ）

IEC 60099-9 避雷器 第9部分：高压直流换流站用无间隙金属氧化物避雷器（Surge arresters—Part 9: Metal-oxide surge arresters without gaps for HVDC converter stations）

IEC 60168 标称电压高于1 000 V系统用户内和户外瓷或玻璃支柱绝缘子的试验（Tests on indoor and outdoor post insulators of ceramic material or glass for systems with nominal voltages greater than 1000 V）

注4：GB/T 8287.1—2008 标称电压高于1 000 V系统用户内和户外支柱绝缘子 第1部分：瓷或玻璃绝缘子的试验（IEC 60618:2001, MOD）

IEC 60871-1 标称电压1 000 V以上交流电力系统用并联电容器 第1部分：总则（Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1: General）

注5：GB/T 11024.1—2019 标称电压1 000 V以上交流电力系统用并联电容器 第1部分：总则（IEC 60871-1:2014, MOD）

IEC 61803 采用电网换相换流器的高压直流换流站损耗的确定（Determination of power losses in high-voltage direct current (HVDC) converter stations with line-commutated converters）

注6：GB/T 20989-2017 高压直流换流站损耗的确定（IEC 61803:2011, IDT）

IEC 61869-2 互感器 第2部分：电流互感器的补充要求 (Instrument transformers—Part 2: Additional requirements for current transformers)

注7：GB/T 20840.2—2014 互感器 第2部分：电流互感器的补充技术要求 (IEC 61869-2:2012, MOD)

IEEE Std 18 并联电力电容器 (Shunt power capacitors)

GB/T 20994 高压直流输电系统用并联电容器及交流滤波电容器

GB/T 30547 高压直流输电系统滤波器用电阻器

3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

ISO 和 IEC 在以下地址维护用于标准化的术语数据库：

- ISO 在线浏览平台：<https://www.iso.org/obp>
- IEC 在线电工词汇：<http://www.electropedia.org>

4 稳态额定值

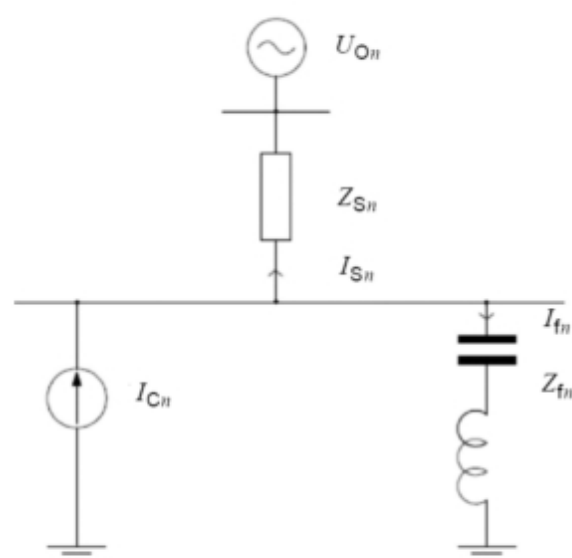
4.1 概述

滤波器设备的稳态额定值的计算由承包商负责。本章对设备额定参数计算以及研究中需要考虑的不同因素给出了指导。若需考虑滤波器停运和电网突发事件，提供合适的系统和环境数据以及澄清运行条件是用户的责任。

4.2 计算方法

4.2.1 概述

电网换相换流器 (LCC) 高压直流系统的滤波器稳态额定值计算基于以下电路模型，其中包括高压直流换流器、滤波器组和交流电源系统，见图 1。



注：图中使用的符号在公式 (1) 之后注释。

图1 额定值计算电路

流过滤波器的谐波电流是来自换流器和交流电网的谐波电流的总和。

使用叠加原理，公式（1）和（2）可用来评估来自两个源的滤波器中第 n 次谐波电流。

a) 高压直流换流器：

$$I_{fn}^i = \frac{Z_{sn}}{Z_{sn} + Z_{fn}} \times I_{cn} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

I_{fn}^i ——来自换流器的滤波器谐波电流；

I_{cn} ——换流器谐波电流；

I_{sn} ——系统谐波电流；

Z_{fn} ——滤波器谐波阻抗；

Z_{sn} ——电网谐波阻抗。

b) 交流电网：

$$I_{fn}^{ii} = \frac{U_{on}}{Z_{sn} + Z_{fn}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

I_{fn}^{ii} ——来自系统的滤波器谐波电流；

U_{on} ——背景谐波电压。

4.5 节说明了电网阻抗的规定。

计算公式（1）和（2），需要已知以下独立变量。

——高压直流换流站的整流器或逆变器产生的谐波电流（ I_{cn} ）。它可以计算所有谐波（见 IEC TR 62001-1 或使用谐波电压源的 VSC 的 CIGRE 技术手册 754）。计算宜考虑在稳态条件下可能出现的最严苛运行情况，即超过 1min 时。关键参数的最大误差范围，例如换流变阻抗或分接头的调节范围，都需要考虑在内。IEC TR 62001-3 中讨论的谐波相互作用现象也宜考虑在内。

——4.2.2 中讨论的系统背景谐波电压。

——IEC TR 62001-1 中所述的交流电网的谐波阻抗（ Z_{sn} ）。请注意，可以为 I_{fn} 和 I_{fn}^i 的计算定义不同的 Z_{sn} 值，这取决于背景谐波畸变如何定义（见 4.2.3）。

滤波器的谐波阻抗（ Z_{fn} ）需考虑失谐和允差因素（见 4.4）。

当高压直流连接两个基波频率不同的交流系统，特别是作为背靠背连接时，两个换流器会在各自的交流侧产生不同于基波的谐波频率电流。标称基波频率可以不同，例如 50 Hz 和 60 Hz，或者可以标称相同，但有时相差高达 1 Hz 或 2 Hz。这个额外产生的畸变（间谐波）的频率将是远端交流系统的基波频率，并将通过线路传输。间谐波可能会导致整数谐波中未发现的特定问题，例如

- 1) 干扰纹波控制系统
- 2) 由于谐波频率与相邻的间谐波的差异引起的低频振幅调制导致的闪变

示例：由于来自 50 Hz 系统的 13 次谐波 650 Hz 与来自 60 Hz 系统的 11 次谐波 660 Hz 的相互作用导致 10 Hz 闪变。

间谐波效应（见 IEC TR 62001-1）虽然很小，但在计算滤波器元件额定值时宜予以考虑。

4.2.2 交流系统背景谐波

在滤波器额定值计算中考虑交流系统背景谐波畸变的影响十分重要。早期高压直流工程中，不适用 4.2.1 所述的直接计算，会给换流器谐波电流增加 10%~20% 的裕度。但是，该算法可能不会充分反映出许多电力系统存在的低次谐波畸变（通常为第 3、第 5 和第 7 次）。由于目前换流站仅产生少量的低次谐波，幅值的少量增加对滤波器的额定值不会有太大影响。

在滤波器设计中,对多个谐波电流源进行详细的电网模型建模是不切实际的。通常建立一种戴维南等效电压源模型模拟在交流系统阻抗之后,如图 1 所示,以造成滤波器母线处的开路电压畸变,即滤波器连接之前的畸变水平。各次谐波电压的大小可以基于测量或性能限制,但受限于总谐波畸变率。这种方法提供了一个更现实的环境畸变水平对设备额定值影响的评估方法。

IEC TR 61001-3 更详细地讨论了关于处理背景谐波的另一种方法。

4.2.3 换流器和背景谐波的组合

由于 I_{fn}^i 和 I_{fn}^{ii} 之间没有固定的矢量关系,可以在每个谐波基础上以方和根(RSS)为基础进行谐波求和,见公式(3):

$$I_{fn} = \sqrt{I_{fn}^i{}^2 + I_{fn}^{ii}{}^2} \dots\dots\dots (3)$$

另外,也可以使用 IEC61000-3-6 的一般求和法则。

对于幅值相对较小的背景谐波,RSS 求和是合理的,因为某些谐波可能同相,其它谐波可能不同相,并且这些关系会随时间和运行条件而变化。

另外,线性相加将提供更大的安全性,以防止在特征频率下的分量近似同相的可能性,但成本会增加,特别是用于高压电容器的额定电压时。

任何单个背景谐波都宜考虑线性相加,线性相加的幅值会显著影响元件的电流额定值。否则,如果在实际工程中两个源在一段时间内是同相的,那么滤波器可能过电流保护跳闸。如果要使用线性相加,宜注意确保计算两个电流的条件是一致的,即计算电流可以在实际工程中同时发生。

4.2.4 设备额定值计算

4.2.4.1 概述

用上述方法计算出包含较高幅值的各次谐波的总谐波电流。对于 LCC 高压直流系统,最大谐波次数一般取 49 或 50。但是随着大功率电子设备的日益普及,可以考虑更高的最大谐波次数。对于 LCC 谐波次数范围很重要,确保考虑到滤波器和交流电网间以及不同滤波器间的所有谐振条件。

每一个滤波器 I_{fn} 的计算考虑估算滤波器每个支路的谐波电流频谱。根据此谐波电流频谱即可计算各元件的额定值。

4.2.4.2 电容器

根据电容器组的电流频谱(I_{fcn}),RSS 总电流可以计算为公式(4)

$$I_c = \sqrt{\sum_{n=1}^N (I_{fcn})^2} \dots\dots\dots (4)$$

通常,电容器单元套管是电容器单元电流的限制因素。宜指定最重要的谐波电流频谱的幅值。

由于高压电容器的额定电压是决定交流滤波器成本的最重要因素,宜仔细考虑计算使用的公式。以往在用户、咨询机构和制造商之间关于此有很多讨论。计算总额定电压时最保守的假设是交流系统在任何谐波频率下都会发生谐振,而且所有谐波同相。但对于高压直流滤波电容器来说,这种假设会导致很高的设计成本,额定电压与实际值间的裕度很大。实际中,滤波器和交流系统可能会在某些谐波频率下发生谐振,但不会在大多数频率下发生谐振。同样,有些运行条件下一些谐波可能同相,但一般来说,谐波具有不可预测的相位关系。因此,高压直流输电用户和制造商制定了一些其它算法,试图以合理的成本确保满意的设计。

因此,已意识到与成本相关的风险问题,但是由于现有观点的多样性,不可能在本文件给出明确建议。下面讨论了不同的计算方法。实际中,这些方法已经成功地在不同的高压直流工程中得到应用。

在最保守的方法中，最大电压（ U_m ）可以计算为各次谐波与基波的算术和，即公式（5）

$$U_m = \sum_{n=1}^N I_{fcn} \times X_{fcn} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

X_{fcn} ——电容器组的 n 次谐波阻抗。

但是，因为它假设所有谐波同相，尤其是基于滤波器和交流系统在所有谐波下同时谐振的估算是过于保守的，并且会导致昂贵的电容器设计成本。

更现实的方法是使用公式（5），假设只考虑一定数量的谐波会发生谐振（例如，两个最大的分量）而在开路系统或固定阻抗下估算其它谐波。但是，这个方法仍然假设所有的谐波是同相的，但实际上并非如此。

更进一步的方法是，假设所有谐波发生谐振，但需要将公式（5）修改为只计算基波和最大谐波分量的算术和。将电压的其它所有谐波分量用 RSS 求和，并与基波和最大谐波分量算术相加以估算 U_m 。因此这个“准平方”和考虑了各个谐波分量间的相角差异，见公式（6）：

$$U_m = U_1 + U_{no} + \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

U_1 ——基波分量；

U_{no} ——所有谐波电压中的最大分量；

U_n ——除了最大分量外的各个 n 次谐波分量。

对上述公式进行改进，仅在基波分量上加上所有谐波分量的 RSS 和，同时假设所有频率下都会发生谐振，见公式（7）。

$$U_m = U_1 + \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \dots\dots\dots (7)$$

该估算没有公式（5）或公式（6）中使用的方法保守，但在实际中大量应用并证明是足够的。所有谐波下发生谐振的假设以及计算中有关允差的最严苛情况假设的应用，为电容器额定值提供了一定裕度，假设补偿了比公式（7）更严重的矢量求和可能性。

由于按照某些国际标准制造的电容器有 10% 的长期过电压能力，允许电容器组的额定电压（ U_N ）比 U_m 低 10%，即公式（8）

$$U_N = U_m / (1 \sim 1.1) \dots\dots\dots (8)$$

然而，根据公式（8）计算的 U_N 值至少宜等于电容器组的最大基波电压。如果情况并非如此，那么指定的 U_N 应该是最大基波电压。

注：在上述定义中， U_n 用于表示谐波分量（ $n = 1$ 至 N ）， U_N 用于表示电容器组的额定电压（按照 IEC 60871-1）。

低压电容器组安装在滤波器中时，例如安装在双调谐或三调谐滤波器中，如上计算的额定电压可能不适用。对于低压电容器组，额定电压应提高以确保电容器组能够承受暂态应力，如 5.4 所述。

根据谐波电流频谱，电容器（单相）的等效“热”无功功率特性可以计算为公式（9）

$$Q_c = \sum_{n=1}^N I_{fcn}^2 \times X_{fcn} \dots\dots\dots (9)$$

电容器（单相）的无功功率额定值基于额定电压（ U_N ）和基波阻抗（ X_{fcl} ）为公式（10）

$$Q_c' = U_N^2 / X_{fcl} \dots\dots\dots (10)$$

由于式（14）中的谐波电压的算术或“准平方”和， Q_c' 通常大于 Q_c 。但是，在谐波电流大于基波电流的情况下， Q_c 大于 Q_c' 。在这种情况下，需要规定一个更大的额定电压来使 $Q_c' = Q_c$ 。实际上，这可以通过确定最主要的各次谐波电流的幅值来实现。

4.2.4.3 电抗器

为确保达到满意的热性能设计和对热性能型式试验的依据进行正确评估，需要给制造商规定谐波电流（ I_{f1n} ）频谱和总 RSS 谐波电流值。电抗器的特性基于公式（11）和公式（12）

$$I_1 = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_{f1n}^2} \dots\dots\dots (11)$$

$$Q_1 = \sum_{n=1}^N I_{f1n}^2 \times X_{f1n} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

X_{f1n} ——电抗器的 n 次谐波阻抗。

为确保电抗器应力不超过设计能力，电抗器的额定爬电距离电压宜规定为公式（13）

$$U_1 = \sqrt{\sum_{n=1}^N (I_{f1n} \times X_{f1n})^2} \dots\dots\dots (13)$$

在滤波器常规投切期间和受到陡波冲击时，电抗器上会产生很高的暂态应力。这些需要在电抗器设计中予以考虑，因此包含在设备规范中。

4.2.4.4 电阻器

热负荷电流可以用谐波电流（ I_{frn} ）频谱表征，见公式（14）：

$$I_r = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_{frn}^2} \dots\dots\dots (14)$$

因此电阻器的额定功率为公式（15）

$$P_r = \sum_{n=1}^N I_{frn}^2 \times R \dots\dots\dots (15)$$

为了确保电阻器元件和电阻器组的绝缘在施加电压下不会发生闪络，电阻器两端的额定电压宜规定为公式（16）

$$U_r = \sqrt{\sum_{n=1}^N (I_{frn} \times R_{frn})^2} \dots\dots\dots (16)$$

该数值 U_r 宜成为决定电阻器内部绝缘支撑件爬电距离的基础（另见 4.2.5）。虽然采用基波和谐波电压求算术和的方法似乎过于保守，并与求绝缘子的爬电距离的一般方法相冲突，但内部绝缘子承受了非正常的运行条件。大气污染效会在不受降雨洗涤的绝缘子表面产生严重的污垢堆积。正常运行期间，

绝缘子的温度会升高，通常为 $100^{\circ}\text{C}\sim 300^{\circ}\text{C}$ ，增加了表面闪络的风险。维护通常是每年进行一次，但一些用户运行维护间隔时间最长达 3 年。因此采用上述的保守方法来计算内部绝缘爬距可能是必要的。

在阻尼滤波器常规投切期间，以及承受如第 5 章所述的陡波冲击条件下，电阻器上会产生很高的应力。这些预测的应力水平需要包含在设备规范中。

4.2.5 电压额定值的应用

上述规定的设备的电压额定值可以用来确定避雷器最大持续运行电压 (MCOV) 的最低水平。避雷器的所有功能由第 5 章中的研究确定。

对设备的各元件进行基波电压和谐波电压的算术求和或准算术求和，目的在于在可能发生的短期负载情况下保证设备的安全。

然而，如果将这些电压作为计算外部绝缘爬电距离的基础，将过于保守。建议用于计算总爬电距离的电压宜为稳态基波电压和谐波电压的平方和。因此对于分级绝缘的滤波器，在滤波器不同位置计算其不同的外绝缘距离。

4.3 交流电网条件

滤波器设备的额定电压宜在交流系统稳态电压范围内，超高压系统中标称电压的典型值通常为 0.95 p. u. 到 1.05 p. u.。对于超过此值的电压偏移，宜规定过电压的持续时间。

4.4 失谐的影响

为确保滤波器设备额定值能够承受使用寿命内的运行，以下因素需要考虑。

- 设备允差：宜使用保证极限范围的允差进行额定值研究。不同于其它的受周期性变化影响的变量，任何由于制造允差而产生的影响都会持续存在于设备的使用寿命中。
- 频率变化：宜使用正常的预期频率变化值进行性能计算，极端的频率变化值进行额定值计算。极端条件可以被规定为连续的或特定时间段内的极端条件。连续极端条件将用来确定连续额定值，特定时段内的极端条件将确定短时过负荷特性。
- 温度变化：设备性能研究宜考虑最大和最小平均温度，而额定值研究宜考虑绝对最大和最小温度。如前所述，温度会影响电容值，因此会使滤波器失谐。另外，低温条件对电容器组很重要，特别是通电条件下。
- 电抗器抽头位置：通常在调谐滤波器的电抗器上安装可调节的分接头以抵消电容器容差的影响。分接头位置对滤波器调谐和随之而定的额定值的影响需要考虑。
- 电容器单元故障检测方案通常具有三个等级：仅报警（第一级），报警加延时紧急跳闸（第二级）和瞬时跳闸（第三级）。在第二级报警下运行时，电容器组的额定值必须满足负载条件。在某些情况下，仅实施二级方案，额定值计算只需考虑第一级报警等级。
- 如果安装了多个相同类型的调谐电容器组时，考虑由于调谐差异引起的电容器组间的循环电流是很重要的。滤波器设备额定值需要考虑这些电流。但是，如果滤波器结构合适，可以使用措施控制这种影响，例如使用并联母线。

4.5 额定值计算的电网阻抗

用于设备额定值计算的交流电网谐波阻抗 (Z_{sn}) 的表示法与用于估算性能的不同。如 IEC TR 62001-1 中所述，可以使用许多不同的几何形状来定义用于性能研究的谐波阻抗。这些数据宜涵盖了在设备的整个使用期限内所有正常情况以及不确定的电网运行条件和负载条件。对于额定值研究，可以使用更广泛的电网条件来确保设备额定值满足预期寿命。可以通过指定更大的搜索区域和/或增加系统阻抗角来实现。确保考虑到实际最小阻抗水平，以避免无阻尼谐振情况发生十分重要。

用户制定的电网谐波阻抗的具体规范直接影响滤波器设备的额定值和成本。

在某些情况下，需要系统零序阻抗来评估不对称故障（例如线路接地故障），换流器母线上的电压不平衡。得到的负序电压分量用于低次（主要是 3 次）谐波，滤波器短时额定值计算（0.1 s~1.5 s，取决于线路保护原理和自动重合闸特性）。

4.6 停运

滤波器设备的额定值必须能承受当确定数量的滤波器退出运行时增加的谐波负载。不同工程的停运要求不同，这取决于可用滤波器的数量和所需的功率传输水平。通常，已投入的一个滤波器或滤波器分组的退出不宜导致其余滤波器过载或需要降低输送功率。在一个滤波器或滤波器组因维护而退出运行，另一个滤波器或滤波器组跳闸的情况下，换流器控制系统通常将减小直流功率来防止滤波器过载以及因此产生的滤波器跳闸。规范宜明确规定承包商在准备方案时，需遵循的用户具体的停运要求标准。

为避免由于安装冗余滤波器或考虑滤波器退出运行工况规定滤波器设备额定值而产生成本，用户可选择允许降低直流输送功率避免滤波器过载。该策略能显著降低滤波器成本，特别是在安装滤波器数量相对较少的低功率方案。

在投切滤波器用作无功功率控制的一部分的情况下，滤波器设备的额定值宜适用于所有可行的投切策略。

5 暂态应力和额定值

5.1 概述

除叠加有谐波负载的稳态基波外，谐波滤波器还会承受由各种干扰引起的暂态应力。因此需要研究这些情况以确保设备的应力能够满足叠加的暂态负荷。

这种研究需要暂态分析程序来模拟系统参数，包括非线性参数，例如变压器饱和特性和避雷器特性。这些研究的结果将会指出计算的应力是否超出设备的能力。在这种情况下，设备额定值将需要增加以适应预期负荷。或者，可以加装避雷器来限制设备的暂态应力。研究旨在确定保护水平，包括被保护设备电压额定值和避雷器能量额定值。

必要时，这些研究的结果可能需要作为设备规范的一部分，也可能成为验收试验依据的基础。

对于双调谐滤波器，暂态研究结果通常表明基于稳态负载的低压滤波器元件的额定值是不够的，需要增加设备额定值才能满足暂态应力。

暂态研究的结果为滤波器设备各元件规范提供了重要信息。

第 5 章中讨论的暂态研究是承包商的责任；但是用户宜在规范中定义合同阶段研究需要的最低要求。例如，用户宜定义所有必须考虑的具体电网和方案运行条件。此外，宜确定所有需要研究的故障工况，以及所有在电网上操作的自动重合闸的详细方案。

虽然暂态研究是在合同阶段才进行和编写报告，但是投标人需要在招标阶段进行一些研究，以降低电站的成本。这些研究需要确定设备绝缘水平和避雷器额定值。任何此类研究的范围宜由投标人自行决定。

宜进行的研究主要有以下两组。

——第一组，如 5.2 所述，包括由例行滤波器投切、自动重合闸、系统故障和涉及直流线路甩负荷故障的施加和排除而引起的操作冲击研究。

——第二组，如 5.3 所述，包括快波前研究，例如会导致电容器组快速放电的雷电冲击和母线闪络。

5.2 操作冲击研究

5.2.1 带电和操作

对于应用于高压直流方案中的每种类型的滤波器，都需要进行初始激励研究以确定过电流、过电压和能量的最大值。励磁涌流研究将根据实际最高系统电压激励确定最严苛情况。然而，在更复杂的滤波器配置中，同样的励磁涌流可能无法为各个设备元件确定最严苛情况。这些研究也确定断路器是否需要操作过电压控制装置(合闸电阻器,同步合闸等)和在过电压条件下进行过电压控制的断路器开关能力。

其它组已投入运行的情况下，滤波器的常规投切操作是滤波器元件最常见的暂态工作方式。每年的操作投切次数可能在不同方案之间差别很大。例如，为大容量电力传输设计的长距离高压直流方案中，滤波器投切的频率很低，而具有无功功率控制设备的背靠背高压直流方案中可能会频繁投切滤波器。暂态结果需要对投切次数进行估计，并且由承包商写入各设备规范中。滤波器的频繁投切对电容器组非常重要，因为暂态过程中施加的高水平介电应力对设备寿命有影响。有关电容器组的标准，如 IEC 60871 系列和 IEEE Std 18 提供了关于暂态电压、电流和年投切次数的接受水平。

与初始激励研究的方式相似，需要对常规投切进行励磁涌流研究以确定最严苛工况。该研究宜考虑到每种类型的滤波器最后被投切的工况，例如所有其它滤波器都在最大实际系统电压下工作。在安装并联电容器组作为无功功率控制策略的一部分时，需要研究并联投切这一特殊工况。在这种情况下，因带电电容器组放电而使高水平的涌流进入一组电容器可能导致电容器损坏。研究表明需要安装限流电抗器作为电容器组的一部分。

