



中华人民共和国国家标准

GB/T 26870—2011

滤波器和并联电容器在受谐波影响的 工业交流电网中的应用

Industrial a. c. networks affected by harmonics—
Application of filters and shunt capacitors

(IEC 61642:1997, MOD)

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 III

1 范围和目的 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 概述 3

 4.1 交流谐波 3

 4.2 无功功率 3

5 谐振问题及其解决办法 3

 5.1 简介 3

 5.2 从电源侧看的等效阻抗图及从负荷母线看的等效阻抗图 4

 5.3 串联谐振示例 5

 5.4 并联谐振示例 7

 5.5 防止谐振的方法 8

6 1 000 V 及以下电力系统用并联电容器和滤波器 12

 6.1 简介 12

 6.2 并联电容器 12

 6.3 失谐滤波器 12

 6.4 调谐滤波器 13

 6.5 组成设备的选择 13

 6.6 并联电容器和滤波器对音频控制装置的干扰 14

7 1 000 V 以上电力系统用并联电容器和滤波器 16

 7.1 简介 16

 7.2 特定要求 16

 7.3 无功补偿装置的选择 17

 7.4 滤波器的类型 17

 7.5 滤波器组成设备的选择 18

 7.6 并联电容器和滤波器对音频控制装置的干扰 19

参考文献 20

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 和 GB/T 20000.2—2009 给出的规则起草。

本标准使用重新起草法修改采用 IEC 61642:1997《滤波器和并联电容器在受谐波影响的工业交流电网中的应用》(英文版)。

本标准与 IEC 61642 的主要技术性差异如下:

- 在“1.2 规范性引用文件”中增加 GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》;
- 删除“1.1 范围和目的”中“本标准不适用于下列电容器”中的“电弧炉用电容器”;
- 在“4.4 滤波器类型”中,根据中国的习惯称呼,将“二阶滤波器——带通滤波器”改称“单调谐滤波器”,“二阶滤波器——有电阻元件的阻尼滤波器”改称“二阶高通滤波器”。

本标准相对于 IEC 61642 主要做了下列编辑性修改:

- 原 IEC 标准中的示例计算部分数值有误,已修改,并在编制说明中列出了详细的示例计算过程及数值更改说明。

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:山东泰开电力电子有限公司、西安森宝电气工程有限公司、西安高压电器研究院有限责任公司、青岛市恒顺电气股份有限公司、鞍山市恒力电气设备制造有限公司、桂林电力电容器有限责任公司、合肥华威自动化有限公司、深圳市三和电力科技有限公司、安徽省电力科学研究院、深圳市环华电气技术有限公司、广东电网公司电力科学研究院、上海库柏电力电容器有限公司、安徽马鞍山市金巨滤波成套设备有限公司、北京赤那思电气技术有限公司、四川波宏电力滤波设计研究有限公司、江苏省江阴市长仪集团有限责任公司。

本标准主要起草人:张宗有、王恒、刘菁、梁晨、江钧祥、张健夫、付大志、徐柏榆、于洋、吕韬、陶梅、王玲海、丁传发、陈思成、平孝香。

滤波器 and 并联电容器在受谐波影响的 工业交流电网中的应用

1 范围和目的

本标准就工业上用于抑制谐波和无功补偿的无源交流滤波器和并联电容器的使用给出了指导意见,包括低压和高压。本标准中提出的建议措施适用于 1 次以上至 25 次(含 25 次)的谐波。

本标准不适用于下列电容器:

感应加热装置用电容器[见 GB/T 3984(所有部分)];

电力系统用串联电容器[见 GB/T 6115(所有部分)];

耦合电容器及电容分压器(见 GB/T 19749);

电力电子电容器[见 GB/T 17702(所有部分)];

交流电动机用电容器[见 GB/T 3667(所有部分)];

管形荧光灯和其他放电灯线路用电容器(见 GB 18489 和 GB/T 18504);

抑制无线电干扰用电容器;

用于各种电气设备中并作为其部件的电容器;

在叠加有直流电压的交流电压下使用的电容器。

本标准的目的是分析并联电容器和滤波器在受谐波电压和谐波电流影响的工业交流电网中的常规应用中出现的问题,并给出建议。

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/T 14549—1993 电能质量 公用电网谐波

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

谐波 harmonic

对周期性交流量进行付立叶级数分解,得到频率为基波频率大于 1 的整数倍分量。

[GB/T 14549—1993,定义 3.4]

3.2

谐波次数 harmonic order

h

谐波频率 f_h 与基波频率 f_1 的整数比。

[GB/T 14549—1993,定义 3.5]

3.3

特征谐波 characteristic harmonics

由静态换流器等在理想工作条件下所产生的谐波。静态 AC/DC 换流器的特征谐波次数 $h = mp \pm 1$, p 是换流器的脉波数, m 是任意正整数。例如, 6 脉波换流电路的特征谐波次数 $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$ 。

3.4

非特征谐波 non-characteristic harmonics

由于交流电力系统不平衡或者由于换流器延时触发角的不对称所产生的谐波。其他一些非线性或时变设备, 如变频器、荧光灯、电弧炉、电焊机等也会产生非特征谐波。

3.5

功率因数 power factor

基波有功功率与基波视在功率的比值。

3.6

总谐波畸变率 total harmonic distortion; THD

周期性交流量中的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。

[GB/T 14549—1993, 定义 3.8]

3.7

滤波器 filter

在给定的频率范围内调谐到要求阻抗的装置, 一般由电抗器、电容器和电阻器(如果需要的话)构成。

3.8

调谐频率 tuning frequency

使滤波器阻抗计算值为最小值或最大值所对应的频率。

3.9

调谐滤波器 tuned filter

调谐频率与滤波频率相差不大于 10% 的滤波器。

3.10

失谐滤波器 detuned filter

调谐频率低于电压或电流幅值不应忽略的最低次谐波频率 10% 以下的滤波器。

3.11

阻尼滤波器 damped filter

在宽的频带内呈低阻抗(主要为电阻)的滤波器。

3.12

音频控制装置 ripple control installation

一种在高压电网注入音频信号控制低压电网接收设备的装置。

3.13

参考电压 reference voltage

计算阻抗所依据的电压。

3.14

谐波放大 harmonic amplification

接入并联电容器和滤波器后, 在特定的频率范围内, 注入系统中的谐波电流比接入前大或引起母线谐波电压比接入前高。

4 概述

4.1 交流谐波

通常,当负荷为非线性负荷或时变负荷时就会向电网中注入谐波电流。工业电网中主要的谐波源为静态换流器及电弧加工设备。

换流器交流侧的谐波电流分为两种:特征谐波和非特征谐波。特征谐波与换流电路密切相关,其频谱是固定的。特征谐波的幅值大小大致与其谐波次数成反比。

产生非特征谐波的主要谐波源是变频器及电弧加工设备,但也有一小部分非特征谐波是由于系统不平衡(电压和阻抗)和换流器触发角不对称引起的。

直传动装置中的整流器产生的主要是特征谐波。

在供电系统的特定状态下,非线性和时变负荷的影响会被放大,例如谐振。由于系统的特定状态和谐振的放大效应,即使电气装置中没有非线性和时变负荷,或这样的负荷仅占整个电网负荷的一小部分,供电电压波形也会畸变。

