



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 26868—2011

---

## 高压滤波装置设计与应用导则

The guide for design and application of high-voltage power filters

2011-07-29 发布

2011-12-01 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 .....	I
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
3.1 谐波 .....	1
3.2 功率 .....	3
3.3 滤波装置 .....	4
3.4 滤波装置参数 .....	5
4 设计原则 .....	7
4.1 可靠性 .....	7
4.2 安全性 .....	7
4.3 功能要求 .....	7
4.4 灵活性 .....	7
4.5 其他特殊要求 .....	7
4.6 经济性 .....	7
5 设计依据 .....	8
5.1 设计条件 .....	8
5.2 设计要求 .....	9
6 设计方法 .....	12
6.1 滤波器类型的确定 .....	12
6.2 滤波器的接线 .....	13
6.3 滤波装置的组合 .....	14
6.4 无功补偿容量的确定 .....	14
6.5 滤波装置参数计算 .....	15
6.6 滤波装置谐波仿真 .....	17
6.7 滤波装置元件参数计算与校核 .....	19
6.8 滤波装置的保护 .....	20
6.9 滤波装置控制 .....	21
6.10 主电路元器件选择 .....	22
7 应用技术 .....	22
7.1 试验 .....	22
7.2 安装与布置 .....	27
7.3 滤波装置的调试 .....	31
7.4 运行及维护 .....	32
附录 A (资料性附录) 滤波装置仿真 .....	34
附录 B (资料性附录) 主电路元器件选择 .....	40
参考文献 .....	43

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国电器工业协会提出。

本标准由全国电力电容器标准化技术委员会(SAC/TC 45)归口。

本标准起草单位：西安高压电器研究院有限责任公司、河北省电力研究院、上海宝钢安大电能质量有限公司、石家庄波宏科技有限公司、四川波宏电力滤波设计研究有限公司、日新电机(无锡)有限公司、广东电网电力科学研究院、河北省电力勘测设计研究院、深圳市三和电力科技有限公司、辽宁荣信电力电子股份有限公司、深圳市环华电气技术有限公司、佛山市南海区樱花电气有限公司、合肥华威自动化有限公司、山东泰开电力电子有限公司、北京赤那思电气技术有限公司、杭州光大电力滤波设备有限公司、浙江瑞泰电力电子有限公司、淄博莱宝电力电容器有限公司、深圳市力量科技有限公司、深圳市威尔辰电力电子科技有限公司。

本标准主要起草人：段晓波、李令冬、贾保军、郭天兴、胡君慧、杨一民、徐柏榆、叶选茂、冯申荣、张建平、张健夫、王锐、龙绍清、张宗有、平怡、江钧祥、任强、焦东亮、平孝香、冯丽、朱维扬、傅光祖、夏小锋、田宜涛、李俊、陈伟俊。

# 高压滤波装置设计与应用导则

## 1 范围

本标准对高压无源电力滤波装置进行了定义、分类,规定了设计原则、设计依据、设计方法、应用技术的基本内容等。

本标准适用于工频 50 Hz、额定电压为 1 000 V 及以上至 110 kV 及以下高压无源电力滤波装置(以下简称滤波装置)。

滤波装置的设计与应用,除应符合本导则的规定外,尚应符合国家现行的有关标准、规范的规定。

## 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 1984 高压交流断路器(GB 1984—2003,IEC 62271-100:2001,MOD)

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

GB 3906 3.6 kV~40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备(GB 3906—2006,IEC 62271-200:2003,MOD)

GB 4208 外壳防护等级(IP 代码)(GB 4208—2008,IEC 60529:2001,IDT)

GB/T 11022 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求(GB/T 11022—1999,eqv IEC 60694:1996)

GB/T 12325 电能质量 供电电压偏差

GB/T 14549—1993 电能质量 公用电网谐波

GB/T 16927.1 高电压试验技术 第一部分:一般试验要求(GB/T 16927.1—1997,eqv IEC 60060-1:1989)

GB/T 16927.2 高电压试验技术 第二部分:测量系统(GB/T 16927.2—1997,eqv IEC 60060-2:1994)

GB 50227 并联电容器装置设计规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 谐波

#### 3.1.1

**公共连接点** point of common coupling

PCC

用户接入公用电网的连接处。

#### 3.1.2

**谐波测量点** harmonic measurement points

对电网的公共母线和电力线路或用户母线和供电线路以及有关设备或装置进行谐波测量的特

定点。

### 3.1.3

**基波分量 fundamental component**

对周期性非正弦交流量进行傅立叶级数分解,得到频率与电网工频相同的分量。

### 3.1.4

**谐波分量 harmonic component**

对周期性非正弦交流量进行傅立叶级数分解,得到频率为基波频率大于 1 的整数倍的分量。

### 3.1.5

**谐波次数 harmonic order**

$h$

谐波频率与基波频率的整数比。

### 3.1.6

**谐波含量 total harmonic content**

从与电网工频相对应的整周期性非正弦交流量中减去基波分量后所得量的方均根值(谐波电压含量或谐波电流含量)。

$$I_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{I^2 - I_1^2}$$

$$U_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2} = \sqrt{U^2 - U_1^2}$$

式中:

$I_H$  ——谐波电流含量;

$I_1$  ——基波电流(方均根值);

$I_h$  ——第  $h$  次谐波电流(方均根值);

$U_H$  ——谐波电压含量;

$U_1$  ——基波电压(方均根值);

$U_h$  ——第  $h$  次谐波电压(方均根值);

$U$  ——电压方均根值;

$I$  ——电流方均根值。

### 3.1.7

**谐波含有率 harmonic ratio**

HR

周期性非正弦交流量中含有的第  $h$  次谐波分量的方均根值与基波分量的方均根值之比(用百分数表示)。第  $h$  次谐波电压含有率以  $HRU_h$  表示,第  $h$  次谐波电流含有率以  $HRI_h$  表示。

### 3.1.8

**总谐波畸变率 total harmonic distortion**

THD

周期性非正弦交流量中谐波含量的方均根值与其基波分量的方均根值之比(用百分数表示)。电压总谐波畸变率以  $THD_U$  表示,电流总谐波畸变率以  $THD_I$  表示。

### 3.1.9

**谐波源 harmonic source**

向公用电网注入谐波电流或在公用电网中产生谐波电压的电气设备。

## 3.1.10

**特征谐波 characteristic harmonic**

在设计工况下,电气设备产生的特定次数谐波。

## 3.1.11

**非特征谐波 non-characteristic harmonic**

电气设备产生的不是特征谐波次数的谐波。

## 3.2 功率

## 3.2.1

**瞬时功率 instantaneous power**

$p$

端口的电压瞬时值与电流瞬时值的乘积。

$$p = ui$$

## 3.2.2

**视在功率 apparent power**

$S$

端口的电压方均根值与电流方均根值的乘积。

$$S = UI$$

## 3.2.3

**矢量功率 vector power**

**复功率 complex power**

$$\dot{S}_k \quad k=1, 2, \dots, n$$

$k$  次电压矢量与  $k$  次电流共轭矢量的乘积。

$$\dot{S}_k = \dot{U}_k \dot{I}_k^* = P_k + jQ_k$$

## 3.2.4

**有功功率 active power**

$P$

一个周期内的瞬时功率的平均值。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T ui \, dt$$

对于正弦电压及电流,矢量功率的实部即有功功率。

$$P_k = \operatorname{Re} \dot{S}_k = S_k \cos \varphi_k$$

$\varphi_k$ ——电压矢量  $\dot{U}_k$  相对于电流矢量  $\dot{I}_k$  的相位差。

对于周期性的非正弦电压及电流,有功功率是直流分量功率及基波和谐波有功功率的总和。

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} P_k$$

## 3.2.5

**无功功率 reactive power**

$Q$

对于周期性的非正弦电压及电流

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

对于正弦电压及电流,矢量功率的虚部即无功功率。

$$Q_k = \text{Im} \dot{S}_k = S_k \sin \varphi_k$$

注:供给电感的无功功率为正值,电容输出的无功功率为负值。

### 3.2.6

**功率因数 power factor**

$\lambda$

有功功率与视在功率之比。

$$\lambda = \frac{P}{S}$$

### 3.2.7

**基波功率因数 power factor of the fundamental**

同类名称:位移因数 displacement factor

$\cos \varphi_1$

基波有功功率与视在功率之比。

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$$

## 3.3 滤波装置

### 3.3.1

**无源滤波器 passive filter**

PF

由滤波电路(电阻 R、电感 L、电容 C 构成)和开关、控制和保护单元等组成无源滤波器,可用于滤除特定频率的谐波电流。

### 3.3.2

**调谐滤波器 tuned filter**

谐振频率调谐于欲滤除的谐波频率的滤波器。

调谐滤波器通常是电容、电感串联谐振型,在调谐频率下,感抗和容抗值正好相等而抵消。

### 3.3.3

**调谐频率 tuned frequency**

$f_0$

在该频率下滤波器的感抗和容抗值相等而符号相反。

### 3.3.4

**滤波器次数 filter order**

$h$  滤波器所需滤除的主导谐波次数。

对于  $h$  次滤波器,  $h = \frac{f}{f_1}$ ,  $f$  为欲滤除的主导谐波电流的频率,  $f_1$  为基波频率,  $h$  为正整数。

### 3.3.5

**单调谐滤波器 single-tuned harmonic filter**

只有一个调谐频率的滤波器。

### 3.3.6

**高通滤波器 high-pass filter**

在某一截止频率后的频带范围内呈低阻抗特性,用以吸收谐波电流的滤波器。

### 3.3.7

**主电路 main circuit**

滤波装置与交流配电线路相连接并具有同一绝缘水平的电路。

## 3.3.8

**辅助电路** auxiliary circuit

用以完成检测、控制、保护等辅助功能的二次电路。

## 3.3.9

**滤波器调谐次数** tuned order of filter

$h_0$

滤波器调谐频率的次数。

对于  $h$  次滤波器的调谐次数  $h_0$ ,  $h_0 = \frac{f_0}{f_1}$ ,  $f_0$  为调谐频率。

## 3.3.10

**滤波装置** filter

由接于同一供电母线上的全部滤波器组成滤波装置。

## 3.4 滤波装置参数

## 3.4.1

**装置的额定电压** rated voltage of filter

$U_N$

设计滤波装置时规定的交流电压。

## 3.4.2

**滤波器的额定电流** rated current of filter

$I_N$

设计滤波器时所采用的电流方均根值。

## 3.4.3

**电容器安装容量** assemble capacity of capacitor

$Q_{CN1}$

滤波器中全部电容器的额定容量之和。

## 3.4.4

**基波补偿容量** fundamental compensation capacity

$Q_{C1}$

滤波装置(或滤波器)在额定电压下运行时的基波无功功率。

## 3.4.5

**电容器的额定电压** rated voltage of the capacitor

$U_{CN}$

设计滤波器时,滤波电容器所采用的电压方均根值。

## 3.4.6

**电抗器的额定电压** rated voltage of the reactor

$U_{LN}$

设计滤波器时,串联电抗器所采用的电压方均根值。

## 3.4.7

**滤波电抗器基波感抗** fundamental inductive reactance of filter reactor

$X_{L1}$

滤波电抗器的基波感抗值。

## 3.4.8

滤波电容器基波容抗 fundamental capacitive reactance of filter capacitor

 $X_{C1}$ 

滤波电容器的基波容抗值。

## 3.4.9

额定电抗率 rated reactance ratio

 $K_{LN}$ 

滤波器中串联电抗器的基波感抗与电容器基波容抗的比值。

$$K_{LN} = \frac{X_{L1}}{X_{C1}} \times 100\%$$

## 3.4.10

最大工作电流 maximum working current

 $I_{max}$ 

温升不超过规定值时,滤波器能连续运行的最大工作电流方均根值。

## 3.4.11

滤波装置谐波电流系数 harmonic current coefficient of filter

 $k_{lh}$ 

滤波装置接入后,注入系统的谐波电流与谐波电流发生量的比值。

$$k_{lh} = \frac{I_{Sh}}{I_{gh}}$$

式中:

 $I_{gh}$ ——与滤波装置接入同一供电母线的谐波电流源(全部非线性负载)的  $h$  次谐波电流发生量; $I_{Sh}$ ——滤波装置接入后,谐波电流源注入系统的  $h$  次谐波电流。