这些研究将需要考虑适用于滤波器连接点的短路电流水平（SCL）的范围。在 SCL 和滤波器设备的峰值电流和电压的幅值之间通常没有简单的关联性。

常规滤波器投切期间发生的暂态波形的典型示例如下图 2 和 3 所示：

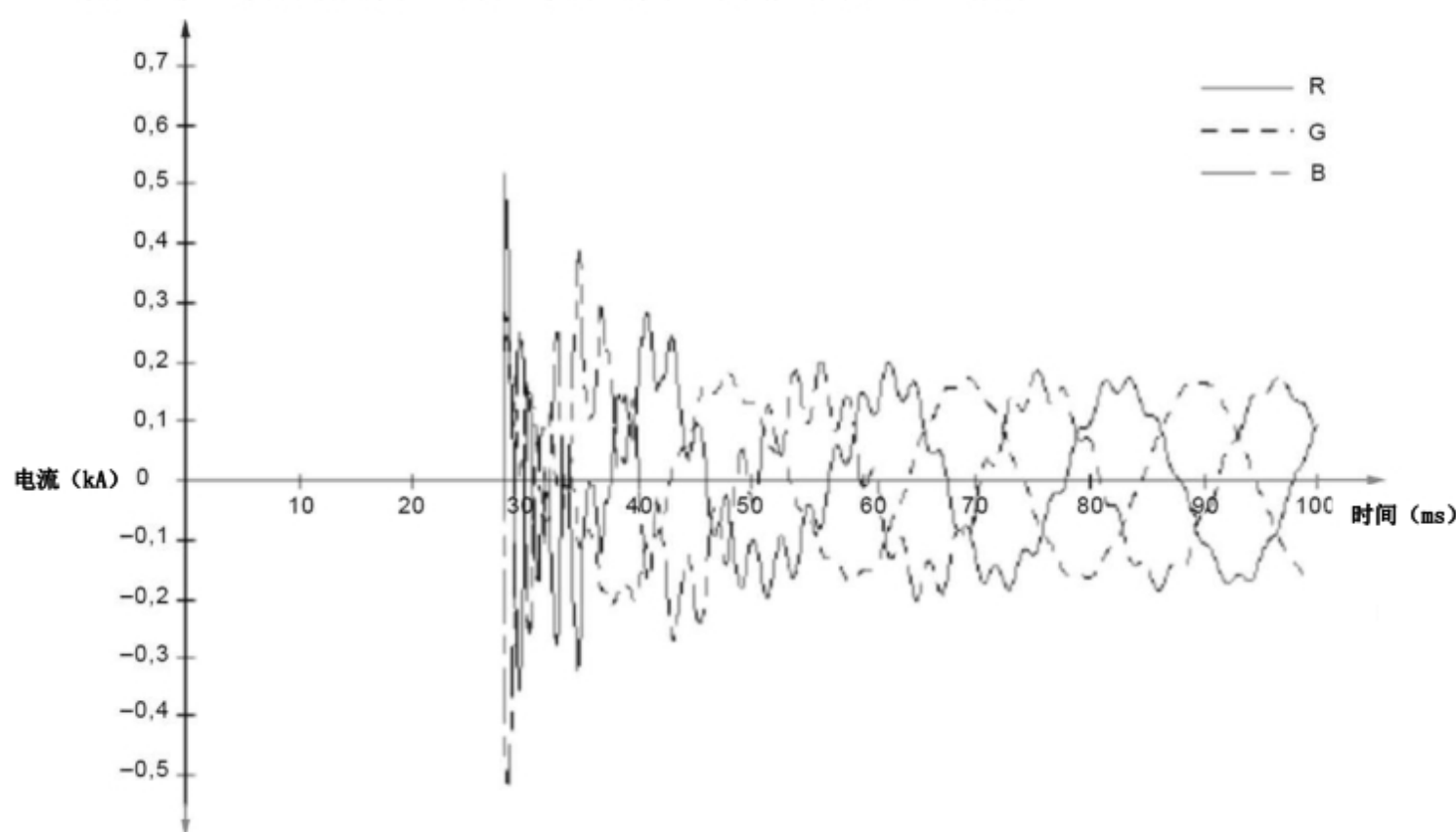


图2 12/24 次双调谐滤波器的涌流

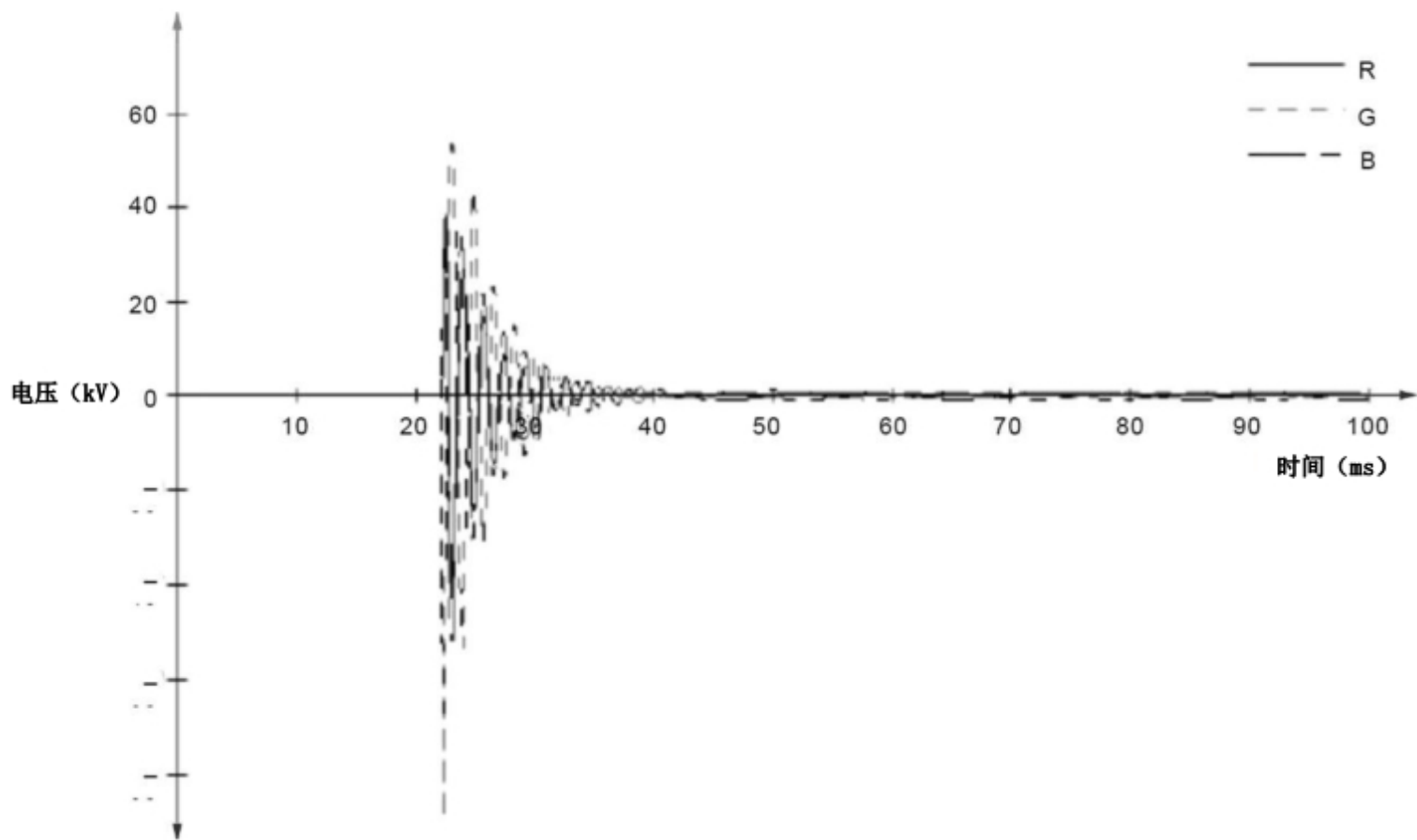


图3 投入 12/24 次双调谐滤波器时低压电容器两端的电压

5.2.2 滤波器的外部故障

交流电网的故障包括绝缘故障（例如相间和三相故障）以及接地故障（包括单相、两相或三相接地故障）。这种故障可能引起直流甩负荷，例如换流器闭锁，导致出现很大的预期恢复电压。滤波器的存在会增大该恢复电压，该恢复电压将受系统的线对地避雷器限制，而且通常是确定避雷器能量额定值的基础。研究这种故障和甩负荷工况时，根据断路器故障清除时间、滤波器跳闸策略和换流器解锁来准确地模拟高压直流方案的运行策略非常重要。通常，谐波滤波器在动态过电压（DOV）期间不投切，以避免在动态过电压后的任何操作限制。但是，如果滤波器要退出，会对断路器和如果安装的任何放电电压互感器（DVT）施加显著负荷。

如果送电端输电线路中的断路器使用单相自动重合闸方案，则需要研究应对重合闸失败的策略。在这种情况下，滤波器的连续重复带电可能会在设备上引起严重的过电流和过电压，特别是可能决定滤波器避雷器的能量水平。如果使用三相自动重合闸方案，将会导致换流站的隔离，这也需要研究来确定对避雷器额定值的影响。放电线圈安装在滤波器组上，可以迅速释放电容器组上的直流电压，以便使滤波器可重复充电。

这种暂态研究的持续时间需要能够包含断路器整个操作过程，并能确保可达到最严苛的过负荷条件和避雷器的吸收能量条件。然而，在数字研究中表示断路器的长清除时间，例如几分钟，是不切实际的，可用缩短的时间段模拟断路器的故障清除时间。

图 4 说明了一个组合故障工况：在 25 ms 时，高压直流换流器闭锁导致主滤波电容器组严重过电压。在 70 ms 时，发生三相母线故障，该故障在 100 ms 处被清除，导致电容器组上产生严重的瞬态过电压，缩短时间段是为了减少计算时间。

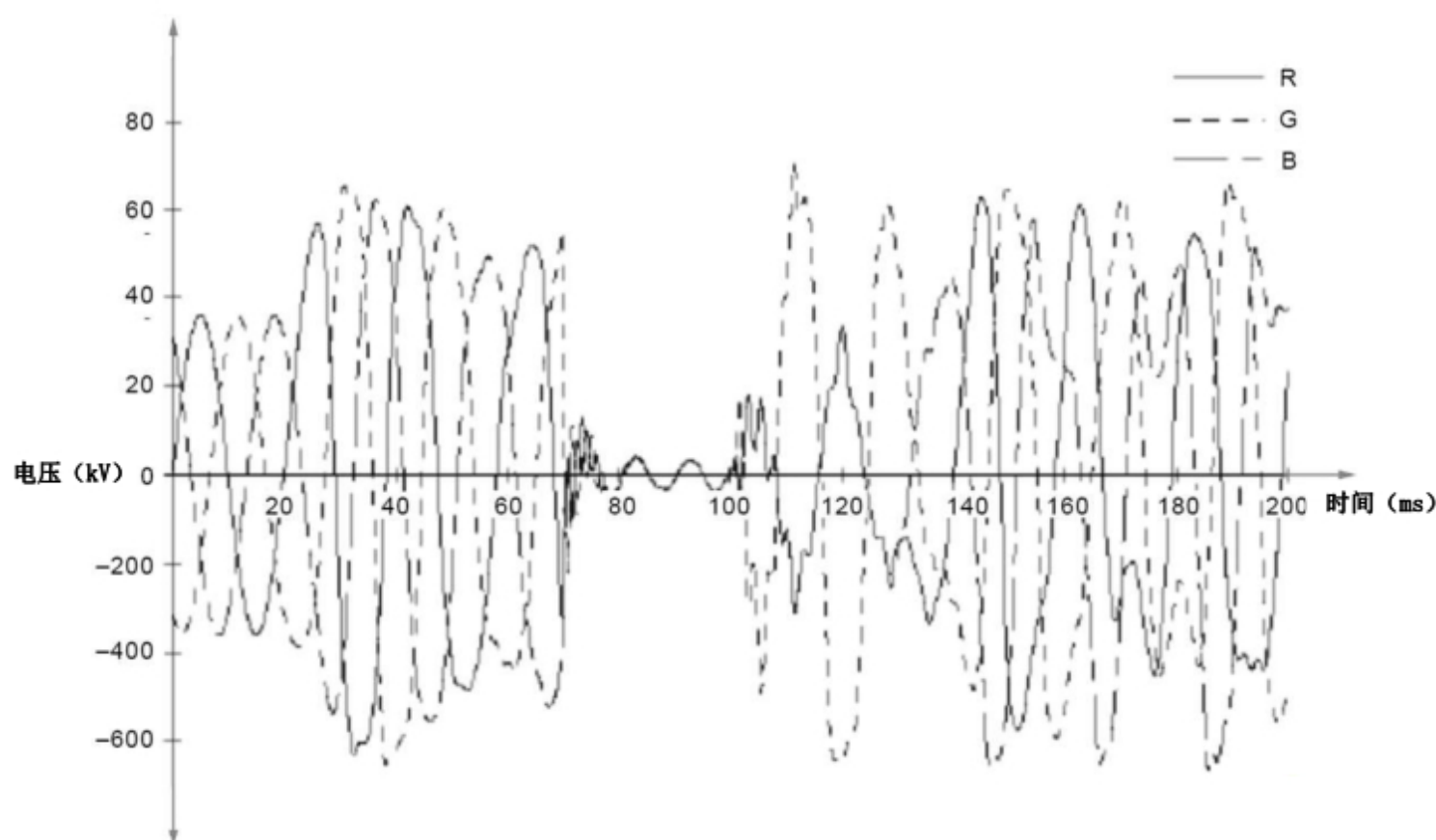


图4 故障条件下 12/24 次双调谐滤波器的高压电容器组两端电压

5.2.3 滤波器的内部故障

滤波器内部故障的影响取决于滤波器的类型和电气布置。例如，一个单调谐滤波器，电容器组高压端处的接地故障会通过低压电抗器和任何避雷器直接在电容器上施加瞬时直流电压，如 5.3.1 所述。电容器低压端处的线路接地故障仅将电抗器旁路并引起电容器组中的电流微小变化，电容器组是滤波器的主要阻抗。

如果滤波器配置倒置，例如高压端的电抗器和电容器连接到中性点，会导致电抗器高压端发生线路接地故障。在上述情况下，会在电抗器上引起与上述工况类似的暂态负荷。但是由于电抗器的阻抗和电容器相比较低，电抗器低压端的接地故障，例如电容器高压端，会在电抗器中引起相当大的故障电流。为了确保电抗器能够承受这样的内部故障，需要对电抗器进行短路试验。

虽然上面所考虑的故障条件通常是滤波器暂态工作的最严苛情况，但对于更复杂的滤波器配置还需要研究其它可能的内部故障。

研究这些故障对滤波器元件和避雷器额定值的影响时，重要的是要考虑母线避雷器提供的保护水平，同时滤波避雷器需要配合该避雷器设计，以实现整体优化设计。

5.2.4 变压器涌流

换流变压器或相邻的传统变压器励磁会导致相当水平的涌流，并可持续相当一段时间。但是，涌流电流可通过应用合闸电阻器或考虑选相合闸来最小化，在这种情况下，下述谐波问题宜忽略不计。由于涌流是不平衡的，并且具有大量谐波分量，尤其是低次谐波，因此会导致谐波电流在相邻的滤波器中流动。在应用中需研究对安装的低次谐波滤波器的影响。虽然实际中，换流变压器通常在滤波器投入前带电，但在故障恢复期间，相邻换流器极的变压器投切，或投切相邻的电网变压器时，变压器带电发生在滤波器已经投入的情况下。研究表明断路器需要过电压控制装置，以确定经济的设备绝缘水平和/或减少换相失败的发生。

涉及变压器涌流的研究需要对变压器进行包括线性和非线性（例如饱和特性）电感的详细建模。对能够决定涌流衰减的变压器内部损耗宜进行模拟。

5.3 陡波前波形研究

5.3.1 概述

该研究涉及的电压和电流变化率很大，因此对滤波器回路和设备的杂散电感和电容建模十分重要。因此，滤波器建模时宜考虑到设备的物理位置，尤其是避雷器。

5.3.2 雷电冲击

尽管滤波器设备直接受雷击的可能性不大，尤其是架空地线提供保护的情况下，但宜考虑远方交流系统上的雷电冲击传递到滤波器上的情况。滤波器端子上的最大电压将受到主要的高压避雷器限制。这些冲击将传递给双调谐滤波器的低压元件，并可能对其绝缘水平有重要影响。在合适的情况下，对高压变电站的不同点和变电站交流线路的不同距离都宜模拟适当的雷电冲击。

5.3.3 母线闪络研究

滤波器高压母线的接地闪络将导致滤波电容器组通过滤波器元件快速放电。这种工况可能在高的系统电压下发生，但是由于电容器熔丝已通过短路电流耐受试验，因此不会在这种情况下工作。由于这种放电时间短（几微秒），它们与雷电冲击属于同一类别。

5.4 绝缘配合

5.2 和 5.3 中描述的研究结果将决定整个滤波器的绝缘配合。分布在滤波器内的避雷器需求会由此决定。在大多数情况下，避雷器的保护电压水平和能量吸收能力，以及受保护设备的电压耐受能力的选择基于成本的权衡。虽然低电压等级变电站避雷器相对便宜，但如果需要较大的能量吸收能力，那么就需要避雷器多柱并联且成本可能会高。在这种情况下，增加设备绝缘水平可能是最佳解决方案。

避雷器建模时，计算保护水平时考虑避雷器特性的最大允差，而计算能量吸收能力时考虑最小允差十分重要。

带避雷器的滤波器有许多可能的连接方式。双调谐滤波器的典型示例如图 5 所示。

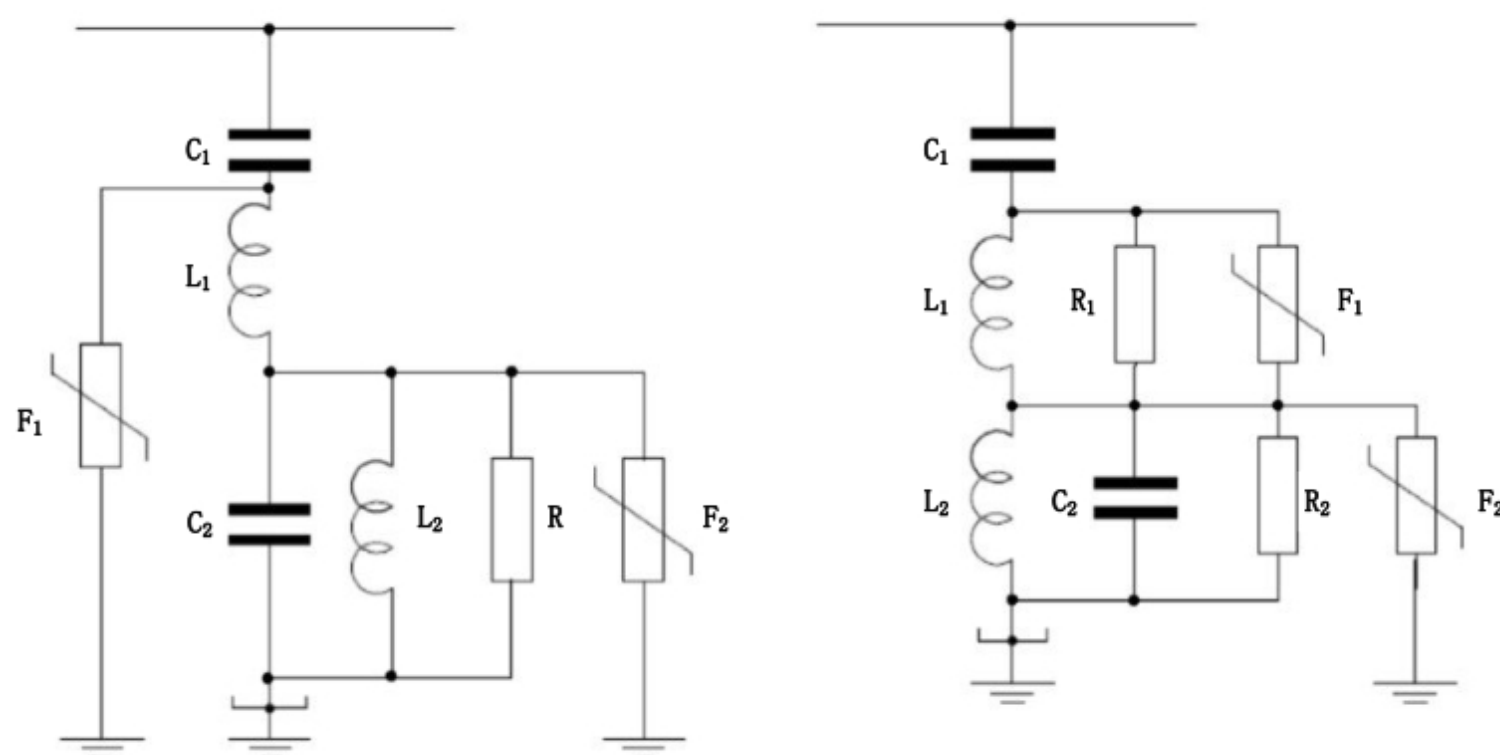


图5 避雷器的典型布置

根据 IEC 60099-4 或用户的规范而确定的设备耐受水平,和相应的避雷器保护水平之间所需的裕度,将通过雷电和操作冲击的研究结果验证。请注意,超过 IEC 60099-4 通常规定的裕度,将导致滤波器成本增加。由雷电冲击引起的避雷器的能量吸收通常小于 5.2 讨论的故障工况产生的能量。

对于双调谐和三调谐滤波器,故障研究或操作冲击研究的结果,通常表明低压电容器上的最大暂态电压远超稳态额定值。由于这种电容器组的成本通常较低,所以提高额定电压使过载能力满足预期的最大暂态电压是可以接受的设计,而且不需要特别设计避雷器。

对滤波器建立一个一致的绝缘配合方案,可以为滤波器设备定义以下参数。

- 雷电冲击耐受水平 (LIWL);
- 操作冲击耐受水平 (SIWL, 如适用);
- 工频电压;
- 净距 (线-线);
- 净距 (线-地);
- 爬电距离;
- 流过避雷器和滤波器元件的暂态电流;
- 滤波避雷器的保护水平;
- 滤波避雷器的位置和要求。

这些参数可以在设备的每一端或者大型高压电容器组中很多可能连接的支柱绝缘子、电流互感器 (CT) 或电压互感器连接点上确定。星形连接的滤波器的每一相的中性点通常通过较低但一致的绝缘水平独立绝缘,然后连接到一起形成单个与地连接的中性点。

为滤波器的中性点规定绝缘水平以避免暂态干扰时的杂散接地故障十分重要。

6 损耗

6.1 背景

对于高压直流项目,损耗成本可能是不同竞标者之间差异的重要因素。用户需要确保损耗估算是根据明确规定的程序,并在可比条件下进行的。

IEC 61803 给出了高压直流换流站损耗的介绍。

LCC 高压直流换流站交流滤波器造成的损耗,通常高达换流站总损耗的约 10%。与很多大型设备不同,谐波滤波器的损耗只能通过计算来确定,尤其是与谐波频率损耗有关的情况(尽管滤波器各元件的损耗也可能作为工厂试验的结果提供)。

IEC 61803 给出了用于计算高压直流换流站损耗的标准步骤。该标准提出了额定条件下的损耗计算方法,作为大多数高压直流站损耗计算的基础。

但是对于交流滤波器,由于失谐、交流电网谐振和交流电压的负序分量等因素,计算的损耗可能会在很大范围内变化。因此,在额定条件下进行计算可能大大低估了实际运行条件下的损耗水平。

因此用户宜注意,遵循 IEC 61803 的指导可能无法得到交流滤波器损耗的现实估计。此外,由于对应于不同交流滤波器设计的损耗差别很大,用户也不能够对不同投标人提供的设计进行公平比较。

因此,本章为用户提供如何确定计算交流滤波器损耗的选择条件的指南。建议滤波器损耗宜根据 IEC 61803 的额定条件和 6.4 中描述的建议选择条件进行计算,以提供用户需要的所有信息。

6.2 交流滤波器元件损耗

6.2.1 概述

交流滤波器包括电容、电感和电阻元件，所有这些元件的损耗构成换流站的总损耗的一部分。作为滤波器设计的一部分，在选择滤波器数量和类型时会考虑损耗的大小。IEC TR 62001-1: 2021 中 7.4 强调了调谐滤波器的各种优缺点，调谐滤波器的损耗通常较低，而阻尼滤波器通常每兆乏产生更高的损耗。

IEC TR 62001-2 进一步讨论了滤波器元件成本，并考虑了它们的损耗。

6.2.2 滤波电容器/并联电容器损耗

对于额定值为兆乏级的大型高压电容器组，损耗角很重要。损耗角越低，电容器组的损耗就越低。表 1 详细说明了典型全膜式电容器单元内的损耗划分。

表1 全膜式电容器单元的典型损耗

损耗源	损耗 W/kvar	
	内熔丝单元	外熔丝单元
电介质	0.05	0.05
放电电阻	0.05	0.05
其它（熔丝和接线）	0.05	0.01
总损耗	0.15	0.11

上述损耗是典型值，保证值将会高出 20%左右。无熔丝电容器具有与上述类似的电介质、放电电阻和接线损耗。就外熔丝单元而言，由外熔丝引起的损耗是上述值之外的额外损失。随着电介质的选择和设计的改进，值得注意的是现在电容器单元放电电阻的损耗倾向于占主导地位。该电阻器的要求和性能不在电容器制造商的直接控制之内，而是由国际标准或用户自己要求的放电时间要求决定的。如果提高放电要求，那么表 1 所示的损耗将更高。

上面讨论的损耗是指新的电容器单元。介电损耗往往会随着时间的推移而降低，在全膜式电容器单元运行几百小时后，介电损耗将达到其最低值。但是，这种减少是很小的，并且由于介电损耗不是对损耗的主要贡献者，所以该减少量对滤波器总损耗的影响也极小。由电容器制造商进行的试验也证实了低次谐波（按 W/kvar）时的损耗类似于上面给出的基频下的值。

假设谐波频率和基频下的损耗角相同，每个电容器组的功率损耗可以通过以下公式（17）确定：

$$P_c = \tan(\delta) \times \sum_{n=1}^N \left(I_{cn}^2 \times X_{cn} \right) \dots\dots\dots (17)$$

- 式中：
- P_c ——滤波电容器损耗；
 - n ——谐波次数；
 - N ——最大谐波次数（对于 LCC，通常为 49；对于 VSC，可能更高）；
 - I_{cn} ——谐波次数为 n 时电容器流过的电流；
 - X_{cn} ——谐波次数为 n 时的电容器电抗；
 - $\tan\delta$ ——电容器损耗角的正切值。

除了谐波滤波器之外，通常还提供并联电容器组以满足整个换流站的部分无功需求。它们的基频和谐波损耗可以按照上述滤波电容器的方法估算。但是，由于电容器本身的损耗很低，所以其它组成部分

的损耗可能会变得显著，不宜忽视。在这方面，以下各项引起的损耗增加可能达到电容器单元自身损耗的 50% 左右：

- 内部连接的电缆和母线；
- 电容器组开关；
- 电容器组（放电）电压互感器（PT）；
- 涌流电抗器（提供时）；
- 电容器熔丝；
- 电容器组内部接线。

6.3 电抗器和电阻器损耗

6.3.1 概述

滤波电抗器（以及电阻器）是滤波器总损耗的主要来源。对于为低次谐波提供衰减的滤波器组尤其如此，无论是单调谐滤波器还是阻尼滤波器。

对于单调谐滤波器，设计人员经常需要在基频和调谐频率下的品质因数 Q 之间做出折中。在基频下，为了减少损耗，需要确定一个尽可能高的 Q 值，而在谐波频率，特别是调谐频率下，需要确定一个与滤波器性能要求兼容的 Q 值。由于较大的系统频率变化和/或环境温度范围，使滤波器可能会受到宽范围的失谐影响时，谐波频率下所需的 Q 值可能较低。最终的平衡往往是这些不相容的需求间的折中，特别是当滤波电抗器制造商的最低初始成本设计在损耗方面不是最佳时。