谐波会增加电网损耗,可能会影响各种装置的正常运行,特别是电子电路。

为了使谐波干扰限制在可接受的范围内,各地方的规定、国家标准和国际标准都对谐波畸变提出了明确限值。可使用滤波器降低谐波畸变率。

4.2 无功功率

通常,电网中的无功负荷功率是由感性负荷和静态换流器产生的。

在一个电网中,功率因数指标是按配电系统最经济的运行方式确定的,或者由供电方强制执行,功率因数过低,供电方可能会根据费率调整细则增收电费。因此较合理的方案是通过安装匹配的补偿装置来补偿感性无功功率。

通常使用并联电容器来改善功率因数,如果电网中含有谐波,就可能产生有害的过电压或过电流,或者两者同时产生。此外,谐波也可能会干扰音频控制装置。这时,可使用滤波器来取代单独使用的并联电容器。

5 谐振问题及其解决办法

5.1 简介

电网中,各种不同的组成设备连接在一起,例如发电机、输电线、电缆、变压器、电容器和负荷。

电网中任何一点的阻抗取决于频率、组成设备和网络拓扑结构。

串联起来的电感和电容,在接近谐振频率的特定频率范围内,其阻抗值非常低,称为串联谐振。

并联起来的电感和电容,在接近谐振频率的特定频率范围内,其阻抗值非常高,称为并联谐振。

在较宽的频率范围内,串联谐振和并联谐振在同一个电网中都可能会出现。

如果有谐波电压源或谐波电流源激励这些谐振电路,就可能会引起电压和电流的放大,干扰系统的组成设备,使其过负荷,甚至导致损坏。

图1所示的是一个单线电路图及其电网简化图。

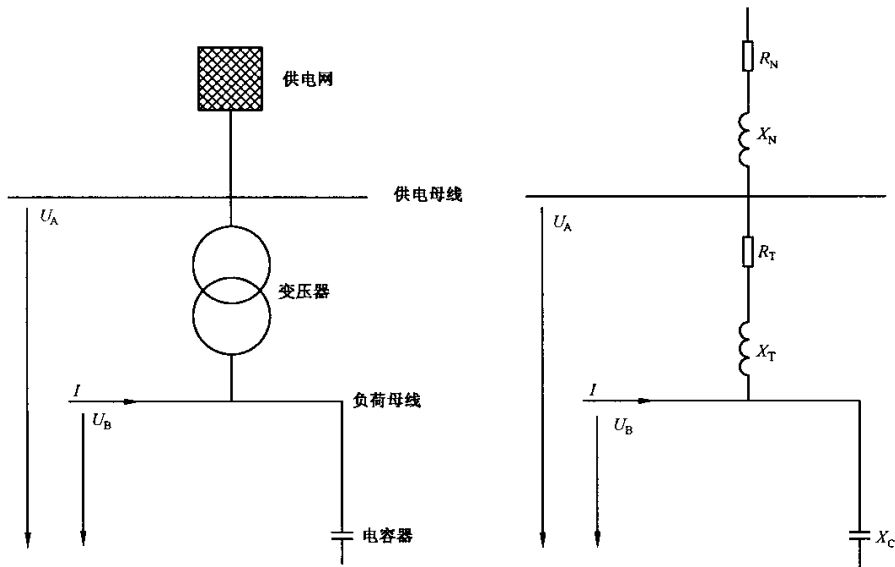


图 1 单线电路图及其电网简化图

该示例系统由供电网络、供电母线(高压侧)、变压器、负荷母线(低压侧)和电容器组成。谐波电流源是由 6 脉波整流器控制的驱动装置。电网自身呈现的谐波电压可能是其他谐波电流源所引起的。

5.2 从电源侧看的等效阻抗图及从负荷母线看的等效阻抗图

分析含有谐波的电网特性,有效的方法是至少看以下两种阻抗:

a) 从电源侧看的等效阻抗图[见图 2a)]

该阻抗图有助于供电母线上存在谐波电压或谐波电流时容性负荷和感性负荷的分析,也有助于计算在音频控制频率下的支路阻抗及评估负荷母线谐波电压(电压质量)。

b) 从负荷母线看的等效阻抗[见图 2b)]

该阻抗图有助于负荷母线上存在谐波电流源时的容性负荷和感性负荷的分析,也有助于评估负荷母线的谐波电压(电压质量)。

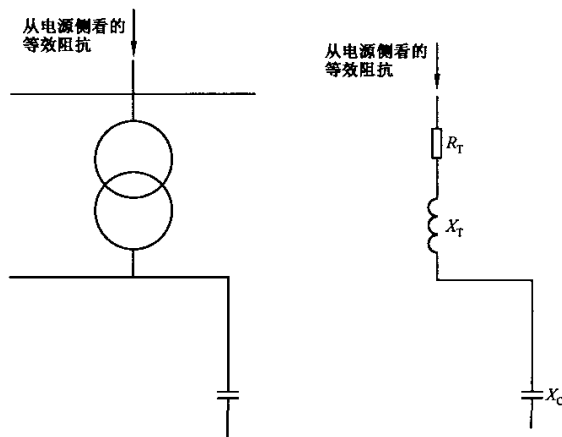


图 2a) 从电源侧看的单线电路图及其等效阻抗图

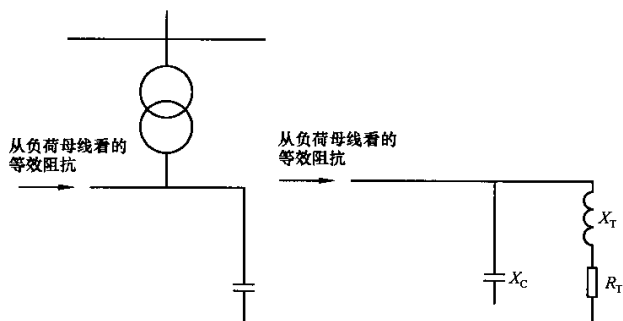


图 2b) 从负荷母线看的单线电路图及其等效阻抗图

5.3 串联谐振示例

在下面这个计算示例中,分析了串联起来的变压器(感抗 X_T ,电阻 R_T)和电容器。图 3a)给出了等效阻抗图,图 3b)给出了阻抗与谐波次数关系,图中显示了发生在 11 次谐波频率附近的串联谐振。表 1 所列为图 1 所示的供电系统中,使用畸变电源电压供电时,其阻抗、电压和电流对应于各特征谐波频率的数值。