## 3.4.12

滤波装置谐波电流滤除率 harmonic current filtering rate of filter

 $\eta_{lh}$ 

滤波装置接入后注入系统的谐波电流的减少量与接入前注入系统谐波电流的百分比。

$$\eta_{lh} = (1 - k_{lh}) \times 100\%$$

## 3.4.13

滤波电抗器品质因数 quality factor of filter reactor

 $q_{Lh}$ 指滤波电抗器  $h$  次谐波频率下感抗与电阻的比值。

$$q_{Lh} = \frac{hX_{L1}}{R_h}$$

式中:

 $R_h$ ——滤波电抗器的  $h$  次电阻。

## 3.4.14

滤波器品质因数 quality factor of filter

 $q_{fh}$ 指滤波器  $h$  次谐波频率时,其等效串联  $h$  次谐波感抗  $X_{eh}$  与等效串联  $h$  次等效电阻  $R_{eh}$  的比值。

$$q_{fh} = \frac{X_{eh}}{R_{eh}}$$

## 4 设计原则

### 4.1 可靠性

可靠性是指在规定的运行条件下滤波装置能够连续工作的保证程度。即滤波装置的设计应能保证在规定的运行环境和运行条件下,确保其连续可靠工作。

对于特殊的运行环境和运行条件,应通过采用相应的技术措施与设计标准,以满足可靠性要求。

### 4.2 安全性

滤波装置的设计应能保证其在正常运行、外部电网事故及异常时本身的安全性,同时装置本身的投入、切除、正常运行及异常时不会对系统运行产生不良影响。

滤波装置的设计应有可靠的技术措施,如:采用自动控制、保护单元、设备可靠接地、闭锁装置、围网设置和警告标志等,以保证装置安全运行。

### 4.3 功能要求

#### 4.3.1 谐波电流滤波功能

谐波源注入公共连接点的谐波电流在规定的限值以内。

#### 4.3.2 无功补偿功能

在负荷功率变化范围内,装置的无功补偿能满足负载对功率因数和母线电压偏差的要求。

### 4.4 灵活性

#### 4.4.1 允许多种组合的运行方式

装置除了满足技术性能指标、可靠性、安全性、经济性外,还应能满足不同工况和不同负荷水平下的灵活运行的需求,允许装置多种组合的运行方式。

#### 4.4.2 允许多种控制方式

可根据实际情况,选择手动和自动控制。自动控制又可分电压无功综合控制和电压、谐波及无功综合控制等。

### 4.5 其他特殊要求

即特殊的运行环境和特殊的技术性能指标。

### 4.6 经济性

#### 4.6.1 装置的运行损耗应力求最低。

#### 4.6.2 在满足 4.1~4.5、4.6.1 要求的前提下,以制造成本最低为原则进行优化设计。

5 设计依据

5.1 设计条件

5.1.1 环境条件

5.1.1.1 海拔

滤波装置安装地点的海拔高度。  
为便于产品的标准化,推荐一般产品可按照海拔不超过 1000 m 考虑。  
用于海拔高度高于 1000 m 地区的滤波装置,其要求应由用户与制造方协商确定。

5.1.1.2 温度和湿度范围

滤波装置运行地点的环境空气温度变化范围如表 1 所示。

表 1 滤波装置运行地点的环境空气温度变化范围

类别	安装地点	环境温度 ℃	
		最高	最低
裸导体	屋外	最热月平均最高温度	
	屋内	该处通风设计温度。当无资料时,可取最热月平均最高温度加 5℃	
电器	屋外	年最高温度	年最低温度
	屋内电抗器	该处通风设计最高排风温度	
	屋内其他	该处通风设计温度。当无资料时,可取最热月平均最高温度加 5℃	
注 1: 年最高(或最低)温度为一年中所测得的最高(或最低)温度的多年平均值。 注 2: 最热月平均最高温度为最热月每日最高温度的月平均值,取多年平均值。			

滤波装置运行地点的相对湿度,应采用当地湿度最高月份的平均相对湿度。对湿度较高的场所,应采用该处实际相对湿度。当无资料时,相对湿度可比当地湿度最高月份的平均相对湿度高 5%。(一般地区推荐的产品环境相对湿度:月平均相对湿度不大于 90%,日平均相对湿度不大于 95%)。

5.1.1.3 风速

安装运行地点距离地面 10 m 高、30 年一遇的 10 min 平均最大风速,最大设计风速超过 35 m/s 的地区,可在屋外滤波装置的布置中采取措施。阵风对装置的影响,应由制造部门在设计中考虑。

5.1.1.4 覆冰厚度

对于户外运行的装置,在积雪、覆冰严重地区,应尽量采取防止冰雪引起事故的措施。隔离开关的破冰厚度,应大于安装地点的最大覆冰厚度。

5.1.1.5 抗污秽能力

设备外绝缘的爬电比距按照安装地点的污秽等级确定。

#### 5.1.1.6 耐受地震能力

滤波装置设计需适应当地的地震烈度,必要时应进行抗震强度验算。

安装时,应考虑支架对地震力的放大作用。辅助设备应具有与主设备相同的耐受地震能力。

#### 5.1.1.7 其他

非正常使用条件由制造方和购买方商定。

### 5.1.2 电源及供配电系统

#### 5.1.2.1 系统参数

系统公共连接点和滤波装置预接入点的系统接线及运行方式,各种方式下电网短路容量,变压器、输配电线路、补偿电容器和电抗器及限流电抗器等设备参数。

#### 5.1.2.2 电压偏差

系统公共连接点和滤波装置接入点电源及供配电系统实际和可能的运行电压范围。

#### 5.1.2.3 电压波动

系统公共连接点和滤波装置接入点系统电压变动和闪变。

#### 5.1.2.4 频率变化

系统公共连接点和滤波装置接入点电网频率的变化范围。

#### 5.1.2.5 谐波水平

系统公共连接点和滤波装置接入点系统的谐波特征和背景谐波水平。

影响系统谐波特征及谐波水平的主要方面有:

- a) 系统电源构成,包括有些交直流混合电源系统,特别是直流电源系统不同运行方式;
- b) 不同运行方式和运行电压及负荷水平下系统背景谐波;
- c) 已有和规划中的谐波源类型及其运行方式。

#### 5.1.2.6 电压不平衡

系统公共连接点和滤波装置接入点系统三相电压不平衡数据。

### 5.1.3 负载条件

#### 5.1.3.1 负载的谐波特征和各次谐波含量。

#### 5.1.3.2 负载的有功和无功的变化范围、变化频度和变化速度。

## 5.2 设计要求

### 5.2.1 接入电网基本要求

5.2.1.1 滤波装置的设计,应根据拟安装地点系统接线及运行方式、谐波水平(含背景谐波)和无功需求等因素,按全面规划、合理布局、分级滤波、就地平衡的原则确定最优滤波容量和方式。

5.2.1.2 设计时应核算滤波装置按各种容量组合运行时,滤波装置所在系统不得发生有危害的谐振,且考核点的谐波水平在设计限值范围内。

5.2.1.3 滤波装置宜装设在变压器的主要谐波源负荷侧。

5.2.2 电压控制

滤波装置运行及退出时,其所接系统引起的电压偏差变化应符合 GB/T 12325 的规定范围。  
对供电电压允许偏差有特殊要求的用户,由设计方、制造方与购买方协议确定。

5.2.3 电压波动限制

对多支路滤波装置,投切任何一支路在考核点所引起的电压变动值满足以下要求:  
——20 kV 及以上等级不宜超过其额定电压的 $\pm 2.5\%$ ;  
——20 kV 以下等级不宜超过其额定电压的 $\pm 3\%$ 。

5.2.4 频率波动、滤波器参数和系统参数变化

滤波装置的设计应考虑频率波动、滤波器参数变化和系统参数变化对系统的阻抗特性和谐波水平产生的影响,确保滤波装置和系统安全稳定要求。

5.2.5 考核点谐波限值要求

5.2.5.1 系统谐波限值

5.2.5.1.1 通则

系统谐波限值是保证不因过大的谐波畸变而使系统所连接设备丧失功能或发生故障。  
对 PCC 点,滤波装置设计应满足 GB/T 14549—1993 规定的谐波限值。对用户或企业内部电网的母线,可参照 GB/T 14549—1993 或根据用户要求另行规定采用电磁兼容谐波限值,或由用户另行规定。

5.2.5.1.2 谐波电压限值

表 2 公用电网谐波电压限值

电网标称电压 kV	电压总谐波畸变率 %	各次谐波电压含有率 %	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

5.2.5.1.3 谐波电流允许值

公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流分量(方均根值)不应超过表 3 中规定的允许值。当公共连接点处的最小短路容量不同于基准短路容量时,表 3 中的谐波电流允许值的换算见 GB/T 14549—1993 附录 B。

表 3 注入公共连接点的谐波电流允许值

标准 电压 kV	基准 短路 容量 MVA	谐波次数及谐波电流允许值 A																							
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0	2.3	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9

注：220 kV 基准短路容量取 2 000 MVA。

同一公共连接点的每个用户向电网注入的谐波电流允许值按此用户在该点的协议容量与其公共连接点的供电设备容量之比进行分配,分配的计算方法见 GB/T 14549—1993 的附录 B。

#### 5.2.5.2 设备承受能力

滤波装置所在系统由各种供用电设备构成,各种设备对谐波的承受能力各不相同,滤波装置设计时应保证在任何一种系统运行方式下,各种供用电设备所承受的谐波水平在设备本身性能要求范围内。

$I_h$  为  $h$  次谐波电流(方均根值),则流经设备的电流有效值  $I$  按照式(1)计算:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \cdots + I_h^2} \quad \cdots \cdots (1)$$

$U_h$  为  $h$  次谐波电压(方均根值),则设备承受的电压有效值  $U$  按照式(2)计算:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \cdots + U_h^2} \quad \cdots \cdots (2)$$

设备承受的峰值电压按照式(3)计算:

$$U_{pk} = \sqrt{2(U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \cdots + U_h^2)} \quad \cdots \cdots (3)$$

#### 5.2.6 无功补偿要求

无功补偿容量应根据负荷需求并结合本地区电网无功规划以及无功电压有关规定确定。

如在用户变压器低压侧安装滤波装置时,设计上应计算到用户变压器、电抗器及其他感性负荷设备的无功功率需求,确保补偿后的功率因数符合相关规定。

为实现对电压和无功的有效调控,一般情况下,要求用户功率因数不能超前,不宜出现无功功率过补偿。

#### 5.2.7 安全运行要求

5.2.7.1 滤波装置设计时应计算系统阻抗频谱,校核系统谐振点,保证在任何一种系统运行方式和负荷水平下,滤波装置所在系统不会发生有害谐振。

5.2.7.2 设计时应保证在系统正常运行方式和负荷水平下,考虑包括各次谐波分量在内时,滤波装置各设备或元件应安全可靠运行。

5.2.7.3 滤波装置应具备完善的保护功能,在因系统或负荷异常而产生非特征性谐波分量而导致谐波异常放大或发生谐振时,能有效监测预警或动作切除滤波器。

5.2.7.4 滤波装置应装设放电器件,放电特性应满足 GB 50227 相关规定要求。有特殊要求的,另行

约定。

5.2.7.5 构成滤波装置的电器设备的外壳、安装支架及绝缘台架的电位均应固定,并符合 GB 50227 的有关规定。

5.2.7.6 滤波装置应有完善的闭锁装置,避免误操作。

5.2.7.7 多个滤波器组成的滤波装置,不同调谐频率的滤波器之间应设置适当的投切闭锁,保证不同调谐频率的滤波器投切时不会出现系统谐波放大。投入时按调谐频率由低至高逐级投入,切除顺序则相反。

5.2.8 可靠性要求

5.2.8.1 在事先约定的电源及供电系统电压偏差、频率偏差和设备允许温度变化范围内,滤波装置性能应满足设计要求。

5.2.8.2 对于大容量的滤波装置,当有限数量的电容器元件或单元击穿时,如需滤波装置继续运行,应进行可靠性、安全性校核计算。

5.2.9 接线要求

5.2.9.1 宜采用单星形接线或双星形接线。在中性点非直接接地的电网中,星形接线电容器组的中性点不应接地。

5.2.9.2 每相或每个臂,对于采用外熔断器或内部熔丝保护的电容器组,由多台电容器串并联组合时,一般采用先并联后串联的接线方式。

5.2.10 环保要求

5.2.10.1 滤波装置所选用的所有主设备和辅助设备,如果含有会污染环境或有其他危险的物质,应按照国家的相关法律执行,采取相应的技术措施,并在单元器件的标牌上或其他地方有明显标志。

