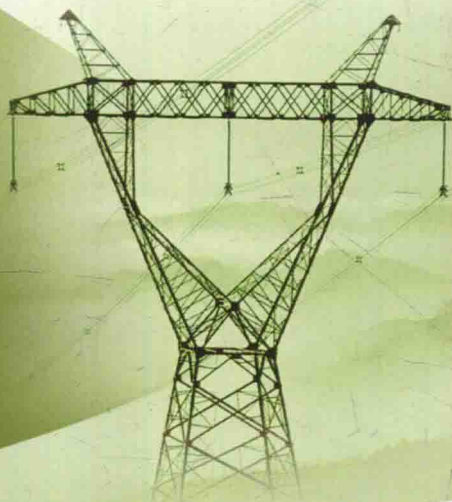


无源电力滤波器 技术与应用

肖遥◎编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

无源电力滤波器 技术与应用

肖遥◎编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是论述无源电力滤波器设计基础及应用的专业书。

全书共分七章,包括概述、单调谐类型滤波器、多调谐滤波器、滤波器应用及无功补偿电容器组、滤波器设计的相关技术、滤波器组的保护、滤波器与系统之间谐振案例两则。

本书可供电力系统工程技术人员使用,也可作为大专院校相关专业广大师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

无源电力滤波器技术与应用 / 肖遥编著. —北京:中国电力出版社, 2018.5
ISBN 978-7-5198-1777-0

I. ①无… II. ①肖… III. ①无源滤波器 IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 037598 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:罗翠兰 (010-63412428)

责任校对:王小鹏

装帧设计:张俊霞 张 娟

责任印制:邹树群

印 刷:三河市万龙印装有限公司

版 次:2018 年 5 月第一版

印 次:2018 年 5 月北京第一次印刷

开 本:710 毫米×980 毫米 16 开本

印 张:10.25

字 数:188 千字

印 数:0001—1200 册

定 价:50.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前 言

早些年,中国电力出版社曾约我写一本关于电力系统谐波方面的专著,我感觉能力有限,不敢贸然承担这样一项严肃认真且艰苦细致的工作。写书除了对本专业有深刻全面的了解之外,还要查阅大量的资料。但从此刻开始,动手写书的念头就一直没有断过,并着手收集了大量的资料。

如果仅仅是整理资料,则许多内容早已见诸相关的书籍和期刊,因此也就没有必要浪费笔墨和纸张,进而消磨读者的时间和精力。社会进步在加速,时间永远不够用。写书一是为了对自己工作的总结,二是为了节省读者的时间,避免相同的工作重复做。酝酿许久,觉得就无源电力滤波器的技术与应用写一本专著,也许有些用处。

尽管现在有源滤波已经普及,但是其投资大、运行维护成本高,对运行维护人员的专业素质要求很高。实现无源滤波与有源滤波的结合,将是解决谐波和无功问题的发展方向。

在国际市场上,无源电力滤波器基本都是成套设计并成套供货,但是极少提供设计方法。为此,作者自1994年开始进行各种无源滤波器参数设计算法的探讨,同时还在国际友人的指导和合作下对系统谐波阻抗测量、谐波的叠加方法等进行了探索。这些研究成果大多散见于IEEE ICHQP(IEEE 电能质量及谐波国际会议,双年举办)会议和期刊上。最近 www.researchgate.net 门户网站汇总了我的这些研究内容,其中关于C型滤波器的设计内容,在极短的时间内有超过千人阅读。

对从事电力滤波器招标、投标、设计等工作的工程技术人员,除了阅读本书之外,推荐大家仔细阅读两本国际大电网会议(CIGRE)手册,见本书参考文献[1]、文献[2]。文献[2]是对文献[1]的补充和完善。作者以中国代表的身份参加了文献[2]起草过程的讨论,该起草过程用了近6年的时间,前后召开了8次小组讨论会议。本书是对CIGRE上述两本手册的补充和完善。