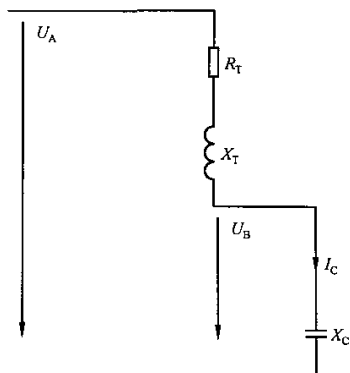


图 3a) 串联谐振等效阻抗图

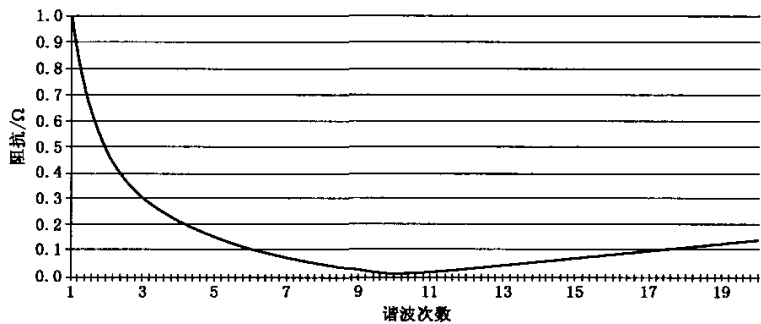


图 3b) 图 3a)所示电路的阻抗-谐波次数曲线图

表 1 由畸变电源电压供电的串联谐振电路对应于各特征谐波下阻抗、电压和电流计算值

| h | X_T Ω | X_C Ω | Z Ω | U_A V | $U_A(\%)$ % | I_C A | U_B V | $U_B(\%)$ % |
|------------------------------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------|----------------|---|------------|----------------|
| 1 | 0.010 | -1.000 | 0.990 | 400.0 | 100.0 | 233 | 404 | 101.0 |
| 5 | 0.048 | -0.200 | 0.152 | 12.0 | 3.0 | 46 | 16 | 3.9 |
| 7 | 0.067 | -0.143 | 0.076 | 9.6 | 2.4 | 73 | 18 | 4.5 |
| 11 | 0.106 | -0.091 | 0.020 | 6.0 | 1.5 | 175 | 29 | 6.9 |
| 13 | 0.125 | -0.077 | 0.050 | 4.8 | 1.2 | 55 | 8 | 1.8 |
| 17 | 0.163 | -0.059 | 0.106 | 2.4 | 0.6 | 13 | 1 | 0.3 |
| 19 | 0.182 | -0.053 | 0.132 | 1.9 | 0.5 | 8 | 1 | 0.2 |
| THD(A) % = 4.4 | | | | | THD(B) % = 9.3 | | | |
| $R_T = X_T / Q_T = X_T / 8$ (简化计算) | | | | | | $I_{C\text{ eff.}} = 309\text{ A}$ $I_C / I_{CN} = 1.34$ | | |

图 3a)、图 3b)和表 1 中各符号和数值说明:

U_N ——参考电压(例如:3 相 400 V);

$h = f_h / f_1$ ——谐波次数, f_1 基波频率, f_h 谐波频率;

$X_T = h X_{T1}$ ——阻抗电压为 6% 的 1 000 kV · A 变压器的短路电抗, X_{T1} 为基波短路电抗;

$Q_T = 8$ ——变压器品质因数;

$X_C = X_{C1} / h$ ——容量为 160 kvar 的电容器电抗, X_{C1} 为基波电容器电抗;

Z ——图 3a)的等效阻抗;

U_A ——供电母线电压。谐波电压值取自国际大电网会议谐波报告中的数据乘以 60%;

$U_A(\%) = (U_A / U_N) \times 100$;

I_C ——电容器电流;

I_{CN} ——电容器额定电流;

U_B ——负荷母线的电压;

$U_B(\%) = (U_B / U_N) \times 100$ 。

从表 1 中可总结出以下几点:

- a) 当频率接近串联谐振频率时,供电母线上一个相对较低的谐波电压将会引起很大的谐波电流。
示例中,当 $h=11$ 时,在电容器中产生了 175 A 电流,相当于基波电容电流的 75%。
- b) 较大的谐波电流将会使负荷母线上出现较高的谐波压降,使正弦电压发生畸变。
示例中,当 $h=11$ 时,虽然供电母线上谐波电压含有率仅为 1.5%,但负荷母线上的谐波电压含有率却达到了 6.9%。
- c) 流过电容器的方均根电流是电容器额定电流的 1.34 倍。由于流过电容器的电流通常被限制为其额定电流的 1.3 倍,所以这种情况属于过负荷状态。

虽然可以设计出能承受如此过电流的电容器,但是这并不能解决问题,因为仅在一个谐波频率 ($h=11$) 下负荷母线上的谐波电压含有率就达到了 7%,这已经大大超过了正常兼容水平。

另外,我们可以看到,并不是只有当频率等于谐振频率时才产生谐波放大,而是只要频率接近谐振频率时就会产生谐波放大。在谐振频率点,阻抗最小,该谐振频率近似为:

$$f_{\text{res}} = f_1 \sqrt{\left| \frac{X_{C1}}{X_{T1}} \right|}$$

5.4 并联谐振示例

在下面这个计算示例中,分析了相互并联的变压器(感抗 X_T ,电阻 R_T)和电容器,图 4a)给出了等效阻抗图,图 4b)给出阻抗与谐波次数关系。表 2 为对应于各特征谐波频率的阻抗、电压和电流的数值。

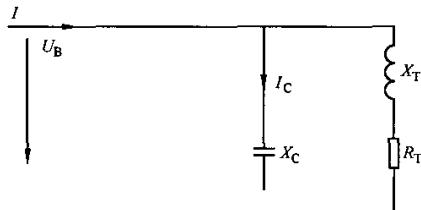


图 4a) 并联谐振等效阻抗图

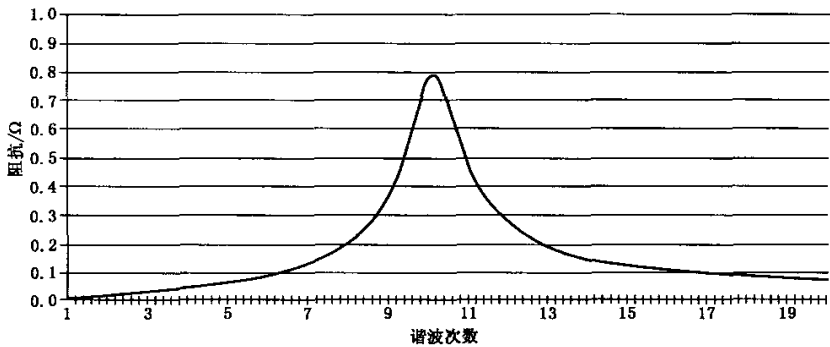


图 4b) 图 4a)所示电路的阻抗-谐波次数曲线图

表 2 含谐波电流源的并联谐振电路中对应于各次特征谐波的阻抗、电压和电流计算值

| h | X_T Ω | X_C Ω | Z Ω | I A | $I(\%)$ % | U_B V | $U_B(\%)$ % | I_C A |
|--|-------------------|-------------------|-----------------|----------|--------------|------------|----------------|------------|
| 1 | 0.010 | -1.000 | 0.010 | 433 | 100.0 | — | — | 231 |
| 5 | 0.048 | -0.200 | 0.064 | 87 | 20.0 | 10 | 2.4 | 28 |
| 7 | 0.067 | -0.143 | 0.127 | 62 | 14.3 | 14 | 3.4 | 55 |
| 11 | 0.106 | -0.091 | 0.490 | 39 | 9.1 | 33 | 8.3 | 212 |
| 13 | 0.125 | -0.077 | 0.192 | 33 | 7.7 | 11 | 2.8 | 83 |
| 17 | 0.163 | -0.059 | 0.091 | 25 | 5.9 | 4 | 1.0 | 39 |
| 19 | 0.182 | -0.053 | 0.073 | 23 | 5.3 | 3 | 0.7 | 32 |
| <div>THD(B)%=9.8</div> <div>$R_T=X_T/Q_T=X_T/8$(简化计算)$I_{C\text{eff.}}=334\text{ A}$ $I_C/I_{CN}=1.45$</div> | | | | | | | | |

图 4a)、图 4b)和表 2 中各符号和数值说明:

- U_N ——参考电压(例如:3 相 400 V);
- $h = f_h / f_1$ ——谐波次数, f_1 基波频率, f_h 谐波频率;
- $X_T = hX_{T1}$ ——阻抗电压为 6% 的 1 000 kV · A 变压器的短路电抗, X_{T1} 为基波短路电抗;
- $Q_T = 8$ ——变压器品质因数;
- $X_C = X_{C1} / h$ ——容量为 160 kvar 的电容器电抗, X_{C1} 为基波电容器电抗;
- Z ——图 4a)的等效阻抗;
- $I, I(\%)$ ——负荷母线电流。该值为 300 kV · A 驱动装置的理论值;
- U_B ——负荷母线电压计算值;
- $U_B(\%) = (U_B / U_N) \times 100$;
- I_C ——电容器电流;
- I_{CN} ——电容器额定电流值。

从表 2 可总结出以下几点:

- a) 当频率接近并联谐振频率时,负荷母线中相对较小的谐波电流能够引起电容器产生很大的电流。

示例中,当 $h=11$ 时,尽管负荷母线中的 11 次电流只有 39 A,但流过电容器的 11 次电流为 212 A,超过基波电容电流的 90%。

- b) 较大的谐波电流将会使负荷母线上出现较高的谐波压降,使正弦电压发生畸变。

示例中,当 $h=11$ 时,11 次谐波电压含有率达到了 8.3%。

- c) 流过电容器的方均根电流是电容器额定电流的 1.45 倍。由于流过电容器的电流限值一般为其额定电流的 1.3 倍,所以这种情况属于过负荷状态。

虽然可以设计出能承受如此过电流的电容器,但这并不能解决问题,因为仅在一个谐波频率下负荷母线上的谐波电压含有率就达到了大约 8%,这已经大大超过了正常兼容水平。

另外,我们可以看到,并不是只有当频率等于谐振频率时才产生谐波放大,只要频率接近谐振频率就会产生谐波放大。在谐振频率点,阻抗最大,该谐振频率近似为:

$$f_{res} = f_1 \sqrt{\left| \frac{X_{C1}}{X_{T1}} \right|}$$

注:实际系统阻抗是与变压器阻抗是串联起来的,这在一定程度上会影响谐振频率和电压电流的幅值。

5.5 防止谐振的方法

防止谐振的主要方法就是使谐振频率尽可能远离那些幅值不应忽略的谐波分量的频率。

防止谐振可以通过改变系统组成设备的电感或电容值来实现。但是如果实际电网由供电系统和无功补偿装置构成的话,这种方法只能在小范围内发挥作用。尤其当系统中使用了自动投切电容器组时,就不得不考虑在许多状态下,都可能发生谐振。

防止谐振最常见的方法就是在电容器上串接电抗器,调整其串联谐振频率,使其谐振频率低于系统中存在的谐波电压或谐波电流的最低频率。在调谐频率以下,电容电感串联支路呈容性,在调谐频率以上呈感性。系统阻抗和电感性的电容电感串联支路的阻抗之间不满足谐振条件,在系统谐波电压和谐波电流频率范围内,既不会产生串联谐振,也不会产生并联谐振。电抗器由相对应的电抗率确定:

$$p = \left| \frac{X_{L1}}{X_{C1}} \right|$$

相应的调谐次数:

$$\frac{f_{LC}}{f_1} = \sqrt{\frac{1}{p}}$$

在大部分电网中,5次谐波是频率最低且幅值较大的谐波,对于这样的电网,选择电容电感串联支路的调谐频率次数低于5次,也就是 $p>4\%$ 是有效的。

如果电网中由于单相整流器或过励磁变压器而产生较高的三次谐波电压,那么调谐频率次数就要低于3次,即 $p>11\%$ 。

在下面的图5a)、图5b)、图6a)、图6b)和表3、表4的例子中,各数取值与前面的例子中取值相同,但是电容电感串联支路的调谐频率为3.78倍 f_1 ,电抗器的 $p=7\%$,基波频率下无功补偿容量与前面相同。

5.5.1 电容电感串联支路:串联谐振示例

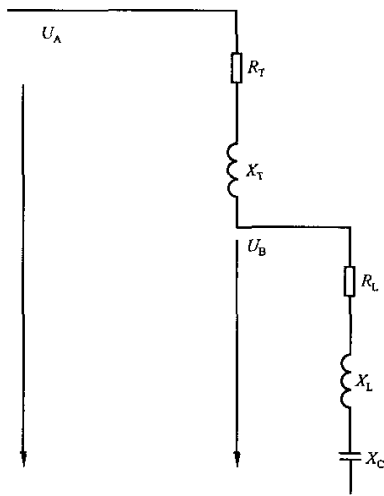


图 5a) 有电容电感串联支路的串联谐振等效阻抗图

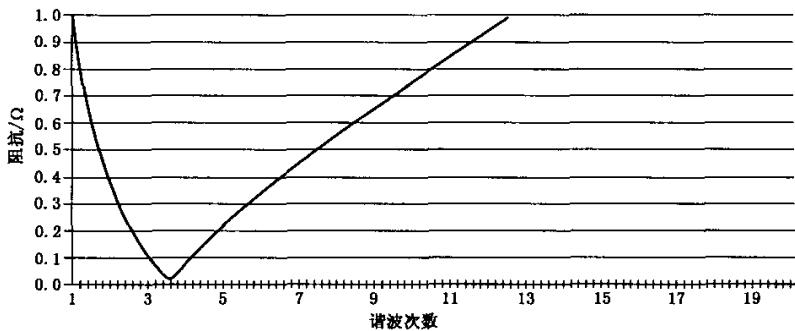


图 5b) 图 5a)所示电路的阻抗-谐波次数曲线图

表 3 由畸变电源供电时含有电容电感串联支路的串联谐振
电路在各特征谐波下阻抗、电压及电流的计算值

| h | X_T Ω | $X_C + X_L$ Ω | Z Ω | U_A V | $U_A(\%)$ % | I_C A | U_B V | $U_B(\%)$ % |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|------------|----------------|----------------------------------|------------|----------------|
| 1 | 0.010 | -1.000 | 0.990 | 400.0 | 100.0 | 233 | 404 | 101.0 |
| 5 | 0.048 | 0.161 | 0.210 | 12.0 | 3.0 | 33 | 9 | 2.3 |
| 7 | 0.067 | 0.373 | 0.441 | 9.6 | 2.4 | 13 | 8 | 2.0 |
| 11 | 0.106 | 0.730 | 0.837 | 6.0 | 1.5 | 4 | 5 | 1.3 |
| 13 | 0.125 | 0.896 | 1.021 | 4.8 | 1.2 | 3 | 4 | 1.1 |
| 17 | 0.163 | 1.216 | 1.381 | 2.4 | 0.6 | 1 | 2 | 0.5 |
| 19 | 0.182 | 1.374 | 1.558 | 1.9 | 0.5 | 1 | 2 | 0.4 |
| THD(A) % = 4.4 | | | | | | | | |
| THD(B) % = 3.6 | | | | | | | | |
| $R_T = X_T / Q_T = X_T / 8$ (简化计算) | | | | | | $I_{C\text{eff}} = 236\text{ A}$ | | |
| $R_L = X_L / Q_L = X_L / 30$ (简化计算) | | | | | | $I_C / I_{CN} = 1.02$ | | |