5.2.10.2 滤波装置运行中产生的噪音应符合国家的相关规定要求。

6 设计方法

6.1 滤波器类型的确定

6.1.1 常用滤波器的类型

滤波器的类型很多,最常用的滤波器是如图 1 所示的 3 种类型滤波器。

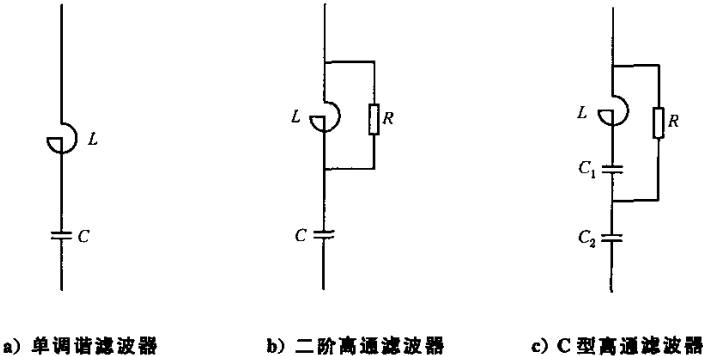


图 1 常用无源滤波器

单调谐滤波器是最简单实用的滤波电路,其优点是在调谐频率点阻抗近似为零,在此频率下滤波效果显著。缺点是在低于调谐频率的某些频率与网络形成高阻抗的并联谐振,低次单调谐滤波器基波有功功率损耗较大。

二阶高通滤波器对于调谐频率点以及高于此频率的其他频率有较好的滤波效果。它一般适合于4次及以上更高次谐波电流的滤波。二阶高通滤波器基波有功损耗较小,其并联电阻器的谐波有功损耗较大。

电弧炉、电焊机、循环换流器等负荷不仅产生整数次谐波电流,而且产生间谐波电流,高品质因数的单调谐滤波器可能会使间谐波放大,低品质因数的单调谐滤波器基波有功损耗大。因此在要求高阻尼且调谐频率低于、等于4次的谐波滤波器常选用C型高通滤波器。

### 6.1.2 滤波器类型的确定原则

6.1.2.1 负载在某些频率点谐波电流大,频率点附近无间谐波,可以选用单调谐滤波器。

6.1.2.2 不高于4次谐波的频率点附近如果存在间谐波,宜选用高阻尼C型高通滤波器。

6.1.2.3 要求高阻尼高通且调谐频率等于、高于4次的谐波频率点,可以选用二阶高通滤波器。

### 6.2 滤波器的接线

#### 6.2.1 接线方式

高压并联无源滤波器的接线方式一般有前置电抗器及后置电抗器两种,如图2所示。

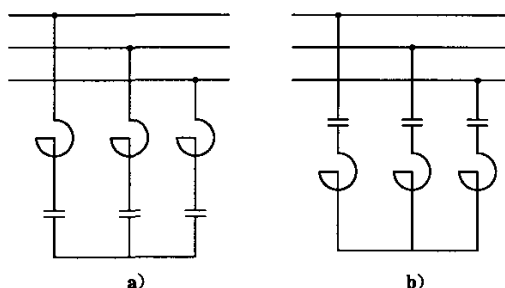


图2 高压无源滤波器的接线方式

#### 6.2.2 电抗器前置接线

图2 a)为电抗器前置接线,电抗器本体对地全绝缘,当滤波电抗器与电容器的连线发生对地短路或电容器组发生全部击穿时,滤波电抗器将承受短路电流和电压,其动、热稳定要求与断路器相同。

对于高压滤波器,一般推荐采用电抗器前置接线方式,这样可以限制短路电流,同时电容器可采用双星形接法,便于使用不平衡的保护方案。

#### 6.2.3 电抗器后置接线

图2 b)为电抗器后置接线,当滤波电抗器与电容器连接线发生对地短路时,滤波电抗器被旁路,短路电流小于滤波器的正常工作电流。仅当电容器组被全部击穿时,电抗器的动、热稳定要求才与断路器相同。

对耐受短时短路电流能力较差的电抗器,如容量较小的扁形电抗器,一般考虑电抗器后置接线方式。

6.3 滤波装置的组合

6.3.1 滤波装置组合的定义

当负载有多个频率的谐波电流发生或无功变化较大时,需要 2 个或 2 个以上滤波器同时运行或分组投切。

6.3.2 滤波装置组合原则

在满足无功补偿,谐波滤波和电压波动指标的前提下,力求滤波器数量最少。

6.3.3 典型组合案例

滤波器典型组合案例见表 4。

表 4 滤波器典型组合案例

谐波源描述	滤波装置组合方式(推荐)
注入系统的三相 3 次谐波电流方向不一致	3 次单调谐滤波器
6 脉动整流负荷	5 次、7 次单调谐滤波器与 11 次高通滤波器组合
12 脉动整流负荷	5 次单调谐滤波器与 11 次二阶高通滤波器组合或 5、7 次单调谐与 11 次、13 次、17 次二阶高通滤波器组合
交流电弧炉	3 次单调谐与 4 次单调谐(或二阶高通)滤波器组合或 2 次 C 型高通滤波器、3 次单调谐滤波器与 4 次单调谐(或二阶高通)滤波器组合
大功率可关断高速电力器件的高压变频器负荷	5 次、7 次单调谐与 11 次、13 次、17 次二阶高通滤波器组合

6.4 无功补偿容量的确定

补偿容量:

$$Q_{C1} = P_1 \left[ \sqrt{\left( \frac{1}{\cos\varphi_1} \right)^2 - 1} - \sqrt{\left( \frac{1}{\cos\varphi_{C1}} \right)^2 - 1} \right] \dots\dots\dots (4)$$

补偿后电压变化近似为:

$$e_{u, \max} = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\% = \frac{Q_{C1} - Q_{1\min}}{S_{sc, \min}} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

$$e_{u, \min} = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\% = \frac{Q_{C1} - Q_{1\max}}{S_{sc, \min}} \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

系统电压的变动:

$$\Delta U = U_P - U_N \dots\dots\dots (7)$$

式中:

- $U_N$  ——滤波装置接入系统处的额定电压,单位为千伏(kV);
- $U_P$  ——滤波装置接入系统处的实际运行电压,单位为千伏(kV);
- $S_{sc, \min}$  ——系统最小短路容量,单位为兆伏安(MVA);
- $\cos\varphi_1$  ——补偿前负载基波平均功率因数测量值或设计值;

- $P_1$  ——负载基波平均有功功率,单位为兆瓦(MW);
- $Q_{1\max}$  ——负载基波最大无功功率,单位为兆乏(Mvar);
- $Q_{1\min}$  ——负载基波最小无功功率,单位为兆乏(Mvar);
- $\cos\varphi_{C1}$  ——补偿后基波平均功率因数设计值;
- $e_{u,\max}$  ——当负载基波无功最小时,补偿后存在的最大电压正偏差;
- $e_{u,\min}$  ——当负载基波无功最大时,补偿后存在的最大电压负偏差。

6.5 滤波装置参数计算

6.5.1 滤波装置的无功补偿容量分配

- 6.5.1.1 由式(4)计算滤波装置总无功补偿容量  $Q_{C1}$ 。
- 6.5.1.2 设滤波装置由  $h_1、h_2\cdots h_m$ 次滤波器并联组成,通过  $h_i(i=1,2\cdots m)$ 次滤波器的主导谐波电流为  $I_{h_i}$ ,建议  $h_i$ 次滤波器的无功补偿容量按照式(8)进行计算。

$$Q_{C1,h_i} = \frac{I_{h_i}/h_i}{\sum_{j=1}^m (I_{h_j}/h_j)} Q_{C1} \quad \cdots \cdots \cdots (8)$$

6.5.2 滤波器的调谐频率

理想条件下,滤波装置的调谐频率应该与需要滤除的特征谐波频率相等,这样可以取得最好的滤波效果。考虑到滤波电容器电容的温漂及制造偏差、滤波电抗器的制造偏差、铁心电抗器的非线性和系统频率的变化,这些因素可能会使滤波器特征频率阻抗呈容性而导致谐波放大,为了保证滤波器长期运行的可靠性,一般取  $h_i$ 次滤波器的调谐频率  $a h_i f_1$  小于其特征频率  $h_i f_1$  (其中  $a$  为调谐系数,  $f_1$  为系统频率)。调谐系数  $a$  的推荐值见表 5。

表 5 调谐系数  $a$  的推荐值

滤波器次数 $h_i$	调谐系数 $a$	
	空心电抗器	铁心电抗器
2	0.96	0.93
3、4	0.96~0.97	0.93~0.94
$\geq 5$	0.97~0.98	0.94~0.95

6.5.3 滤波电抗器的品质因数

滤波装置的有功基波损耗应不大于总补偿容量的 0.5%,为了减小滤波器的有功基波损耗,各滤波电抗器品质因数推荐值见表 6。

表 6 滤波电抗器品质因数推荐值

滤波器次数 $h_i$	滤波电抗器品质因数 $q_{LA}$	
	$h=1, 50\text{ Hz}$	$h=h_0$ , 调谐次数
2	$\geq 50$	$\geq 80$
3	$\geq 40$	$\geq 100$
4~7	$\geq 20$	$\geq 100$
$\geq 7$	$\geq 10$	$\geq 100$

## 6.5.4 滤波器的 R、L、C 参数计算

6.5.4.1 单调谐滤波器( $h$ 次)

$$a) \quad X_{L1} = \frac{U_{P,\max}^2}{Q_{Cl,h}(h_0^2 - 1)} (\Omega) \quad L = \frac{10}{\pi} X_{L1} (\text{mH})$$

$$b) \quad R_e = \frac{h_0 X_{L1}}{q_{Lh_0}} (\Omega)$$

$$c) \quad X_{C1} = h_0^2 X_{L1} (\Omega) \quad C = \frac{10^6}{2\pi f_1 X_{C1}} (\mu\text{F})$$

$$d) \quad \eta_{P1} = \frac{P_1}{Q_{Cl,h}} = \frac{\sqrt{h_0}}{q_{Lh_0}(h_0^2 - 1)} + 0.001$$

式中:

$h$  —— 滤波器次数;

$h_0$  —— 滤波器调谐次数;

$q_{Lh_0}$  —— 滤波电抗器调谐频率时品质因数;

$Q_{Cl,h}$  ——  $h$  次滤波器基波补偿容量,单位为兆乏(Mvar);

$U_{P,\max}$  —— 供电母线实际运行的最高电压,单位为千伏(kV);

$f_1$  —— 基波频率,单位为赫兹(Hz);

$R_e$  —— 滤波电抗器调谐频率时等效串联电阻;

$\eta_{P1}$  —— 滤波器基波损耗率估算值;

$P_1$  —— 滤波器总基波有功损耗,单位为兆乏(Mvar)。

6.5.4.2 二阶高通滤波器( $h$ 次)

$$a) \quad X_{L1} = \frac{U_{P,\max}^2}{Q_{Cl,h}(h_0^2 - 1)} (\Omega) \quad L = \frac{10}{\pi} X_{L1} (\text{mH})$$

$$b) \quad R = h_0 X_{L1} q_{th_0} (\Omega) \quad q_{th_0} = 0.6 \sim 30$$

$$c) \quad X_{C1} = h_0^2 X_{L1} (\Omega) \quad C = \frac{10^6}{2\pi f_1 X_{C1}} (\mu\text{F})$$

$$d) \quad \text{基波损耗率估算值: } \eta_{P1} = \frac{P_1}{Q_{Cl,h}} = \frac{1}{h_0(h_0^2 - 1)q_{th_0}} + \frac{\sqrt{h_0}}{(h_0^2 - 1)q_{Lh_0}}$$

式中:

$q_{th_0}$  —— 滤波器调谐频率时的品质因数。

## 6.5.4.3 C型高通滤波器

$$a) \quad X_{C21} = \frac{U_{P,\max}^2}{Q_{Cl,h}} (\Omega) \quad C_2 = \frac{10^6}{2\pi f_1 X_{C21}} (\mu\text{F})$$

$$b) \quad X_{C11} = X_{L1} = \frac{X_{C21}}{h_0^2 - 1} (\Omega) \quad C_1 = \frac{10^6}{2\pi f_1 X_{C11}} (\mu\text{F}) \quad L = \frac{10}{\pi} X_{L1} (\text{mH})$$

$$c) \quad R = \frac{q_{th_0} X_{C21}}{h_0} (\Omega), q_{th_0} = 8 \sim 30$$

$$d) \quad \eta_{P1} = \frac{P_1}{Q_{Cl,h}} = \frac{\sqrt{h_0}}{q_{Lh_0}(h_0^2 - 1)} + 0.001$$