本书除了介绍无源滤波器的参数设计方法外,还介绍了滤波器现场调谐的方法。鉴于无功补偿电容器组设计和运行中的问题较多,故设专门章节介绍了无功补偿电容器组设计和运行中应该注意的要点。本书中谐波概率叠加方法则是简单经济计算滤波器元件耐压值的一种探索;谐波阻抗测量方法则是探索现实系统的谐波阻抗频率特性,为滤波器系统设计提供基础数据。书中两则滤波器与系统之

间谐振的案例则提醒滤波器设计中应该特别留意这方面的问题。

本书大部分内容是笔者参加工作后从事电力谐波研究的主要成果，研究过程中得到了曾经共事的同事、朋友以及领导鼓励和支持，在此致以诚挚的感谢。

本书的编写过程中得到中国南方电网有限责任公司超高压输电公司的支持和资助，在此表示衷心感谢。

编者
2018.01

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 电力系统谐波及滤波	1
第二节 无源电力滤波器的分类及设计目标	2
第三节 谐振及其基本特征	4
第二章 单调谐类型滤波器	8
第一节 单调谐滤波器	8
第二节 二阶高通滤波器	13
第三节 三阶滤波器	19
第四节 C 型滤波器	29
第三章 多调谐滤波器	39
第一节 双调谐滤波器	39
第二节 其他双调谐滤波器型式	47
第三节 三调谐滤波器	49
第四节 四调谐滤波器	54
第五节 低损耗的多调谐无源滤波器	57
第四章 滤波器应用及无功补偿电容器组	64
第一节 抑制低次谐波和暂态过电压的非线性滤波器	64
第二节 串联阻波器	64
第三节 滤波频率可调的滤波器	67
第四节 滤波器空载调谐	67
第五节 并联无功补偿电容器组的设计及投切顺序	73
第五章 滤波器设计的相关技术	81
第一节 谐波阻抗计算的数学模型	81
第二节 谐波阻抗测量技术	83
第三节 无需系统信号同步的谐波阻抗测量	92
第四节 谐波叠加的概率统计方法	96

第六章 滤波器组的保护	104
第一节 引言	104
第二节 内熔丝电容器单元和无熔丝电容器单元的内部结构	105
第三节 高压滤波电容器组不平衡保护整定原则	107
第四节 H 型接线带内熔丝高压滤波电容器组不平衡电流保护整定值	109
第五节 H 型接线无熔丝高压滤波电容器组不平衡电流保护整定值	117
第六节 Π 型接线内熔丝电容器组故障行为及保护动作整定	124
第七节 Π 型接线无熔丝电容器组故障行为及保护动作整定	129
第八节 两种电路的优缺点比较	133
第九节 Π 型接线电容器组不平衡保护电路的改进	134
第十节 C 型交流滤波器低压元件保护的原理	135
第七章 滤波器与系统之间谐振案例两则	140
第一节 隔河岩水电站接入葛洲坝换流站交流场的谐波问题	140
第二节 滤波器改造经典案例	147
参考文献	154

第一章

概 述

第一节 电力系统谐波及滤波

“谐波”一词源于英文单词“harmonics”，本意为和谐，自然具有“雅”的本质和属性，最初是表示音乐“悦耳”的一个专有名词，意指人处于和谐的环境中，便有快乐。谐波的数学概念则起源于周期函数的傅里叶变换（Fourier Transform）。近代计算机科学的长足进步，带动了数字信号分析学科的迅猛发展。而电力系统谐波则是建立在对电压、电流波形进行周期性傅里叶变换的数学基础上的一个分支学科。

事实上，电力系统的谐波具有“罪恶”般的名声。提起电力系统谐波，大多数将其与事故、危害等联系在一起。鉴于电力谐波的危害性，自然就要求对其进行监测，并追根溯源。因此就有各种谐波测量方法的研究，以及对各种谐波源的研究。同时，为了消除谐波，积极的方法是在谐波源头装设滤波器，这样就带动了对各种滤波器的研究，并不断改进滤波器的性能。更为积极的方式是改进输、配电装置，特别是用电设备的特性，使其产生的谐波降低到最小。