图 5a)、图 5b)和表 3 中各符号和数值说明：

U_N ——参考电压(例如：3 相 400 V)；

$h = f_h / f_1$ ——谐波次数， f_1 基波频率， f_h 谐波频率；

$X_T = h X_{T1}$ ——阻抗电压为 6% 的 1 000 kV · A 变压器的短路电抗， X_{T1} 为基波短路电抗；

$Q_T = 8$ ——变压器品质因数；

$X_L + X_C$ ——160 kvar 无功补偿装置中电容器和 $p = 7\%$ 的电抗器的电抗值；

$Q_L = 30$ ——电抗器品质因数；

Z ——图 5a)的等效阻抗；

U_A ——供电母线电压。谐波电压值取自国际大电网会议谐波报告中的数据乘以 60%；

$U_A(\%) = (U_A / U_N) \times 100$ ；

I_C ——电容器电流值；

I_{CN} ——电容器额定电流值；

U_B ——负荷母线电压；

$U_B(\%) = (U_B / U_N) \times 100$ 。

从表 3 可总结出以下几点：

a) 电容器与电抗器串联连接后，消除了导致电压、电流放大的谐振问题；

b) 负荷母线的谐波电压含有率为 3.6%，电能质量有所提高(表 1 中为 9.3%)。

5.5.2 电容电感串联支路：并联谐振示例

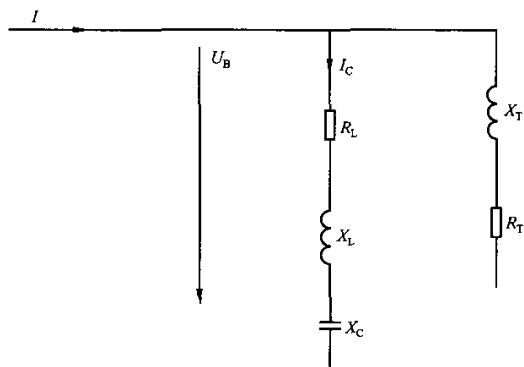


图 6a) 有电容电感串联支路的并联谐振等效阻抗图

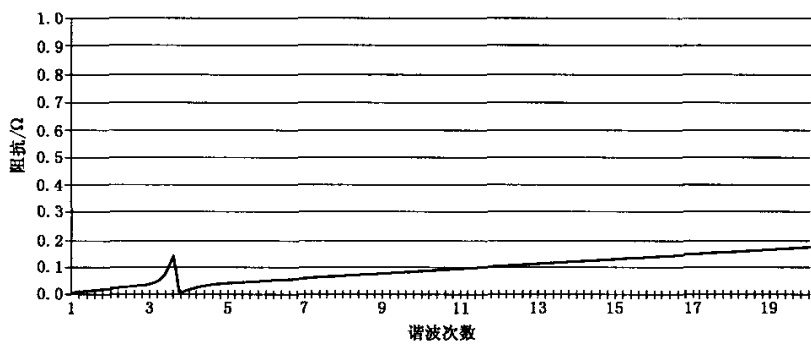


图 6b) 图 6a)所示电路的阻抗-谐波次数曲线图

表 4 存在谐波电流源时含有电容电感串联支路的并联谐振电路
在各特征谐波下阻抗、电压及电流的计算值

| h | X_T Ω | $X_L + X_C$ Ω | Z Ω | I A | $I(\%)$ % | U_B V | $U_B(\%)$ % | I_C A |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|---------------------------------|--------------|------------|----------------|------------|
| 1 | 0.010 | -1.000 | 0.010 | 433 | 100.0 | — | — | 231 |
| 5 | 0.048 | 0.161 | 0.037 | 87 | 20.0 | 6 | 1.4 | 20 |
| 7 | 0.067 | 0.373 | 0.057 | 62 | 14.3 | 6 | 1.5 | 9 |
| 11 | 0.106 | 0.730 | 0.093 | 39 | 9.1 | 6 | 1.6 | 5 |
| 13 | 0.125 | 0.896 | 0.110 | 33 | 7.7 | 6 | 1.6 | 4 |
| 17 | 0.163 | 1.216 | 0.145 | 25 | 5.9 | 6 | 1.6 | 3 |
| 19 | 0.182 | 1.374 | 0.162 | 23 | 5.3 | 6 | 1.6 | 3 |
| THD(B) % = 3.8 | | | | | | | | |
| $R_T = X_T / Q_T = X_T / 8$ (简化计算) | | | | $I_{C\text{eff}} = 232\text{A}$ | | | | |
| $R_L = X_L / Q_L = X_L / 30$ (简化计算) | | | | $I_C / I_{CN} = 1.01$ | | | | |

图 6a)、图 6b)和表 4 中各符号和数值说明:

U_N ——参考电压(例如:3 相 400 V);

$h=f_h/f_1$ ——谐波次数, f_1 基波频率, f_h 谐波频率;

$X_T=hX_{T1}$ ——阻抗电压为 6% 的 1 000 kV·A 变压器的短路电抗, X_{T1} 为基波短路电抗;

$Q_T=8$ ——变压器品质因数;

X_L+X_C ——160 kvar 无功补偿装置中电容器和 $p=7\%$ 的电抗器的电抗值;

$Q_L=30$ ——电抗器品质因数;

Z ——图 6a)的等效阻抗;

$I, I(\%)$ ——负荷母线电流。该值为 300 kV·A 驱动装置的理论值;

U_B ——负荷母线计算值电压;

$U_B(\%)=(U_B/U_N)\times 100$;

I_C ——电容器电流值;

I_{CN} ——电容器额定电流值。

从表 4 可总结出以下几点:

a) 电容器与电抗器串联连接后,消除了导致电压、电流放大的谐振问题;

b) 负荷母线的谐波电压含有率为 3.8%,电能质量有所提高(表 2 中为 9.8%)。

注:实际系统阻抗是与变压器阻抗是串联起来的,这在一定程度上会影响谐振频率和电压电流的幅值。

6 1 000 V 及以下电力系统用并联电容器和滤波器

6.1 简介

本部分叙述了在低压电网中运用并联电容器的三种方法,并指出每种方法应采取的安全措施。

在设计无功补偿装置时,应考虑电网所有的运行方式,包括异常和事故时电网的运行方式,以及未来电网扩建后的情况。

6.2 并联电容器

并联电容器类型的无功补偿装置可以在不需要防止谐振或抑制谐波的情况下使用。这种情况通常是指由电网感抗和并联电容器容抗所确定的谐振频率相对较高,并且电网中谐波(即母线谐波电压和负荷产生的谐波电流)含量很低。

应该认识到:谐振发生的可能性是由配电变压器低压侧所投运的所有无功补偿装置的总电容所决定的。当无功补偿装置已经投运后,再考虑防止谐振问题要比无功补偿装置设计时就考虑困难得多,费用也昂贵得多,这是因为现有电容器和框架等通常不能再利用。

6.3 失谐滤波器

如 5.5 中所示,从技术经济的角度出发来考虑防止谐振,有效的方法是在无功补偿装置的每组电容器回路中都串入电抗器。

这种类型的无功补偿装置(失谐滤波器),也有可能吸收部分比电容电感串联支路调谐次数更高的谐波电流,降低电网中的谐波电压。

电容电感串联调谐频率的选择取决于电网中现有谐波电流的频率和大小,并取决于音频控制装置的信号频率。

一般不能增加电抗器与已经安装使用的电容器构成失谐滤波器,因为该电容器额定值可能不满足由于串入了电抗器而引起的电压或电流的升高。

通常,含有串联电抗器的无功补偿装置不能与不含串联电抗器的装置混合使用,当不同调谐频率的

装置与失谐滤波器混合使用时也要注意。这两种情况都可能导致谐波负荷分配不均使某个滤波器或部分装置过负荷。

6.4 调谐滤波器

为了使电网中的谐波电压保持在可接受的范围内,就应考虑安装 4.1 所提到的调谐滤波器。它作为谐波源的负荷,吸收谐波电流,从而减小谐波电压的升高。评估是否需要调谐滤波器时应综合考虑整个电网系统的状况。