式中:

$X_{C_{1,1}}$ —— $C_1$ 的基波容抗,单位为欧姆( $\Omega$ );

$X_{C_{2,1}}$ —— $C_2$ 的基波容抗,单位为欧姆( $\Omega$ )。

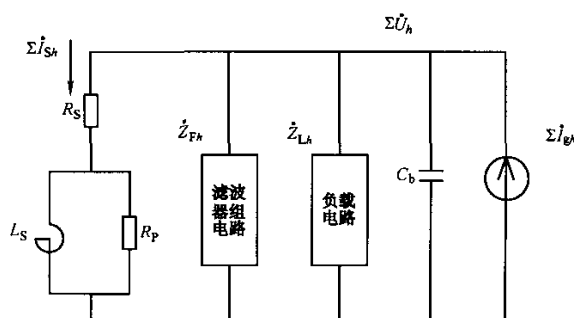
## 6.6 滤波装置谐波仿真

### 6.6.1 仿真目的

通过仿真,计算网络阻抗的幅频特性和相频特性,计算流入系统的谐波电流系数(谐波电流源流入系统的谐波电流/谐波电流发生量),由此评价滤波装置的性能并计算滤波器元件的电压、电流和功率等参数。

### 6.6.2 仿真电路

滤波装置接入系统后的配电网络等效电路如图3所示。



图中:

$R_s, L_s, R_p$ ——系统阻抗参数;

$\dot{Z}_{Fh}$ ——滤波装置  $h$  次谐波阻抗,针对滤波装置不同的组合方式,  $\dot{Z}_{Fh}$  有不同的值;

$\dot{Z}_{Lh}$ ——负载  $h$  次谐波阻抗;

$C_b$ ——配电电缆电容参数;

$\Sigma \dot{I}_{sh}$ ——配电网内非线性负载的谐波电流发生量;

$\Sigma \dot{I}_{sh}$ ——非线性负载注入系统的谐波电流;

$\Sigma \dot{U}_h$ ——非线性负载注入系统的谐波电流所产生的谐波电压。

图3 仿真电路

### 6.6.3 仿真计算

#### 6.6.3.1 阻抗计算

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{Nh} &= \dot{Z}_{bh} // \dot{Z}_{Lh} // \dot{Z}_{Fh} // \dot{Z}_{Sh} = \dot{Z}_{Nh} e^{j\theta_{Nh}} \\ \dot{Z}_{Sh} &= R_s + (j2\pi f_1 h L_s // R_p) \\ \dot{Z}_{bh} &= -j \frac{10^6}{2\pi f_1 h C_b} (\Omega)\end{aligned}$$

式中:

$\dot{Z}_{Nh}$ ——网络谐波阻抗,单位为欧姆( $\Omega$ );

$\dot{Z}_{Sh}$ ——系统阻抗,单位为欧姆( $\Omega$ );

$\dot{Z}_{lk}$  —— 电缆阻抗, 单位为欧姆( $\Omega$ );

$\beta_{Nk}$  —— 为  $\dot{Z}_{Nk}$  的幅角;

$f_1$  —— 系统频率, 单位为赫兹(Hz);

$C_b$  —— 配电电缆电容, 单位为微法( $\mu F$ )。

#### 6.6.3.2 谐波电流系数

$$k_{lk} = Z_{Nk} / Z_{Sk}$$

#### 6.6.3.3 注入系统的谐波电流

$$I_{Sk} = I_{gk} k_{lk}, I_{SH} = \sqrt{\sum_{k \geq 2} I_{Sk}^2}$$

#### 6.6.3.4 谐波电流源在母线上产生的谐波电压

$$U_k = I_k Z_{Nk}, \text{ 或 } U_k = I_{sk} Z_{sk}$$

$$U_H = \sqrt{\sum_{k \geq 2} U_k^2}$$

$$HRU_k = \frac{U_k}{U_N} \times 100\%$$

$$THD_U = \frac{U_H}{U_N} \times 100\%$$

#### 6.6.3.5 R、L、C 元件的电压和电流

计算流入各 R、L、C 的基波电流、各次谐波电流、总电流; 计算 R、L、C 两端的基波电压、谐波电压。

#### 6.6.3.6 计算滤波器的有功损耗

根据 6.6.3.5 计算滤波装置总的基波损耗  $P_{T1}$  和谐波损耗  $P_{TH}$ , 滤波装置总损耗  $P_T = P_{T1} + P_{TH}$

$$\text{滤波装置总损耗率: } \eta_{P_T} = \frac{P_T}{Q_{Cl}} \times 100\%$$

#### 6.6.4 仿真结果评价

6.6.4.1  $I_{sk}$  小于或等于规定限值。

6.6.4.2  $HRU_k$ 、 $THD_U$  小于或等于规定限值。

6.6.4.3  $k_{lk}$  为极大值的点即并联谐振点, 并联谐振频率应远离非线性负载的特征谐波频率。

6.6.4.4 对于小于  $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$  的负载,  $k_{lk}$  在并联谐振点小于等于 10; 对于大于等于  $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$  小于  $40 \text{ MV} \cdot \text{A}$  的负载,  $k_{lk}$  在并联谐振点小于等于 8; 对于大于等于  $40 \text{ MV} \cdot \text{A}$  的负载,  $k_{lk}$  在并联谐振点小于等于 6。

6.6.4.5 各调谐频率均小于各邻近特征谐波频率的 2%~5%。

6.6.4.6 滤波装置总损耗率的限值小于设计值。

6.6.4.7 若 6.6.4.1~6.6.4.6 各项全部成立, 则 6.5 和 6.6 的各项设计计算达到要求; 若有一项不成立, 则需要对 6.5 和 6.6 的设计进行调整和优化, 直至 6.6.4.1~6.6.4.6 项全部成立。

#### 6.6.5 仿真案例

参见附录 A。

## 6.7 滤波装置元件参数计算与校核

### 6.7.1 电容器组参数计算与校核

#### 6.7.1.1 过电压校核

$$K_u U_{CN} \geq U_{C1, \max} + \sum_{h \geq 2} U_{Ch, 0.95}$$

式中:

$K_u$  ——电容器的电压因数;

$U_{CN}$  ——电容器的额定电压;

$U_{C1, \max}$  ——加在电容器两端的基波电压的最大值(即为在最高运行电压时计算的  $U_{C1}$  值);

$U_{Ch, 0.95}$  ——加在电容器两端  $h$  次谐波电压的 95% 概率大值。

注 1:  $U_{C1}$  和  $U_{Ch}$  由 6.6.3 仿真结果中得到。

注 2:  $K_u U_{CN}$  为电容器长期运行时, 加在电容器两端的最高允许电压。

注 3:  $K_u$  的取值范围为 1~1.3, 在系统电压波动和谐波较大时,  $K_u$  的取值比较复杂,  $K_u$  的取值方法在 GB/T 11024.1—2010 第 19 章和第 27 章中有较详尽的叙述。在实际工程中推荐按如下原则选取  $K_u$  的值:

系统运行基波电压和谐波电压是稳定的, 即在一天 24 h 中, 大于 12 h 以上的时间内  $U_{C1} + \sum_{h \geq 2} U_{Ch} \geq 0.9(U_{C1, \max} + \sum_{h \geq 2} U_{Ch, 0.95})$ , 则  $K_u = 1$ , 否则  $K_u = 1.1$ 。

#### 6.7.1.2 过电流校核

$$1.3 I_{CN} \geq (I_{C1, \max}^2 + \sum_{h \geq 2} I_{Ch, 0.95}^2)^{\frac{1}{2}}$$

式中:

$I_{CN}$  ——电容器的额定电流;

$I_{C1, \max}$  ——流过电容器的基波电流的最大值(即为在最高运行电压时流过电容的电流值),  $I_{C1, \max} = 2\pi f_1 C U_{C1, \max}$ ;

$I_{Ch, 0.95}$  ——流过电容器的  $h$  次谐波电流的 95% 概率大值,  $I_{Ch, 0.95} = 2\pi f_1 C h U_{Ch, 0.95}$ 。

#### 6.7.1.3 过容量校核

$$1.14 \sqrt{K_u} U_{CN} \geq (U_{C1, \max}^2 + \sum_{h \geq 2} h U_{Ch, 0.95}^2)^{\frac{1}{2}}$$

6.7.1.4 由 6.7.1.1、6.7.1.3 计算所得  $U_{CN}$  中大值为电容器最小额定电压  $U_{CN}$ , 由 6.7.1.2 计算得到的  $I_{CN}$  为电容器的额定电流。

电容器额定基波容量  $Q_{CN1} \geq U_{CN} I_{CN}$

### 6.7.2 电抗器的电压电流参数

#### 6.7.2.1 系统标称电压 $U_N$

#### 6.7.2.2 额定电流

$$I_{LN} \geq (I_{L1, \max}^2 + \sum_{h \geq 2} I_{Lh, 0.95}^2)^{\frac{1}{2}}$$

式中:

$I_{LN}$  ——流过电抗器的额定电流;

$I_{L1, \max}$  ——流过电抗器的基波电流最大值,  $I_{L1, \max} = I_{C1, \max} = 2\pi f_1 C U_{C1, \max}$ ;

$I_{Lh, 0.95}$  ——流过电抗器的  $h$  次谐波电流 95% 概率大值, 对于单调谐滤波器  $I_{Lh, 0.95} = I_{Ch, 0.95}$ , 对于二阶高通滤波器和 C 型高通滤波器,  $I_{Lh, 0.95}$  由 6.6 的仿真结果进一步计算得到。

6.7.3 电阻器的电流和功率计算

6.7.3.1 额定电压:运行电压最大值  $U_{p,max}$

6.7.3.2 额定电流

$$I_{RN} \geq (I_{R1,max}^2 + \sum_{h \geq 2} I_{Rh,0.95}^2)^{\frac{1}{2}}$$

式中:

- $I_{RN}$  ——流过电阻器的额定电流;
- $I_{R1,max}$  ——流过电阻器基波电流的最大值,由 6.6 仿真结果进一步计算得到;
- $I_{Rh,0.95}$  ——流过电阻器  $h$  次谐波电流的 95% 概率大值,由 6.6 仿真结果进一步计算得到。

6.7.3.3 额定功率

$$P_{RN} \geq I_{RN}^2 R$$

6.8 滤波装置的保护

6.8.1 保护功能

当出现异常现象,但不危及系统和设备安全时,保护系统发出报警信号,允许滤波装置继续运行;当出现严重威胁系统和设备安全的问题时,滤波装置应跳闸,避免出现安全事故。

6.8.2 保护类型

6.8.2.1 稳态过电压保护

稳态过电压包括基波电流流过电容器引起的母线基波过电压,谐波电流流过电容引起的谐波过电压等。过电压状态下,滤波器若不及时退出,会造成滤波元件损坏。建议当供电电压大于  $1.1U_N$ ,延时  $\tau_s$  内应切除全部滤波支路。

注:  $\tau$  的确定原则是:

- a)  $\tau$  小于系统过电压保护延时时间,一般系统过电压保护延时为 60 s;
- b) 建议当过电压范围在  $1.1 \sim 1.2$ ,  $\tau \leq 30$  s; 当过电压范围在  $1.2 \sim 1.4$ ,  $\tau \leq 3$  s; 当过电压范围在  $1.4 \sim 1.8$ ,  $\tau \leq 600$  ms。

6.8.2.2 低电压保护

在滤波装置设计中,低电压保护容易被忽略。低电压状态下,滤波器若不及时退出,当供电恢复正常时可能会产生动态过电压。建议当供电电压低于  $0.7U_N$ ,0.5 s 后应切除全部滤波支路。

6.8.2.3 剩余过电压保护

若供电母线三个线电压的矢量和不等于零,将会引起中性点电压严重偏移。建议当三个线电压的矢量和大于  $0.2U_N$  时,2 s 后应切除全部滤波支路。

6.8.2.4 过电流保护

过电流会引起电容器过电压和电容器、电抗器、电阻器的过热。推荐采用 2.5 倍左右额定电流的定时限(例如 0.1 s)保护和 1.3 倍左右额定电流的反延时过流保护结合的方式进行过电流保护。