传统的电力系统稳态分析，是考虑如何保证电力系统的潮流分配合理，以及维持系统电压和频率在给定的范围内，并保持系统稳定运行。实际上，电压和频率是电能的质量范畴，所有的电力设备都依据标准电压和频率设计，如果电压和频率超出标准给定的范围，自然会使其效率降低，甚至于损坏。现阶段，电能质量的范畴依旧为电压和频率，只是将电压质量的范围外延到其波形及其连续性方面，以及三相电压的对称性方面。

如何保持电网的电压为持续稳定的正弦波形，在电力系统诞生的初始阶段就已经被认识到并加以控制：如发电机设计中采用绕组分布方式，以及转子气隙等技术，可以将发电机的出口电压波形维持在正弦波的概念范围之内。

现代电力电子技术以及用电技术的发展，使得许多用电负荷的性质为非线性的。即在正弦电压的作用下，流过其中的电流波形不再是正弦形，而是含有丰富

的高频分量。而消除由非线性负荷所引起的谐波分量，其担子就落在了无源电力滤波器和新近发展起来的有源电力滤波器上。

无源电力滤波器和有源电力滤波器是电力谐波滤波技术的两个分支。前者发展起步较早，应用也比较广泛。后者是随着电力电子技术的发展，以及瞬时无功功率概念的推出而发展起来的。目前关于有源电力滤波器的设计和应用基本还处于成长期，将随着电力电子器件的发展而进步。无源电力滤波器和有源电力滤波器各自有不同的理论基础，尽管现在有源滤波已经普及，但是其投资大、运行维护成本高，对运行维护人员的专业素质要求更高。实现无源滤波和有源滤波的结合，将是解决谐波和无功问题的发展方向。

在国外，无源电力滤波器都是由承包商成套设计并成套供货，但是基本不提供设计方法。

第二节 无源电力滤波器的分类及设计目标

无源电力滤波器作为解决电力系统谐波问题的一种有效手段，在直流输电工程诞生之日起就已经有应用。纵观无源电力滤波器技术的发展历史，其驱动力就是来自滤波器的滤波效益与滤波器的投资、运行成本等问题。

最早应用的无源电力滤波器是单调谐的滤波器。为了限制滤波器与交流系统之间可能的谐振，提出了阻尼型的单调谐滤波器。阻尼型单调谐滤波器里面阻尼电阻的损耗高，为降低阻尼电阻上的损耗，提出了二阶高通型滤波器。由于二阶滤波器用于低次谐波滤波时的损耗依旧很高，为进一步降低阻尼电阻上的损耗，继而提出了三阶滤波器的电路型式。但是三阶滤波器的参数选择和阻抗频率特性不尽如人意，于是在英法海底直流工程中创造性地推出了C型滤波器，比较彻底地解决了滤波器用于低次谐波滤波场景的损耗问题。

直流输电系统中需要的滤波器众多，根据不同的特征谐波次数需要设置不同频率的滤波器，相应地，每组滤波器需要设置一组断路器。这些滤波器占地可观，并且要求配合直流输电系统的运行方式进行投切。为了节省滤波器的占地面积，以及节省断路器的数量，提出了双调谐滤波器并应用，继而又提出了三调谐滤波器的结构。理论上，更多次数的多调谐滤波器不是难题，但是用于工程实践就要考虑其电路的复杂程度，考虑投资和运行成本，以及滤波器与系统之间可能出现的谐振问题。本书关于多调谐滤波器的设计中比较着重描述了无阻尼的多调谐滤波器及其算法，阻尼型的多调谐滤波器设计建立在相应的无阻尼多调谐滤波器设计基础之上。阻尼型多调谐滤波器如果用于低次谐波的滤波，也同样面临基波损耗高的问题。为解决损耗问题，本书介绍了低损耗的多调谐滤波器原理及其设计