设计调谐滤波器应知道电网的谐波阻抗值,特别是配电变压器的阻抗和谐波源频谱及电网高压侧谐波电压的频谱。

一个调谐滤波器包含一个或多个调谐滤波支路(每相都是电抗器和电容器的串联),每个支路对于给定的谐波频率所呈现的阻抗要比同频率下电网的阻抗低。这样,大部分谐波电流都被这个滤波器吸收。在电网频率下,滤波器等同于电容器起到无功补偿的作用。

一般地,调谐滤波器支路需要针对除 3 次及 3 的整数倍以外的奇数次谐波设计,如 5,7,11,13,17,19 等。通常对于低压设备可以不设三次滤波器,因为三次谐波仅出现在相和中性线之间,而大多数无功补偿装置接在相与相之间(不与中性线连接)。但是在负荷不平衡及三次谐波较大时,也要考虑三次谐波滤波器。

通常,有以下几点结论:

- a) 在电网频率下,每个调谐滤波支路的基波容量随谐波次数的增加而降低;
- b) 一般滤波器的所有调谐支路是同时投切的。但是如果需要单独投切各调谐支路,需从低次到高次(如 5,7,11 等)投运,从高次到低次切除;
- c) 选择调谐支路的额定调谐频率一般要稍低于谐波频率,这样,调谐支路的阻抗在谐波频率下呈电感性。

在将调谐滤波器安装到连接在同一个配电变压器低压侧的各个设备上时,要注意防止出现问题。由于组成设备的制造偏差,在某一谐波次数上工作的并联的滤波器支路不会有完全一致的谐振频率,这就会产生一些问题,例如,由于谐波电流分配不均造成的问题,或调谐滤波器之间的并联谐振造成的问题,或两者都有。在这些情况下有效的做法是,利用附加的触点把针对同一次谐波的每个滤波器支路对应相的电抗器和电容器之间的点连接起来。

6.5 组成设备的选择

低压无功补偿装置通常安装在室内,由以下设备中的部分或全部组成:

- a) 电容器;
- b) 电抗器(例如在滤波器中);
- c) 接触器、断路器或无触点开关;
- d) 短路保护装置(熔丝或断路器)。

这些组成设备额定参数的选取通常是由它们(在将要服务的装置中)处于最严重工况时计算出的值确定的。设计无功补偿装置或滤波器时,应考虑负荷产生的谐波电流和任何存在于电网中的谐波电流或电压。

应确保装置的制造偏差、温度和老化的影响、内外熔丝(如果存在)的动作、滤波器组成设备的非线性和电网频率的变化等不会给滤波器的性能带来不应接受的影响。

6.5.1 电容器

电容器单元或电容器组是无功补偿装置和滤波器的基本组成部分。应进行透彻的研究以获得电容器的最优设计。

电容器的电流由基波分量和谐波分量组成。由于谐波分量的含量可能非常高,特别是在调谐滤波器中,在确定电容器的额定参数时就要将这些谐波分量考虑在内。

还要考虑滤波器中电容器与电抗器串联之后电容器的电压升高。

6.5.2 电抗器

电抗器电流由基波分量和谐波分量组成。由于谐波分量的含量可能非常高,特别是在调谐滤波器中,在确定电抗器的额定值时应将它们计算在内。

设计电抗器时应按照基波电流和谐波电流所能产生的最大热负荷进行设计。

设计滤波器时应考虑电抗器电感的制造偏差,大多数滤波装置允许偏差范围为 $\pm 3\%$ 。

电抗器应能承受装置故障时产生的短路电流和操作电流、操作电压。

电抗器在最大负荷时的电感值与额定电流下的电感值之间的差异不能超过额定电流时电感值的 5% ,最大负荷状态是由电流或电压(由基波和谐波电压电流最大值的算术和合成的)的峰值给定的。

当使用铁芯电抗器(通常用于低压滤波装置中)时,应避免发生铁芯饱和问题(电感值突变,投切时发生铁磁谐振、导致组成设备过负荷等)。

电抗器的所有损耗都应该考虑在内。

6.5.3 接触器和断路器

无功补偿装置对投切装置有特殊的性能要求。需要考虑以下几方面:

- a) 接触器和断路器应该是无重击穿的,适用于电容器组的投切;
- b) 接触器和断路器的额定电压应该不小于当系统含有无功补偿装置或滤波器时电网电压的最大值;
- c) 在设计时应保证接触器和断路器的电流能够承受当无功补偿装置或滤波器工作在最高电压、最高频率和组成设备(特别是电容器和电抗器)最大偏差时流过装置的持续电流(包括谐波分量);
- d) 断路器的额定开断容量应能开断发生在无功补偿装置或滤波器侧的短路电流;
- e) 接触器和断路器的额定短时耐受电流应能够承受系统短路故障电流和合闸涌流;
- f) 接触器和断路器的选型应满足预期的投切操作频率。

6.5.4 短路保护装置(熔丝)

短路保护装置的额定电压应不小于无功补偿装置或滤波器处于工作状态时的电网电压最大值。

短路保护装置的电流在设计时应该满足能够承受无功补偿装置或滤波器工作在最高电压、最高频率和组成设备(特别是电容器和电抗器)最大偏差时所流过装置的持续电流(包括谐波分量)。

短路保护装置的额定开断容量应能开断发生在无功补偿装置或滤波器侧的短路电流。

短路保护装置的额定短时耐受电流应能够承受系统短路故障电流和合闸涌流。

6.6 并联电容器和滤波器对音频控制装置的干扰

6.6.1 并联电容器

对于由音频控制装置注入到高压电网的音频信号,无功补偿装置的电容和配电变压器的电感形成了一个串联谐振电路。当该电路的谐振频率等同于或接近于信号频率的时候就会出现問題。低压侧的信号电压可能上升到不应接受的水平,在此频率下高压侧阻抗可能会降低,而成为音频控制信号发生器的附加负荷。当谐振频率远远低于音频控制信号的频率时,信号的电压可能会被减弱到不应接受的水平。

下面给出了上面所述情况的一个例子,图 7b)、图 7c)所示为图 7a)所示的变压器-电容器连接对应

四种不同音频控制信号频率时的情况。接近谐振频率时,装置的阻抗远远低于正常的负荷阻抗,这种情况会导致音频控制发生器过负荷。另一方面,音频控制信号电压能够升高或降低到足以损坏音频接收器的程度。