电抗器设计人员（至少对于敞开结构的自然风冷电抗器）可通过在电抗器上安装额外的降低 Q 值的绕组，或使用自调谐滤波器来控制或优化不同频率下需要的 Q 值达到平衡。

对于阻尼滤波器，谐波频率下电抗器 Q 值的选择，对获得需要的性能和理想的额定值方面通常不重要，这就给滤波器设计者相对自由的选择权，来确定基频下的 Q 值，以满足电抗器成本和损耗之间的平衡。但是，对于双调谐阻尼滤波器，在谐波频率下电抗器 Q 值的选择需要仔细优化，以最大限度地减少滤波器内部的谐波环流效应。增加 Q 值在某些情况下可能会增加电抗器的谐波损耗。

谐波频率下的电抗器 Q 值一般定义在标称值附近的特定允差范围内。在损耗计算中宜优先采用最小 Q 值（即最大阻抗）而不是标称值。

电抗器的功率损耗可以确定为公式（18）

$$P_1 = \sum_{n=1}^N \frac{I_{ln}^2 \times X_{ln}}{Q_n} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

P_1 ——滤波电抗器损耗；

n ——谐波次数；

N ——最大谐波次数（对于 LCC，通常为 49；对于 VSC，可能更高）；

I_{ln} ——谐波次数为 n 的电抗器流过的电流；

X_{ln} ——谐波次数为 n 的电抗器电抗；

Q_n ——谐波次数为 n 的电抗器 Q 值。

6.3.2 滤波电阻器损耗

在确定滤波器总体配置时，设计人员将依据最小化滤波电阻器损耗，评估调谐型与阻尼型滤波器以及不同类型阻尼滤波器的选择。在本文件中，宜考虑三阶和 C 型滤波器在减小电阻损耗和提升性能方面

优于二阶滤波器。还宜考虑到是否有必要为单调谐滤波器配置外部电阻器，以获得调谐谐波频率下所需的滤波器品质因数。

在确定不同阻尼滤波器的选型时，尤其对于连接到高电压的交流滤波器，宜记得由于所需的绝缘成本可能占总成本的很大一部分，所以电阻器组本身成本并不与所需的损耗成正比。

电阻中的功率损耗可以由以下公式（19）确定

$$P_r = \sum_{n=1}^N I_m^2 \times R_n \dots\dots\dots (19)$$

式中：

P_r ——滤波电阻器损耗；

n ——谐波次数；

N ——最大谐波次数（对于 LCC，通常为 49；对于 VSC，可能更高）；

R_n —— n 次谐波下的电阻；

I_{rn} ——计算得到的电阻器中 n 次谐波电流。

6.3.3 并联电抗器损耗

并联电抗器可以作为高压直流换流站的一部分为交流滤波器提供感性补偿，尤其在小负荷条件下要求最少数量的谐波滤波器来满足谐波性能时。其损耗的计算与常规输电系统中的相似。宜注意，通常它们在谐波频率下的损耗与基频损耗相比几乎可以忽略不计。

6.4 损耗估算的准则

6.4.1 概述

采购高压直流换流站的用户在评标时，损耗评估通常作为一个焦点。因此其评估准则需在技术规范中做出一致、明确、清晰的规定，不宜只有益于或不利于某个投标者。

IEC 61803 提供了一套评估交流滤波器损耗的准则，并且常由高压直流换流站或方案的采购方规定。同样的，它也有效地提供了在同等基础上评估各种潜在投标者设计的方法。但该文件规定的准则并不总是能完全反映实际运行条件，可能会引起不同幅值的损耗。这些特别事例在 6.4.7 讨论。

在评估损耗时需要考虑到的各方面因素有：

- a) 交流滤波器母线基频电压，
- b) 基波频率和环境温度，
- c) 交流系统谐波阻抗，
- d) 换流器产生的谐波电流，
- e) 背景谐波畸变，
- f) 换流站预期负荷曲线。

以上各因素在 6.4.2~6.4.7 逐个进行讨论。

6.4.2 交流滤波器母线基频电压

由于交流滤波器母线电压的选择不是敏感问题，即通常它不会有利于一种交流滤波器配置设计而不利另一种，所以损耗评估宜基于交流滤波器母线标称电压。

6.4.3 基波频率和环境温度

最初可能会出现和交流系统基频电压的选择一样，损耗评估也宜基于基波频率的标称值。

同时这种方法通常会满足组成换流站的其它大多数元件，但对交流滤波器可能不适用，基波频率和环境温度变化的选择可能是一个敏感问题。根据滤波器配置的类型，极端频率变化（和温度变化，适用时）下的滤波器谐波损耗会显著不同于标称频率和正常温度下的计算值。这在包含单调谐或双调谐滤波器支路的配置下尤为显著。

因此，为使用户更全面地了解每个滤波器设计中可能产生的损耗，交流滤波器的实际损耗估算宜考虑规定用于谐波性能计算的基波频率和环境温度的极值。

这宜作为采用标称频率和 20℃ 环境温度（见 IEC 61803）的计算方法的补充，可用于整个换流器站损耗比较。

6.4.4 交流系统谐波阻抗

合适的系统谐波阻抗选择对于损耗计算也是敏感问题。高压直流工程规范已趋向于说明（并且 IEC 61803:2020 中 5.3.1 要求），估算损耗时宜假设交流系统处于开路状态，这样就可认为换流器的所有谐波电流都流入交流滤波器。

然而该准则忽视了以下实际情况：交流滤波器和供电系统谐波阻抗可能发生谐振，导致换流器（和其它任何电源）产生的谐波电流放大。

选择用于确定滤波器性能的阻抗，更能代表系统谐波阻抗的实际情况（选择用于滤波器额定值条件下的系统谐波阻抗对于损耗估算可能太保守）。

可以使用该算法代替或作为采用交流系统开路算法的补充。

6.4.5 换流器产生的谐波电流

IEC61803 和一些高压直流工程规范建议，确定交流滤波器损耗时，宜只基于换流器产生的特征谐波电流，忽略非特征谐波。

可是对于一些高压直流方案，采用低次谐波滤波器削弱剩余非特征谐波电流，以满足性能要求是必要的。在这种情况下，为了得到预期损耗的实际估算值，计算滤波器损耗时将非特征谐波计算在内，因为它们可能会对滤波器损耗的大小有很大影响。根据用户采用的方法，这种方法可能会代替或补充不含非特征谐波的估算方法。

使用“性能”条件下计算的换流器特征谐波电流作为损耗估算是比较合适的，即基于延迟角和换相电抗的典型标称值。

如果要考虑非特征谐波，则 12 脉波组的换流变压器之间的电抗不平衡、单个换流变压器相间不平衡、12 脉波阀组和六脉波阀组间延迟角不平衡，宜以“预期”水平为基准而不是“保证”水平，并服从于用户的协议。

换流器中负序相电压对损耗的影响在损耗估算中经常被忽略。这种出现在换流站交流供电系统中的电压，导致每个换流器都产生正序三次谐波电流，并因此影响所有相关的低次谐波滤波器的损耗。这些损耗可能很大，建议用户了解它们可能的实际水平。对于这种损耗的计算，所用的负序电压宜确定为估算谐波性能的值。

6.4.6 背景谐波畸变

背景谐波畸变所造成的影响是否宜包括在损耗估算之内，很大程度上取决于性能规范的要求。如果在性能计算中忽略了背景谐波畸变所造成的影响（见 IEC TR 62001-1），那么在损耗计算中也宜忽略。另一方面，如果性能要求规定宜包括背景谐波畸变，那么损耗计算也宜考虑。

如果换流站包括电力电子无功补偿设备，例如静止无功补偿器（SVC），作为总成套的一部分，该设备本身可以是谐波电流源，且为符合性能要求可能需要相应的谐波滤波器。尽管如此，一定水平的谐波电流将会流入直接与换流器相关的谐波滤波器，这些电流在总损耗计算中都要考虑。

6.4.7 换流站预期负荷曲线

交流滤波器损耗的经济成本计算，很大程度上依赖于换流站的预期负荷曲线，也要考虑每个换流器在整流和逆变模式（对双向方案来说）下的运行时间，以及在“备用”（或“热备用”）状态下的运行时间。

备用状态定义为线路运行所需的所有设备，均处于带电状态且通过解锁阀建立传输。它通常也称为热备用状态。负载损耗是备用状态之上到满负荷之间的、任何特定运行条件下的系统运行对应的损耗。

在特定的应用条件下，可能需要在备用状态下投入最少的滤波器，即使晶闸管阀处于闭锁状态。这种条件下连接的滤波器数量，可以满足最小可行直流负载条件下的谐波性能要求，以及无功功率平衡的要求。

对于评估每种负载条件，投运的交流滤波器数量宜与性能以及无功平衡要求一致，并且总损耗宜由相一致性运行参数（例如延迟角等）确定。

各单独负载条件下的损耗，经可代表预期运行曲线的适当因数进行加权，得到总等效损耗。然而宜注意到，根据用户对损耗成本估算采用的方法，基频和谐波频率损耗可以采用不同的加权，备用状态和负载损耗也可能如此。

7 设计问题和特殊应用

7.1 概述

本章提供了一些关于更先进设计的选择，以及一些以传统无源交流滤波器作为参考的特殊滤波器应用的指南。IEC TR 62001-1 说明了其它技术，例如有源滤波。

7.2~7.6 简述了来自高压直流方案的经验，讨论了许多工程中出现过的问题和一些特殊应用。

某些问题可能对用户的技术规范用语有影响，但是更多的是为了在投标评审阶段，以及与投标者和承包商的后续讨论中给用户提供帮助。

7.2 性能方面

7.2.1 低次谐波滤波和与交流系统的谐振条件

产生非特征低次谐波的机理是众所周知的，并且在 IEC TR 62001-1 中已经做了说明。负序电压对三次谐波的产生的特殊影响在 IEC TR 62001-1 中进行了说明。

调谐到 12 脉波特征谐波的交流滤波器，在较低频率下表现为电容性阻抗。通常情况下，交流系统谐波阻抗与滤波器阻抗并联，在换流器母线产生并联谐振现象。因此在一些高压直流方案中都安装了低次谐波滤波器来阻尼这种谐振（在参考文献[10]和[11]中进行了报告），并且限制来自换流器的一些非特征谐波产生的畸变。

根据经验，这种滤波器非常昂贵，并且由于滤波电容器（它本身较贵）通常容量额定值较低，以及回路的调谐频率较低，需要将滤波电抗器设计为很高的电感值和基频额定值。另外，如果提供了阻尼电阻器，损耗也会相对较高。

这种滤波器可能需要在整个换流器负载范围内运行。考虑到无功功率的要求，这可能会在低负载状态下对最小滤波器数量有影响，并且增加与交流系统的无功功率交换。在一些工程中，这种多出的无功功率用附加的并联电抗器补偿，而有些其它工程中的换流器采用增大触发角来消耗更多的无功功率的方式。

交流系统谐波阻抗在 2 次和 3 次谐波下的精确建模，对避免低次滤波器的超裕度设计是很重要的。对于低于 11 次的谐波来说，推荐使用详尽和精确的谐波阻抗防止对谐波的过分放大。如果在设计阶段不可能做到的话，宜给承包商一定的灵活性和风险允许，使其在工程执行阶段对这种现象进行研究，并

且在工程的后期消除其责任下的任何问题。在某些情况下，可以使用具有特殊功能的换流器控制，作为低次谐波问题的解决方法以代替昂贵的谐波滤波器（见参考文献[12]）。

在确定这种低次滤波器（见 IEC TR 62001-3）的设计和需求时，对换流器交流和直流侧之间的谐波相互作用，以及换流器控制系统的影响进行精确建模是至关重要的。忽视这些因素可能会导致完全错误的结果，并且有可能导致对低次滤波器的不必要的技术要求。

低次滤波器（例如 3 次或 3/5 次谐波）主要缺点是，它们的负载不仅是来自换流器的电流还包括交流系统内其它谐波源的电流。通常这些谐波源并不是用户的责任或在用户的控制之下，可能无法就地滤波并且也不知道其幅值。它们也可能是由于高压直流换流站设计后的工业发展出现在线路上。此外，来自这些源的电流可能被交流电网内部的谐振放大。因此，很难预测有多少电网谐波电流可能会流入低次滤波器，而且低次滤波器曾因这些过负荷跳闸或者损坏。滤波器的过应力设计是唯一的解决方法，但是预计需要过应力设计到何种程度以保证安全性是很困难的，并且会导致滤波器很昂贵。

因此，为了尝试避免安装低次滤波器，研究低次谐波问题时，精准建模是可取的。用户宜了解情况，并且做好与投标者就技术规范各个方面进行讨论的准备，例如，规定的交流系统阻抗包络、规定的负序电压水平或者单次谐波电压限值，这些可能迫使承包商在设计中包括低次滤波器支路。

7.2.2 包括 5 kHz 范围内谐波的干扰因数规定

在大多数 LCC 高压直流技术规范中，交流滤波器性能需考虑的最大谐波次数为 50 次。然而，少数 LCC 高压直流规范将范围扩大到更高的频率，例如 60 Hz 时的 83 次谐波，也就是 5 kHz。如果考虑的谐波次数高于 50 次，对滤波器设计和成本的影响会很显著，用户要仔细考虑后再提出这种要求。随着越来越多的 VSC 换流器的建设，这一要求变得越来越普遍，CIGRE 技术手册 754 中提供了更多详细信息。

模拟电话线路上的标准通信，不宜受到由高压直流换流器产生的、在 50 次谐波和 5 kHz 之间的较高频带谐波水平的显著影响。但是，如果交流滤波器设计不包括高通阻尼滤波器，那么就会在调谐交流滤波器和交流系统之间产生潜在谐振条件。需要进行研究以避免在附近的电话通信系统中产生过大的干扰。为保障研究的真实性，对主要元件（例如线路、变压器和负载）的频率特性合适建模非常重要。但是，在高频范围内，频率特性是未知的，并且如此详细的研究通常是不可行的。

如果换流站中使用了高通阻尼滤波器，注入交流系统的高次谐波可以忽略。但是，使用足够大并且有足够阻尼的高通滤波器来满足在扩展的频率范围内严苛的性能指标，可能会大幅度增加滤波器的成本和损耗。

因此用户面对着进退两难的局面——如果技术规范将性能要求限制在 50 次谐波，那么投标者可能会发现具有竞争力的设计，是在特征谐波上使用双调谐滤波器并且在第 50 次谐波频率以上呈电感性阻抗设计。这种设计可以满足规范的要求，但是在更高频下可能与交流系统产生谐振，将本可以忽略的谐波放大。

尽管如此，如果用户将频率范围扩大到比如 60 Hz 的第 83 次（或 50 Hz 的第 100 次），而且如果规定的电话干扰因数(TIF)等典型限值使用的最大谐波为 50 次，那么可能需要相当大的高阻尼滤波器，造成相当大的额外成本。

因此用户在将交流滤波器性能规定的频率范围扩展到 50 次以上前宜仔细考虑这些选择。可以考虑以下两种可能的替代方法：

- 性能要求只规范到 50 次谐波，但是另外规定在 50 次以上谐波交流滤波器必须具有阻尼特性（也可以规定 50 次以上的谐波所允许的最大阻抗角）；
- 性能要求只规范到 83 次谐波，但是相应提高 TIF、电话谐波波形因数（THFF）或方均根电流 I 与 TIF 的乘积（IT 乘积）的最大限值，以避免滤波器设计不必要的花费。

7.2.3 三调谐滤波器

由于高压电容器组和交流开关设备的成本降低,证明调谐频率大于一个的滤波器设计是合理的,双调谐滤波器多年来作为无源交流滤波器的标准设计。在一定情况下,如果可以有多个的调谐频率,那么可进行进一步优化。在很多工程中,制造商已经确认了如果提供三调谐滤波器将节约成本的优势(也可见 IEC TR 62001-1)。

三调谐与单调谐或双调谐滤波器相比较复杂,但已具有可行性。除此之外,如果滤波器只需要在一个频率调谐,而在其它两个频率有宽带阻尼特性,较易实现足够精确的调谐。

如果在高交流系统电压下要求滤波器组容量较小,那么三调谐滤波器通常是有吸引力的。为了得到经济的高压电容器设计,在一个滤波器组中滤除几个主要谐波是理想的。如果有必要,可以使用附加的阻尼电阻器实现高通特性。

以下要求也会导致需要考虑三调谐滤波器作为解决方法:

- 无功功率控制的运行要求限值窄;
- 严苛的 THFF 或 TIF 电压畸变率,同时要求低 IT 乘积限值;
- 靠近发电机的滤波器无功功率设备最小化;
- 低次滤波与 12/24 次交流滤波器相结合;
- 节约交流开关设备和空间;
- 在低负载状态下,3/12/24 次三调谐滤波器与 3 次单调谐和 12/24 次双调谐滤波器相比无功功率低,从而减少对并联电抗器的需求;
- 对使用的所有类型的滤波器来说有更高的冗余。

除更复杂的现场调谐以外,需考虑的可能存在的缺点(也见 IEC TR 62001-1:2021, 6.4.3)有:

- 调谐电容器熔丝的灵敏性;
- 满足所有元件保护的电流互感器数量,或未保护的低压元件的可能的过应力。

因此用户和承包商宜考虑到所有上述因素,并且如果使用三调谐滤波器是最经济方案,认真考虑是否使用三调谐滤波器。

7.2.4 换流变压器第三绕组的交流谐波滤波器

一些额定功率大约为 200 MW 到 300 MW 的高压直流换流站,在换流变压器的第三绕组侧安装了交流谐波滤波器,例如黑水(Blackwater),麦克尼尔(McNeil)和维堡(Vyborg)高压直流换流站。

通过连接较低电压降低了最小电容器组额定值的经济限制,所以有望节约滤波器回路的占地和投资成本(包括交流滤波器断路器)。此外,整流侧和逆变侧元件相同的电压和容量设计,可以通过为背靠背换流站提供最少数量的备件而节省成本。此外,根据该方法,滤波电抗器可以接在第三绕组滤波器的线路侧,从而滤波电容器可以按照简单的三相布置来制造,与传统的高压滤波器设计相比简化了交流滤波器的保护。

宜考虑到滤波器的停运。所有备用或冗余滤波应在在变压器而不是换流站基础上提供,这会明显降低成本优势。滤波器可通过使用无载隔离开关,以允许在不增加故障水平的情况下共享。

根据这种方法,滤波器和高压系统之间串联的变压器阻抗,减少了高次谐波的作用,并且简化了滤波器的布置(只在高次频率需要高通滤波器)。如果需要并联电抗器,第三绕组母线连接(典型的电压范围在 30 kV~60 kV),允许提供与油浸式高压并联电抗器相比更加经济的空心电抗器。

与传统方案相比变压器的成本将增加,需要将滤波器区域的节省与此进行比较,以确定最佳方案。还宜考虑与换流变压器有关的以下方面。

- 附加的第三绕组必须按照短路负载方式设计,并且从第三绕组到高压母线绕组的漏抗相对较低。
- 变压器的可靠性较低。
- 四绕组换流变压器不是标准的设备,并且对系统研究来说需要承包商开发出细致的变压器模型,以验证所有的假设和额定值。

- 换流变压器阻抗的选择应反映将短路电流限制在可接受限值的要求，但是从另一方面来说，变压器阻抗的选择对交流滤波器总的谐波性能有影响，而且需要以将滤波器回路和交流系统之间的谐振阻尼到最小的方式进行选择。
- 在计算无功功率补偿时，第三绕组滤波器母线的电压分布应予以考虑，并且通常要求的无功功率补偿高于安装在高压母线上时。

7.3 额定值方面

7.3.1 限制滤波器并联谐振回路中的大谐波电流

双调谐和三调谐滤波器包括并联谐振回路，这将在调谐频率之间产生反谐振点。对于这些回路中元件的电流和电压额定值，谐波频率下的阻尼是非常重要的因素。除非该回路中含有单独的阻尼电阻器，否则循环的谐波电流主要受电抗器电阻的限制。在提供具有大谐波电流额定值的 L - C 元件的可行性，和选择加强损耗的电阻性阻尼之间进行优化，是滤波器设计者的一项重要工作。

如果在特殊情况下，电抗器的品质因数应被减少到无法达到的情况，可在滤波电抗器线圈、滤波电容器上串联附加的阻尼电阻器或在电抗器上增加降低 Q 值的绕组。

7.3.2 多调谐滤波器并联回路中的暂态额定值

对于双调谐和三调谐滤波器，经验表明低压调谐回路元件的暂态额定值在滤波器设计中是非常重要的。因此建议在相关元件规范中包括最严苛情况下暂态电压应力的典型波形图。

在某些回路阻尼很低的情况下，对于电容器电压额定值的决定性电压-时间曲线，例如 NEMA 特性，应考虑电压谐振。电容器两端的暂态电压用于电容器单元内部的绝缘设计。

对低次谐波滤波器来说，由于变压器饱和效应引起的谐波电流的注入，可能产生幅值极大的暂态低次谐波电流和电压。对于这些滤波器元件，其暂态电流、电压和能量消耗可能成为决定因素。承包商有义务确定这些额定值并且证明滤波器的设计是充分的。不同元件最严苛的工况必须在不同的研究工况下、针对不同负载和交流系统条件而更改的故障发生、故障持续时间以及故障排除情况挑选出来。

7.3.3 高通谐波滤波电阻器的过负荷保护

如果在高通滤波器中提供电阻器，在紧急情况下，不同过载条件的工况都会作用在电阻器上。这些工况下需核查电阻器的保护方案和短时过负荷额定值。典型的例子如下

- 滤波器配置与负荷不匹配，
- 滤波器回路中的内部故障或断开，
- 换流器的误操作，
- 紧急系统条件下的频率偏差，
- 交流系统阻抗未来的改变，导致滤波器和交流系统谐振。

在一些高压直流方案中，电阻器不是直接由电流互感器保护。制造商的保护方案包括有用滤波器回路侧得的其它值来计算电阻器应力的能力，作为继电保护方案的输入。但是，如果要求，也可以提供附加的电阻器电流互感器和相关的保护功能。建议在规范中涵盖特定电阻器的保护要求，但是作为选择，要求投标者根据实际经验和设计理念提出另外的解决方案供投标评估阶段进行讨论。

7.3.4 滤波器或并联电容器的背靠背投切

背靠背投切是指母线上还连接有一个或多个其它组时，一个滤波器组或并联电容器组的投切。这种操作会在投入的滤波器或电容器组中引起高的涌流。

如果使用调谐滤波器，调谐电抗器足以限制这些涌流。如果在该设计中有一个或多个并联电容器，建议在并联电容器组中提供附加的限流电抗器以阻尼各个支路间的放电。断路器设计方面见 11.7。

另一个可以获得的附加优点是，如果选择了限流电抗器那么并联电容器组可以调谐到更高次的特征谐波，或在只安装了 12/24 次滤波器的情况下调谐到频率略低于 35 次谐波。用这种方法，滤波器和并联电容器之间的并联谐振就可以避开所有高于 25 次的 12 脉波特征谐波，并且可能转移到非特征频率。

7.3.5 短时过负荷—合理的规范要求

7.3.5 讨论如何合理规定由于系统紧急情况引起的滤波器固有短时过负荷程度。以下系统紧急条件会导致滤波器元件的短时过负荷：

- 交流系统短时过电压；
- 交流系统短时频率偏差；
- 高压直流换流器短时过负荷。

频率偏移、滤波器元件的失谐以及交流母线电压水平的所有组合，都需要进行研究以确定最严苛的负荷条件。

例如，考虑的典型短时持续时间可以分为：

普通系统条件：持续时间 10min~2h

被干扰的系统条件：持续时间 1min~10min

紧急系统条件：持续时间 1s~60s

同样，当为关于寿命和风险的所有要求进行滤波器元件设计时，宜清晰地规定合理的工作循环。规定也宜反映系统工作循环最初和随后的系统条件。

显然，滤波器元件的决定性应力不由异常的短时持续时间确定是可取的。通常，根据稳态条件适当确定额定值的滤波器元件也将耐受短时条件。但是，这些条件必须经过计算并且检验滤波器元件的短时能力。

如果证明短时条件是决定性的，用户和承包商宜一起考虑按照所讨论的短时条件规定是否经济合理，或者在这种小概率情况下是否宜允许滤波器跳闸。也宜分析短时条件和最大失谐条件结合的可能性。

下面讨论了短时负荷对不同滤波器元件的影响：

a) 滤波电容器

短时基频过电压对于电容器的额定电压可能是决定性的。最严苛的谐波电压负载情况下，电容器包括固有的过电压能力，只要最大谐波电压和短时过电压不同时出现。如果将稳态谐波额定值和短时系统过电压叠加，两者的叠加宜反映在电容器的电压-时间特性中。

在计算滤波器最大、最小程度失谐时滤波电容器两端间最大基频电压及内部最大基频电流时，宜考虑短时系统频率范围。在电容器额定值计算中包括电容器单元的退出和假设的最严苛允差，会导致电容器的最大电压和电流应力。