方法。

无源滤波器的基本理论来自电工学的谐振电路。谐振电路的应用非常广泛,在无线电、工业自动化等领域有许多具体的应用实例。具体而言,谐振电路有串联谐振、并联谐振两种基本类型。针对不同的场合和目的,两种类型的谐振电路都有应用。本书将从这两种最基本的谐振电路作为引子,介绍各种无源滤波器设计的数学原理,并结合工程实际介绍各自应用中要考虑的因素。

电力系统应用谐振电路的例子非常多,除了要满足通常的阻抗频率特性要求之外,电力系统中的谐振电路还需要承受高电压、大电流的考验。作为构成电力系统谐振电路的基本元件如电阻、电感、电容等,要防止元件本身在高电压的作用下出现绝缘击穿;同时要防止大电流流过元件本身时造成的种种问题,比如电抗器绕组在大电流下的电动力及其造成的振动,振动可能产生可听噪声,还有大电流通过元件时产生的热效应将会使绝缘寿命缩短等。滤波器设计中要特别考虑各元件乃至系统耐受电压、电流的能力,以及有功损耗等方面的问题,并且兼顾无功补偿。滤波器各元件的额定值计算和校核这部分内容在 CIGRE 专题手册(见文献 [1, 2])中有专门章节加以介绍。

本书在介绍各种滤波器的参数设计之外,还介绍了谐波的概率叠加理论。

谐波的概率叠加,是滤波器功能设计及各元件额定值计算中需要考虑的内容。滤波器额定值计算如何恰到好处仍然是研究的课题之一。过高的额定值将导致投资过大,而过低的额定值将使运行中的滤波器元器件频繁损坏。本书中的概率叠加方法只是给出一种可能的额定值选择方式。

要使滤波器实现理想的设计目标,现场调谐是不可缺少的环节。本书第四章中介绍了滤波器的调谐方法及其注意事项。至于滤波器是否达到设计目标,现场是否出现与系统之间的并联谐振,则需要通过实际监测现场谐波来进行判断。谐波测量方法和监测设备日臻成熟,IEC61000 电磁兼容系列标准中就谐波测量仪器、方法等做了规范,但是具体测量点的选择和测量结果的分析,则需要工程技术方面的经验。

中低压系统普遍安装的无功补偿电容器组,就其电路结构而言即为单调谐的串联谐振电路。实际工程中经常遇到的问题是无功补偿电容器组与系统之间出现低次谐波的并联谐振,并导致电容器组损坏。针对这一问题,在第四章中专门介绍了这方面的理论和解决方案。

为了环境和谐,各种事物之间要求进行协调配合,并争取用较少的代价取得较大的效益。无源电力滤波器的设计必须做到与接入的系统协调配合,要特别注意滤波器与系统之间是否存在可能的并联谐振。为此,进行滤波器设计时需要考察系统的结构以及未来的规划,并计算系统在各种运行方式下的谐波阻抗。本书

第五章中关于系统谐波阻抗的计算和测量,其主要目的是通过研究系统谐波阻抗,防止滤波器与系统之间出现并联谐振。滤波器与系统一旦在某频率点出现并联谐振,将对系统和滤波器本身造成极大的危害,并导致滤波器设备损坏。其中的电容器组是电压敏感型设备,最容易在过电压状态下击穿。

如同电力系统的其他元件一样,滤波器组需要设置成套的保护装置。其中的电容器单元是电压敏感型设备,极易由于过电压导致绝缘介质击穿,因此电容器组不平衡保护是重点。鉴于现场运行中电容器组不平衡保护问题较多,本书第六章侧重介绍滤波电容器组不平衡保护研究最新成果,另结合C型滤波器保护的实例,介绍低压元件保护设置的思路及解决误动的方法。