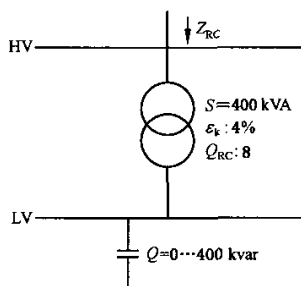


图 7a) 变压器-电容器连接的单线电路图

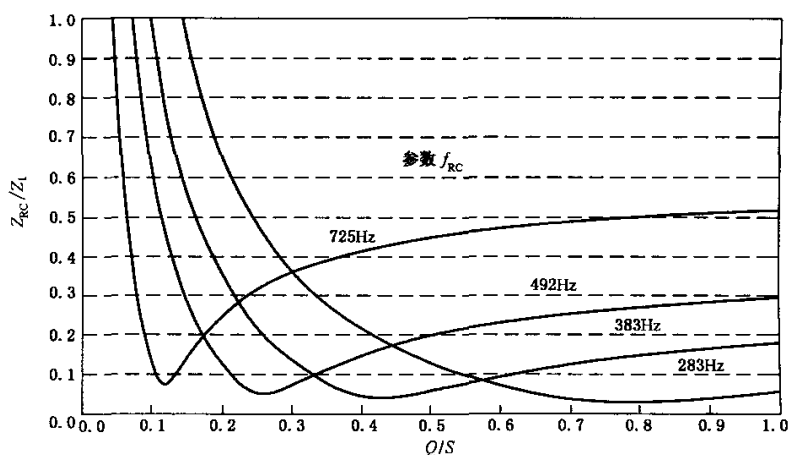


图 7b) 相对阻抗 Z_{RC}/Z_1

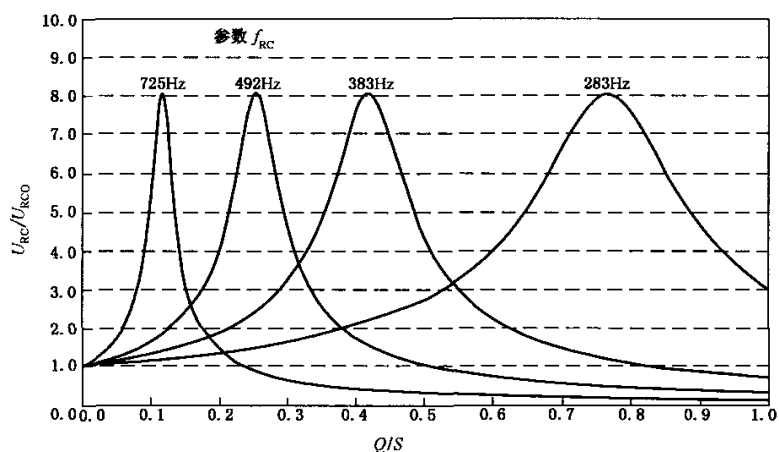


图 7c) 相对信号电压 U_{RC}/U_{RCO}

图 7a)、图 7b)、图 7c)中所用符号的说明:

Z_{RC} —— 变压器-电容器连接在音频控制频率下的阻抗;

Z_1 —— 电网频率下的正常负荷阻抗;

S —— 变压器额定容量;

ϵ_k —— 变压器阻抗电压百分数;

Q —— 并联电容器额定容量;

U_{RC} —— 低压侧音频控制信号电压;

U_{RC0} —— 无并联电容器接入时音频控制信号电压;

f_{RC} —— 音频控制信号频率;

Q_{RC} —— 变压器在音频控制信号频率下的品质因数。

6.6.2 失谐滤波器

将电抗器串联到无功补偿装置的电容器组中,如果电容电感串联支路的谐振频率低于或远离音频控制信号频率,就能阻止装置对音频控制装置信号的干扰。

例如,从图 7b)中可以看到,当音频控制信号频率与系统频率之比 h 约为 10 时(例如频率为 492 Hz 的信号在 50 Hz 的电网中),信号频率下的阻抗与基波频率下的阻抗相差不大,因此实际上对音频控制装置可能没有影响。频率比 h 在 2~6 范围内时,阻抗相对较低,这时在音频控制信号频率下低压侧信号电压和高压侧阻抗将会降低,因此音频控制装置的正常运行可能会受影响。

如果电容电感串联支路的谐振频率高于音频控制信号频率,则信号频率下阻抗是容性的,这可能会与配电变压器的感性阻抗发生谐振,对音频控制装置产生影响,类似于 6.6.1 所叙述的无电抗器的电容器组。

6.6.3 调谐滤波器

调谐滤波器可能影响音频控制装置的信号。调谐滤波器支路的阻抗在所有低于其谐振频率的频率下呈容性,在所有高于其调谐频率的频率下呈感性。在第一种情形下(阻抗呈容性),配电变压器的阻抗降低了高压侧电网在音频控制信号频率下的阻抗。在第二种情况下(阻抗呈感性),降低了低压侧音频控制信号电压。在这两种情况下,音频控制装置都受到了影响。

如果音频控制信号频率在两个调谐滤波器支路的调谐频率之间,那么由于两个滤波器感抗和容抗的全部或部分补偿,在音频控制信号频率下可能会产生一个相对较高的阻抗。例如精心选择调谐频率或调谐滤波器支路的电容值和电感值,可以避免干扰。

7 1 000 V 以上电力系统用并联电容器和滤波器

7.1 简介

低压系统讨论的所有原则也适用于高压系统,但针对 1 000 V 以上电压等级还有特定要求。

7.2 特定要求

在高压系统中,系统结构和短路容量通常是变化的。在设计装置时要考虑到所有的变化。

高压无功补偿装置可安装在户内或户外,下面各项会对设计产生影响:

- a) 不利的大气条件、污秽等要求增加爬电距离和电气间隙;
- b) 气候条件;

- c) 机械应力,地震强度;
- d) 太阳辐射。

在设计无功补偿装置时要考虑负荷产生的谐波以及任何存在于电网中的谐波。

7.3 无功补偿装置的选择

应该对系统进行分析,以便选定最适合的装置。尽管对系统已经进行了详细分析,但只要系统中有谐波畸变存在,就应该进行实际的测量。

以下几点在系统分析时应该计算在内:

- a) 应该考虑系统所有的接线方式,包括异常和事故时电网的接线方式,以及未来对系统的扩展。特别要注意电机(发电机,同步补偿器),电缆电容,线路阻抗等。
- b) 在所有不同工作环境中的谐波发生量(畸变率)。应考虑到系统中存在的谐波源。谐波电流的测量和计算是有必要的。当谐波是由电流源产生而不是由电压源产生的时候,仅从谐波电压畸变推导出的数据是不准确的。如果某个系统没有隔离变压器或其他大阻抗将其与公用电网隔离,那么用户在这样的系统中安装滤波器时就要考虑系统中所有其他并联电容器和滤波器的影响。
- c) 系统已安装的无功补偿装置、失谐滤波器和调谐滤波器。
- d) 需要研究无功补偿装置和滤波器对音频控制装置的影响,以确保不会发生系统故障。

7.4 滤波器的类型

最常用的滤波装置有单调谐滤波器、二阶高通滤波器及 C 型高通滤波器[见图 8b)、图 8c)、图 8e)]。可根据技术和经济条件决定使用何种类型的滤波器。如果使用了二阶高通滤波器,还需要进行损耗估算。滤波器最常使用的调谐次数是 2,3,4,5,7,11,13,17,19,23,25。