6.8.2.5 不平衡保护

6.8.2.5.1 不平衡保护的功能:电容器组中的单元内部发生击穿时,不平衡保护单元可使故障滤波器

及时从运行状态中脱开,以避免更大故障发生和设备损坏。

6.8.2.5.2 为了避免谐波电压或谐波电流影响不平衡保护动作,不平衡信号检测装置应有检测基波信号的功能。

6.8.2.5.3 不平衡信号随着元件损坏增多逐渐增大,当不平衡信号达到限值(保护动作值)的75%时,应有报警信号输出,使用户有时间安排维修计划,避免滤波器突然退出对配电系统和用户造成有害的影响。

6.8.2.6 过载保护

6.8.2.6.1 滤波装置可能会遭受非预期的谐波源过载、谐振或其他意外工作条件。造成电容器、电抗器或电阻器的热过载和电压过载,采取过载保护的措施可避免设备元件的过载损坏。

6.8.2.6.2 对装于壳体内部的铁心电抗器可使用温度继电器监测壳体内部的温度,保护设备不受热过载损坏。

6.8.2.6.3 电抗器和电阻器可使用能反应基波电流和谐波电流的总电流有效值的电流继电器,实现热过载保护。

6.8.2.6.4 电容器可使用具有电流积分功能和谐波电流测量功能及电压计算功能的电流继电器,实现热过载和电压过载保护。

6.9 滤波装置控制

6.9.1 滤波装置的投切控制要兼顾基波无功功率补偿、电压变动和谐波滤波的要求;在满足基本功能要求的前提下,应尽量简化结构并减少开关动作次数。

6.9.2 控制方式按图4的程序确定。

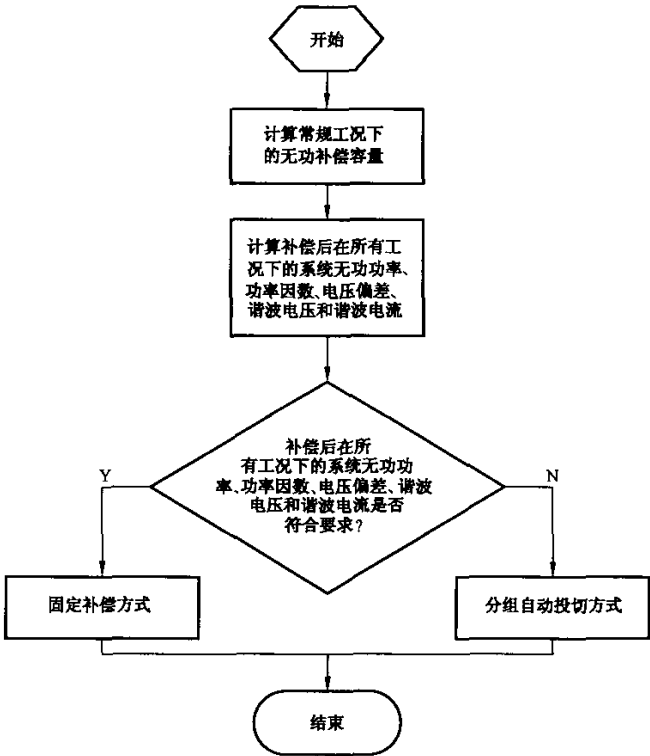


图4 滤波器控制方式确定程序

6.9.3 对于滤波装置中较小容量的低次滤波器,若相邻的较高次数的滤波器容量较大,则在较小容量低次滤波器中发生瞬态过电压的概率很大,可能会导致低次滤波器的电抗器或电容器损坏,这是在设计阶段就应该避免的问题。

6.9.4 为了滤波装置的安全投切,同一滤波支路在控制器的开与关之间应有与放电回路特性相适应的延迟时间,使电容器充分放电。

6.9.5 根据 6.6 的仿真结果,滤波装置投切过程应避免不安全组合运行方式。

## 6.10 主电路元器件选择

参见附录 B。

## 7 应用技术

### 7.1 试验

#### 7.1.1 试验要求

##### 7.1.1.1 概述

本章给出了滤波装置的试验要求和试验分类。

构成滤波装置的电器设备应符合相应的标准。

##### 7.1.1.2 试验条件

滤波装置的全部试验和测量,除另有规定外,均应在下列条件下进行:

a) 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,滤波装置的温度应与环境空气温度一致,滤波装置在不通电状态下及稳定的环境空气温度中放置超过 6 h 的时间后,即认为滤波装置的温度与环境空气温度一致。

试验时的环境空气温度应作记录。

b) 试验和测量所使用的交流电压的频率应为  $(50\pm 0.5)\text{ Hz}$ ,其波形应接近正弦波形(即两个半波基本一样,总电压畸变率不大于  $1\,000\text{ V}\sim 10\text{ kV}$ ,4%; $11\text{ kV}\sim 35\text{ kV}$ ,3%)。

c) 除一次电路元件应分别进行试验外,进行装置整体试验时,有关接线都应按实际运行情况连接好。

##### 7.1.2 试验分类

###### 7.1.2.1 例行试验

例行试验的目的在于检验制造中的缺陷。试验由制造方对出厂的每一套滤波装置进行。

例行试验的结果可以用于验收试验。

- a) 外观检查;
- b) 电器检验;
- c) 电容测量;
- d) 电感测量;
- e) 工频耐受电压试验;
- f) 放电器件检验;
- g) 保护特性试验;
- h) 自动控制试验;

- i) 空载投切试验;
- j) 滤波特性测试;
- k) 基波无功功率的测定。

#### 7.1.2.2 型式试验

型式试验的目的是考核滤波装置的设计、结构以及器件选择是否满足本导则的要求。

用作型式试验的滤波装置应为经例行试验合格的产品。

新产品应进行型式试验。

当材料、工艺、产品结构或所选用的配套设备有改变,且其改变有可能影响装置的性能时,也应进行型式试验,此时允许只进行与这些改变有关的试验项目。

在正常生产情况下,每5年至少应进行一次型式试验。

- a) 雷电冲击耐受电压试验;
- b) 温升试验;
- c) 并联谐振试验;
- d) 短路强度试验;
- e) 防护等级检验;
- f) 熔断器保护试验。

#### 7.1.3 试验方法

##### 7.1.3.1 外观检查

目测检查所有设备的外观,是否有机械损伤,各种标志应清晰,数据正确。

##### 7.1.3.2 电器检验

电器检验主要检查滤波装置主电路及辅助电路电器设备的合格证及出厂试验报告,并检查其性能指标是否满足滤波装置的技术条件或标准要求,型式试验报告是否合格、有效。

##### 7.1.3.3 电容测量

滤波支路中电容器的电容值可用实测方法,也可根据各单台电容器的实测电容用计算的方法来检验。

滤波支路的实际电容值与其额定电容值之差应在额定电容的0~3%范围内,或符合订货要求的误差范围。

滤波支路各相间的实际电容最大值与最小值之比应不超过1.02。

##### 7.1.3.4 电感测量

测量时,先将滤波支路中所有电容器短接,从滤波支路的受电端测量总的回路电感,实测电感与根据实测电容按下式计算的电感值的相对误差在0~+2%范围内。

$$\delta_L = (\Delta L / L_0) \times 100\%$$

$$\Delta L = L_0 - L; \quad L = \frac{1}{h_0^2 \omega^2 C}$$

式中:

$h_0$ ——所测支路的滤波回路次数;

$L_0$ ——电感实测值,单位为亨(H);

$L$ ——电感计算值,单位为亨(H);

$C$  ——实测电容,单位为法(F);

$\omega=2\pi f$ 。

干式空心电抗器测量电感时,可以采用电压电流法,也可以采用谐振法和电桥法。

测量三相叠装的干式空心电抗器和三相铁心电抗器的电感时,应使用三相电源。

电抗器三相间互差:

$$\left| \frac{X(\text{最大或最小}) - X(\text{三相平均值})}{X(\text{三相平均值})} \right| \leq 2\%$$

7.1.3.5 工频耐受电压试验

7.1.3.5.1 试验程序

滤波支路的绝缘试验一般按 GB/T 16927.1、GB/T 16927.2 中的有关规定进行。主回路连线包括在耐压试验范围中。

试验前,应将滤波支路中的滤波电抗器、放电线圈、滤波电容器组等端子上的连接线断开,但这些设备应分别按规定进行验收试验。

7.1.3.5.2 试验要求

工频耐受电压试验在滤波器的相间、相与地之间以及辅助电路与地之间进行,试验电压由表 7 选取。

试验时,应从装置额定电压的一半或以下开始升压,在 2 s~10 s 内均匀升高到试验电压值,并在该电压下保持规定的时间。

表 7 绝缘水平 单位为千伏

滤波装置额定电压	主电路		辅助电路工频耐受电压 方均根值
	工频耐受电压 方均根值	雷电冲击耐受电压 (1.2~5)/50 μs,峰值	
6	32	60	3
10	42	75	
20	50	125	
35	95	200	
66 及以下	140	325	

7.1.3.6 雷电冲击耐受电压试验

电压施加于滤波装置的相与地之间,试验电压由表 7 选取。试验时,先施加 15 次正极性冲击,然后施加 15 次负极性冲击。改变极性后,施加负极性冲击之前,允许施加数次低幅值的冲击。

如果每一极性试验中均未发生多于 2 次的闪络且未发生击穿,则认为装置通过了该项试验。

7.1.3.7 放电器件试验

放电试验应分别在每一组电容器上进行。

对电容器组施加直流电压,达到 $\sqrt{2}$ 倍额定电压后断开电源,在放电线圈两端测量该电压降至 50 V 时的时间,应在 5 s 以内,或按订货技术条件中规定的时间。

注:自动投切装置的放电试验可结合投切试验进行。

### 7.1.3.8 温升试验

本试验只对柜式滤波装置进行。

试验时,装置应按正常布置,给装置施加不低于  $U_N$  的电压,并使装置的容量在整个试验过程中等于 1.35 倍的装置额定无功功率。

试验时应有足够的时间使温度达到稳定。每隔 1 h~2 h 用温度计、热电偶或其他测温仪测量各规定部位的温度,同时测量最热区域 2 台电容器中间的空气温度。当 6 h 内连续 4 次测量温度的变化不超过 1 K 时,即认为温升达到稳定。

试验期间应测量装置的周围空气温度,此测量应用不少于 3 支经标准温度计校验过的水银温度计或热电偶进行。温度计或热电偶均匀布置在距装置约 1 m 之处,放置高度应为装置各载流部分高度的平均值。取最后 2 次所测温度的算术平均值作为装置的周围空气温度。为了避免由于温度的迅速变化而引起的误差,温度计或热电偶应置于盛有油的容器中,使热时间常数约为 1 h。

滤波装置的母线之间连接处、主电路各连接处的温升应不超过 50 K。各电器设备的温升应不超过各自的规定。

注:如受试验条件限制,本试验也可在额定电压下进行,然后换算到 1.35 倍的装置额定无功功率下的温升值。如果试验条件限制,经制造方与购买方协商,本试验也可在安装现场进行,试验时选择谐波源谐波电流最大时的时间段进行。

### 7.1.3.9 保护特性试验

进行不平衡保护特性试验时,可采用增加或撤出 1 台电容器模拟电容器内部故障,或在二次回路上设定等值故障信号。保护装置应能正常动作。试验次数不少于 3 次。

过电流、过负荷、速断、低电压、过电压、谐波超限等保护均应做传动试验。

### 7.1.3.10 滤波特性测试

从滤波器的受电端与滤波次数对应的频率下测量滤波支路的总阻抗,试验对每个滤波支路的每一相单独进行。要求总阻抗偏感性且阻抗值与滤波装置接入点在该频率下的系统最小阻抗(对应于最大短路容量)之比不大于 20%。

阻抗测量所使用的信号发生器,其频率偏差不得大于 1%,当无条件直接测量谐波阻抗时,可以将电容器短接后先测量回路直流电阻,然后利用 7.1.3.3 及 7.1.3.4 所测得电容、电感值进行计算:

$$Z_T = \sqrt{R_0^2 + \left(h_0 \cdot \omega \cdot L - \frac{1}{h_0 \cdot \omega \cdot C}\right)^2}$$

要求  $Z_T \leq 0.2 h_0 X_{D\text{MAX}}$

式中:

$Z_T$  ——对应滤波次数为  $h_0$  的频率下的总阻抗,单位为欧姆( $\Omega$ );