本书第七章则以两个案例的方式,介绍滤波器与系统之间谐振问题及其严重程度,以及如何避免谐振的方法。

第三节 谐振及其基本特征

谐振,又称“共鸣”,是两个不同物质(或系统)内在固有形态(谐振频率)达到高度统一的结果,以至于两者之间互相激励,正反馈至极致状态。

任何谐振需要两个基本条件:①系统的固有频率;②激励源。只有当激励源以系统的固有频率施加在系统上面时,系统谐振的现象才会出现,两者缺一不可。

谐振的基本特征是:一个小的激励源,可以使系统在谐振频率下的振荡幅度比激励源的振幅大许多倍。

抑制谐振的技术措施也是从两方面入手:①在源头上下功夫,消除引起谐振的激励源;②在系统本身下功夫,比如改变系统的谐振频率,或者施加阻尼,将谐振的幅值限制在一定的范围之内。无源滤波器技术就是利用滤波器的谐振电路,使谐波在源头就被旁路掉。

在利用谐振方面,则是将系统的谐振频率设计成所需的频率,然后在激励源的作用下使系统起振并维持振荡。电力系统载波通信就是利用了这种原理。

设有电感 L 和电容 C 两个线性元件,电感元件的感抗为

$$Z_L(f) = j\omega L = j2\pi fL \quad (1-1)$$

电容元件的容抗为

$$Z_C(f) = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{1}{j2\pi fC} \quad (1-2)$$

式中 L ——电感元件的电感量, H;

C ——电容元件的电容量, F;

f ——谐波频率, Hz;

$\omega = 2\pi f$ ——谐波角频率;

$Z_L(f)$ ——电感元件在频率为 f 时的阻抗值, Ω ;

$Z_C(f)$ ——电容元件在频率为 f 时的阻抗值, Ω 。

上述的电感元件和电容元件既可以组成串联谐振电路, 也可以组成并联谐振电路。

由电感 L 和电容 C 串联组成的典型的串联谐振电路见图 1-1, 其串联电路的阻抗 Z_s 随频率 f 变化

$$Z_s(f) = Z_L(f) + Z_C(f) = j2\pi fL + \frac{1}{j2\pi fC} \quad (1-3)$$

当串联阻抗 $Z_s(f) = 0$ 时的频率即为串联谐振频率 f_s

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1-4)$$

该串联谐振电路的阻抗频率特性曲线见图 1-2。

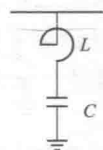


图 1-1 串联谐振电路

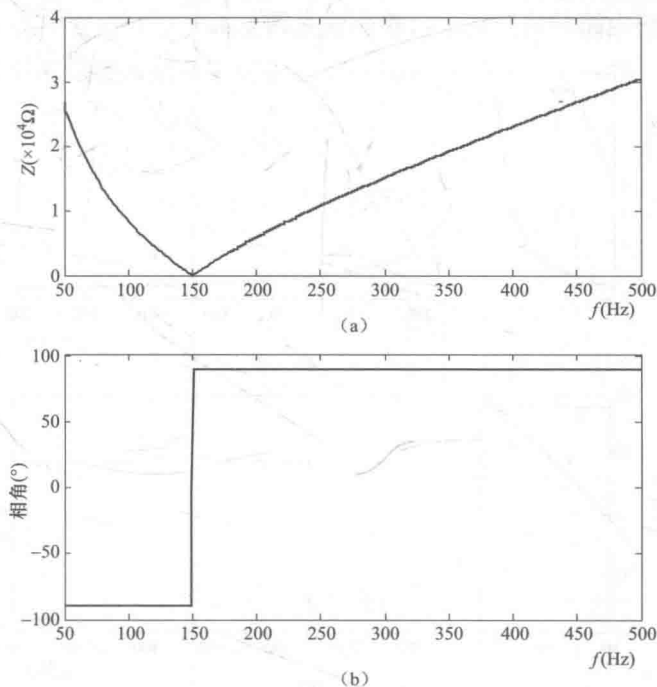


图 1-2 串联谐振电路的阻抗频率特性曲线

(a) 阻抗频率特性曲线; (b) 相位频率特性曲线

串联谐振电路的特点是：当在串联谐振电路两端施加频率为 f_s 的很小电压激励时，在串联谐振电路中即产生非常大的谐振电流。而流过电抗元件 L 和电容元件 C 的谐振电流将分别在各自元件两端产生高电压，甚至使元件两端的电压超出源头施加的电压幅值若干倍。