滤波电容器的电压和电流额定值，应针对高压直流换流器短时过负荷运行进行校核。但是，通常对于换流器过负荷条件，所有的滤波器和并联电容器都是通电的，因此每个滤波器的负载通常没有假设滤波器分组停运、部分负荷条件下出现的紧急情况严重，那些情况有助于决定滤波器的额定值。

b) 滤波电抗器

对于滤波电抗器，电流应力是最关心的。规定的稳态额定值需要针对短时过负荷应力进行校核。

c) 滤波电阻器

由于功率的关系，滤波电阻器是对过负荷最敏感的元件。过负荷应力取决于上述所有影响。在一些近期的工程中，研究表明电阻器的额定值是考虑短时过负荷的关键点。

有必要详细计算以确定滤波电阻器最严苛的短时过负荷。

7.3.6 无熔丝的低压滤波电容器

对双调谐和三调谐滤波器的结构来说,低压电容器通常不受基频电流和电压的作用。因此这种电容器的熔丝(若有)要针对谐波电流应力进行设计,谐波电流应力根据换流器的负载条件和运行中的交流滤波器的实际数量和类型变化。因为变化的负载条件,熔丝的动作电流应与最严苛工况下电容器单元的最大电流负载条件相配合。

动作电流低于额定值时,由于电流中没有主要基频分量,熔丝无法排除故障的电容器元件。通常,低压电容器将采用无熔丝设计并降额定电压运行,从而在稳态条件下介电元件故障的可能性可以忽略不计。在某些情况下,低压电容器按照非常高的谐波电流应力进行设计(由于滤波器组的失谐和停运)。例如,在一些滤波器中,双调谐滤波器低压元件的11次和13次谐波电流要求高达1 000 A(方均根值)。

7.4 特殊滤波器

7.4.1 用于阻尼暂态过电压的谐波滤波器

在一些高压直流工程中,低次谐波滤波器既用于稳态滤波也用于暂态滤波。限制换流站母线暂态过电压(TOV)的暂态滤波器,可以被用于限制交流母线故障或甩负荷后换流变压器的饱和过电压。如果交流母线的短路水平非常低,过电压可能相当高。

在变压器饱和期间,如果交流系统阻抗与交流滤波器在靠近二次和三次谐波处谐振,那么由注入变压器的谐波电流引起的二次和三次谐波暂态过电压可能非常高。这样就需要在采取其它措施(例如滤波器跳闸、SVC运行等)之前,把滤波器设计成可在第一峰值时间吸收高水平能量以及阻尼饱和过电压。与故障之前的母线电压相比,保持稳态的甩负荷电压在1.1p.u.和1.2p.u.之间是比较理想的。

例如,1 000 MW的沙托盖(Chateauguay)高压直流换流站安装了两个滤波器组(2×135 Mvar 二次谐波高通滤波器)。为确定在滤波电阻器和滤波避雷器中消耗的总能量进行了专门的设计研究。

7.4.2 低次谐波、暂态过电压的非线性滤波器

对于非线性滤波器,可以要求针对两个不同的滤波性能要求进行设计。这两种要求是稳态范围内的滤波,和在故障恢复期间为阻尼或限制暂态、暂时过电压的暂态非特征谐波滤波。该滤波器的非线性特性是通过将非线性金属氧化物避雷器与其它滤波器调谐设备串联产生的。

作为上述7.4.1讨论内容的替代方法,已设计出特殊滤波器,并成功地运行于奥地利的杜恩罗(Durnrohr)和维也纳东南(Vienna South-East)高压直流换流站。对于特殊的交流系统配置,进行了各种研究以发现暂态和瞬态过电压的最严苛情况。交流系统中的阻尼相对较低,变压器的过电压饱和现象会造成低次谐波过电压与基频过电压叠加,并且在交流系统低短路比(SCR)运行情况下,交流系统的低阻尼会将其放大。这些过电压的产生多数都是无阻尼的,并且交流断路器通常也不足以排除这些故障过电压。研究建议将SVC装置与低次谐波滤波器相结合,以限制暂态和瞬时过电压包括变压器饱和。

杜恩罗和维也纳东南高压直流换流站安装的二次和三次非线性滤波器配置如图6所示。这种滤波器的配置在基波频率下几乎没有损耗,同时通过一定的触发水平(由避雷器的配置决定)嵌入它的滤波能力。滤波器内部的一组并联避雷器控制着滤波器的稳态和暂态阻抗。避雷器是根据故障条件下的最严重能量损耗进行设计的。

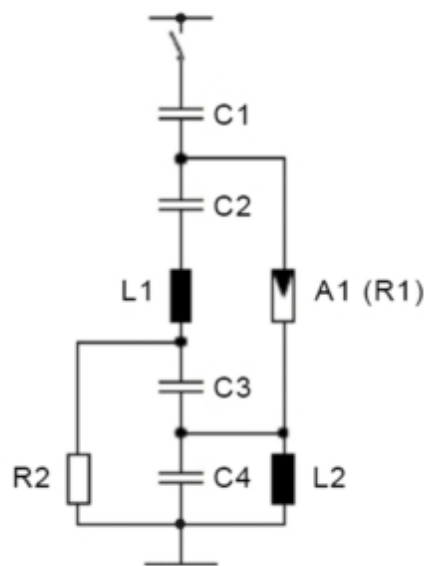


图6 维也纳东南高压直流换流站的非线性低次滤波器

7.4.3 高压直流换流站的串联滤波器

已有交流谐波滤波器的研究和经验几乎全部基于并联滤波器。关于串联和并联滤波器混合结构的研究主要基于伊泰普(Itaipu)工程,这对于巴西乌鲁圭亚纳(Uruguaiana)和加拿大渥太华(Outaouais)的实际应用提供了很好的运行经验。

如果滤波要求需要串联滤波器,用户宜指定是否可以绕过滤器继续使用高压直流方案,而不会降低滤波器谐波性能。

串联滤波器在功能上和用于电力线路载波的阻波器很相似,并且由一个电感器(通常1 mH ~ 4 mH 范围内)和串联在一起的电容器和电阻器并联组成(见图7),调谐至单一谐振频率。如果要求多个谐振频率,可以串联若干这样的滤波器回路,并将每个都调到特定的谐波频率。也可以使用多调谐串联滤波器(见图8),提供两个或多个阻抗峰值(如需要,也可包括载波、无线电频率的阻抗峰值)。用于滤除一定范围内高次谐波的阻尼带阻特性也是可以实现的。

上述提到的研究指出,把换流器当作谐波电流源时,串联滤波器只有当和相对较低的阻抗并联时才有效果,例如可以由电容器组、并联滤波器得到的。因此串联滤波器宜在串联和并联滤波器的混合结构中使用(见图9)。

根据工程的具体要求以及经济评估,对于整个换流站可使用一个安装在并联滤波器母线和交流线路母线之间的串联滤波器,或与交流换流站相连的每条线路安装一个串联滤波器。对于整个站用一个滤波器这一方案,由于可靠性考虑,串联滤波器宜由几个等效的并联支路组成。

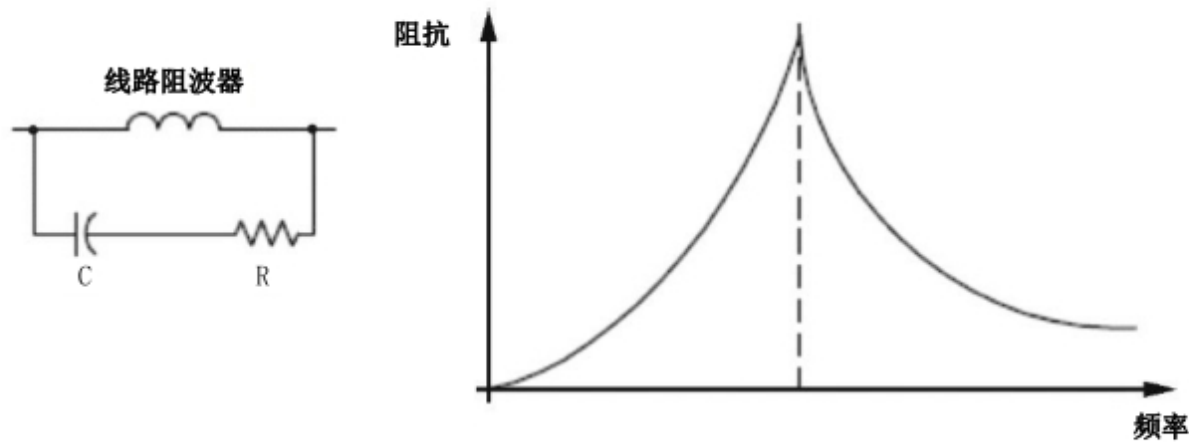


图7 单调谐串联滤波器和阻抗图

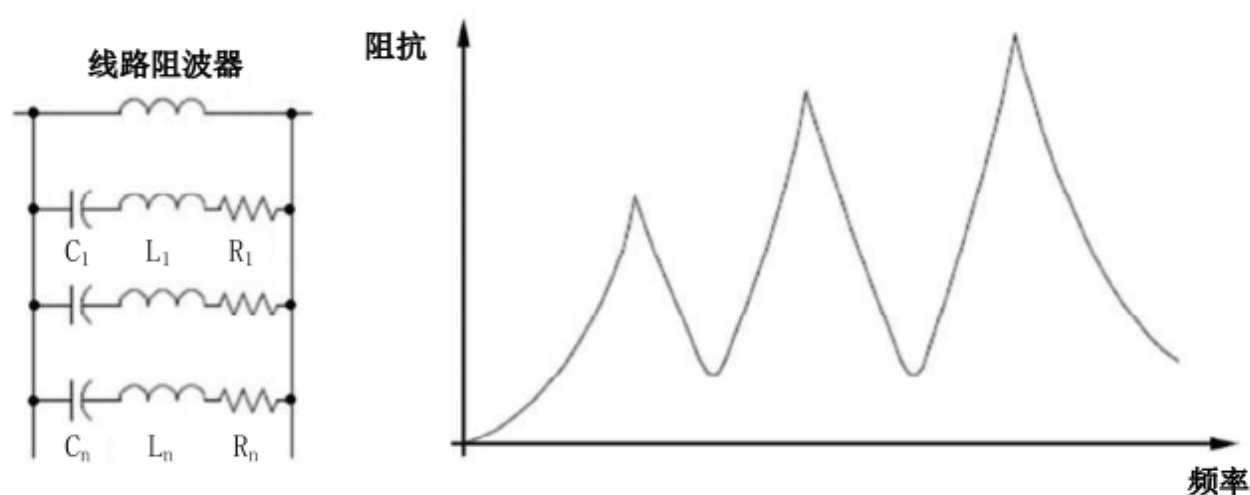


图8 三调谐串联滤波器和阻抗图

串联滤波器的优点有：

- 与并联滤波器相比电容器单元较少且滤波电抗器尺寸较小；
- 占地较小；
- 不需要断路器和相应的开关设备，只需要并联的断开开关（假设开关可以排除故障的并联负载支路，或若可接受无冗余方案）；
- 保护设备最少化。

串联滤波器的缺点有：

- 主电抗器应承载基频线路电流；
- 短路故障的电容器、过电压保护昂贵；
- 与常规并联滤波器相比，不提供无功功率；
- 若提供高通电阻器，电阻器损耗相对较高；
- 需要按大短路容量设计设备；
- 保护设备的额定电压宜为交流母线全压；
- 可能引起基频或次谐波谐振以及稳定性的问题；
- 保护方案相对复杂。

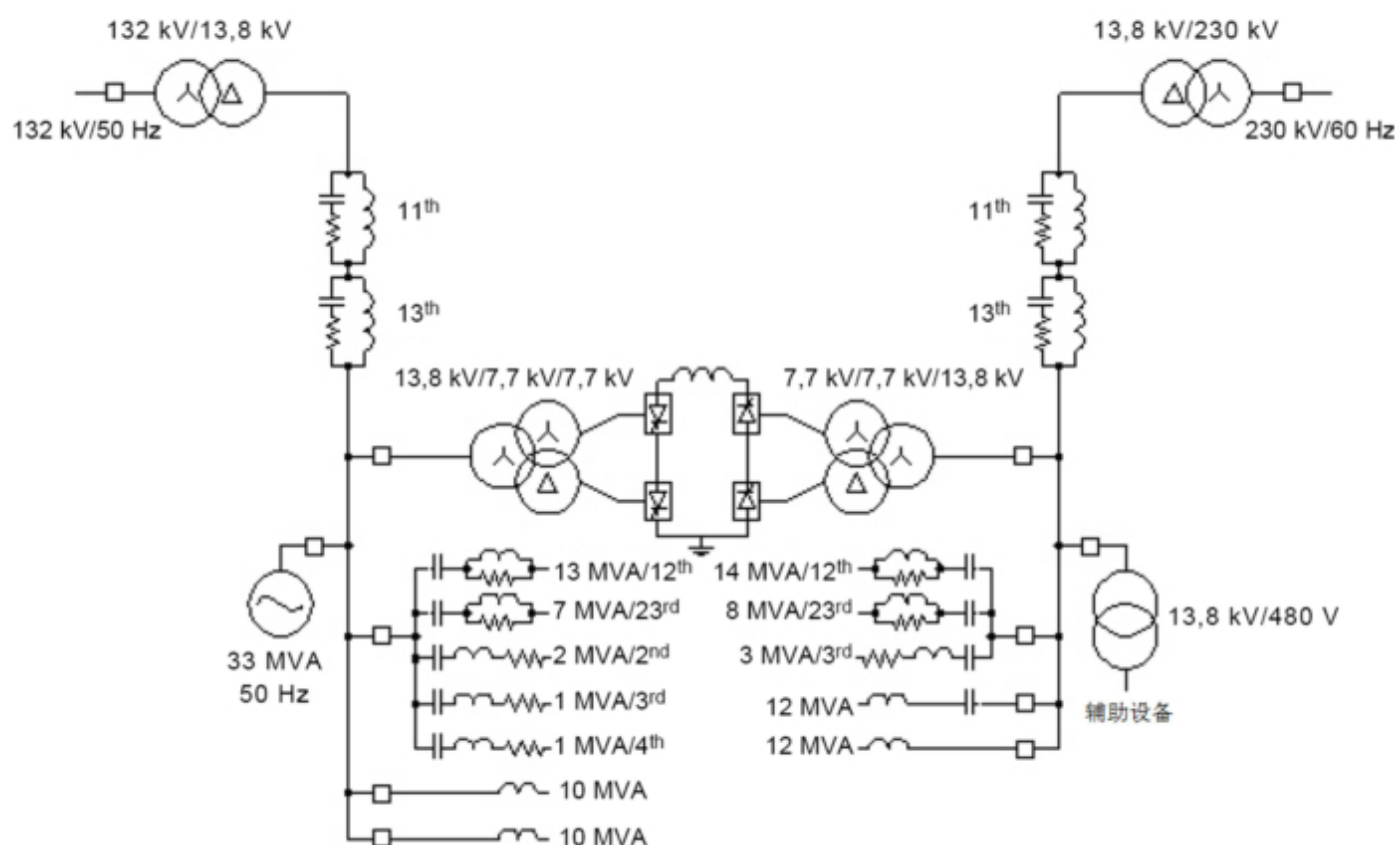


图9 乌鲁丰亚纳高压直流换流站的串并联混合交流滤波器

有几个特殊的谐波性能要求、换流站设计要求的应用可证明考虑混合滤波器配置是合理的。以下讨论了对于研究混合方案的一些应用特性。

- a) 当交流系统最小的低阻抗与进入交流系统的谐波电流的限制要求相结合, 并联滤波器方案难以满足给定的条件。
- b) 在土壤电阻率较高的地区 (高于 $1\,000\ \Omega\cdot\text{m}$), 电力线路和电信线路之间的耦合高, 并且潜在的干扰问题可能决定交流系统中的谐波电流限值非常低, 此时最好使用串并联混合滤波器。
- c) 连接的交流系统包括重要的并联滤波器组、地下电缆的应用, 这些电容器为高次谐波产生低阻抗点, 使谐波电流的主要部分流入交流线路。串联滤波器是限制这些电流和由此产生的干扰水平的最经济的方法。
- d) 串联滤波器把流入交流系统的谐波电流限制到期望水平的能力, 与从换流站看过去的交流系统的等效谐波阻抗无关。特别是考虑到在获得实际等效阻抗时的常见困难, 尤其是对于交流系统未来的扩展上更是如此。
- e) 在轻负载期间的稳态电压控制、换流器闭锁期间的过电压控制, 对并联滤波器尺寸增加了限制、要求使用并联电抗器的应用中, 混合的滤波器结构提供了有吸引力且经济的解决方案, 因为对于相同的滤波性能该配置显著减小了需安装的并联大组容量。
- f) 在基本只要求控制注入交流系统的谐波电流的情况下, 宜研究混合方案, 因为方案的并联部分可以限制到仅用一台简单的电容器, 这由换流站的无功要求决定, 并且串联部分仅为单一的电抗器。

在对伊泰普方案进行的分析中,在研究改善伊泰普高压直流系统逆变站及与其相连的交流系统干扰性能时,考虑了混合滤波器的使用,与被分析的其它方案相比效果很好。在这种情况下,需要解决的主要问题是极高的土壤电阻率(3 600 W-m)和交流系统中极高的电容(电缆和 345 kV 大容量并联电容器组)的影响。

乌鲁圭亚纳背靠背中安装混合滤波器是由于电压和过电压控制,以及规定的谐波性能要求。根据谐波性能要求,使用并联滤波器方案要安装的无功功率为 72% (基于 $P_{av} = 50 \text{ MW}$),但这使得进行稳态电

压和过电压控制成为不可能。使用混合滤波器的话，50 Hz 侧的并联滤波器只需要 24%就可得到同样的谐波性能，但是由于站无功要求必须提高到 48%。

在以后的混合滤波器配置使用研究中，宜检查这种滤波器对换流站的设计和性能的下述影响。

- 1) 短路比 (SCR) 会减小，可通过减小换流变压器的电抗进行补偿，但这种方案会在一定程度上增加换流器产生的谐波电流；
- 2) 若在调节混合方案串并联部分的阻抗角时出现误差，可能会使与交流系统连接点的谐波电压增加；
- 3) 混合方案可能影响换流站运行的灵活性，要求额外的负载投切设备。

确定包括额定值的混合滤波器方案程序与用于并联方案的常规方法没有太大的不同。

7.4.4 可再调谐流的滤波器

在特定的情况下，对交流滤波器临时再调谐使其对不同的频率滤波可能是一个可选项，以下举例说明。

对于魁北克/新英格兰 (Quebec/New England) 多端高压直流系统，拉迪松 (Radisson) 和尼高力 (Nicolet) 换流站都使用了可再调谐的交流滤波器。在这两个站中，作为改装行为来解决原来的滤波器安装后引起的问题。

在拉迪松站，该方案被用来避免一定的系统条件和存在地磁感应电流 (GIC) 的情况下，交流侧 5 次谐波和直流侧 6 次谐波的相互作用。当交流侧 5 次谐波大于预期值时，打开开关 S1 就可将 36/48 次交流滤波器重调谐至 5 次谐波 (见图 10)。当条件回归正常时，运行人员就可合上该开关。

在尼高力站，该问题是由 3 次和 5 次谐波附近的系统谐振引起的。24 次和 36 次单调谐滤波器被改装为分别允许再调谐至 5 次和 3 次谐波。

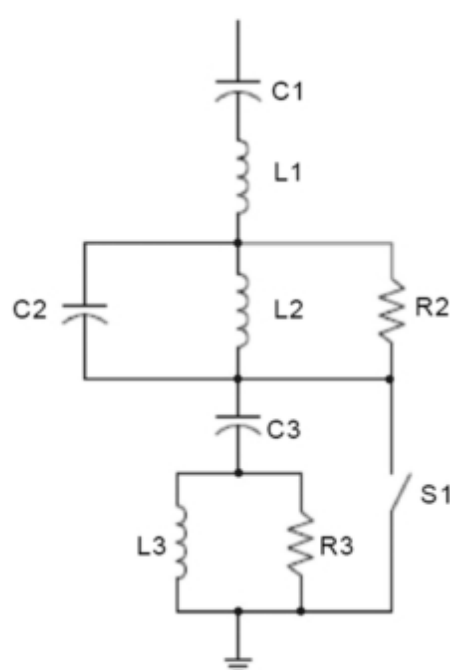


图10 可再调谐滤波器支路

7.5 已存在的站附近新高压直流换流站的影响

大量增加的规划中或建成的新高压直流线路,使它们的终端站位于离已存在的高压直流换流站电气距离很近的位置。这要求适当考虑已存在换流站交流滤波器的性能和额定值,与新换流站的附加设计的额外要求的影响。目的是尽可能地设计新换流站滤波器,使得不用更改已存在换流站的滤波器。

CIGRE 技术手册 364 和 798 更深入地讨论了在这种情况下需要考虑的一些问题。

设计新换流站滤波器时要考虑的性能方面的因素有:

- a) 性能参数限值宜在适当考虑对已存在换流站的影响的前提下规定。此时可参考 CIGRE WG14.03/CC.02 (JTF 02) 和 CIGRE WG14.03/cc.02 (JTF 01);
- b) 发电机谐波电流限值,如适用时,宜使总的有效注入电流不超过允许的限值;
- c) 宜考虑已存在的站和新站滤波器之间的谐振效应;
- d) 用于设计计算的交流系统谐波阻抗的确定宜适当考虑已存在站及其滤波器。

要考虑的额定值方面有:

- 宜考虑来自已存在站的附加谐波。通常,在设计中和交流系统谐波一同考虑,换流站的谐波按照一定的百分比增加;
- 由于已存在站相似频率滤波器退出运行引起的额定值增大;
- 由于已存在站和新站滤波器之间可能的谐振,引起额定值增大。

技术规范宜包括已存在换流站中交流滤波器设计的所有细节或使其可用,包括以上列出的在设计新滤波器时要考虑全面的充足信息。在承包商方面,技术规范宜清晰界定用户和承包商关于两个站的交流滤波器的责任。

7.6 冗余和备件

7.6.1 滤波器冗余-降低额定值和损耗

高压直流站交流滤波器的现场经验通常显示了非常高的可靠性水平,滤波器元件设计的不断改进趋向于进一步提高可靠性。因此有通过消除对冗余滤波器的要求减少成本的讨论,特别是在相对低功率的高压直流方案中。

但是,滤波器回路的冗余可以提供很多的好处,即使冗余系统的投资成本略高于其它优化后的滤波器方案。除了提高换流站的可靠性、可利用率外,冗余还可降低单个滤波器支路中的滤波器损耗和元件额定值。

如果因为无功要求需要一个并联电容器,那么将其转换为一个额外的滤波器支路以提供更多的冗余是值得的。

这些概念可基于近期经验通过一个例子说明。假设在额定负载时要求单位功率因数,两个非常经济的使用双调谐滤波器的方案 a) 和 b) 是可能的。这两种方案的优缺点比较如下。

- a) 采用两个双调谐滤波器和一个附加的并联电容器的方案

在这种情况下,假设两个几乎相同的冗余滤波器,在谐波性能和无功功率控制方面能提供充分的特性。常规做法是换流器带一个滤波器从轻负荷条件开始,然后第二条支路将在 40%到 50%额定负荷时带电。直到额定负荷满足典型的谐波性能要求。为满足额定负荷时的单位功率因数要求,只需要再添加一个简单的并联电容器组。

与方案 b) 相比,优点为:

- 简单的滤波器布置和冗余 (2 组退 1 组);
- 节约了低压滤波器元件和占地要求。

缺点为:

- 如果滤波器按照在所有负荷下有任意一个滤波器支路退出进行设计 (在整个运行范围内,两个滤波器支路退出一个),那么滤波器元件的额定值较高。这对谐波电流的额定值以及高通阻尼电阻器的额定功率有很大影响;

——换流器较高负荷范围内的滤波性能比方案 b) 差。同样可预料运行损耗较高。

b) 采用三个相同的双调谐滤波器的方案

该方案采用三个相同的双调谐滤波器，不使用并联电容器。

该方案优点为：

——当一个滤波器支路停运时，可利用率更高且谐波性能更好（3 组退 1 组）。这种情况下剩余回路中的谐波性能和元件应力都低于方案 a)；

——滤波电抗器、电容器和电阻器的元件额定值与方案 a) 中相比明显更低。因此该方案采用的滤波器元件更便宜，特别是滤波阻尼电阻器。

由于谐波损耗是滤波器损耗的决定因素，所以运行损耗很低。

缺点为：

——回路中低压滤波器元件数量的增加导致了比较复杂的回路布置，增大了空间要求。

通常建议校核方案 a) 和 b) 中更可靠和经济的方案。该评估应考虑到元件成本、运行的滤波器损耗评估和交流滤波器布置的总体可靠性和可利用率。

7.6.2 滤波器内部冗余

除了电容器，滤波器内元件的冗余不经常使用。根据电容器熔丝的类型是内熔丝还是外熔丝，某些附加的电容器元件、电容器单元可作为电压冗余。但是滤波器内部的实际冗余是不可能的，因为电容器单元内的每一个故障都增加了其它电容器元件上的电压应力，而且会使滤波器回路失谐。

正常运行条件下和熔丝熔断后的电压应力可用两种方式降低和优化：

a) 细分内熔丝电容器元件，

b) 整个电容器组的额定电压更高，将减少电容器元件、单元击穿的可能性。

另外电容器细分的越小，熔丝熔断时滤波器失谐越小。另一方面，电容器细分越小，就有更多的熔丝要被熔断，熔断熔丝的整体失谐允许量可能不会太小。

桥式连接的电容器组布置不增加耐压或冗余。桥式连接只用于通过灵敏测量熔断熔丝，进行电容器不平衡保护。

一个重要的设计问题，是在要求维护和替换电容单元前，有多少熔丝可以熔断（这使得电容单元是并联还是串联连接没有区别），需考虑：

——电容器电压应力，

——超过规定偏差的滤波器失谐。

通常，对于允许的滤波器失谐故障的电容器元件数量，远小于允许的电压应力对应的数量。

7.6.3 备件

滤波器元件备件的最佳数量主要取决于冗余要求。在没有提供滤波器冗余的情况下，例如在一些斯堪的纳维亚（Scandinavian）方案中，希望所有类型的滤波器元件都宜储存在换流站或其附近。为缩短故障后的停运时间，建议备用安装成整套的滤波器元件，例如滤波电阻器。