$R_0$  ——滤波支路的总直流电阻,单位为欧姆( $\Omega$ );

$L$  ——电感值,单位为亨(H);

$C$  ——电容值,单位为法(F);

$h_0$  ——滤波次数;

$X_{D\text{MAX}}$  ——对应滤波频率下的系统最大短路容量时的阻抗,单位为欧姆( $\Omega$ )。

### 7.1.3.11 并联谐振试验

#### 7.1.3.11.1 通则

并联谐振试验用等效电路的方法进行。在滤波装置旁并联一只等效电感,测量并联电路的谐波阻

抗,比较并联电路的谐波阻抗和所并联电感的谐波阻抗来判断是否会对谐波频率发生并联谐振。试验时,所有滤波支路根据允许的投切组合均应并联在一起。

7.1.3.11.2 等效电感的确定

等效电感应为滤波装置拟接入母线的短路容量所折算的等值电感:

$$L_s = \frac{1}{2\pi f} \cdot \frac{U_j^2}{S_d}$$

式中:

$L_s$ ——等效电感;

$U_j$ ——滤波装置接入点系统的平均电压,单位为千伏(kV);

$S_d$ ——滤波装置接入点系统的短路容量,单位为兆伏安(MV·A)。

为了确保在最大、最小短路容量范围内均不发生并联谐振,等效电感至少应在最大短路、最小短路容量及其平均值三个点取值分别进行试验。

等效电感的基波品质因数应不小于40。

7.1.3.11.3 并联谐振的判断

a) 在  $h$  次谐波频率下测量滤波装置与等效电感并联后的阻抗  $Z(h)$ ,测试仪器推荐使用可调频率的阻抗测试仪。按以下公式计算谐波放大倍数:

$$K = \frac{|Z(h)|}{h \cdot 2\pi f \cdot L_s}$$

b) 在各次谐波频率下,谐波放大倍数( $K$  值)应不大于 1.1 倍的原始谐波电流。在有条件时,也可以采用数字仿真的方法。

7.1.3.12 短路强度试验

短路强度试验的目的是验证装置耐受由短路电流引起的热应力和电动应力的能力。

试验时,装置按正常使用情况安装,功率因数见表 8。

表 8 短路强度试验电流

短路电流 kA	$\cos\varphi$	短路电流 kA	$\cos\varphi$
2.5	0.7	12.5,20	0.3
8	0.5	25,31.5	0.25

试验方法按 GB/T 11022,试验时,将电容器组和电抗器进线端子处短接。

试验后若母线没有明显变形,导线、绝缘支持件没有任何损坏,电气间隙和爬电距离仍符合规定,则认为装置通过了本项试验。

7.1.3.13 防护等级检验

本检验只对柜式装置进行。

检验时根据所选取的防护等级,按 GB 4208 规定的相应方法进行。

7.1.3.14 熔断器保护试验

在某台电容器两端并接 1 或 2 台同等容量的电容器,模拟内部故障,通电后观察熔断器动作情况,应能正确动作。

### 7.1.3.15 自动控制试验

本试验只对自动投切的装置进行。试验时,按控制方式的要求设置运行状态,自动投切装置应能正确动作。试验次数不少于3次。

### 7.1.3.16 投切试验

投切试验应参照 GB 1984 的有关规定进行。

对于由多个支路组成的滤波装置,试验应对每一支路进行,各投切操作30次,测量过电压及涌流;背靠背试验仅需对最后的一个支路进行测量,操作10次。

试验时,开关应能正常切合,机械运动灵活,无操作力过大或卡住现象,与其相连接的机械联锁或其他附件承受上述操作次数后应未受损伤,且不应发生重击穿,过电压及涌流不应超过规定值。

### 7.1.3.17 滤波效果计算

谐波源设备正常运行后,进行最后的参数调试和谐波测定。使用谐波分析仪,记录装置投入前、后的谐波数据并按本标准 3.4.12 计算谐波电流滤除率。

### 7.1.3.18 基波无功功率的测定

在负荷不变,滤波装置未投时,测量总进线处电网输送的无功功率,然后再测量投入滤波装置后电网输送的无功功率,其差值即为滤波装置的基波无功功率。

## 7.2 安装与布置

### 7.2.1 安装场所条件

7.2.1.1 没有剧烈的机械振动。

7.2.1.2 没有损坏绝缘及腐蚀金属的有害气体及蒸汽。

7.2.1.3 没有导电性或爆炸性尘埃,没有强电场或强磁场。

7.2.1.4 安装倾斜度不大于 $5^{\circ}$ 。

### 7.2.2 布置和安装设计

#### 7.2.2.1 一般规定

- a) 滤波装置的布置和安装设计,应利于通风散热、运行巡视、便于维护检修和更换设备。
- b) 滤波装置的布置型式,应根据安装地点的环境条件、设备性能和当地条件,选择户外布置或户内布置。
- c) 户外布置的滤波装置,应考虑防止污闪事故的措施。  
户内滤波装置和配电开关柜,不宜同室布置。
- d) 滤波装置中的铜、铝导体连接,应采取铜铝过渡措施。
- e) 滤波装置应设置巡视及停电检修及更换设备的通道。其宽度(净距)不宜小于1200 mm。  
通道与滤波装置间应设置网状遮拦,高度不低于1500 mm。网门宜设置闭锁。

注1:维护通道是指正常运行时巡视、停电后进行维护检修和更换设备的通道。

注2:检修通道是指停电后维护检修工作使用的通道。

- f) 滤波装置的绝缘水平应与电网的绝缘水平相配合。电容器与架构可靠连接并接地,连接并联段各台电容器的母线与架构间的绝缘水平应与电容器的绝缘等级相同。电容器为单套管时各并联段构架之间应无电的连接。35 kV及以下电容器组的绝缘架构应分相设置。

7.2.2.2 电容器布置

- a) 电容器组的布置,宜分相设置独立的框架。当电容器台数较少或受到场地限制时,可设置三相一体的框架。
- b) 分层布置的电容器组框架,不宜超过三层,每层不应超过两排,四周和层间不得设置隔板。
- c) 电容器组的汇流母线应满足机械强度的要求,防止引起熔断器至母线的连接线松弛。
- d) 电容器组框架、柜体结构件、电抗器的支架等钢结构件,应采取镀锌或其他有效的防腐措施。
- e) 户外滤波装置,可根据周围环境中鸟类、鼠、蛇类等小动物活动的情况,设置封堵、围栏和网栏等设施。
- f) 电容器铭牌应面向通道侧。
- g) 设计电容器组构架时,应验算抗地震能力,必要时应采取抗震措施。
- h) 电容器组的绝缘水平,应与电网绝缘水平相配合。当电容器与电网绝缘水平一致时,应将电容器外壳和框架可靠接地;当电容器的绝缘水平低于电网时,应将电容器安装在与电网绝缘水平相一致的绝缘框架上,电容器的外壳应与框架可靠连接。
- i) 电容器套管相互之间和电容器套管至母线或熔断器的连接线,应有一定的松弛度。严禁利用电容器套管连接或支承硬母线。单套管电容器组的接壳导线,应采用软导线由接壳端子上引接。
- j) 电容器组的最小安装尺寸,应符合表 9 的规定。

表 9 滤波电容器组的安装尺寸

单位为毫米

项目	电 容 器		电容器底部距地面		装置顶部至屋顶净距
	间距*	排间距离	户内	户外	
最小尺寸	70	100	200	300	1 000
* 电容器间距应按制造方规定,制造方未提供数据时,可按不小于 70 mm 考虑。					

7.2.2.3 熔断器

- a) 熔断器应安装在巡视通道侧,熔断后应有明显的标志。
- b) 熔断器严禁垂直装设。装设角度和弹簧拉紧位置,应符合制造方的产品技术要求。
- c) 熔丝熔断后,尾线不应接地。

7.2.2.4 滤波电抗器

- a) 油浸式铁心滤波电抗器,宜布置在户外;污秽较重的工矿企业区应布置在户内。户内安装的油浸式铁心电抗器,其油量超过 100 kg 时,应单独设置防爆间隔和贮油设施。
- b) 干式空心滤波电抗器,宜采用分相布置的水平排列或三角形排列。三相叠装的安装顺序,应符合制造方规定。
- c) 滤波电抗器的对地绝缘水平低于电网时,应将其安装在与电网绝缘水平一致的绝缘台上。
- d) 干式空心滤波电抗器的围网、围栏、支架、基础内钢筋、接地导体及二次接线应避免形成闭环连接,还应满足防电磁感应的空间距离。
- e) 干式空心滤波电抗器的支承底座接地应采用放射形或开口环形,并应与主接地网至少有两点相连。
- f) 干式空心滤波电抗器组装的零部件,应采用非导磁材料的螺栓连接。

g) 滤波电抗器的最小距离,见表 10。

表 10 滤波电抗器的最小安装尺寸

单位为毫米

项 目	一字水平布置		三角形水平布置		顶部至屋顶净距
	中心间距	中心距墙或梁柱	中心间距	中心距墙或梁柱	
最小尺寸	1.7D <sub>s</sub>	1.1D <sub>s</sub>	1.7D <sub>s</sub>	1.1D <sub>s</sub>	0.5D <sub>s</sub>
注 1: 上表仅针对空心电抗器,铁心电抗器无此要求。D <sub>s</sub> 为电抗器直径。					
注 2: 其他布置方式和生产厂家商定。					

7.2.3 电气间隙和爬电距离

- 7.2.3.1 滤波装置内的各种电器设备的电气间隙应符合有关标准的规定。
- 7.2.3.2 户内滤波装置的带电体间、带电体与接地体间的最小电气间隙应不小于表 11 所列数值。
- 7.2.3.3 户外滤波装置的带电体间、带电体与接地体间的最小电气间隙可按表 12 推荐的数值选用。或由制造方与购买方协商确定。

表 11 户内滤波装置的最小电气间隙

相关位置	电力系统标称电压 kV					辅助电路 500 V 以下
	6	10	20	35	66	
不同相的裸导体间 mm	100	125	180	300	550	4
带电裸导体至接地框架 mm	100	125	180	300	550	15
带电裸导体至板状遮栏 mm	130	155	210	330	580	15
带电裸导体至网门及网状遮栏 mm	200	225	280	400	650	50

表 12 户外滤波装置的最小电气间隙

相关位置	电力系统标称电压 kV		
	6~10	35	66
带电部分至接地部分之间 网状遮栏向上延伸线距地 2.5 m 处与遮栏上方带电部分之间 mm	200	400	650
不同相的带电部分之间 断路器和隔离开关的断口两侧引线带电部分之间 mm	200	400	650
设备运行时,其外廓至无遮栏带电部分之间交叉的不同时停电检修的无遮栏带电部分之间栅状遮栏至绝缘体和带电部分之间 mm	950	1 150	1 400

表 12（续）

相关位置	电力系统标称电压 kV		
	6~10	35	66
网状遮栏至带电部分之间 mm	300	500	750
无遮栏裸导体至地面之间 无遮栏裸导体至建筑物、构筑物顶部之间 mm	2 700	2 900	3 100
平行的不同停电检修的无遮栏带电部分之间 带电部分与建筑物、构筑物的边沿部分之间 mm	2 200	2 400	2 600

7.2.4 防护等级

柜式滤波装置的防护等级见表 13。

表 13 防护等级

序号	含 义
IP2X	阻挡直径大于 12 mm 的固体、手指或长度不超过 80 mm 的类似物
IP3X	阻挡直径或厚度大于 2.5 mm 的工具、导体等及直径超过 2.5 mm 的其他物体
IP4X	阻挡直径或厚度大于 1.0 mm 的导线、带或直径超过 1.0 mm 的其他物体
IP5X	防尘(指防止影响设备安全运行的大量尘埃进入,但不能完全防止灰尘进入)、防溅

7.2.5 接地

- 7.2.5.1 滤波装置的接地应符合相关标准。
- 7.2.5.2 未装设接地开关的滤波装置应设便于挂接地线的端子。
- 7.2.5.3 滤波器室至少应引出 2 根接地线与主接地网相连。