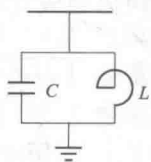


图 1-3 典型的并联谐振电路

由电感 L 和电容 C 并联组成的典型的并联谐振电路见图 1-3，其并联阻抗 Z_p 随频率 f 变化

$$Z_p(f) = \frac{Z_L(f) \cdot Z_C(f)}{Z_L(f) + Z_C(f)} = \frac{j2\pi fL}{1 - (2\pi f)^2 LC} \quad (1-5)$$

当式 (1-5) 的分母为 0 时的频率即为并联谐振频率 f_p

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1-6)$$

可见，用同样参数的电感元件 L 和电容元件 C 分别构建串联谐振电路和并联谐振电路，其谐振频率是相同的。

该并联谐振电路的阻抗频率特性曲线见图 1-4。

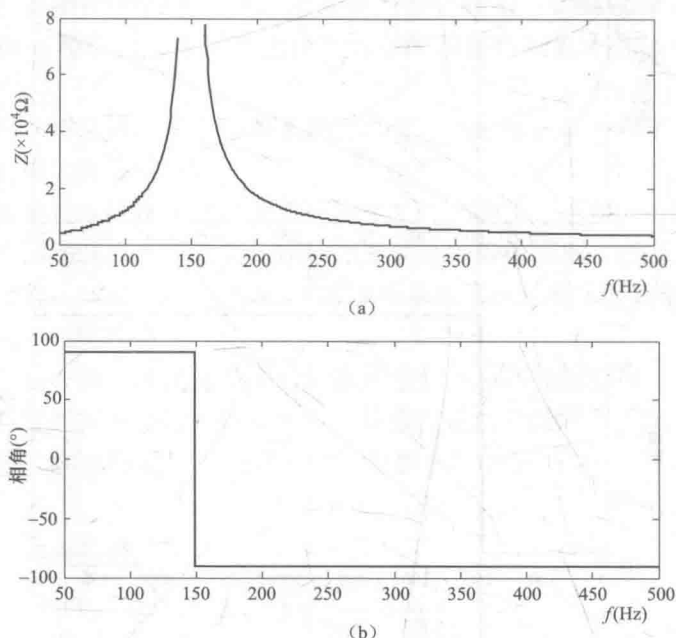


图 1-4 并联谐振电路的阻抗频率特性曲线

(a) 阻抗频率特性曲线；(b) 相位频率特性曲线

如果一个小的电流源注入并联谐振电路, 且其频率在并联谐振电路的谐振频率附近, 将在并联谐振电路上产生非常高的谐振电压。相应地, 在该并联谐振电压的作用下, 并联的电抗器 L 和电容器 C 支路将流过非常大的谐振电流, 该电流幅值甚至数倍于激励源的电流幅值。

因此串联谐振电路和并联谐振电路的共同特点是: 谐振频率下施加的谐波电压或者谐波电流即便是其幅值非常小, 都将在电感元件 L 和电容元件 C 两端产生非常大的谐波电压和谐波电流。如果电抗器或者电容器耐受此谐振电压和/或谐振电流的能力不够, 都将使电抗元件或者电容元件受损。轻者绝缘损坏, 重者则可能爆炸并起火燃烧。曾经出现太多这样的例子。