在要求滤波器冗余的情况下（2 组退 1 组或 3 组退 1 组），根据要求的关于滤波器性能或额定值的冗余类型，备件的解决方案可能不同。如果冗余只与额定值有关，建议沿用上述的无冗余情况下的建议。但是如果冗余要求也包含滤波器性能，可能就不要求整套备件。例如每种类型只需要一个备件（每种类型一个绝缘子、一个电阻元件等）来代替整个电阻器，包括构架和绝缘子。

每个类型的滤波电抗器都需要储备一个备件。对于滤波电容器，每种类型宜提供最小数量的电容器单元。因此，如果考虑所有因素在经济上具有吸引力，将滤波器设计成对交流滤波器的每个单独类型使用同样的电容器单元是理想的。

8 保护

8.1 简介

安装的滤波器的保护类型，很大程度上取决于不同交流滤波器支路的配置，和承包商的日常实践以及优选的保护技术，也可能受到保护要求和滤波器性能要求的影响。交流滤波器保护设备的详细规定通常由承包商确定。

因此技术规范通常仅限于有关保护的通用要求、冗余要求、接口规范以及任何用户的特定要求。这样既保证了用户的利益，同时也使承包商能最大范围的选择解决方案。

然而，用户宜充分了解交流滤波器保护的不同技术，并在投标评估阶段做好准备，以保证投标者提供的解决方案满足用户的整体技术要求。本章中给出的信息主要是向用户提供与投标者进行技术讨论阶段时需要的背景信息。

交流滤波器保护相关的 IEC 标准在以下文献中给出：IEC 61869-2, IEC 61869-3, IEC 61869-5, IEC 60549, IEC 60871-1, IEC TS 60871-3, IEC 60931-3, IEC 60871-4。

8.2 概述

通常保护设备的范围和类型取决于技术要求、滤波器或并联电容器组的尺寸，以及被保护元件的成本。在以下两点中做出明确的决定：

- 防止元件损坏的保护功能（过负荷保护、不平衡保护），
- 限制元件损坏的保护功能（短路保护、接地故障保护）。

每种情况都宜将保护成本和被保护的高电压或功率元件的成本进行仔细权衡。保护设备的平均价值不宜高于被保护元件价值的 10%左右。

因此，规定每个滤波器或并联电容器组有不同类型的保护单元是不可能的。宜针对每种情况，根据电压、功率、安全标准和故障率进行选择。

尤其是对于小型和相对成本较低的元件，考虑使用具有更高电压（或功率）设计裕度的元件，是否比使用具有电流或电压互感器的专门保护装置便宜。例如，C 型滤波器配置中的低压滤波电容器。

在某些特定的电网谐振情况下，可能出现早期报警信号，所以在滤波器、交流系统配置中可自动地或是运行人员进行预定改变。

用户和承包商之间宜确定每种工况下的冗余。通常可靠性越高，成本也越高。另一方面，没有冗余的情况下，需考虑整个系统故障的影响。要考虑的因素有：

- 其它常用的交流系统标准；
- 冗余保护设备是否按滤波器或电容器组的额定功率进行确认。

一个很好的折中方法是仅对少量主要功能部分冗余。如果决定全部冗余，则主系统和冗余系统不宜使用相同的触发信号源。

作为冗余保护功能的可选项，一些功能可被保护功能所涵盖。例如，差动保护是短路保护的不完全后备保护，而接地故障保护是电容器不平衡保护的不灵敏后备保护。

承包商宜提交有关滤波器各元件主保护和后备保护，包括多重保护的总体方案。主保护和后备保护的信号最好不要来自于同一 CT。

在每个工程中，用户宜明确承包商提供以下最低标准条款：

- a) 保护原理，
- b) PT 和 CT 标准，
- c) 保护标准，
- d) 保护功能，
- e) 接口类型，高压直流控制的辅助开关、开关场控制、报警系统、事故记录系统等的类型和数量，

- f) 用户特定的要求（例如跳闸信号回路的设计），
- g) 机械标准，
- h) 辅助电压的类型和数量。

根据保护原理，滤波器组和滤波器分组中的 PT 和 CT 数量宜与母线中的 PT 一同优化。有关电磁式 PT 规划和配置的重要因素有：

- 滤波器放电的最长时间，
- 自动重合闸要求，
- 断路器配置。

滤波器接线通常为中性点固定接地的星型连接。在带有无功接地故障补偿或中性点绝缘的电网中，宜重新考虑保护的问题。

原则上，保护设计宜使得外部暂态干扰不会导致滤波器保护的跳闸信号。这种干扰包括：

- 1) 交流系统故障，
- 2) 变压器的切换，
- 3) 并联电容器的投切，
- 4) 高压直流换流器的换相失败，
- 5) 直流线路故障。

交流滤波器保护宜与交流开关场保护相配合。

8.3 组和分组的总体保护

8.3.1 概述

保护包括不止一个滤波器元件，并可保护滤波器外部元件，例如电流互感器、滤波器和接地线之间的导体。保护也有利于检测接地故障和滤波器连接损坏。

8.3.2 短路保护

根据回路的总故障阻抗，短路保护只在进线电流互感器和第一个元件的线路侧之间有效。短路继电器通常是电流互感器和滤波器之间导体保护的标准要求。根据电容器的涌流，有时需延迟跳闸信号 5 ms~10 ms。滤波器支路中的 CT 比率与线路中的 CT 比率相比可较低。对于短路电流保护，重要的是 CT 足够精确，以便能在二次回路中重现具有全直流偏移的短路电流。

8.3.3 过电流保护

通常过电流保护同样是标准保护要求，有时与短路继电器功能相结合。由于只有电抗器被真正保护，该保护对滤波器和并联电容器组不是很有效。对于电容器，外加电压而非电流，是关键因素。并且只有电容器组中存在严重故障时，才能检测到过电流。这种功能可通过反时特性或以电流定时步长的形式实现。通常不要求单独评估基波和谐波，但是好的技术解决方案能单独检验重要谐波下的过电流。这种方法是非常全面的保护。

8.3.4 热过载保护

虽然总过载保护只能保护承载主滤波电流且具有最短热时间常数的最薄弱滤波器元件，但这种保护是最重要的功能之一。因此每种工况下都宜确定，是否安装总过载保护、是否分别安装电抗器和电阻器的独立保护。因为通过电阻器的电流和主滤波电流不成比例，对于整个滤波器的简单过载保护不能保护阻尼电阻器。但是基于频率来计算电阻器和并联的电抗器之间的谐波电流分配的保护已成功应用。在单调谐滤波器中，总过载保护可用于电抗器和电容器。要注意以下讨论。

- 过载继电器的结构和功能可由简单变为最复杂。
- 决定复杂水平的基本前提，是对整个所关心的频率范围内电抗器热时间常数的了解水平。
- 由过载保护假设的周围环境温度，可作为具有最大计算周围环境温度或实际温度测量的固定设置的设计输入值。连续检查温度测量的标准功能和真实性。
- 如果没有足够的电抗器热特性知识，可选择比较简单的过载保护方案。可采用真实有效的电流测量或附加滤波器功能以增加灵敏度。
- 对于理想功能，实际电流有效值的测量是不够的。过载保护也宜考虑电抗器由频率决定的热损耗特性。电抗器的电阻取决于频率，所以每个谐波电流的计算均不同。

8.3.5 差动保护

这种保护通常只作为总体保护。差动保护只有在每相单独操作时才有效，并能稳定地防止外部故障以避免更高频率的影响。建议对输入电流采用基频带通滤波，以消除或避免这些影响。另外，由于滤波器和变压器零序阻抗之间的涌流谐振，差动保护可在投切变压器时动作。差动电流设置宜很低（为主电流的 20%~30%）。

差动保护检测相对地和相间故障，但不能检测绝缘故障，例如滤波器支路元件的击穿。

另一种差动保护是高压和低压零序系统之间的单相保护继电器。但是电流也宜针对更高次谐波的影响进行滤波。这种差动保护不能提供分相的保护方案。

8.3.6 接地故障保护

接地故障保护功能只能应用于星形中性点接地电网的接地中性点。接地故障保护对过电流或反时特性有效，并使用三相星形联结接地的电流。它是差动保护可靠但缓慢的后备功能（以及不平衡保护的粗略后备保护）。它对每个相间的不对称检测很像相间差动保护。它也检测滤波器外部的不对称信号。

对于高的跳闸阈值需要避免对外部事件的伪跳闸，跳闸信号的时间延迟宜较长，或相电流总和宜经过基频带通特性滤波，一般使用二次滤波器。这两种类型中，跳闸信号会延迟几秒钟（取决于电流设置）。

8.3.7 过压和欠压保护

与电抗器的过电压保护相同，过电压保护是电容器保护最重要的类型之一。通常母线电压是过电压保护的信号源，但是也可使用导线回路中电压互感器的电压。

在高压直流系统运行的情况下，阀控制通常可降低稳态工频交流系统过电压（非谐波）。和架空直流线路故障时的甩负荷或断电一样，暂态过电压下高压直流换流器和滤波器的快速过电压跳闸，可增加过电压的幅值。任何快速过电压保护通常在 5 ms~20 ms 的时延后，启动滤波器顺次跳闸程序。

宜根据不同工况分别确定是否需要过电压保护。

欠压保护主要是系统控制功能而不是保护功能。这种功能也可被用作联锁装置，以避免未完全放电的滤波器或并联电容器再带电。带有放电线圈的电容器放电，再充电可能在 0.3s~1s 内完成，这对于电网中的自动重合闸而言足够迅速。所有其它工况下，在不能保证快速放电时，滤波器或并联电容器对断路器的合闸信号宜联锁，以保证电容器的完全放电。

8.3.8 特殊保护功能和谐波测量

根据不同的参数，例如滤波器设计类型、交流系统条件和其它特殊要求，可能还需要附加的保护功能。这些功能可包括谐波过电流或过电压保护。

为加强这种保护，可配置快速傅里叶变换（FFT）分析模块（参考第 9 章）。

8.3.9 母线和断路器故障保护

母线和断路器故障保护不是专门的滤波器和并联电容器保护，而是一般的变电站保护要求。但是滤波器保护（可调额定值、接口、信号等）宜和所有变电站保护相配合。

8.4 滤波器元件的保护

8.4.1 滤波器和并联电容器的不平衡保护

在经济方面，电容器单元体现了滤波器的主要成本，因此电容器单元的保护是最重要的功能之一。

通常电容器组以两对相同支路桥的形式布置，每对支路都具有并联和串联电容器单元。这种结构允许采用横向连接的电流（或电压），安装很灵敏的不平衡保护。大多数情况下采用具有内熔丝的电容器元件，但是做了小改动（在熔丝动作的情况下需要更高的阶梯电流）的不平衡保护系统也可用于具有外熔丝或无熔丝的电容器单元。不平衡保护不能代替短路保护。

用于不平衡保护的电流互感器宜精心设计。一方面，CT 宜适合于短路电流，但是另一方面需要很低的变比。还需考虑 CT 的饱和特性和二次绕组负荷。宜仔细规定电流互感器的不平衡保护等级，因为电容器支路局部短路的情况下，高频暂态过程可能会出现在电流互感器上引起大电流应力。选择 CT 的饱和临界点需使得在一次绕组有大短路电流的情况下，不平衡保护的二次绕组上连接的设备不会因为过大的电流或电压而过载。电流互感器的一次绕组可由避雷器来保护。

通常，不平衡电流保护原则上是带有不同报警和跳闸整定值的过负荷电流继电器。该功能不仅检测电容器元件或电容器单元熔丝的动作，还可检测桥的所有其它不对称性，包括接地故障和开路。报警和跳闸信号的确定准则宜由承包商和用户讨论后决定。

除了横向电容器连接的过负荷电流继电器，也可采用如下其它方法

- 中性点电压检测，
- 电容器相间的电压差，
- 电容器相间的电流差。

与桥式电流测量相比，上述方法的缺点不仅是灵敏度低，而且最重要的是跳闸信号的长时间延迟。由于对于对称电网电压的高依赖性，电网的干扰会影响这些测量，因此折中是不可避免的。

在不接地的并联电容器布置中，有时使用中性点的不平衡电流测量，参考图 11。

通常，桥的固有不平衡电流可在工厂根据电容测量允差进行计算。在滤波器使用期限内，由于电压变化和主要由日光照射导致的桥臂受热不均，该固有不平衡电流可增加或减少。桥臂对称性的每种改变，例如元件熔丝的开断，都会导致不平衡电流的变化（增加或减少）。

近几年，特别是随着数字保护系统的引入，可高标准地实现解决方案，因此不再需要电容器桥臂平衡到很低的不平衡电流。

根据被保护元件的成本和重要性，宜提供具有下列特性的不平衡保护。

- a) 对不平衡电流进行基频带通滤波。这可在保护回路内消除横向桥臂内的暂态涌流振荡。
- b) 按主滤波电流的比例，对不平衡电流进行补偿，以消除电压变化对不平衡电流的影响。
- c) 对日光照射引起的不平衡电流的缓慢变化进行补偿。
- d) 更换桥臂元件后，重新调整残余不平衡电流的影响到零的电位。
- e) 滤波器断开后最终完全补偿不平衡电流值以及其与闭合后电流比较的存储。采用这种方法，可检测滤波器闭合时的熔丝故障（但对于完全动作，滤波器闭合后需要几毫秒才能启动不平衡保护）。
- f) 补偿的不平衡电流与报警和跳闸信号限值的比较。
- g) 由一个电容器元件熔丝动作以及熔丝动作的最大允许数量，引起的不平衡电流偏差值的计算。可测量和计算故障电容器元件的数量。

- h) 熔断的熔丝总数存储（也包含滤波器断开阶段）。若计算的熔丝熔断数量比预设值高，则宜给出报警、跳闸信号。
- i) 检测故障电容器元件所在的电容器桥臂支路的可能性。为此，在桥的横向连接中需要为功率方向的测量增加一个输入电压。
- j) 为故障电容器元件的数量选择不同报警和跳闸信号整定的可能性。
- k) 根据限值检查未补偿的不平衡电流。
- l) 定期记录在行式打印机或数字监测系统的不平衡电流值。

带有隔离或阻抗星形中性点接地的滤波器中，有可能构建星形连接的并联电容器组。在两个中性点之间可使用电流互感器比较两个电容器组的不平衡性。对于这种布置，电流方向测量也可检测故障相和桥臂。

8.4.2 低压调谐电容器保护

如果电容器具备降额运行能力，则不需要配置不平衡保护。

8.4.3 过载保护和滤波器失谐检测

由电流决定的过载保护只对电抗器线圈或电阻器是必要的，对于电容器并不是必要的。

根据滤波器设计，电抗器和电阻器通常位于滤波器的接地端，而电容器在高压端。也可以反过来。在第一种情况下，可使用相对较便宜的电流互感器，为过载保护测量电抗器和电阻器的电流。

对于电抗器过载条件的计算，作为对基频的补充，宜对谐波电流进行评估。

与电抗器相比，电阻器的过载保护相对容易，因为欧姆电阻较少取决于频率，而且不同谐波频率的时间常数也变化不大。电流的实际方均根（RMS）测量值作为电阻器的数字或模拟热力学模型基础是足够的。虽然取决于滤波器的设计，但通常较高次的谐波电流会导致电阻器过载，而较低次的谐波电流则往往引起电抗器过载。

在电阻器支路中有 CT 的情况下，基频电流水平可用于确定滤波器的失谐程度。如果基频接近标称值，带基频调谐旁通回路的滤波器可能在电阻器支路中具有可忽略的基频电流。

8.4.4 保护的溫度测量

到目前为止，因成本过高，对元件热点的直接温度测量方法（例如应用于变压器），还不能应用于常规滤波器元件。

8.4.5 基頻元件測量

带有串联电抗器的低压电容器（例如 C 型滤波器），常用于减少并联电阻器中的基频损耗。通过滤波得到电阻器的基频电流，电容器和电抗器可得到灵敏的附加保护（即附加的高通滤波器保护方案，见图 12）。在额定条件（额定基频）下，阻尼电阻器支路的基频电流宜减小到零。如果与滤波电抗器串联的调谐电容器因电容器元件的干扰而改变电抗，那么通过电阻器的基频电流会增加，大多数情况下比正常频率偏差时更高。

另外，电容器、电抗器的接线损坏也可采用这种方法检测。

8.4.6 电容器熔丝

电容器单元由大量的并联和串联电容器元件组成。电容器元件熔丝是一种限制单元损坏的保护形式，但不同于过载或不平衡保护设备，它们不能防止其它单元由于错误的电压分布引起的损坏。电容器熔丝只隔离故障元件。

外部并联的电容器数量以及可用的供电系统短路电流，不宜影响元件熔丝的限流能力。

电容器外熔丝可排除内部电容器单元和外部电容器套管闪络的故障。外熔丝的优点是，熔断的熔丝可通过目测快速简单地检测。缺点是当一个电容器元件出现故障时，整套电容器单元就会被断开。此外，熔丝暴露于周围环境中。外熔丝主要用于很多并联电容器单元和相对较少串联单元的中低压电容器组。

电容器单元中的每个电容器元件都有自己的熔丝，电容器内熔丝可排除电容器元件故障因而更加灵敏。

通常元件熔丝不是为电容器元件的过载保护设计的。它们应耐受仅由回路阻抗限制的高涌流和放电电流。因此，元件熔丝的灵敏度宜高于允许的最大元件电流。

内熔丝熔断的影响小于外熔丝，对于单个元件的损耗，剩余电容器元件上的电压应力相对较小。此外，内熔丝免受周围环境的影响。内熔丝主要用于有若干串联电容器单元的高压电容器组。需要注意的是，内熔丝不能提供内部连接间短路或有源元件和外壳之间短路的保护，这两种情况都可能导致外壳破裂。

11.2.2 对无熔丝电容器进行了讨论。

8.4.7 仪表互感器的保护和额定值

在有自动重合操作的辐射式电力系统中，可在重新带电前用电磁式 PT 确保电容器放电。PT 可直接布置在滤波器的导线上或变电站的其它导线上，以使得电容器和 PT 间的连接是安全的。放电 PT 的额定值宜谨慎确定。一方面，对于动态结果考虑了通过 PT 一次绕组的高放电直流电流（大约 $10\text{ A} \sim 15\text{ A}$ ），但是另一方面，计算了放电的热负载。然而，通常每个电磁式 PT 应对架空线路和电缆放电，因此电容器的热应力和动态应力通常不是问题，电容器容值与架空线的容值相当。PT 额定值的主要条件是每单位时间（1h）所允许放电次数所产生的总热负载。有必要规定和限定每小时允许的放电次数（电容器开、合周期）。允许放电次数的正常值大约是第 1 个小时内 5 次，以后每个小时内 1 次。

放电 PT 可连接在线路和地之间，也可与地隔离而连接在电容器两端。在这种情况下，二次绕组不能用于测量或保护的目的。

在没有使用放电 PT 的所有情况下，电容器吸收电荷重合闸的可能性，是确定断路器额定值时考虑的重要条件。

当无负载和 PT 并联时，与电磁式 PT 产生铁磁谐振的可能性是存在的。通常，滤波器阻抗和 PT 并联并且抑制所有的振荡。铁磁谐振的影响可通过减小 PT 中的磁感应强度（小于大约 0.6 T ）来减小或避免。

PT 更高的过电压因数（以 p.u. 为单位，高于某电压下 PT 的变比是线性的因数，通常约为 1.9 p.u. ）在有干扰时，例如甩负荷，为二次电压提高了变换的线性度。通过改变过电压因数可将 PT 的外部谐振频率上移或下移，如果 PT 内部谐振频率和谐波频率一致是有利的。

滤波器支路的 CT 大部分具有低变比。为实现所有保护，特别是短路电流保护，宜确定二次绕组真实再现了一次故障电流。

不平衡 CT 的二次绕组短路时，宜耐受一次侧短路电流的影响。

不平衡 CT 的二次绕组短路时，宜耐受一次侧短路电流的影响。

8.4.8 保护布置实例

简单并联电容器组的典型保护方案实例如图 11 所示，C 型滤波器如图 12 所示。宜注意根据给定滤波器设计的特定性能和采用的保护原理，保护方案可能会有相应的变化。

8.5 人员保护

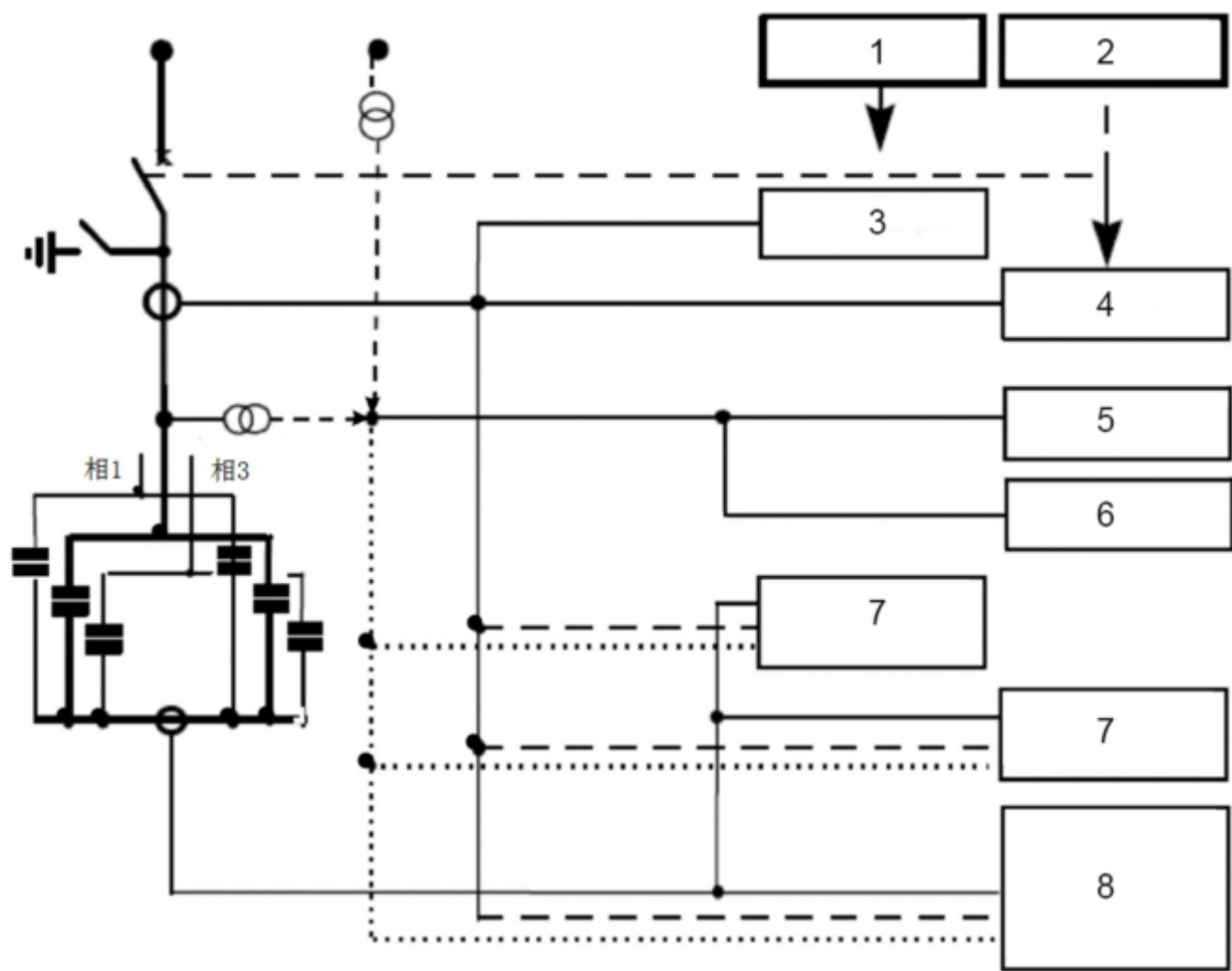
在带电前每个电容器单元宜放电。完全放电和接地是在滤波器和并联电容器回路上进行任何工作和维护前的绝对要求。

目前电容器单元通常都配备了和电容器并联的内部（或外部）放电电阻。为减少损耗（使 $\tan\delta$ 最小化），放电电阻值较高。根据最终的时间常数，放电时间可以在几分钟到 15 分钟内变化。

通常，内部（或外部）放电电阻的运行和可能的故障，不能在运行和维护期间检查。因此，断电后的电容器完全放电没有保障。外部放电电阻更容易在维护中进行检查，但是它们暴露在周围环境中存在腐蚀的可能性。

使用电磁式 PT（电容式 PT 不适合）是损耗最小化或可忽略损耗的选择之一。在断电的情况下，电容器在大约 0.3s~1s 内完全放电。PT 不必直接接在滤波器的导线回路，但是宜保证滤波电容器和 PT 之间的接线足够长，以使电容器可以完全放电。在装有未接地 PT 的悬浮滤波器回路中，对地放电宜作为附加项目单独完成。

在高压元件上进行任何工作之前，宜遵守国家和用户的相关安全工作标准。推荐在接触前使用专用设备将电容器单元接地。



- 标引序号说明：
- | | |
|-----------|----------------------|
| 1——报警信号； | 5——欠电压、过电压，第 1 步； |
| 2——跳闸信号； | 6——过电压，第 2 步； |
| 3——过电流保护； | 7——不平衡电流； |
| 4——过电流保护； | 8——不平衡电流，电容器故障的最大数量。 |