7.2.6 防火

- 7.2.6.1 滤波装置室的防火等级应按丙级考虑。
- 7.2.6.2 滤波装置的构架应采用不可燃材料。滤波装置的地面户内宜采用水泥砂浆抹面并压光。
- 7.2.6.3 滤波装置与其他建筑物或主要电气设备之间无防火墙时,其防火间距不应小于 10 m。当由于条件限制,滤波室与其他生产建筑物连接布置时,应设防火隔墙。
- 7.2.6.4 滤波装置应就近设置消防设施。
- 7.2.6.5 滤波器室门应向外开启,相邻两滤波器室之间的门应能向两个方向开启,应采用乙级防火门。
- 7.2.6.6 当滤波器室的长度超过 10 m 时,应设两个出口。
- 7.2.6.7 滤波器室内沟道,应符合下列规定:
  - a) 通向户外的沟道,在户内外交接处应采用防火封堵;
  - b) 滤波器室内的沟道盖板,应采用不可燃材料制作。

### 7.2.7 通风

7.2.7.1 滤波器室的通风量,应按排出室内余热计算,余热量包括设备散热量和通过围护结构传入的太阳辐射热。

7.2.7.2 滤波器室的夏季排风温度,应根据滤波器的环境空气温度类别确定,并不应超过滤波器所允许的最高环境空气温度。

7.2.7.3 滤波装置室应采用自然通风。当自然通风不能满足要求时,可采用自然进风和机械排风。

7.2.7.4 滤波器室的进排风口,应采取防止鸟类、鼠、蛇类等小动物进入和防雨雪飘进的措施。

7.2.7.5 在风沙较大地区,滤波器室应采取防尘措施。

### 7.3 滤波装置的调试

#### 7.3.1 调试目的

7.3.1.1 滤波效果满足技术条件的要求。

7.3.1.2 基波补偿满足功率因数的要求。

#### 7.3.2 调试条件

7.3.2.1 滤波装置的调试通常在使用现场进行。

7.3.2.2 谐波源设备正常运行。

7.3.2.3 滤波装置安装完毕,场地清理干净。

7.3.2.4 具有工程安装验收报告。

7.3.2.5 收集所有设备、元件的出厂检验合格证书。

#### 7.3.3 调试内容

7.3.3.1 一、二次回路的联动试验。

7.3.3.2 电容器、电抗器测试与验证。

7.3.3.3 中央信号盘测试试验。

7.3.3.4 继电保护电路调试验。

7.3.3.5 开关装置的操作及闭锁。

7.3.3.6 监测信号回路的传输特性。

7.3.3.7 调谐频率测试。

#### 7.3.4 安全措施

7.3.4.1 在进线开关及两侧刀闸挂上“有人工作、禁止合闸”警告牌。

7.3.4.2 在各个滤波支路开关及两侧刀闸挂上“有人工作、禁止合闸”警告牌。

7.3.4.3 现场安全遮拦齐全,并在各出入口处悬挂警示标志。

7.3.4.4 与调试无关人员不得进入开关室及滤波器室。

7.3.4.5 调试人员应遵守电力作业有关安全工作规程。

#### 7.3.5 开关试操作

确认各个滤波回路的断路器及两侧刀闸在打开状态,每个支路分合断路器5次,包括手动、自动投入,各种保护联动,确保开关操作状态正常。

### 7.3.6 空负载下投入滤波器

- 7.3.6.1 检验保护装置整定值,应与计算整定值一致。
- 7.3.6.2 合上进线开关两侧刀闸,并确定无误后手动合上进线开关、检查正常后挂上设备运行标志。
- 7.3.6.3 所有监测保护设备处于正常工作状态。
- 7.3.6.4 合上第一路滤波器开关两侧刀闸,确定无误后,合上断路器,同时监视所有二次表计及信号是否正常,滤波器一次设备(电容、电抗、电缆等)有无异常情况(响声、烟火、异味等)并挂上设备运行标志。
- 7.3.6.5 确定第一路支路运行正常后,测试该支路电参数,应无异常情况。
- 7.3.6.6 保持第一支路在投入状态,合上第二支路开关两侧刀闸,确定无误后,合上断路器,同时监视所有二次表计及信号是否正常,滤波器一次设备(电容、电抗、电缆等)有无异常情况(响声、烟火、异味等)并挂上设备运行标志。
- 7.3.6.7 确认第二支路运行正常后,测试该支路电参数,应无异常情况。
- 7.3.6.8 其余支路依次投入,各个支路应连续运行不少于 60 min,达到热稳定值为止。

### 7.3.7 负载下投入滤波器

- 7.3.7.1 各个滤波支路保持带电运行,谐波源投入运行,监测滤波器运行情况,确认无异常谐振放大,设备无异常,即电压、电流及其谐波水平在额定允许范围内。并保证连续运行不少于 60 min 以上。
- 7.3.7.2 不同工况下测试各个支路参数,保证电压,电流值在额定范围内。
- 7.3.7.3 退出最高次数支路,测试其余支路参数,保证电压,电流值在额定范围内。
- 7.3.7.4 从高次到低次逐次退出所有滤波支路,确保电容器放电后,进入设备区检查外形及表面温度。设备应无变形,变色,温度在正常范围内。
- 7.3.7.5 检查结束确认设备正常后,按正式操作程序投入滤波器组,作相关滤波效果测试。
- 7.3.7.6 滤波器调试完毕,连续 24 h 正常后可以正式交付使用。

### 7.3.8 调试及测量报告

调试及测量报告应包括以下内容:

- a) 报告名称及编号;
- b) 调试测量时间和地点;
- c) 调试及测量仪器型号;
- d) 调试单位及人员;
- e) 供配电系统及滤波装置概况;
- f) 调试方法及测量点;
- g) 各种工况下的测量结果及分析;
- h) 结论。

## 7.4 运行及维护

### 7.4.1 一般规定

- 7.4.1.1 滤波装置应有专人负责,保持良好的运行状态。
- 7.4.1.2 每班至少巡视一次,发现异常情况及时处理。
- 7.4.1.3 制定运行记录表格,按表填写各项数据。建立完善的运行档案。
- 7.4.1.4 有条件时采用智能仪表,监测滤波装置的运行状况,将有关数据输入计算机。
- 7.4.1.5 每年应进行常规交接试验。

## 7.4.2 特殊情况处理

### 7.4.2.1 谐波源增加

滤波装置的设计是针对特定的谐波源,当系统中谐波源负荷增加时,将会导致滤波器过负荷,也可能导致谐振。

这种情况应及时和滤波装置的制造方联系,给出解决措施。

### 7.4.2.2 供电系统发生变化

变压器容量改变,滤波装置接入点改变,系统短路容量改变时,均应与制造方协商,以便验证滤波装置的性能,调节相关参数。

### 7.4.2.3 滤波性能降低

长期运行电抗器和电容器的参数会发生变化,导致谐振频率偏移,降低滤波作用。

这种情况应及时和滤波装置的制造方联系,重新调节参数。

## 7.4.3 滤波电容器的运行管理

7.4.3.1 经常对电容器组进行外观检查,如发现箱壳膨胀严重应停止使用。

7.4.3.2 电容器组投入时本身温度不能低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,运行时环境上限温度(A类、 $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,B类、 $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),24 h平均不得超过规定值(A类、 $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,B类、 $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ )及一年平均不得超过规定值(A类、 $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,B类、 $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。如超过时,应采取降温措施。

7.4.3.3 电容器外壳上最热点的温度可以通过红外测温仪测量。

7.4.3.4 电容器套管表面、电容器外壳、电容器支架上面不应有粉尘覆着和其他脏物。

7.4.3.5 应定期检查电容器组所有接触处的(汇流排、接地线、熔断器、断路器、开关等)接触可靠性。

7.4.3.6 新安装电容器和停止使用较长时间的电容器在使用前,可进行 $5\text{ s}\sim 10\text{ s}$ 的极间耐压试验,试验电压为工频。极对壳试验电压为工频,时间 $1\text{ min}$ 。其值选取为例行试验电压的75%或更低。在极间试验前后均应测量电容。如果电容有显著变化,则不允许将电容器接入使用。

7.4.3.7 电容器电容值和熔断器的检查,应结合年度检预防性试验进行。

7.4.3.8 当继电保护动作电容器组的开关跳闸后,在未找出故障原因之前,不得重新投入运行。

7.4.3.9 运行过程中如发现电容器外壳漏油,应采取必要措施及时处理。

附录 A  
(资料性附录)  
滤波装置仿真

A.1 供电系统简介

某钢厂 100 t 交流电弧炉 (EAF) 和 110 t 精炼炉 (LF) 配电系统如图 A.1 所示, 平均负载功率为 60 MW, SVC 装置由 TCR 和滤波装置组成, 滤波装置由 2 阶 C 型高通滤波器 (2pF) 和 3 次单调谐滤波器 (3pF)、4 次高通二阶滤波器 (4pF) 组成。

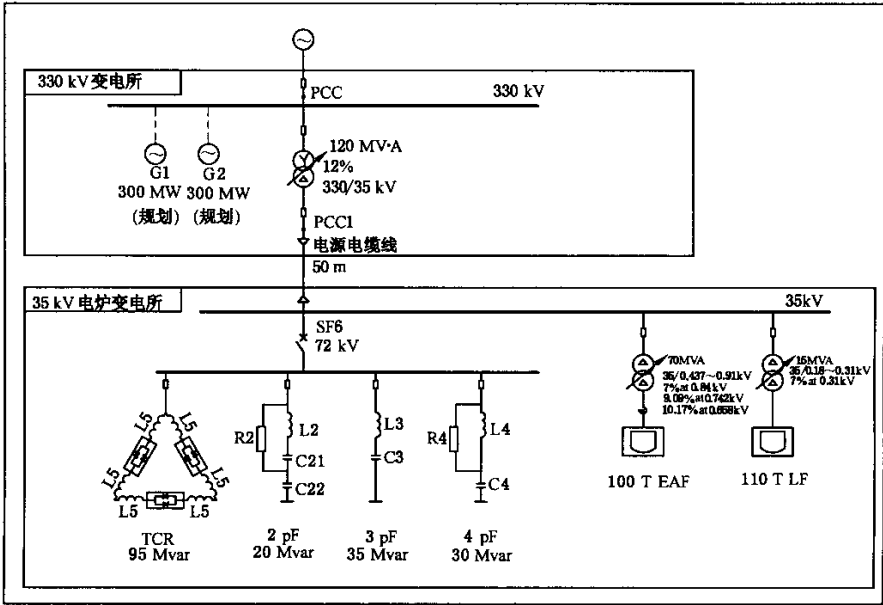


图 A.1 某钢厂 100 吨交流电弧炉配电系统图

A.1.1 系统参数

A.1.1.1 PCC 短路容量

最大运行方式 6 369 MV · A (远期规划值 7 000 MV · A)  
最小运行方式 3 115 MV · A

A.1.1.2 PCC1 短路容量

最大运行方式 864 MV · A (远期规划值 875 MV · A)  
最小运行方式 757 MV · A

A.1.1.3 供电主变压器

120 MV · A, 330/35 kV, 短路阻抗 12%

A.1.2 滤波装置参数

A.1.2.1 滤波器主要参数见表 A.1。

表 A.1 滤波器主要参数

滤波器次数	2	3	4
补偿容量(35 kV) Mvar	20	35	30
滤波电抗器基波品质因数	70	50	40

A.1.2.2 各滤波器电容器组参数见表 A.2。

表 A.2 各滤波电容器组参数

电容器组	C21	C22	C3	C4
电容值 $\mu\text{F}$	145.64	51.97	80.5	73.1
三相安装容量 Mvar	11.6	32.7	69.2	50.3
额定电压 kV	15.9	44.8	52.3	46.8
基波容抗 $\Omega$	21.856	61.249	39.542	43.544

A.1.2.3 各滤波器电抗器参数见表 A.3。

表 A.3 各滤波电抗器参数

电抗器	L2	L3	L4
电感值 mH	69.6	14.5	8.7
额定基波电流 A	370	648	555
额定谐波电流 A	80	288	190
短路稳态电流 kA	0.86	3.32	4.76
短路冲击电流 kA	2.19	8.47	12.14
基波电抗 $\Omega$	21.865	4.553	2.733