注意, 同样的电感元件和电容元件构成的串联谐振电路和并联谐振电路的相频特性正好相反。以谐振频率点为界, 串联谐振电路的相频特性是低频段为容性, 高频段为感性; 并联谐振电路的相频特性是低频段为感性, 高频段为容性。这样的特性将在后续的双调谐滤波器中加以利用。

无源电力滤波器设计的主要目标是: 利用串联谐振和并联谐振的原理, 使滤波器支路在电路上形成一个指定频率的低阻抗频带, 从而使指定次数的谐波电流被旁路掉; 同时注意避开某些频率点上滤波器与系统之间可能形成的并联谐振, 特别是要注意避开谐波源所具有谐波频率下并联谐振。

第二章

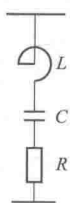
单调谐类型滤波器

第一节 单调谐滤波器

一、单调谐滤波器原理

单调谐无源滤波器电路见图 2-1。与第一章概述中串联谐振电路略有不同的是，单调谐滤波器电路中增加了串联电阻 R ，该串联电阻描述的是电抗器 L 和电容器 C 的内电阻之和；某些应用场合还特意额外串联了阻尼电阻。阻尼电阻的作用就是抑制滤波器与系统之间可能出现的并联谐振，保护系统及滤波设备不至于因为谐振过载而损坏。

变电站内常用的无功补偿电容器组也是单调谐滤波器的电路形式，补偿电容器和电抗器内部有内电阻。补偿电容器组设置串联电抗器的目的，一是限制电容器投入时的涌流，同时限制电容器短路故障时的短路电流。因此，35kV 及以下电压的并联补偿电容器组，其电抗器常常安装在高压侧。



单调谐滤波器（图 2-1）在谐波角频率 $\omega_h = h\omega_F$ 下的阻抗为

$$Z_f(h) = R_{fh} + j \left(h\omega_F L - \frac{1}{h\omega_F C} \right) \quad (2-1)$$

图 2-1 单调谐滤波器电路

式中 h ——谐波次数；

$Z_f(h)$ ——滤波器在 h 次谐波频率下的阻抗， Ω ；

R_{fh} ——滤波器在 h 次谐波频率下的等效串联电阻， Ω ；

L ——滤波电抗器的电感量，H；

C ——滤波电容器组的电容量，F；

ω_F ——系统工频角频率，rad/s。

滤波器的调谐及滤波频率为

$$\omega_H = h_H \omega_F = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2-2)$$

在滤波器调谐频率 ω_H 下, 有 $h_H \omega_F L = \frac{1}{h_H \omega_F C}$, 以及 $Z_f(h_H) = R_{fH}$ 。在此条件下, 滤波器的阻抗最小, 相应谐波源产生的 h_H 次谐波电流将主要通过滤波器的低抗分流, 使流入系统的谐波电流最小, 从而使母线上的 h_H 次谐波电压大为降低。

二、滤波器的失谐

电力系统并不是严格以恒定的标称频率运行, 系统运行中的实际频率会围绕标称频率在一定范围内波动。GB/T 15945《电能质量 电力系统频率偏差》规定: 电力系统正常频率偏差限值为 $\Delta f_F = \pm 0.2\text{Hz}$ 。当系统容量较小时, 频率偏差限值可以放宽到 $\Delta f_F = \pm 0.5\text{Hz}$ 。

若将系统实际工频频率相对于标称工频频率的误差计为

$$\delta_\omega = \frac{\omega - \omega_F}{\omega_F} = \frac{\Delta\omega}{\omega_F} \quad (2-3)$$

式中 ω ——系统实际工频角频率, rad/s;

ω_F ——系统标称工频角频率, rad/s;

δ_ω ——系统实际频率相对于标称工频频率的误差。

在实际工频角频率 ω 条件下, 滤波器在谐波次数为 h 时的阻抗为

$$\begin{aligned} Z_f(h) &= R_{fH} + j \left[h(1 + \delta_\omega) \omega_F L - \frac{1}{h(1 + \delta_\omega) \omega_F C} \right] \\ &= R_{fH} + j \left(1 + \delta_\omega - \frac{1 - \delta_\omega}{1 - \delta_\omega^2} \right) h \omega_F L \approx R_{fH} + j 2 \delta_\omega \cdot h \omega_F L \end{aligned} \quad (2-4)$$