图11 不接地并联电容器的保护方案实例

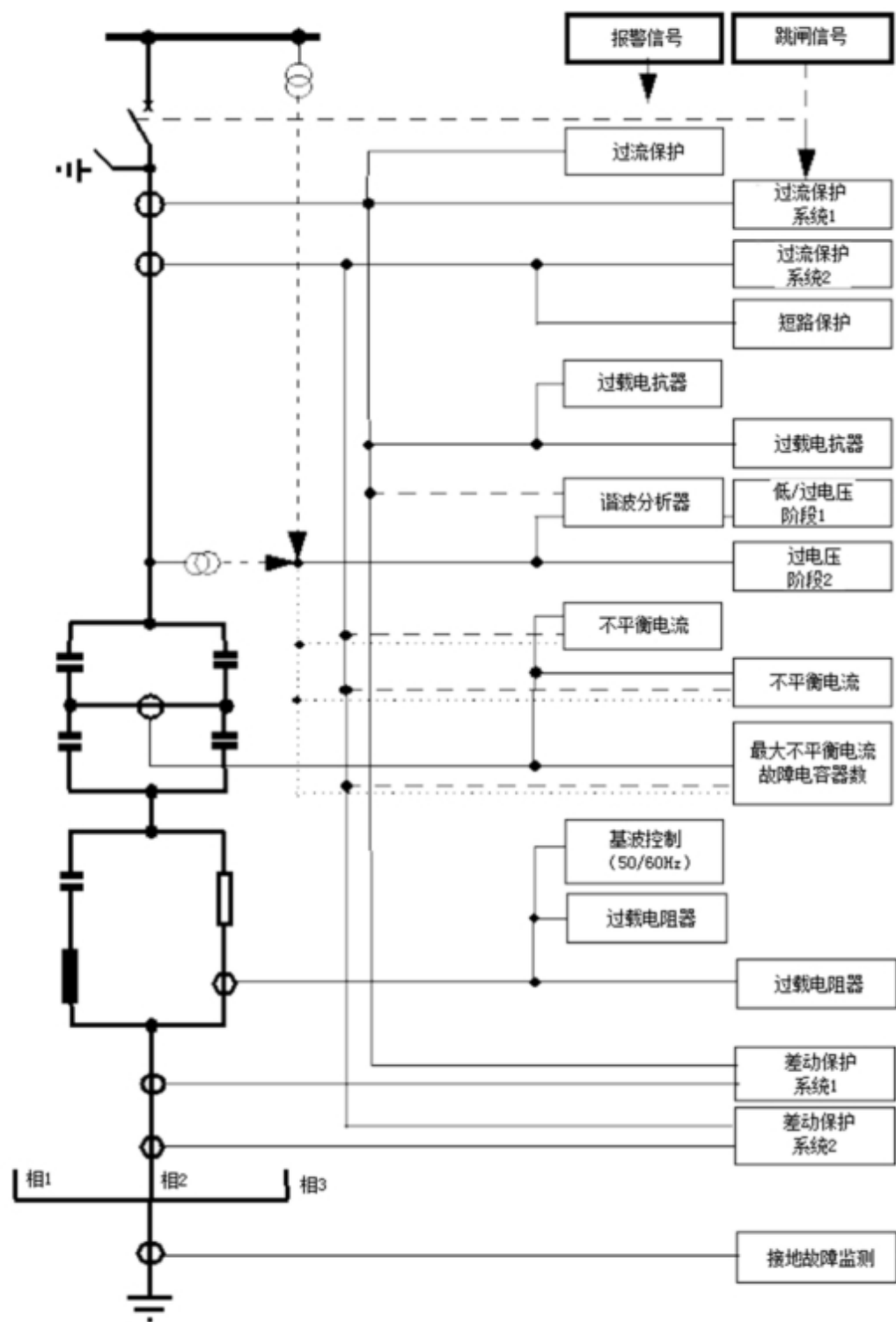


图12 C型滤波器的保护方案实例

9 可听噪声

9.1 概述

换流站设计的一个需要考虑的重要问题，就是避免住在附近的居民因换流站可听噪声带来的困扰。本章的目的是向用户告知可听噪声限值的背景，及其与交流滤波器设计的关联性。技术规范中对可听噪声限值的处理是很重要的，该问题在评标和后续的工程设计中也很突出（见 IEC TS 61973）。

建议规范要求考虑关于换流站周边家庭、住户和社区的环境噪声的法规。

达到可接受的噪声环境的要求，可能成为换流站开关场规划的关键参数，影响技术和经济方面，并且可能影响交流滤波器设计（例如双调谐滤波器中的环流可能产生无法接受的噪声）以及各元件的设计。设备设计中加入专门的噪声控制措施将会增加设备的成本。

因为在调试中和调试后采取降噪校正措施通常是很昂贵且耗费时间，所以建议用户在初期设计阶段选择换流站站址时宜充分注意可听噪声的要求。可听噪声限值通常是确定换流站站址时考虑的一个重要问题。

可听噪声可被规定为在空气中可被人耳感知的频率的声波总和。噪声可能由单频率声音信号（声调）或具有分布频率的声波组成。声音参数的定义见 IEC TS 61973。

发声元件例如交流滤波电抗器和电容器宜被设计和布置在一定区域内，以尽量减小对换流站周边噪声敏感区域的辐射。

9.2 交流滤波器的发声元件

高压直流换流站发出可听噪声的最主要的电气元件有换流变压器、直流平波电抗器、并联电抗器（若有）、PLC 电抗器以及交流滤波器的电容器和电抗器。因此交流滤波器只是高压直流站的众多可听噪声源中的一个。另外，由放电（电晕噪声）引起的可听噪声也会增加总的可听噪声。

电容器发出的声音取决于电容器两端施加的电压。电容器元件（卷筒）中的电动力引发元件的振动从而引起电容器单元的壳体振动。

空心电抗器产生的声音主要来自于由经过绕组的电流和它自身的磁场相互作用而产生的绕组振动力。对于铁心电抗器，作用在磁路中的力引起设备的进一步振动。

对于电容器和电抗器，设备表面的振动产生的可听噪声向周边辐射。

产生噪声的力与电气负载、电压或电流的平方成比例，因此力的频谱及声音的频谱与电气频谱不同。

例如，图 13 表示了一个滤波电抗器的电流频谱。假设电流由频率为基频 f 分量和谐波次数为 n 的谐波分量组成。

图 14 表示了作用在电抗器绕组上的振动力分量。该振动力由频率 $2f$ ， $f_{(n-1)}$ ， $f_{(n+1)}$ 和 $2f_n$ 的分量组成。



图13 电流频谱

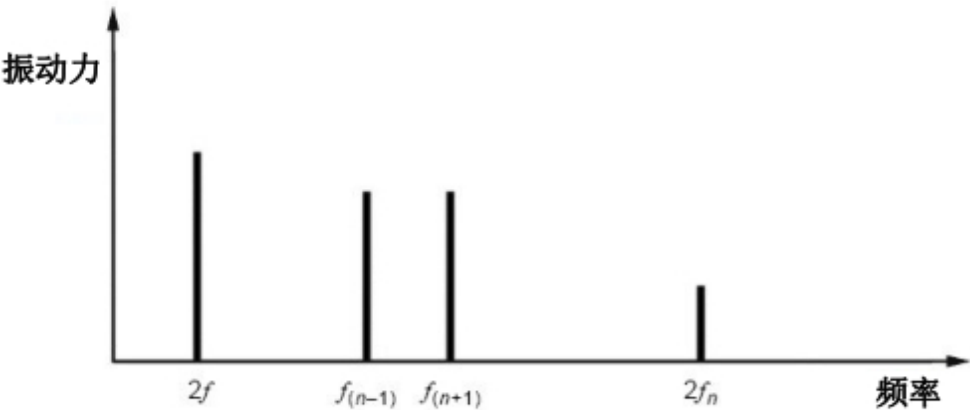


图14 振动力频谱

与任何机械结构一样,具有分布质量和结构特性的电容器或电抗器,具有若干主要的结构共振频率。因此如果作用力频谱的一个或若干频率和共振频率一致,那么就可能出现设备振动放大,使噪声增大。

在分析滤波器元件的声音性能时,不可避免要包括电压和电流的基波和谐波分量。

根据滤波电容器和电抗器的物理尺寸和功率额定值,这些元件的声功率在 60 dB(A)到 80 dB(A)之间。

9.3 噪声要求

噪声要求的目的是限制换流站周围的噪声水平,尤其要遵守换流站附近家庭、住户和社区的环境噪声法规。这一目标由承包商为整个换流站提供的噪声控制实现。因为交流滤波器只代表若干发声元件中的一个,所以宜由承包商对开关场各元件规定适当的噪声标准(通常用最大允许声功率水平表示)来满足整体噪声要求。

当规定噪声要求时,用户明确规定换流站的有效运行条件是必要的。出于经济原因,建议提出噪声要求时,只考虑正常运行条件而不考虑短时或任何极端条件。正常运行条件是指持续时间比规定时间长的稳态条件,通常多于一天,但是也可能短至几小时,这取决于所有适用的规章或实际采用的法规。

规定的运行条件下,换流站的噪声水平要求通常由用户规定,对换流站附近特定点或换流站周围的一定范围的最大允许声压水平提出要求。

有时范围选在换流站周围的栅栏线处。在栅栏处噪声限值的典型值在 50 dB(A)到 60 dB(A)之间。可是,这种要求可能导致采取不是很必要的降噪措施。可将噪声大的元件安装在远离围栏处,以满足围栏处的噪声要求。但是,这可能不能降低离站更远的噪声敏感区域的噪声水平,而这才是规定噪声要求的目的。

因此,建议在离站较远的地方,规定专门的噪声临界点或包含这些临界点的轮廓线,这些地方的噪声水平可能是至关重要的并且宜满足规定的噪声要求。

事实上,所有的国家都对环境噪声有规定。这些要求由国家、联邦或省级机关提出,规定了各种场所的最大允许噪声水平。通常生活区的最大允许噪声水平在 40 dB(A)到 50 dB(A)范围内,如果噪声包含了一个或若干个不同的明显的声音信号,那么最大允许噪声水平减少 5 dB。这些规定中包括了噪声要求的细节、测量步骤和对结果的评估。建议用户参照相关的环境噪声规定,而不是建立自己的准则。

9.4 噪声抑制

满足换流站的噪声准则的程序可以分为两步。第一,换流站布局设计时宜进行声学优化,第二,发声元件进行降噪设计和制造。

第一个抑制噪声的方法,是对发声元件所在区域和声音敏感区域之间进行最大可能的隔离。将发声元件集中布置,可利用自然地形或利用阀厅或其它建筑物的屏蔽效应,以阻碍声波向噪声临界方向的传播。在设计和选择这些建筑物位置时宜充分考虑声学要求。例如,避免使用薄板,因其会被附近发声元件的声波激发产生噪声,并能够改变声波方向甚至扩大噪声。

元件或其组合有时具有巨大差异的声波辐射模式。例如,电容器组的声波辐射具有明显的指向性。换流站附近的某个噪声超标问题,可通过改变元件的方向,使得在关键方向上没有明显的声波辐射而得以避免。

开关场设备的低噪声设计,要求尽量减小元件声波辐射表面的振动幅度。为此,重要的是适当设计设备,使元件的固有频率和主要激振力的频率不一致。如果噪声水平仍不能达标,那么可能要提供降噪屏障来进一步降低噪声。但是,根据声音抑制的必要程度,这种方法成本可能较高。

宜考虑到发声元件的支架结构和电气连接,以避免元件振动向其它设备的传送。

另一种目前不常用的降低噪声的方法是使用噪声抵消技术,该技术包括例如:

——在声波辐射表面安装的麦克风;

- 一个放大器和控制电路；
- 安装靠近发声元件的喇叭。

10 抗震要求

10.1 概述

本章的目的是为了给用户工程师提供处理交流滤波器的充足背景信息,以了解交流滤波器设计中抗震要求的含义,并且作为与投标商讨论抗震设计的基础。与换流站其它设备的要求一样,滤波器的所有抗震要求都要在技术规范里规定。

由电容器、电抗器、电阻器等组成的交流滤波器的构架,可能要经受地震时地面震动施加的机械载荷。与其它机械载荷相比,例如风力负荷或电磁力,抗震要求通常描述代表了构架最严苛的机械载荷。

地震时随时间变化的地面运动导致滤波器构架振动,造成基础和滤波器元件产生机械应力,也引起了构架相对于开关场中其它设备的移动。

设备抗震设计的目的是为了在可接受的花费内得到构架在地震时足够好的性能。在剧烈地震的情况下,整个滤波器设计都可能受到影响,例如,可能优先选择机械性能较强的构架。

足够的抗震性能是指在地震中或之后,至少能保持设备的功能正常,需要:

- 构架安全地固定在地面上,要考虑现场土壤质量;
- 构架能够耐受自身各元件产生的机械应力,特别是支柱绝缘子;
- 考虑可能出现的相对移动,电气连接适当且与相邻结构间的间距足够大。

对于含有大量脆性材料(瓷)的特殊性质的电气设备,实际负载和合理的评估准则由用户规定很重要。本章讨论的抗震设计验证由承包商负责。抗震要求规范的信息可以在 IEEE Std 693 中找到。地震响应频谱示例见附录 A。

10.2 负载规范

10.2.1 抗震负载

对特定项目进行合适的抗震设计,需要由量化的工程参数表征设备安装区域的地震情况。通常由规定“抗震设计”给出,是根据最大地面加速度和所谓的“响应频谱”对现场地震时的规范。

最大地面加速度用重力加速度(g)的分数表示。地面加速度设计值的选择是现场特定的物理学、期望的设备可靠性和经济成本之间的平衡。在地震多发区,最大地面加速度的水平分量的典型值在 $0.1g$ 到 $0.5g$ 的范围之间,垂直分量典型值为水平分量的 50%到 80%,某些场合也可有更高的值。地面加速度在 $0.15g$ 以内,且滤波器构架组成元件的安全系数为中等,通常不需要额外的抗震设计和花费就可以得到适当的抗震性能。

响应频谱通常用于预测施加在简单结构上的给定类型冲击负载的最大效应。在抗震设计中,响应频谱是说明不同临界阻尼比和频率关系的一组曲线,用于对由单个弹簧和质量(单一自由度结构)组成的可变固有频率的构架进行评估。

响应频谱说明了地震活动的动态特性,该曲线显示了与频率相关的构架运动的预期增幅。通常地震运动不包括超过约 33 Hz 的频率,所以固有频率高于 33 Hz 的结构产生的震动不会被放大。

对于特定场合,如果用户没有可用的响应频谱,那么可以使用 IEEE Std 693 中的“要求的响应频谱”(RRS)。例如中等地震要求的 RRS 如图 A.1 所示。在该频谱中最大的地面加速度为 $0.25g$ 。

如果滤波器构架安装在影响结构响应的主构架(建筑、平台等)上,那么可能有必要获得基于地面响应频谱和主构架的模型特性的二次响应频谱(基层响应频谱)。

10.2.2 附加负载

需考虑与抗震负载同时作用的附加负载有

——自重，

——正常操作负载（正常运行中的电磁力）。

在少数情况下，可能需要规定与抗震负载同时作用的其它附加负载，例如风力载荷和短路负载。如果要求这种负载的组合，那么宜给出附加负载的相关数据（例如风速或短路电流）。

10.2.3 土壤质量

除 10.2.1 和 10.2.2 负载外，应考虑土壤质量。对地基的影响取决于土壤的类型，例如岩石、粘土、沙地等。在土质疏松的地区，整个滤波器或其中一部分可能要固定在一个公共底座上。因此用户宜规定土壤的性质。

10.3 验证方法

10.3.1 概述

验证可通过理论分析或试验得到，用户宜规定承包商采用何种验证方法。如果选择试验验证，那么用户可接受一个以往完成的在类似设计和抗震要求的构架所进行抗震验证试验的结果。通过试验进行抗震验证的细节参见 IEEE Std 693。

然而实际中通常采用的验证方法是理论分析法。

10.3.2 分析法验证

10.3.2.1 概述

用分析法进行抗震验证要求用等效模型再现滤波器构架，该模型要求足够详细以精确地建立设备的静态和动态特性。因此假设构架的质量集中于分散的几个点，这些质量点由代表构架机械特性的元件相连接。

动态或静态的分析法主要取决于设备的类型。固有机械频率在地震频率范围内 (0.1 Hz~33 Hz) 的复杂结构，通常需要进行动态分析，多数情况下采用频谱分析法，10.3.2.2 进一步说明。对于仅包括少量元件的简单结构，静态分析可能足够。无论如何，采用普遍接受的计算机程序进行数值计算。

10.3.2.2 响应频谱分析

由多个弹簧、质量构成的结构将会具有多个固有振动，称为振动方式。每种方式在不同的固有（模态）频率下以特定的方式（振型）振动。振型和模态频率的确定叫做模态分析。从响应频谱得到的各独立模式的最大响应的叠加，即为构架的响应，换算到规定的最大地面加速度值。在实际情况下，只有少数方式需要在分析中考虑以获得足够的准确度。

由独立模态响应确定的最大合成响应通常由 SRSS 法（平方和的平方根）得到。如果没有其它规定，假设每个振型有 2% 的模态阻尼。如果使用增加的结构阻尼，通常要求测量以查证模态频率和模态阻尼比。

响应频谱假定构架是完全线性的。当认为结构系统是非线性时，可采用所谓的时程分析法。采用这种方法，通常根据加速度与时间的关系，用地面运动记录来计算在地震期间不同时间段内构架的应力、加速度和位移。可是这种方法需要大量的计算并耗费时间，因此仅在少数情况下采用。

10.3.2.3 静态系数法

静态系数法应用于具有几个其它模型中的一个主要模型的构架。作用于构架上的地震载荷可被假定为等效的静态负载，设备上各元件的抗震力等于响应频谱中最大加速度（2%的阻尼值）和元件质量的乘积。考虑其它模式的效应时，安全系数（静态系数）通常取值 1.5。

例如，置于绝缘子上的质量集中的支柱式电流互感器一般采用这种结构。主要模型为由地面水平振动引发的振动。

10.3.2.4 静态分析法

静态分析法适用于可认为是刚性结构的设备，即其固有机械频率大于 33 Hz。设备中各元件的抗震力，均等于最大地面加速度与元件质量的乘积。

10.3.3 设计准则

10.3.3.1 概述

设计准则规定了要求的最小安全系数和抗弯要求。

10.3.3.2 最小安全系数

对于构架中的每一个组成元件，宜对地震和附加载荷共同作用产生的应力进行计算，并根据材料类型确定最小断裂和形变安全系数。

a) 易碎材料

对于含有易碎材料的元件，例如瓷瓶式绝缘子，宜由用户规定断裂强度的安全系数。易碎元件（绝缘子）的最小断裂强度由相关元件制造厂家给出。如果没有规定的安全系数，那么易碎材料制成的绝缘子和其它元件最小安全系数宜取值 2.0。

b) 韧性材料

对于由韧性材料制成的元件，例如钢和铝元件，安全系数是根据变形点或极限强度确定的。采用的安全系数宜符合通常的工程实践，例如国家建筑规范。

如果没有可用的安全系数信息，宜使用以下最小安全系数：

- 抗弯强度 1.2，
- 极限强度 2.0。

10.3.3.3 抗弯要求

抗震验证宜确定构架能安全承受地震载荷造成的弯曲力。抗弯要求通常在相应的建筑规范中规定。

10.3.4 分析验证文档

规范可能要求以下层面的文件资料之一：

a) 抗震说明

由简短的抗震验证总结组成，说明了设备、方法、负载和最重要结果。

b) 抗震验证报告

该报告宜充分描述分析步骤和模型，且对主要结果进行验证，宜包括：

- 简要结论，
- 能展示主要元件及其支撑结构的设备图纸，
- 构架和相应的分析模型的说明，
- 负载和合成负载，
- 分析方法及其适用性的说明，
- 动态或静态分析结果（位移、力和力矩、元件上的应力、底座负载）。

10.4 机械设计改良实例

在抗震负载要求对不同滤波器构架的机械设计起决定性作用的情况下，可采取一些典型措施：

- 在构架和滤波器本身的元件中使用机械性能更强的材料，例如构架采用钢和瓷；
- 在支撑构架和绝缘子中采用其它几何设计（例如支撑绝缘子安装在有一定角度的位置，而不是垂直位置），替代常规设计；
- 对若干滤波器元件采用公共底座；
- 在构架内部对地、或外部对地、或内部和外部同时对地之间使用拉条；
- 构架和地面之间使用弹簧隔振；
- 使用阻尼器增加构架的阻尼。

有时可组合使用以上列出的两个或多个措施。

11 设备设计和试验参数

11.1 概述

11.1.1 技术信息和要求

根据所选滤波器的布置(见 IEC TR 62001-1)，滤波器由电容器、电抗器和电阻器组合而成，通过合适的投切设备与交流母线相连。包括例如用于过电压保护的避雷器，和作为滤波器保护系统一部分的互感器等附加设备。

很多因素明显影响滤波器元件的设计和应力。用户应在招标要求中给出的基本信息在前述的第 9 章、第 10 章和 IEC TR 62001-1 中做了详细的说明。

本章旨在以下方面给予用户一些指导：

- 用户在规范中宜给出滤波器元件的特定技术信息，
- 宜由用户规定滤波器元件的设计、制造、试验、安装和维护信息，
- 用户宜要求投标者在其标书中给出设备的特定技术信息。

11.1.2 用户提供的技术信息

交流滤波器通常安装在户外，虽然也可能安装在户内。不正常的现场环境条件宜引起承包商的注意，例如严重的污秽（工业的或海上的）、严苛的抗震要求、异常的高风速、严格的可听噪声要求等。这些要求对设备设计可能是决定性的。

用户宜指出交流滤波器在运行方面的特殊信息。如果适用，用户宜指出用于滤波器投切操作的设备宜按频繁开合操作进行设计，因为无功功率控制可能会要求这点，并且用户宜规定每年预期期望的操作投切次数。也宜规定滤波器退出的所有暂态过电压条件。

11.1.3 用户要求

11.1.3.1 设计、制造、安装和维护要求

由于滤波器元件是“带电”部件，所以滤波器设备可使用围栏以获得人员安全距离。此外可将设备安装在特殊的支撑结构上代替围栏，该结构将带电部分抬高到和人员安全标准相称的高度。用户可规定采用何方法并且宜规定最小安全距离。

建议用户要求承包商对用于安装滤波器元件的支柱绝缘子和电容器套管的规定。通常绝缘子和套管使用瓷质的类型。为设备的可靠运行宜提供足够的爬电距离和净距。根据用户在现场收集的与污秽条件相关的信息，用户宜规定绝缘子的最小爬电距离。根据现场的污秽等级，特定爬电距离的典型

值在 25 mm/kV 到 45 mm/kV 之间（见 IEC TS 60815-1, IEC TS 60815-2 以及 IEC TR 62001-1）。爬距要求宜依据出现在绝缘子或套管两端的最大电压（包括谐波）确定，最大电压根据 4.2.4 和 4.2.5 进行计算。

用户可要求滤波器尽量由相同的可互换的元件组成，以简化维护和备件存储。

为便于运输和安装，用户可要求每一个设备元件配备起吊孔或用于元件起吊的类似措施。

用户可对任何设备提出最大高度要求。可根据与其它滤波器设备相对位置，进一步要求元件（例如电容器单元）重量的最大限值。如果承包商超过了限值，宜提供适当的工具以便在安装和维护时进行处理。

滤波器元件的外形设计宜使得在电压达到高出额定电压 20% 时，尽量消除可见电晕。

用户可建议，投标者滤波器元件的设计，宜在没有损坏或减少寿命的情况下耐受操作机械力。若适用，这些力包括正常操作中的振动力、外部故障中的电磁力、风力、冰荷载和抗震力。在一只支柱绝缘子破损的情况下，结构宜保持稳定。用户可要求滤波器结构的静态计算。

提供了规定的维护条件时，用户可要求承包商保证某些滤波器元件，例如电容器、电流互感器等的最大年故障率。

11.1.3.2 质量系统和文件要求

建议用户规定对承包商将使用于交流滤波器设备的设计、制造、试验、安装和维护的质量体系的最低要求。

通常，质量程序是由承包商的质量手册提供的。用户宜审查承包商的手册，并保留根据手册所说明的质量体系进行审核的权利。

作为对标准质量管理体系的补充，用户可对材料和工艺的种类和质量提出特殊要求。包括例如用于端子和电气接线的材料要求、通过镀锌和喷漆进行表面保护、焊接的特定要求等。

用户可对承包商的文件规定要求。通常设计和制造检验、试验、安装和交接行为都基于检验和试验计划。检验和试验计划宜规定由用户或用户的代理机构见证检验或试验的停工待检点。

建议用户要求承包商在设备具体的设计阶段提交上述文件予以认可。

11.1.3.3 试验要求

对于常规要求，建议用户宜尽量参考来自 IEC、ANSI 或 IEEE 的适用标准和建议。对于滤波器设备的设计、额定值和试验，宜清楚依据的标准是 IEC 或者是 ANSI/IEEE 是基础。

元件特殊试验的试验项目依赖大量的参数，例如滤波器的常规技术概念、过电压保护、从其它高压直流工程中得到的特殊元件的运行经验等。试验项目宜确定特殊元件将提供要求的性能，且耐受现场所规定的电气和环境条件。但宜注意对于不现实条件下的试验要求，可能显著增加设备的成本。

宜由用户、承包商及其分包商共同确定试验项目。通常分为例行试验、型式试验，以及如果必要时的特殊或“其它”试验。安排用户或其代表见证型式试验和特殊试验是明智的，这对进行试验中出现困难或对试验结果有疑问时，非常重要。在这种情况下，对如何继续试验，用户代表可帮助快速决策。

以往对相似单元进行型式试验时，已得到认可的试验报告可替代型式试验。相关的试验报告宜提交给用户批准，包括设计或技术数据差异的报告。如果用报告代替了型式试验的实施，那么该报告宜作为检验和试验报告文件中的一部分。

如果适用，承包商宜为每一个安装在支撑结构上的设备元件进行抗震验证。抗震验证可通过分析法或试验实施（见第 10 章）。

11.1.4 投标者提出的技术信息

用户宜要求投标者提供滤波器布置的总体说明，包括清晰地表示出各个滤波器元件的示意图。投标者宜说明包括备品单元的滤波元件单元数。

11.2 至 11.7 中所给出的电气数据清单用于指导用户如何规定特定滤波器元件。如果认为有用，用户可要求更多的参数和信息。例如，要求的信息可涉及电抗器、电阻器和避雷器的热时间常数。