如果需要保证谐波畸变率在规定的限值内,就得考虑电容器和电抗器的制造偏差。滤波器并不总是能够保证谐波畸变率和功率因数两者都在给定的限值之内。

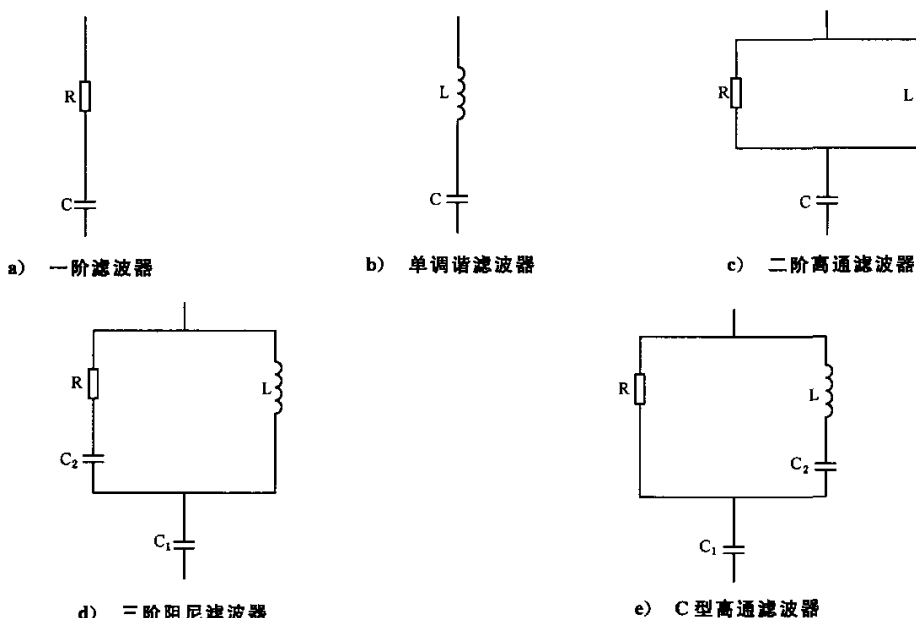


图 8 高压滤波器的类型

7.5 滤波器组成设备的选择

高压滤波器通常由下面的组成设备组成：

- a) 断路器；
- b) 电容器；
- c) 电抗器；
- d) 电阻器(如果需要的话)；
- e) 保护装置。

这些组成设备的额定参数的选取通常取决于它们(在将要使用的装置中)处于最严重工况时计算出的值。当设计无功补偿装置或滤波器时,应考虑负荷设备产生的谐波电流和任何存在于电网中的谐波电流或电压。

应确保装置的制造偏差、温度和老化的影响、内外熔丝(如果存在)的动作、滤波器组成设备的非线性和电网频率的变化等不会给滤波器的性能带来不应接受的影响。

7.5.1 断路器

滤波器对投切装置有特殊的性能要求。需要考虑以下几方面：

- a) 断路器应该无重击穿；
- b) 断路器的额定电压应该不小于系统含有滤波器时电网电压的最大值；
- c) 设计时应保证断路器的电流能够承受住滤波器工作在最高电压、最高频率和最大电容偏差时流过滤波器的持续电流；
- d) 断路器的开断容量应能开断发生在断路器的滤波装置侧的短路电流；
- e) 断路器的额定短时耐受电流应能够承受系统短路故障电流和合闸涌流；
- f) 断路器的选型应满足预期的投切操作频率。

7.5.2 电容器

电容器组是每个滤波装置的基本组成部分。应进行透彻的研究以获得电容器的最优设计。

滤波器的电流由基波分量和谐波分量组成。由于谐波分量的含量可能非常高,所以在确定电容器的额定参数时就要将这些谐波分量考虑在内。

下面的定义和设计准则是针对滤波电容器的：

- a) 电容器额定电压,电容器额定电流和电容偏差:见电容器相关标准；
- b) 电容器的额定值选择时应允许元件损坏或熔丝动作,并与滤波器保护配合。运行期间,如果电容值的变化超过了滤波器的允许范围,滤波器应该从系统上断开。

7.5.3 电抗器

选择滤波电抗器时,应该考虑以下几方面：

- a) 电抗器的热损耗取决于基波和谐波电流的最大值；
- b) 电感值的制造偏差:大多数滤波装置的允许值为 $\pm 3\%$,特殊情况下可能需要电感可调；
- c) 事故时产生的短路电流；
- d) 在一定电流和频率范围内的线性度；
- e) 相邻金属体的涡流损耗影响,例如装置框架,接地系统和建筑物内的建筑用钢材。

7.5.4 电阻器

选择滤波电阻器时,应该考虑以下几方面：

- a) 流过电阻器的总方均根电流；
- b) 电阻器的电感；
- c) 电阻值的制造偏差和温度系数。

7.5.5 继电保护

保护系统通常由以下部分构成：

- a) 谐波过负荷保护；
- b) 过电流保护；
- c) 接地故障保护；
- d) 欠压保护；
- e) 电容器组不平衡保护。

7.6 并联电容器和滤波器对音频控制装置的干扰

应该校验无功补偿装置和滤波器对音频控制装置信号的干扰，以确保不发生系统故障。

无功补偿装置的调谐频率不应与音频控制信号频率相同，应保持足够距离。由于音频控制装置注入点和无功补偿装置之间的线路存在感抗，所以音频控制信号电压可能被降低或提高。如果无功补偿装置的阻抗在音频控制信号频率下呈感性，音频控制信号电压就会被降低；如果呈容性就会被提高。参考 6.6 的要求，应确保音频控制信号电压受到的影响在允许范围之内。

参 考 文 献

- [1] GB 1984—2003 高压交流断路器
- [2] GB/T 2900.1—2008 电工术语 基本术语
- [3] GB/T 2900.15—1997 电工术语 变压器、互感器、调压器和电抗器
- [4] GB/T 2900.16—1996 电工术语 电力电容器
- [5] GB/T 3667 交流电动机电容器
- [6] GB 3804—2004 3.6 kV~40.5 kV 高压交流负荷开关
- [7] GB/T 3859 半导体变流器
- [8] GB/T 3984 感应加热装置用电容器
- [9] GB/T 4365—2003 电工术语 电磁兼容
- [10] GB/T 6115 电力系统用串联电抗器
- [11] GB 10229—1988 电抗器
- [12] 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
- [13] GB/T 11024.2—2001 标称电压 1 000 V 以上交流电力系统用并联电容器 第 2 部分：耐久性试验
- [14] GB 12747.1—2004 标称电压 1 000 V 及以下交流电力系统用自愈式并联电容器 第 1 部分：总则——性能、试验和定额——安全要求——安装和运行导则
- [15] GB 13539—2008 低压熔断器
- [16] GB/T 14047—1993 量度继电器和保护装置
- [17] GB/T 14549—1993 电能质量 公用电网谐波
- [18] GB/T 14810—1993 110 kV 及以上交流高压负荷开关
- [19] GB/T 15166.1—1994 交流高压熔断器 术语
- [20] GB 15166.2—2008 高压交流熔断器 第 2 部分：限流熔断器
- [21] GB 15166.4—2008 高压交流熔断器 第 4 部分：并联电容器外保护用熔断器
- [22] GB/T 16700—1996 集中网络控制装置的标准频率
- [23] GB/T 17702 电力电子电容器
- [24] GB/T 17886.1—1999 标称电压 1 000 V 及以下交流电力系统用非自愈式并联电容器 第 1 部分：总则——性能、试验和定额——安全要求——安装和运行导则
- [25] GB/T 18489—2008 管形荧光灯和其他放电灯线路用电容器 一般要求和安全要求
- [26] GB/T 18504—2001 管形荧光灯和其他放电灯线路用电容器性能要求
- [27] GB/T 19749—2005 耦合电容器及电容分压器
- [28] Harmonics characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in network, CIGRE, WG36-05, Electra no. 77