在调谐谐波次数 h_H 时, 滤波电抗器的电抗值等于电容器的容抗值

$$X_H = h_H \omega_F L = \frac{1}{h_H \omega_F C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2-5)$$

式中 X_H ——滤波电抗器或者电容器在调谐谐波次数 h_H 时的电抗值, Ω 。

将单调谐滤波器在调谐点 h_H 次滤波频率下的感抗(或容抗) X_H 与电阻 R_{fH} 之比定义为滤波器的品质因数 q , 即

$$q = \frac{X_H}{R_{fH}} = \frac{h_H \omega_F L}{R_{fH}} = \frac{1}{R_{fH} \cdot h_H \omega_F C} \quad (2-6)$$

则滤波器在调谐点 h_H 次滤波频率下的阻抗为

$$Z_f(h_H) = R_{fH}(1 + j2\delta_\omega q) = X_H \left(\frac{1}{q} + j2\delta_\omega \right) \quad (2-7)$$

$$|Z_f(h_H)| = R_{fH} \sqrt{1 + 4\delta_\omega^2 q^2} = X_H \sqrt{q^{-2} + 4\delta_\omega^2} \quad (2-8)$$

由于滤波器元件的制造偏差，以及运行中滤波器所在的环境温度与设计参考温度的偏差，导致滤波器的实际电容量和电感量会偏离设计值。将电网频率 ω 、电感 L 、电容 C 的相对于各自标称值的偏差分别记做

$$\delta_\omega = \frac{\Delta\omega}{\omega_F} \quad (2-9)$$

$$\delta_L = \frac{\Delta L}{L} \quad (2-10)$$

$$\delta_C = \frac{\Delta C}{C} \quad (2-11)$$

式中 δ_ω ——系统频率相对偏差；
 δ_L ——滤波电抗器电感量的相对偏差；
 δ_C ——滤波电容器电容量的相对偏差。

在计及上述各项参数偏差的条件下，滤波器在 h_H 次滤波频率下的阻抗

$$\begin{aligned} Z_f(h_H) &= R_{fH} + j \left(h_H \omega L - \frac{1}{h_H \omega C} \right) \\ &= R_{fH} + j \left[h_H (\omega_F + \Delta\omega)(L + \Delta L) - \frac{1}{h_H (\omega_F + \Delta\omega)(C + \Delta C)} \right] \quad (2-12) \\ &= R_{fH} + j \left[(1 + \delta_\omega)(1 + \delta_L) - \frac{1}{(1 + \delta_\omega)(1 + \delta_C)} \right] h_H \omega_F L \\ &\approx R_{fH} + j(2\delta_\omega + \delta_L + \delta_C) h_H \omega_F L \end{aligned}$$

上式与(2-4)式相比较，得到滤波器的等效失谐度 δ_f 为

$$\delta_f = \delta_\omega + \frac{\delta_L}{2} + \frac{\delta_C}{2} \quad (2-13)$$

如果考虑小电网运行时允许的频率最大变化范围 $\pm 0.5\text{Hz}$ ，则 $\delta_\omega = \pm 1\%$ 。

由此可见，电容器组的电容量 C 或者电抗器的电感量 L 参数变化2%就相当于系统频率变化1%。在考虑大容量电力系统的频率偏差 δ_ω 基本为0的条件下，如果要求限制滤波器的等值频率失谐度在 $\delta_f = \pm 1\%$ 以内，则滤波器电感 L 、电容 C 的参数偏差之和必须保持在2%以内。实际的工程规范书中，一般要求电容器元件的电容量制造偏差不大于2%，同时要求电抗器的电感量连续可调，或者至少有