每个元件的各个参数由投标者根据滤波器设计来选择。因为一些数值，尤其是允差，可能是严苛且有时难以获得的，这种值通常在咨询了元件的分包商后确定。

用户可要求投标者指出，在确定的运行条件下，维护设备可靠运行所必需的总人力（天/每年）。

11.1.5 额定值

对各种滤波器元件规定以下额定值。

——额定谐波频率

额定谐波频率是指谐波滤波器性能的相关参数所涉及的频率。对于单调谐滤波器，该频率等于调谐频率。对于双调谐滤波器，该频率可能是两个调谐频率的几何平均频率或者两个调谐频率。

——电压额定值

交流滤波器电容器组的额定电压 U_N (RMS) 在 4.2.4.2 中进行了讨论。电容器单元的额定电压 U_U (RMS) 宜高于或等于电容器组额定电压 U_N 除以串联单元数。

要注意的是，在电容器的允许长期持续过电压能力方面，IEC 60871-1 和 IEEE Std 18 有相当大的差别。

建议承包商在给电容器分包商的规范中，提供电容器组两端出现的瞬态振荡电压的波形图，以及每年的预期发生数量。

电抗器或电阻器的额定电压是基频和谐波频率电压的算数和。电抗器或电阻器两端的额定电压在 4.2.4.3 和 4.2.4.4 中做出了讨论。对地电压额定值取决于电抗器或电阻器相对于其它滤波器元件的位置，并可能与其两端的电压额定值不同。

——电流额定值

额定电流是基波频率和谐波频率电流的方均根值（见 4.2.4）。

11.2 电容器

11.2.1 概述

交流滤波器的电容器有两个国际认可的适用标准：优选 IEC 60871-1 进行比较。电容器的一般要求建议参照这两个标准之一。

为了澄清用语使用以下规定。

——电容器元件：习惯上，通常是指由铝箔、绝缘纸、塑料膜组成的一个独立封装件（线圈、绕线轴）。

——电容器罐或电容器单元：包括套管、内部放电和均压电阻器、串并联电容器元件及如果采用的元件熔丝的金属箱体。

——串联组：并联连接的一组电容器单元。几组串联在一起满足电压要求。

——电容器支架：含有一个或几个串联组的金属框架，包括要求的内部连接母线和绝缘子。

——电容器塔架：安装在一组用于支架间绝缘的基础绝缘子上的一个或几个电容器支架，包括支架内和支架间连接。

——电容器组：一个或几个电容器塔架，包括塔架内连接以及相关的监控和保护设备。通常，电容器组由两个同样的塔架并联组成，为测量两个塔架之间的不平衡提供桥臂。

在单线图中，电容器组由集中的单相电容器表示。

11.2.2 设计方面

11.2.2.1 概述

承包商宜图示各个电容器组和电容器单元的电路，说明如何满足规定的电容值。

11.2.2.2 和 11.2.2.3 都要考虑到。

11.2.2.2 电容器单元设计

11.2.2.2.1 电容器外壳和装配

根据现场环境条件，建议采用不锈钢制造电容器单元外壳。电容器外壳的设计宜考虑在电容器单元的寿命内，因预期的环境温度的变化和负荷条件，包括短期和暂态负荷条件的变化，所引起的膨胀或收缩。电容器供货商宜提供一种判据，用来判断电容器单元箱体的正常膨胀和由电容器损坏造成的膨胀。

通常，电容器单元用螺栓固定在支架上。每个电容器单元宜被分别安装，在不移动其它单元或拆卸支架任意部分的情况下，可从支架上轻易移动或更换每一个电容器单元。根据重量，如果必要，每一个电容器单元都应该配装起吊孔。

11.2.2.2.2 绝缘介质

电容器单元中使用的绝缘介质宜对环境安全且可生物降解。电容器单元不宜含有 PCB 介质。在注入绝缘介质前，容器中的电容器元件宜是真空干燥的。在注入后，电容器单元宜在移开浸渍剂储存器后立即密封。

11.2.2.2.3 单元额定值

根据 IEC/IEEE 标准，电容器单元的电流、电压和容量，以及测量的容值或允差等级宜在电容器单元的铭牌上给出。

11.2.2.2.4 单元配置

最早的电容器设计采用外熔丝。电容器单元故障导致熔丝工作，需要更换熔丝和电容器单元。由于电容器单元的损耗而引起的电容的大的变化对电容器组设计具有重大影响。

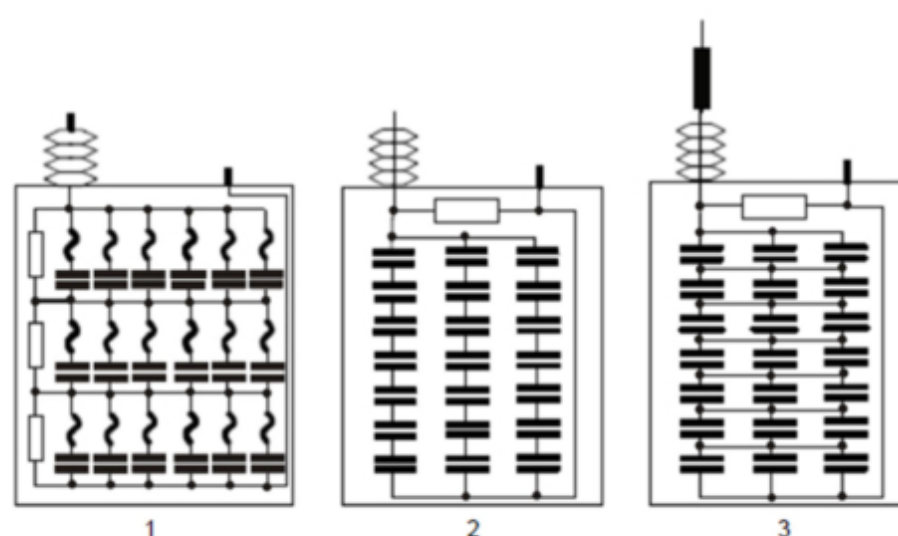
随后，内熔丝式电容器单元被设计出来，并广泛应用于谐波滤波器。它们具有与内置在电容器单元中的每个元件串联的熔丝，使得元件故障导致的电容损坏非常小，且其余并联元件上过电压较适当。在许多元件故障后，升高的电压过大，必须更换单元。

近年来，无熔丝电容器已应用于谐波滤波器。滤波电容器常用设计是具有几个并联的串组成的内部结构，每个串由大量的串联元件组成（见图 15）。除电容器单元的两端外，串之间没有并联连接。每个元件的结构使用铝箔与现代全膜介电材料交错排列，使得元件内部的短路会在发生故障的元件的两个箔电极之间产生良好的电焊接头。单个元件故障仅导致有限的能量释放，不足以损坏相邻的元件或释放大量的气体，且对单元的总电容和其余正常元件上的电压分布的影响有限。

与内熔丝设计相比，无熔丝设计可提供更经济的电容器单元结构，并具有更少的串并联元件。另一个优点是，在故障点处产生的放电能量有限。如果在缠绕的元件的外匝中发生故障，将降低损坏相邻元件和其它绝缘元件的风险。

它对高压低容量滤波电容器特别有吸引力。但是可能不适用于低电压的滤波器组，因为一个元件故障会在相对较少的剩余正常元件上引起很大的电压应力。

用户的规范宜允许使用，适用于电容器应用的适当技术的电容器。宜提供令人满意的电容器保护装置或明显的过额定值。



标引序号说明：

- 1——内熔丝；
- 2——无熔丝；
- 3——外熔丝。

图15 内熔丝，无熔丝和外熔丝式电容器单元设计的对比

11.2.2.2.5 放电电阻

根据 IEC 60871-1，宜为每个电容器单元提供内部放电电阻。如果用户同意，那么更长的放电时间（可以减少损耗）是可能的。

11.2.2.2.6 熔丝和单元保护

熔丝用来保护电容器单元的外壳，以免因电容器元件故障造成破裂。在任何运行条件下，内熔丝用于安全隔离有故障的元件。

用户宜指出其认可的熔丝类型——内熔丝、外熔丝或无熔丝，并宜规定不平衡保护的报警和跳闸水平设定值。承包商宜显示建议的熔丝/单元布置是如何满足用户要求的。

11.2.2.3 电容器组设计

11.2.2.3.1 支架

通常供应的电容器支架完整地装配有电容器单元、绝缘子以及连接件。宜提供起吊孔以便于电容器支架装进电容器塔架。根据现场环境条件，可建议支架用热镀锌的钢结构或防锈的铝结构。镀锌后不允许钻孔。

支架的结构构件不能用作电气母线。在一组电容器单元和电容器支架之间宜只有一个电气节点。支架的所有结构构件都宜在电气上连接在一起，以确保在维护时能够充分接地。宜为支架提供充分的接地连接。

每个支架宜清晰的标注出完全装配好的电容器单元的重量、标明该电容器支架属于哪一相的一部分和哪一组的一部分、以及可能作为支架的电容器备品的最大和最小单台电容器的电容值。还宜贴上适当的警告标签。

11.2.2.3.2 电容器组

宜特别注意电容器组的设计，以满足技术规范（见第 7 章）中规定的可听声功率水平。宜为每一个电容器组提供声功率的计算。

11.2.3 电气数据

表 2 是承包商用来采购设备或向用户提供设计参数的数据检查清单。电气数据宜符合 GB/T 20994 及表 2 的要求。

表2 电容器电气数据

电容器设计参数	单位
额定谐波频率	Hz
每相额定电容（+20℃）	μF
额定电容允差	±%
电容相对温度的最大变化值	%/℃
额定电压和额定温度下的最大总损耗	W/kvar
额定电压和额定温度下的最大介质损耗	W/kvar
tanδ相对频率的变化	°
电容器组两端包括谐波的额定电压（ U_n ）方均根值(RMS)	kV
谐波电压方均根值(RMS)频谱 ^a ，稳态	n/kV
电容器组两端不包括谐波的最小电压方均根值(RMS)	kV
总电流方均根值(RMS)（包括谐波）	A
谐波电流方均根值(RMS)频谱 ^a ，稳态	n/A
电容器组两端的用于评估声功率水平的包括谐波的持续电压方均根值(RMS)	kV
评估声功率水平的谐波电压方均根值(RMS)频谱	n/kV
最大声功率水平	dB(A)
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方均根值(RMS)（50Hz或60Hz，1min）	kV
^a tanδ随频率从基频到最高次谐波的频率变化宜以图或表格的形式给出。	
^b 谐波电流或电压频谱用各次谐波电压或电流的次数和RMS值表述。	

11.2.4 试验

除非另有说明，例行试验和型式试验宜按照标准 IEC 60871-1、IEEE Std 18 的相关章节进行。如果适用，支柱绝缘子的试验可按照 IEC 60168 进行。如果用户对特殊试验或“其它”试验以及设备性能验证另有特殊要求，宜说明这些要求。

例如，这些要求可能包括如下。

——放电试验

宜通过将电容器充电到直流电压等于 1.7~2.5 倍额定电压，由端子间短路使其放电进行电容器单元的放电试验。试验中使用的直流电压水平宜得到用户和承包商的认可。

——电容值随频率和温度变化测量

——浸渍剂试验

元件供应商宜提议进行试验，以证明提供的浸渍剂有充足的化学和电气性能。

——可听噪声的验证

承包商宜通过分析法证明电气数据表中给出的基波电压和谐波电压下，每个电容器组的预计总声功率水平，单位为 dB(A)。

——抗震验证

如果适用，由承包商或其分包商执行（见第 10 章）。

建议提供电容器组的现场噪声测量数据。

11.3 电抗器

11.3.1 概述

通常适用于规定交流滤波电抗器的标准是含有涉及滤波电抗器章节的 IEC 60076-6。

由于交流滤波器中使用的电抗器通常为干式空心的，所以以下信息仅涉及这种类型的电抗器。

11.3.2 设计方面

通常，电抗器是单相的，设计成在户外安装、通过自然对流进行空气冷却的绕组。因此所选的所有材料都具备耐受现场气候和环境条件的能力。对于安装在高原城市污染地区或者海洋盐污地区的电抗器，宜注意电抗器绕组的保护以防止电解沉积的不良后果。在这种运行环境下，交流电压作用下的干式空心电抗器的表面可能发生漏电。因此建议，如果可能出现盐污，电抗器宜涂覆具有独特憎水性的特殊涂料，比如 RTV 单组分、低温硫化的硅橡胶，以防止直接暴露于环境中的绕组表面形成水膜。

绝缘材料的温度等级通常为 B 级（130℃）或 F 级（155℃）。

干式空心电抗器没有铁心。因此磁场不受约束，并且将占用电抗器绕组周围的空间。虽然磁场强度随着与电抗器距离的增加而减小，但是安装干式空心电抗器单元时，宜考虑磁场的存在。应考虑的范围基本上是容量的函数，并且对于较低容量的单元范围较小。

通常电抗器安装在支柱绝缘子和支撑结构上。提供支撑结构有两个方面的原因，一是为变电站人员提供与高电位设备间的安全距离，二是提供到电抗器安装底座的足够的磁场距离。

电抗器的电气端子和相应连接头的尺寸宜尽可能的小，以避免由电抗器的磁场引起的大量涡流损耗。

支撑结构的设计不宜具有短路环，否则电抗器的漏磁场会产生感应电流。支撑结构的接地不宜使接地系统形成闭环。

如果必要，绕组可设计成带中间抽头位置的形式，以便分级调节电感。抽头位置的设置在不影响电抗器主要端子连接的情况下，通过手动完成。

通常滤波器回路要求电抗器谐波频率下的 Q 值比其“固有” Q 值低得多。可通过在回路中给电抗器连接一个电阻器来阻尼滤波器响应实现。通常电阻器和电抗器并联连接。另一代替使用电阻器的方法就是

在电抗器上附加一个可降低 Q 值的绕组。典型的可降低 Q 值的绕组，是由若干与电抗器主磁场耦合的同轴排列的短路金属环组成的。闭合环中的感应电流消耗能量，因此降低了电抗器的 Q 值。

如果电抗器配有避雷器，那么避雷器的安装宜使得压力释放阀不会妨碍电抗器。

宜特别注意绕组的设计以满足技术规范中规定的可听声功率水平。可以要求对每一个单元进行声功率计算（见第 7 章）。

11.3.3 电气数据

表 3 是承包商用来采购设备或向用户提供设计参数的数据检查清单。

表3 电抗器电气数据

电抗器设计参数	单位
额定谐波频率	Hz
额定电感	mH
额定电感允差（适用于无分接头范围的电抗器）	±%
分接头范围	±%
每档步长	%
基频下电抗器 Q 值	
额定谐波频率下电抗器 Q 值	
基频下的 Q 值允差	±%
额定谐波频率下的 Q 值允差 ^a	±%
电流额定值	
最大持续电流方均根值(RMS)，包括谐波	A
谐波电流方均根值(RMS)频谱 ^b ，稳态	n/A
最大暂时电流方均根值(RMS)，包括谐波	A
暂时谐波电流方均根值(RMS)频谱	n/A
持续时间	h
评估声功率水平的电流方均根值(RMS)	n/A
最大声功率水平	dB(A)
暂态电流	
幅值峰值(peak)	kA
峰值时间	μs
短路电流方均根值(RMS)，热的 ^c	kA
短路电流峰值(peak)，机械的 ^c	kA
持续时间 ^c	s

表 3 电抗器电气数据（续）

电抗器设计参数	单位
额定交流电压方均根值(RMS)（包括谐波）	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方均根值(RMS)（50Hz或60Hz，1min）	kV
° 额定谐波频率下的Q值允差可能很重要（见第6章）。	
° 谐波电流频谱用各次谐波电流的次数和RMS值表述。	
° 如果适用。	

11.3.4 试验

除非另有说明，例行试验和型式试验宜按照标准 IEC 60076-6 的相关章节进行。如果适用，支柱绝缘子的试验可按照 IEC 60168 进行。如果用户对特殊试验或“其它”试验以及设备性能验证另有特殊要求，宜说明这些要求。

例如，这些要求包括以下。

——可听噪声

承包商宜通过分析法证明上述电气数据清单中给出的基波电流和谐波电流下，每个电抗器的预计总声功率水平，单位为 dB(A)。如第 9 章所述，基于基频的可听噪声测试意义不大。

——抗震验证

如果适用，由承包商或其分包商执行（见第 10 章）。

11.4 电阻器

11.4.1 概述

IEC TS 63014-1 对电阻器的额定值和试验给出了指导，用于交流滤波器的电阻器通常是干式的，以下信息是针对通过自然空气对流冷却的干式电阻器。

11.4.2 设计方面

电阻器设计宜可忽略电感，且阻值与谐波频率相关性较小。

电阻器是由导线（格栅式电阻器）、展开的金属板或者铸造的金属元件组成。最好采用电阻值随温度变化小的合金材料，使得在各种负载条件和环境温度下滤波器特性随工作温度的变化减少到最小。

通常电阻器元件安装在防护雨水的箱体中以避免任何运行方式下雨水的有害影响。箱体宜设计成防止鸟类或其它动物的进入。箱体还宜被设计成能够简单打开以便维护。根据现场环境条件，建议使用不锈钢或热镀锌的钢结构或防腐蚀的铝结构来制作箱体。

箱体在电气上宜被连接到电阻器元件的一点，通常在电阻器的中点。

对于由若干串联单元组成的电阻器电气绝缘，宜考虑非线性暂态电压分布的影响。参见对雷电试验的建议（见 11.4.4）。

电阻器元件的温升可能相当高（高至 600℃），要求特别注意电阻器模块中绝缘的选择，因为高的空气温度影响绝缘性能。高温下，空气的击穿电压可能减少到环境温度下击穿电压值的 50%。也需考虑到垂直堆放电阻器的“烟囱效应”。

宜注意电气端子设计时材料的选择，以在高温下获得足够的性能。即电阻器的高温升要求电阻器的内部和外部连接具有足够的冗余，以避免膨胀产生的机械过应力。

宜规定维护期间两次内部检查之间建议的时间间隔。

通常电阻器箱体安装在支柱绝缘子上以提供必要的对地电气绝缘。绝缘子可以安装在支撑结构上为变电站人员提供与高电位设备间的安全距离。

根据电阻器的电气回路和功率额定值，有时可能与电抗器安装在一起。在这种情况下，电抗器绕组上方的保护性盖板可提供必要的防雨水保护。

11.4.3 电气数据

表 4 是承包商用来采购设备或向用户提供设计参数的数据检查清单。

表4 电阻器电气数据

电阻器设计参数	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
额定电阻允差 ^a	±%
额定谐波频率下的最大电感	μH
电流额定值	
最大持续电流方均根值(RMS)，包括谐波	A
谐波电流方均根值(RMS)频谱 ^b ，稳态	n/A
最大持续电流下的运行温度，包括谐波	℃
最大暂时电流方均根值(RMS)，包括谐波	A
暂时谐波电流方均根值(RMS)频谱	n/A
持续时间	min
最大暂时电流下的运行温度，包括谐波	℃
暂态电流 ^c	
幅值峰值(peak)	kA

表 4 电阻器电气数据（续）

电阻器设计参数	单位
峰值时间	Ms
能量	kJ
额定交流电压方均根值(RMS)（包括谐波）	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方均根值(RMS)（50Hz或60Hz，1min）	kV
^a 规定的允差宜包括制造允差和随环境温度及工作温度的电阻变化。 ^b 谐波电流频谱用各次谐波电流的次数和RMS值表述。 ^c 电阻器宜耐受最大持续电流后的暂态电流。	

11.4.4 试验

电阻器建议进行下列试验，且遵循 GB/T 30547 中对于试验的要求。

a) 例行试验

——电阻测量

宜在工频和额定谐波频率下测量电阻。校正到最大和最小工作温度的电阻测量值，宜在规定的允差限值内。

——工频电压耐受试验

该试验是为检查电阻器元件对箱体的绝缘。为达到试验目的，箱体和电阻器元件之间如果存在电气连接，拆除后对电阻器元件和箱体之间施加 1min 的试验电压。因为箱体的高运行温度会影响绝缘性能，选择试验电压时宜考虑温度的影响，且根据用户与承包商之间的协议。

在电阻器是由若干串联电阻器模块组成的情况下，考虑到制造允差后，每个模块上所加的试验电压会根据串联模块的数量而减少。

试验中绝缘体不宜发生闪络。

b) 型式试验

——电感的测量

宜在工频和额定谐波频率下测量电感，电阻器组装配和运行时同样。

——温升试验

该试验宜在 50 Hz 或 60 Hz 的热等效电流下进行。若电阻值与规定谐波频率范围内的频率无关，那么试验电流为基波和谐波电流的方均根值。

若电阻值随着频率变化，那么试验电流的计算宜根据下述公式（20）：

$$I_t^2 \times R_t = I_F^2 \times R_F + \sum_{n=2}^N I_{Hn}^2 \times R_{Hn} \dots\dots\dots (20)$$

式中：

I_t ——等效的试验电流（50Hz 或 60Hz）；

I_F ——最大持续基波电流；

I_{Hn} ——最大持续 n 次谐波电流；

R_t ——试验电流频率时的交流电阻值，校正到最大工作温度；

R_F ——基频交流电阻值，校正到最大工作温度；

R_{Hn} —— n 次谐波交流电阻值，校正到最大工作温度；

N ——规定的最大谐波次数。

如果可用的试验设施不允许电阻器承受额定电流，那么可能需要改变电阻器的内部连接使其功率等于额定功率。

该试验可在任何方便地环境温度下进行。电阻器的加载通过施加试验电流并在达到稳态条件后保持最少 30min。试验最后阶段测量的温度宜校正到最大环温，且不宜超过预期的设计温度。整个电阻器绝缘体的温度（内部的，以及如果相关，外部的）也宜进行测量以评估它的耐受能力。

——雷电冲击试验

该试验宜在低压端子接地时，在高压端子上分别施加正极性和负极性雷电冲击电压。电压波形宜为标准的雷电冲击波 1.2/50 μ s。因电阻值较低，可接受较短的波尾。由于外壳箱体内部空气的高温会影响绝缘性能，承包商或其分包商宜征得用户同意后采用适宜的方法（通过试验或计算），验证高温下冲击电压试验的性能。

在由若干串联电阻器模块组成电阻器的情况下，冲击电压试验宜在所有模块都串联完整的电阻器上进行。如果因为试验室的制约无法实现，冲击电压试验可在每个模块的基础上进行。承包商宜证明每个模块的试验电压包括了足够的裕度，以考虑电阻器组暂态电压分布的非线性。

整个试验期间绝缘体不能闪络。

——短路性能验证

承包商或其分包商宜通过计算、试验证明电阻器可耐受规定的暂态电流施加的机械和热应力。

——抗震验证

如果适用，由承包商或其分包商进行（见第 10 章）。

11.5 避雷器

11.5.1 概述

假设只有无间隙金属氧化物避雷器用于交流滤波器的过电压保护。

建议避雷器遵循 IEC 60099-4，IEC 60099-5 和 IEC 60099-9。

用户宜要求承包商根据不同的暂态过电压的最小保护裕度，提供交流滤波器过电压保护所需的所有避雷器。

避雷器通常与交流滤波器母线连接，并跨接在特定滤波器元件的两端。滤波器元件可能是简单的一个电抗器或者是连接在滤波器的高压电容器和地之间的所有电容器、电抗器和电阻器的组合。用户宜要求承包商提供避雷器在滤波器回路中的位置，以及在避雷器过电压保护回路中的各技术数据。

避雷器宜为与之相连的设备，对来自雷电冲击或操作冲击、交流滤波器外部的所有故障以及其它系统干扰所引起的过电压提供一致性的保护。

各避雷器的电气参数,例如额定电压、持续运行电压、保护特性和能量吸收能力都宜由承包商提供,并经过承包商的系统研究确认。

11.5.2 设计方面

用户可选择是否优先选用复合材料外套的避雷器。

避雷器可是单柱或多柱设计。

用户可要求避雷器的附件,例如:

——避雷器的放电计数器和/或电火花间隙来记录避雷器冲击放电的次数(滤波器的带电通常不宜使放电计数器动作)。

——监控避雷器的泄漏电流的泄露电流装置。

因为下述原因,不推荐为交流滤波器的避雷器提供泄漏电流监控装置。

- 利用现代技术生产的避雷器通常不要求泄露电流监控。
- 避雷器的实际持续运行电压与最大动作电压相比较低时,对于跨接在滤波器两端的避雷器,泄漏电流意义不大。
- 避雷器动作电压中的高次谐波可能导致泄漏电流的监测结果不稳定。

11.5.3 电气数据

表5是承包商用来采购设备或向用户提供设计参数的数据检查清单。

表5 避雷器电气数据

避雷器设计参数	单位
持续运行电压 ^a 方均根值(RMS)	kV
谐波电压方均根值(RMS)频谱 ^b , 稳态	n/ kV
额定电压 U 方均根值(RMS)	kV
标称放电电流(8/20 μ s)	kA
大电流冲击(4/10 μ s)	kA
长持续电流冲击(2ms)	A
线路放电等级	
最大能量吸收能力 ^c	kJ
参考电压(peak/ $\sqrt{2}$)	kV
参考电流峰值(peak)	mA
多柱避雷器柱间或并联运行的避雷器间参考电流分配的允差	
标称放电电流下的残余电压	kV
0.5 kA下的残余电压(30/60 μ s)	kV
避雷器外套的雷电冲击耐受水平	kV
释压能力电流方均根值(RMS)	kA

表 5 避雷器电气数据 (续)