A.1.2.4 各滤波电阻器参数见表 A.4。

表 A.4 各滤波电阻器参数

电阻器	R2	R4
额定电阻值 (50%额定功率) Ω	251	327
额定连续功率 kW	75	40
短时功率	5 MW, 3 s	1.3 MW, 2 s

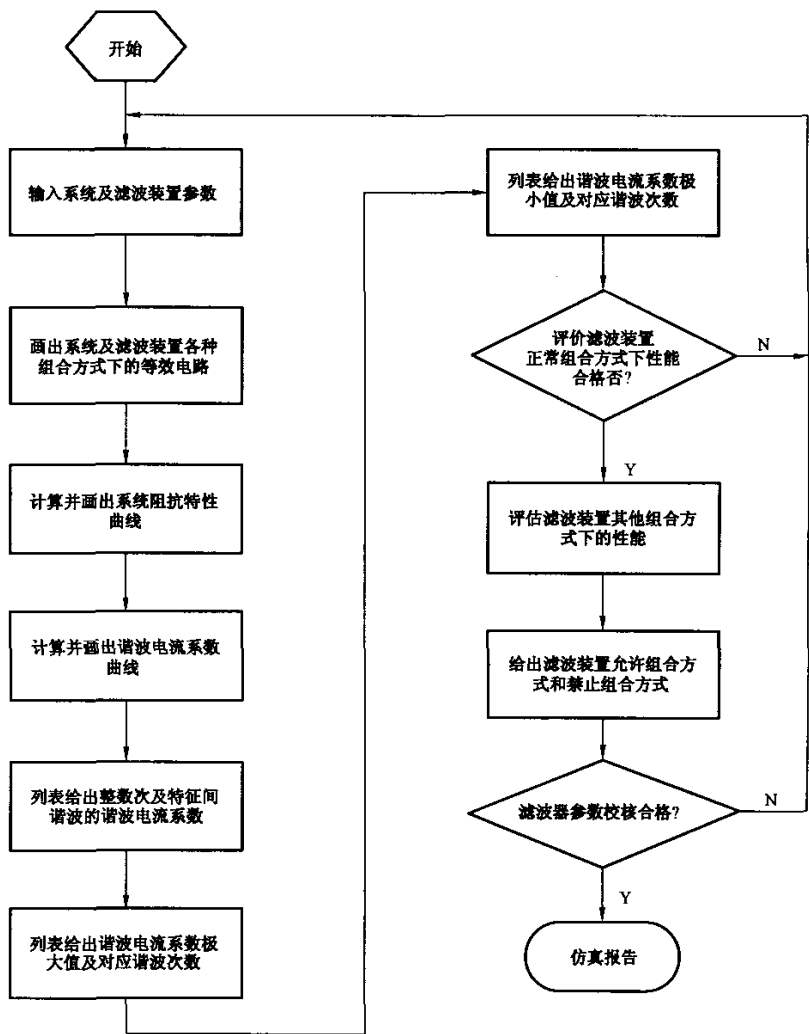
A.1.3 EAF、LF 和 TCR 谐波电流发生量见表 A.5

表 A.5 EAF、LF 和 TCR 谐波电流发生量

谐波次数	35 kV 谐波电流发生量 A				
	EAF	LF	EAF+LF	TCR	EAF+LF+TCR
	$I_{A1}$	$I_{A2}$	$ \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} $	$I_{A3}$	$ \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A3} $
0.5	350	0	350	0	240
1.5	80	0	80	0	50
2	95	20	97	6	97
2.5	70	0	70	0	40
3	200	45	237	9	245
4	50	12	51	5	52
5	100	25	118	30	139
6	35	10	36	0	36
7	40	10	45	18	54
8	15	5	16	0	16
9	20	5	21	2	21
10	10	3	10	0	10
11	10	3	11	5	12
12	5	2	5	0	5
13	7	2	7	4	9
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	3	1	3	0	3

A.2 滤波装置仿真流程

见图 A.2。



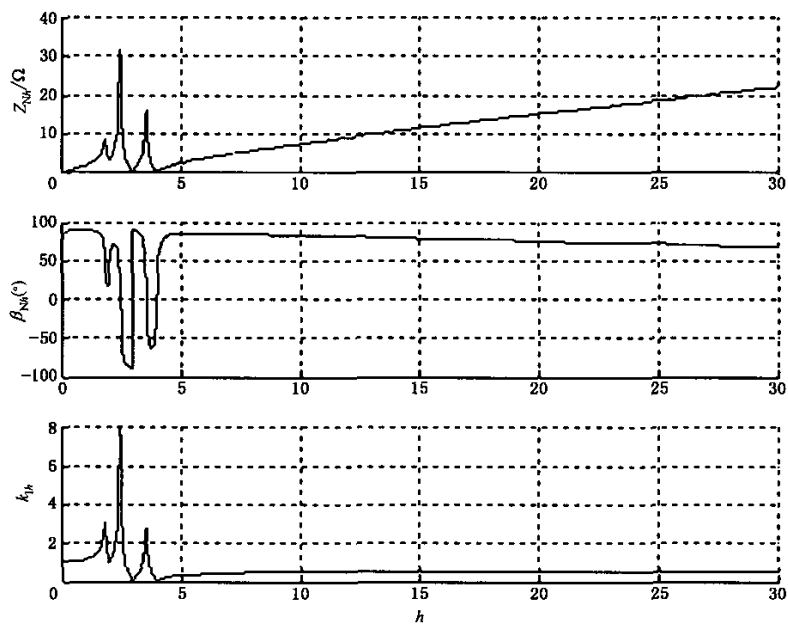
注：滤波装置主组合方式一般指所有滤波器都投入运行。

图 A.2 滤波装置仿真流程图

### A.3 滤波装置仿真计算

#### A.3.1 2、3、4 次滤波器投入运行

2、3、4 次滤波器投入运行时，系统的阻抗特性及谐波电流系数如图 A.3 所示。



图中：  
 $Z_{Nh}$ ——从谐波电流源看后去的系统网络阻抗， $\Omega$ ；  
 $\beta_{Nh}$ ——网络复阻抗角；  
 $k_{Nh}$ ——滤波装置滤波电流系数；  
 $h$ ——谐波次数。

图 A.3 2、3、4 次滤波器投入运行时系统阻抗特性及谐波电流系数

系统的谐波电流系数如表 A.6 所示。

表 A.6 2、3、4 次滤波器投入运行时系统的谐波电流系数

$h$	0.5	1.5	2	2.5	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$k_{Nh}$	1.03	1.49	0.97	5.77	0.1	0.06	0.31	0.38	0.42	0.44	0.45	0.46	0.47	0.47
$h$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
$k_{Nh}$	0.48	0.48	0.48	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	

系统的谐波电流系数最大值如表 A.7 所示。

表 A.7 2、3、4 次滤波器投入运行时谐波电流系数最大值

$h$	1.82	2.46	3.54
$k_{Nh}$	3.04	7.95	2.85

系统的谐波电流系数最小值如表 A.8 所示。

表 A.8 2、3、4 次滤波器投入运行时谐波电流系数最小值

$h$	1.98	2.94	4
$k_{Nh}$	0.97	0.01	0.06

## A.3.2 2、3 次滤波器投入运行(略)

## A.3.3 2、4 次滤波器投入运行(略)

## A.3.4 3、4 次滤波器投入运行(略)

## A.4 滤波装置性能评价

## A.4.1 安全运行评价

## A.4.1.1 谐波电流系数极大值

对于滤波装置主组合运行方式(2、3、4 次滤波器投入运行),在  $h=2.46$  次时,  $k_{hk}=7.95$ 。本例负荷大于 60 MW,最大谐波电流系数应小于 6,特别是电弧炉负荷存在较大间谐波,因此应修改滤波器参数,使  $k_{hk}$  的最大值尽量减小(建议  $k_{hk}$  小于 5)。

## A.4.1.2 谐波电流系数极小值

由表 A.8 数据可看出,2、3、4 次滤波器调谐点分别左偏 1%、2%、0%,这样当系统频率或电抗或电容的数值发生变化时,会造成滤波器对谐波的放大,应修改滤波器参数,使 2、3、4 次滤波器调谐点分别左偏 5%、2%、2%。

## A.4.2 其他性能评价(略)

## A.5 修改滤波装置参数

修改滤波器参数,重新仿真并评估,直至满足用户要求(具体略)。

## A.6 滤波装置参数校核(略)

## A.7 仿真报告

## A.7.1 滤波装置参数优化结果

## A.7.2 优化后的滤波装置性能评价

## A.7.3 优化后的滤波装置参数校核结果

**附录 B**  
**(资料性附录)**  
**主电路元器件选择**

**B.1 滤波电容器**

**B.1.1 结构**

对 1 000 V 及以上系统宜采用铝箔电极电容器。当采用自愈式电容器时,应考虑到由于自愈特性造成电容器电容量减小而可能引起的失谐。

**B.1.2 额定电压**

应按 6.7.1 计算的结果选择。

**B.1.3 额定电流**

应按 6.7.1 计算的结果选择。

**B.1.4 允许偏差**

单元的电容偏差应不大于 $\pm 5\%$ ,整组滤波电容器的电容偏差应不大于 $+1\% \sim +3\%$ 。

**B.2 滤波电抗器**

**B.2.1 结构**

滤波电抗器宜采用干式空心或干式铁心的结构。空心电抗器要求的安装间距较大,应采用户外分相布置的水平排列或三角形排列。空心电抗器宜采用三相平装方式。由于滤波电容器会存在电容偏差,为了达到设计要求的调谐特性,滤波电抗器宜采用可调感形式,调感范围依据设计需要以及所配电容器的制造偏差确定。

**B.2.2 绝缘水平**

滤波电抗器主绝缘的绝缘水平应与所接入系统的绝缘水平一致。

滤波电抗器纵绝缘的绝缘水平由合闸涌流下电抗器两端产生的电压降或正常运行时流过的工频电流和预期流过的各次谐波电流在电抗器两端产生的压降两者取较大值决定。

**B.2.3 额定电流**

应按 6.7.2.2 计算的结果选择。

**B.2.4 铁心电抗器的线性度要求**

铁心电抗器饱和后会引发电感量的下降,因此铁心电抗器应保证在工频电流及预期流过的各次谐波电流的共同作用下铁心不饱和。另外,在合闸涌流作用下铁心也会饱和而引起过渡性的滤波器组失谐,如果过渡过程中的失谐引起的谐波电流放大在涌流结束后仍维持铁心饱和,将会使滤波器进入稳定失谐状态。因此建议在工频及谐波电流的共同作用下,铁心滤波电抗器的磁密不大于 8 000 GS。在等

效工频电流下做试验时,对电抗器通以 2 倍工频加谐波电流代数和的工频试验电流时,电抗器电抗值下降的幅度应不超过 5%。

B.2.5 噪声水平

在额定工作状态下,滤波电抗器的噪声水平应不超过表 B.1 的规定。

B.2.5.1 容许偏差电感可调的滤波电抗器,其实际调节电感范围应满足设计要求,出厂时电感应固定接于额定电感位置。

B.2.5.2 当采用不可调感的滤波电抗器时,电感的允许偏差应不大于 0%~1.5%。

B.3 隔离开关和断路器

选用的隔离开关和断路器的额定电流应不小于  $1.5I_N$ ,并满足开断容性电流的要求,应选用无重击穿的断路器,对于要求切除短路故障的断路器,其额定开断电流应大于滤波装置安装地点的短路电流。

表 B.1 滤波电抗器的噪声水平

电抗器三相容量 kvar	噪声水平 dB
<80	48
80~125	50
125~200	52
200~315	54
315~500	56
500~800	58
800~1 250	60
1 250~2 000	63
>2 000	66

隔离开关和断路器操作时应运动灵活,无操作过大、不出现卡涩的现象。

隔离开关应符合 GB 1985 的规定。

凡组装成高压开关柜者应符合 GB 3906 的规定。

B.4 放电器件

放电器件分为:

- a) 内置放电电阻;
- b) 外接放电线。

放电器件的额定电压应不低于滤波电容器的额定电压,放电性能应能满足对内置放电电阻 5 min 内、对外置放电线圈 5 s 内将滤波电容器上的剩余电压自额定电压峰值降至 50 V 或更低。

放电器件应符合制造方与购买方商定的技术条件的规定。

## B.5 金属氧化物避雷器

当需要限制投切滤波装置引起的操作过电压时,宜选用金属氧化物避雷器。

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和滤波电容器容量等。

金属氧化物避雷器可放置于开关柜内,也可放置于滤波电容器附近,由制造方与购买方协商确定。

金属氧化物避雷器应符合 GB 11032 的有关规定。

## B.6 接地开关

滤波装置宜装设接地开关。接地开关可以和带接地隔离开关合用,但安装时接地刀应在电容器一侧。

接地开关应符合 GB 1985 的规定。

参 考 文 献

- [1] GB/T 11024.1—2010 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
-