避雷器设计参数	单位
雷电冲击耐受水平 (LIWL)	
高压端对地	kV
低压端对地	kV
操作冲击耐受水平 (SIWL)	
高压端对地	kV
低压端对地	kV
施加的对地交流试验电压方均根值(RMS) (50Hz或60Hz, 1min)	kV
^a 持续运行电压 U_c 是允许的最大工频电压RMS值, 包括可能持续施加于避雷器端子间的谐波。 ^b 谐波电压频谱用各次谐波电压的次数和RMS值表述。 ^c 根据IEC60099-4, 该值是指避雷器在两个长时间的电流冲击中吸收的总能量。	

11.5.4 避雷器：试验

除非另有说明, 例行试验和型式试验宜按照 IEC 60099-9 的相关章节进行。如果适用, 支柱绝缘子试验可以按照 IEC 60168 进行。如果用户对特殊或“其它”试验以及设备性能验证有附加的具体要求, 那么宜予以说明。

11.6 互感器

11.6.1 电压互感器

用户可要求承包商提供与交流滤波电容器并联的电磁式电压互感器。这种电压互感器的主要目的是在滤波器断开后, 给电容器快速放电 (通常少于 0.5s, 而不是用电容器的放电电阻, 需要 5min 左右才达到)。这一过程由大量放电电流 (最高峰值大约 15 A) 放电期间饱和的电压互感器完成, 而在正常运行期间, 一次绕组的典型电流小于 2 mA, 电压互感器对电容器组消耗因数的影响可忽略。快速电容器放电的优点是减轻了滤波器组开路断路器两端的电压应力, 并允许在元件没有过应力的情况下滤波器的快速重带电。

对这种特殊应用的电压互感器, 按照满足通过电压互感器对滤波电容器放电所施加的热应力和机械应力来设计。可是电磁式电压互感器的适用标准 IEC 61869-3 没有完全涵盖此应用。因此, 可取的办法是承包商和用户在设备规范上达成协议, 规范中包括用放电能量和占空比描述的放电要求, 详细说明如何验证电压互感器的放电耐受能力。

与换流器母线连接的、用于换流站过电压和不平衡保护, 以及为换流器控制提供电压信号的电压互感器, 是交流滤波器的外部设备, 所以在本文件中不加以讨论。

11.6.2 电流互感器

11.6.2.1 概述

交流滤波器的电流互感器, 如第 8 章所述, 是滤波器保护系统的一部分。

短路电流用的电流互感器和完整滤波器回路的过电流保护,通常被布置在滤波器组的馈电侧或相关滤波器回路的接地侧。对于不平衡保护,布置在并联支路的桥臂上。对于各元件的保护,电流互感器可与规定的滤波器元件串联。

IEC 61869-2 适用于规定交流滤波器用电流互感器。

11.6.2.2 设计方面

馈线侧的电流互感器通常是油绝缘设计的。储油箱结构的类型可能是密封（正立式）箱型或者是可打开（倒立式或吊环螺栓）箱型。工作组 23.07 的 CIGRE 报告 57 提供了油绝缘互感器的设计、结构、监控和质量保证方面的信息。

用户可规定电流互感器暂态性能要求。例如,可要求电流互感器低电感值（低漏磁通）设计。在这种情况下,电流互感器暂态性能的评估可通过一次绕组开路,测量二次绕组的电压、电流特性来简单地 进行。如果互感器不是低电抗设计,宜在精确的限制电流下（特殊试验）直接测量精度。这种情况下存在较大的问题,因为试验电流可能非常高,这对试验设备要求极高。IEC 61869-2 给出了更进一步的细 节。

用户可规定绝缘子爬电距离以及悬臂载荷的最低要求。

接地侧的互感器通常设计成固体绝缘。

电流互感器可安装在支撑结构上,用以提供变电站工作人员与高电位设备间的安全距离。

11.6.2.3 电流互感器：电气数据

表 6 是承包商用来采购设备或向用户提供设计参数的数据检查清单。

表6 电流互感器电气数据

电流互感器设计参数	单位
额定频率	Hz
设备的最高电压方均根值(RMS)	kV
电流额定值	
一次绕组	
最大持续热电流方均根值(RMS)	A
谐波电流方均根值(RMS)频谱*	n/A
短时电流方均根值(RMS)	A
谐波电流方均根值(RMS)频谱*	n/A
持续时间	ms
暂态电流峰值(peak)	kA
峰值时间	μs
二次绕组电流方均根值(RMS)	A
最大持续热电流方均根值(RMS)	A
铁心	

表 6 电流互感器电气数据（续）

电流互感器设计参数	单位
测量铁心	
铁心数量	
匝数比	
额定负载	VA
精度等级	
仪表安全因数（FS）	
保护铁心	
铁心数量	
匝数比	
额定负载	VA
保护等级 ^b	
准确度极值因数	
对地绝缘要求	
功率耐受电压（1min）	
一次绕组电压方均根值(RMS)（湿式，如果适用）	kV
二次绕组电压方均根值(RMS)	kV
一次绕组雷电冲击耐受水平	kV
一次绕组操作冲击耐受水平（如果电压等级适用）	kV
^a 谐波电流频谱用各次谐波电流的次数和RMS值表示，通常不适用于不平衡变压器。 ^b 见IEC 61869-2。根据规定的保护等级可能要求更多的数据。	

11.6.2.4 试验

除非另有说明，例行试验和型式试验宜按照标准 IEC 61869-2 的相关章节进行。如果适用，支柱绝缘子的试验按照 IEC 60168 进行。如果用户对特殊试验或“其它”试验以及设备性能验证有附加的具体要求，那么宜予以说明。

例如，这些要求可能包括如下。

——暂态电流能力的验证

承包商或其分包商宜通过计算证明互感器能够耐受规定的暂态电流所施加的机械应力和热应力。

——抗震验证

如果适用，由承包商或其分包商进行（见第 10 章）。

11.7 滤波器开关设备

11.7.1 概述

通常滤波器组的开关设备，特别是高压直流系统的开关设备目前还没有明确的标准。不同工况、电流、叠加的频率和可能的恢复电压的数量很难在最严苛的条件下按照常规规则提出。正常运行和故障情况的系统应力应在进行系统研究期间确定，是高压直流工程的重要组成部分。这些研究结果将揭示作用在滤波器断路器上的应力是否符合现有标准，或者是否还需要增加其它要求。

如前所述，交流滤波器具有双重功能：滤除谐波及提供无功功率。因此滤波器和电容器组开关设备的性能和应力有很多相似之处。由于滤波器组中的电感值相对较高，涌流的幅值会减小，并且暂态频率会降低。另一方面，相对较高的电感值可能在（故障）条件下引起过电压，并伴有电流的快速上升。这些过电压成为高压直流换流站绝缘配合的一部分。

对于上述原因，11.7.2 中的设计方面能够有效解决，宜认为是主要的相关项目以及作为确定滤波器开关设备的导则。

如果适用，两种类型的开关设备可能是首选：断路器和高压（负荷）开关。后者在下文中以“开关”表示。考虑经济性，滤波器支路和分组中可考虑使用负荷开关。断路器和后者最大的不同是开断短路电流的能力，而负荷开关只能开断负载电流，如果有规定有时可开断有限的短路电流。通常，需要断路器对滤波器组整体进行保护，防止短路故障。使用断路器或开关还是其它设备取决于经济、特定的高压直流回路以及运行要求。

安装于滤波器组的并非主要用于开断电流的其它开关设备，例如隔离开关和接地开关，除了常规交流变电站相关的要求外，不需要特殊要求。因此，它们不在本文件中讨论。

11.7.2 设计方面

11.7.2.1 概述

11.7.2.2~11.7.2.4 为概况，11.7.2.5~11.7.2.10 为滤波器用断路器和负荷开关的具体内容。

11.7.2.2 现有的国际标准

主要有两个关于断路器的国际标准，其中包括容性开关的试验要求：IEC 62271-100 和 ANSI/IEEE C37 系列。对于高压开关，IEC 62271-104 也适用。但是该标准不包括交流滤波器投切要求。因此，无故障安装经过 IEC/ANSI 试验的断路器不一定能够保证良好的工作。

11.7.2.3 环境条件

可参考 IEC 62271-1 和 IEC TR 62001-1。对于断路器，建议特别考虑相关的户外环境温度、污秽（见 IEC TR 62001-1）和抗震要求（见第 10 章）。

11.7.2.4 系统参数

与目前情况相关的重要交流系统参数有：

——系统标称电压、电压范围以及超过稳态范围限值的特殊电压要求，如 IEC TR 62001-1 中所述。

满足滤波器退出的任何暂时过电压条件也宜予以规定；

——标称工频频率；

——短路容量水平；

——短路持续时间；

——系统接地；

——存在的其它并联电容器和滤波器组；

——短路比（X/R）；

——绝缘水平。

高压直流系统参数也很重要，因为和滤波器组连接在一起的断路器或负荷开关的戴维南等效回路也取决于高压直流换流器，高压直流换流器具有在甩负荷等操作中起重要作用的控制特性。

11.7.2.5 持续电流

持续电流由工频无功电流和谐波电流叠加组成。所讨论的滤波器来自所有指定条件下的交流系统。通常，负荷电流额定值与主回路中断路器、负荷开关电流相比较低。然而，因为存在所提到的叠加谐波电流，将比只有基频出现的情况下出现更多的电流过零点。它们的出现与正常运行条件下电流的开断能力有关。建议明确规定断路器、开关的特殊用途。

11.7.2.6 断路器的短路电流

额定短路能力至少宜和 11.7.2.4 中规定的系统短路水平一致，且宜考虑到未来的发展。

如果短路出现在断路器和滤波器的连接处，那么断路器应开断全部的短路电流。在滤波器支路内部故障的情况下，例如闪络，根据故障的位置，通过断路器的故障电流将或多或少被滤波器剩余的阻抗减小。

负荷开关只能在有限时间内承载短路电流，然而如 11.7.1 所述，有限的短路开断能力可能是有用的。

11.7.2.7 投切方式和顺序

根据特定的换流站方案，以及由于运行条件、故障恢复策略等，断路器的投切方式和顺序可能与标准中规定的不一致。建议规定这些方式。

在特殊情况下，开合正常负载电流时会发生滤波器组内部故障。虽然这种情况很少，但是会引起附加的应力，因此可规定为断路器的特殊方式。

负荷开关的额定投切方式通常限于分闸和合-分操作顺序。

11.7.2.8 电弧介质的介电耐受

由于断路器作为常规高压直流换流站的正常应用，需要相对大量的投切操作，建议要求断路器具有最低可能的重击穿概率。滤波器（和电容器）组投切操作期间出现的重击穿，可引起具有相对较高频率的高过电压。重击穿的发生很大程度上取决于相对下一个电流过零点的触头分离时刻和断路器的设计。IEC 60056 中，断路器在经过（仅）有限次的没有重击穿的试验后，被假设为无重击穿的断路器。然而在 IEC 62271-100（IEC 60056 的修订版）中，与 IEC 60056 相比进行了更多次的试验，对断路器具有低的和非常低的预期重击穿概率之间做出了区分。

11.7.2.9 投切操作次数

该判据的重要性体现在以下两方面：

- 根据方案、运行策略、电容器和滤波器组的数量，正常的应用中可能需要（非常）频繁地投切。这会给断路器、负荷开关施加高的机械应力，因此建议适当考虑这方面。这种情况下可考虑特殊用途开关设备。
- 在大量投切操作的情况下，不利的燃弧时间的概率将增加，并且重燃的概率也会随之增加。通常，短燃弧时间比长燃弧时间更加不利。

11.7.2.10 （暂态）恢复电压（TRV）

开关设备的电流开断能力主要取决于熄弧后触头间的（暂态）恢复电压。首先，该电压取决于交流系统和滤波器组的中性点接地情况。后者通常是接地的。

特别的，与高压直流有关的 TRV 准则的相关性是由以下几项确定的：

- 甩负荷下的 TOR 的值（换流器闭锁），
- 短路或换相失败恢复后的交流系统的强弱，
- 故障恢复中的换流变压器的饱和可能性，
- 故障恢复中和交流系统阻抗的谐振，
- 电容器组的放电率，
- 并联的其它滤波器断路器的投切方案，
- 滤波器组电流产生的谐波，
- 交流滤波避雷器，
- 交流母线避雷器。

断开的断路器的持续直流电压可影响一些类型的断路器的电压耐受能力。因此建议规定滤波器组的放电时间常数。该放电取决于放电电阻的值以及采用的（电磁式）PT。

如果系统研究证明 TRV 应力超过了 IEC、ANSI/IEEE 中规定的数值时，建议进行附加试验。

作为一种选择，可考虑采用高于系统电压额定值的断路器。

11.7.2.11 合闸涌流

滤波器组合闸后会流过涌流，该电流由滤波电抗器限制。来自电容器组的涌流取决于有效电源阻抗的阻尼效应。两个或多个并联电容器组、滤波器并联运行时，如果单独投切，可能引起投切过程中非常高的不平衡电流问题。当一个组投入，其它所有已带电运行的组放电到新带电的组中。可能很大的暂态电流仅被放电回路中的阻抗阻尼。

关于合闸涌流，宜注意以下几点。

- 滤波器组投入可能引起预击穿。随后的涌流幅值和频率将由滤波器本身的参数、站配置、实际和母线以及交流系统相连的其它滤波器组确定。在预击穿期间，涌流将在一定时间内流过还未闭合的触头以及熄弧介质。有些类型的断路器、负荷开关可能对该现象敏感。
- 涌流可引起过电压，涌流的幅值和频率由上述参数和预击穿时刻确定。
- 还要注意含有（部分）带电电容器组合闸时交流系统暂态。
- 为满足要求，如必要，承包商可选用不同的方法限制断路器合闸时的涌流和过电压。这些方法包括了应用电阻器、电感器或同步合闸方案。利用同步投切，断路器在最优的时刻合闸可使涌流和元件的应力减到最小。同步合闸方案的性能受断路器本身以及控制接口特性的影响。因为断路器应在零电压附近闭合，所以对电压幅值、系统频率、谐波畸变的变化应允许有足够的裕度。更进一步，合闸精度将受到断路器的合闸时间的稳定性、控制界面的合闸顺序以及测量误差的影响。
- 短路时的合闸，断路器、负荷开关宜能够符合规定的短路电流。

11.7.3 电气数据

表 7 是承包商用来采购设备或向用户提供设计参数的数据检查清单。

表7 滤波器开关设备电气数据

滤波器开关设备设计参数	单位
额定电压方均根值(RMS)	kV

表 7 滤波器开关设备电气数据（续）

滤波器开关设备设计参数	单位
额定频率	Hz
额定电流方均根值(RMS)	A
对地和分闸开关设备端子间绝缘水平	
额定交流电压方均根值(RMS)	kV
雷电冲击耐受水平	kV
操作冲击耐受水平（额定电压>300 kV）	kV
额定短时耐受电流方均根值(RMS)	kA
额定耐受电流峰值	kA
额定短路持续时间	s
额定短路开断电流方均根值(RMS)	kA
端子故障的额定暂态恢复电压	*
额定短路关合电流峰值(peak)	kA
额定操作顺序	
额定单电容器组开断电流方均根值(RMS)	A
额定背靠背电容器组开断电流方均根值(RMS)	A
投切电容器组时最大允许操作过电压	kV
分合闸装置和辅助回路的额定电源电压	Vdc或Vrms
分合闸装置和辅助回路的额定电源频率	Hz
操作和开断用压缩气源的额定压力	MPa
合闸时间的最大偏移（如果使用同步投切）	ms
* 由若干参数确定——见IEC 62271-100。	

11.7.4 试验要求

根据 IEC 、 ANSI/IEEE 进行的型式试验可能不是总能涵盖现实情况下的真实应力。CIGRE WG 13.04 制定了关于并联电容器的投切的文件。关于并联电容器投切的文件有 CIGRE WG 13.04、 CIGRE TB 817 和 IEC 62271 系列。如前所述，在高压直流换流站中，断路器上的有些应力可能超过标准中所规定的。因此建议仔细评估相关准则并比较系统研究的结论和标准中的规定。附加的要求可能是必要的。

特别涉及到：

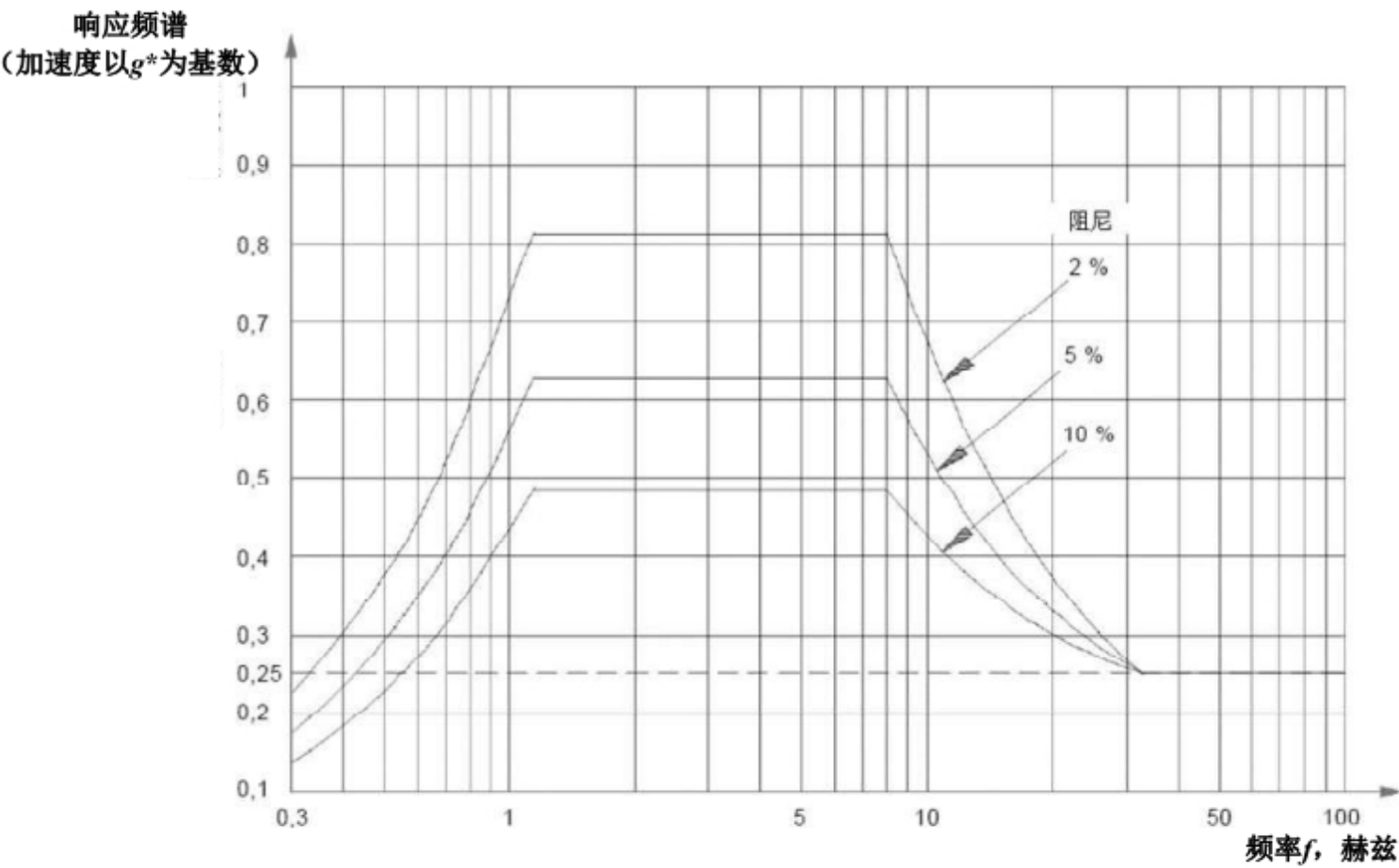
- 在现场条件下，与机械负载和重击穿概率相关的投切操作的数量要求，
- 投切方式和顺序，
- TRV 分量，特别是在故障和特殊条件下和 TOV 条件有关的。

IEC 和 ANSI/IEEE 中关于容性开关规定的要求为试验回路、试验方式和试验电压的选择提供了各种可能性。

考虑换流站方案、运行策略、规定的故障条件和交流系统参数，断路器、负荷开关的试验要求宜尽量反映实际情况。

如果适用，11.7.2.11 中提到的与影响因素有关的同步投切的准确精度宜通过试验或实际运行条件下特定的交接试验进行验证。试验条件宜考虑到影响因素，例如老化、环境条件和以往投切操作的次数。

附 录 A
(资料性)
抗震响应频谱实例 (来自 IEEE Std 693-2005)



* g 重力加速度

图 A. 1 抗震响应频谱

上述响应频谱图 A. 1 来自于经验公式:

$$\beta = \frac{(3.21 - 0.68 \ln D)}{2.1156} \dots\dots\dots (A. 1)$$

式中:

D ——临界阻尼百分数, 例如 2、5、10 等。

系数 β 在本式中没有物理意义。用它来计算加速度如下 (以重力加速度 g 为基数):

0 Hz~1.1 Hz	$0.572\beta f$
1.1 Hz~8 Hz	0.625β
8 Hz~33 Hz	$(6.6\beta - 2.64)/f - 0.2\beta + 0.33$
33 Hz~更高	0.25

参 考 文 献

- [1] CIGRE Technical Brochure 754, AC side harmonics and appropriate harmonic limits for VSC HVDC
- [2] IEC TR 62001-5, High-voltage direct current (HVDC) systems—Guidance to the specification and design evaluation of AC filters—Part 5: AC side harmonics and appropriate harmonic limits for HVDC systems with voltage sourced converters (VSC)
- [3] IEC TR 60919-1, Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters – Part 1: Steady-state conditions
- [4] IEC TR 60919-2, Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters – Part 2: Faults and switching
- [5] IEC TR 60919-3, Performance of high-voltage direct current (HVDC) systems with line-commutated converters—Part 3: Dynamic conditions
- [6] IEC TR 61000-3-6:2008, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Limits –Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems
- [7] CIGRE Technical Brochure 92, DC side harmonics and filtering in HVDC transmission systems, April 1995
- [8] CIGRE WG14.03/CC.02 (JTF 02), Connection of Harmonic Producing Installations in AC High-Voltage Networks with Particular Reference to HVDC. Guide for Limiting Interference Caused by Harmonic Currents with Special Attention for Telecommunication Systems, Electra No. 159, April 1995
- [9] IEC TR 62001-2, High-voltage direct current (HVDC) systems—Guidance to the specification and design evaluation of AC filters—Part 2: Performance
- [10] CIGRE WG 14.03, AC Harmonic Filter and Reactive Compensation for HVDC—A General Survey, Electra No. 63, March 1979
- [11] IEEE Std 519:1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- [12] CIGRE WG14.03/cc.02 (JTF 01), Connection of Harmonic Producing Installations in AC High-Voltage Networks with Particular reference to HVDC – Guide for Limiting Voltage Effects, Electra No. 149, August 1993
- [13] IEC TR 62001-3:2016, High-voltage direct current (HVDC) systems – Guidance to the specification and design evaluation of AC filters – Part 3: Modelling
- [14] IEC TR 61000-2-1, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment –Section 1: Description of the environment – Electromagnetic environment for low frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems
- [15] IEEE C57.12.00:2015, IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers
- [16] IEC 60034-1, Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance
- [17] CIGRE Technical Brochure 798, Implications for harmonics and filtering of the installation of HVDC converter stations in close proximity
- [18] J. Arrillaga, E. Acha, T.J. Densen, Ineffectiveness of transmission line transpositions at harmonic frequencies, IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. C, No. 2, March 1986

- [19] IEC TR 60146-1-2, Semiconductor converters – General requirements and line commutated converters – Part 1-2: Application guidelines
 - [20] CIGRE Technical Brochure 65, AC harmonic filters & reactive compensation for HVDC with particular reference to non-characteristic harmonics, June 1990
 - [21] CIGRE JWG 12/14-10, Consideration of Impedance and Tolerances for HVDC Converter Transformer, Electra No 167, pp 49-57, Aug 1996
 - [22] CIGRE Technical Brochure 143, Cross-modulation of harmonics in HVDC schemes
 - [23] CIGRE WG 14.25, Cross-Modulation of Harmonics in HVDC Systems, CIGRE Technical Brochure, 1999
 - [24] IEC TR 62001-4, High-voltage direct current (HVDC) systems – Guidance to the specification and design evaluation of AC filters – Part 4: Equipment
 - [25] CIGRE/CIRED WG CC02, Guide for Assessing the Network Harmonic Impedance, Electra No 167, p. 97–131, Aug. 1996
 - [26] CIGRE Joint Task Force 36.05.02/14.03.03, AC System Modelling for AC Filter Design—an Overview of Impedance Modelling, Electra No. 164, p. 133–151, February 1996
 - [27] CIGRE Technical Brochure 766, Network modelling for harmonic studies
 - [28] IEC 60815 (all parts), Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions
 - [29] IEC 60071-1, Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules
 - [30] IEC 60071-2, Insulation co-ordination – Part 2: Application guidelines
 - [31] IEC TR 60071-4, Insulation co-ordination – Part 4: Computational guide to insulation coordination and modelling of electrical networks
 - [32] IEC 60071-5, Insulation co-ordination – Part 5: Procedures for high-voltage direct current (HVDC) converter stations
 - [33] IEC 60507, Artificial pollution tests on high-voltage ceramic and glass insulators to be used on a.c. systems
 - [34] IEC 62271-1, High-voltage switchgear and controlgear—Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear
 - [35] CIGRE Technical Brochure 223, Active Filters in HVDC Applications, CIGRE SC14 Colloquium in South Africa, 1997
 - [36] IEC TR 62544, High-voltage direct current (HVDC) systems—Application of active filters
 - [37] CIGRE JWG 11/14-09, HVDC Unit Connected Generators, Electra No. 149, August 1993
 - [38] Task Force 01.05 of Study Committee 38 (Power System Analysis and Techniques), Use of DC Converters for Var Control, Electra, February 1994
 - [39] IEC TR 62543, High-voltage direct current (HVDC) power transmission using voltage sourced converters (VSC)
-