

交直流滤波器及并联电容器装置 运行及维护

吴鹏 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

交直流滤波器及并联电容器装置 运行及维护

吴鹏 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书结合当前国内交、直流滤波器及并联电容器装置运行的实际情况及存在的问题,总结了我国二十多年直流换流站中该类设备的运行、维护经验并适当提炼现阶段国内最新的设备运行、检修导则,介绍了交、直流滤波器及并联电容器装置概述,运行管理,运行操作,检修试验,不平衡保护跳闸处置,状态评价,状态检修,保护及交、直流滤波器及并联电容器过电压及控制方法9部分内容。

本书可供换流站、变电站从事运行、检修工作的生产一线人员及专业管理人员使用和参考,也可作为大专院校相关专业师生学习的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

交直流滤波器及并联电容器装置运行及维护/吴鹏编. —北京:中国电力出版社,2013.3

ISBN 978-7-5123-4090-9

I. ①交… II. ①吴… III. ①电力系统-滤波器-运行②电力系统-滤波器-维修③并联电容器-运行④并联电容器-维修
IV. ①TN713②TM531

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 031907 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 http://www.cepp.sgcc.com.cn)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013年4月第一版 2013年4月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 12.25印张 213千字

印数 0001—3000册 定价 35.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

当今世界，经济的发展助推了能源的发展，能源的发展又强力地推动了电力的发展，电力的发展促进了符合我国国情的具有长距离、高电压、大容量传输特性的直流输电工程的发展。

自 1989 年我国第一条超高压直流输电工程——葛洲坝—上海（南桥）直流输电工程建成投运以来，直流输电技术在中国稳步发展。21 世纪，随着我国“西电东送”大能源方针的推出以及三峡电力全面送出，跨区直流输电得到了大规模的发展。目前，我国直流输电无论在容量、技术水平方面，还是电压等级上都已位于世界前列。随着今后全国经济要求均衡发展的发展趋势，中、西部还必将有大批直流输电工程投运，这将使得直流输电在骨干电网中的作用越来越重要。

直流输电工程的重要性、特殊性及其技术的复杂性决定其设备运行、维护与交流工程设备有很大的不同，因此掌握直流输电各设备运行、维护技能对于直流换流站安全稳定运行至关重要。本书旨在全面阐述直流换流站的关键设备——交、直流滤波器及并联电容器装置的运行维护，以贴近实际为主。该类设备在直流换流站内使用量大，主要用于为换流器提供无功并消除交、直流侧谐波。一个换流站中，交流滤波器及并联电容器设备容量要占到直流输电系统容量的 50% 左右；其设备故障、事故可能会造成直流系统的降功率或闭锁，因此运行维护好该类设备，对于换流站来说至关重要。

本书结合当前国内交、直流滤波器及并联电容器装置运行的实际情况及存在的问题，同时特别总结了我国二十多年的大直流系统换流站内该类设备的运行及维护经验，全面、详细地对交、直流滤波器及并联电容器装置进行了介绍。全书共 9 章，包括：交、直流滤波器及并联电容器装置概述（分别介绍交流滤波器、直流滤波器、并联电容器装置组成、形式、结构、原理、配置、功能作用以及电容器设备的制作过程）；交、直流滤波器及并联电容器装置运行管理；交、直流滤波器及并联电容器的运行操作；交、直流滤波器及并联电容器装置检修试验；交、直流滤波器及并联电容器不平衡保护跳闸处置；交、直流滤波器及并联电容器装置状态评价；交、直流滤波器及并联电容器装置状态

检修；交、直流滤波器及并联电容器装置保护；交、直流滤波器及并联电容器过电压及抑制方法。

本书作者长期从事交、直流滤波器及并联电容器运行、维护及专业管理工作，感觉目前需要这样一本全面、系统介绍交、直流滤波器及并联电容器装置运行维护的专业书籍，以便一线生产人员更好、更系统地掌握交直流滤波器及并联电容器的相关专业知识和检修、运行业务技能，本书关于交、直流滤波器及并联电容器装置运行、维护、检修、试验方面的内容阐述，都是作者在日常工作及管理中深切、实际地体验，相信更有利于指导从事该方面工作的人员进行相关工作，并可在实际工作中去验证、体验。关于交直流滤波器及并联电容器装置状态检修、状态评价，本书列举实例来具体阐述状态评价的方法，该内容可作为相关单位指导状态检修工作时的参考资料。关于交、直流滤波器及并联电容器装置过电压及抑制方法章节中阐述了目前最前沿的一些抑制过电压方法：带选相合闸装置的断路器。同时，本书抽出专门的章节阐述电容器故障跳闸后的处置过程，相信这应该特别有利于指导现场运行、检修人员进行相关工作。在本书的附录中，特别增加了电容器不平衡电流理论计算及一些现场非常实用的技巧、方法。

在该书稿编写过程中，作者精心收集了大量该类型设备检修、运行过程中的图片，为本书内容阐述作了形象的补充，并查阅了国内近 10 年关于交、直流滤波器及并联电容器专业方面相关论文及书籍，对有些经典理论和学术观点进行提炼总结，将这些内容充分地展示给读者。同时该书又紧密结合电力行业及国家电网公司最新颁布高压直流输电交、直流滤波器及并联电容器装置相关技术规范，力求尽量做到与这些规程、标准、规范相一致，且兼具很强的现场实用性和操作性。该书既适用于从事直流换流站变电运行、变电检修的一线人员日常工作中参考以及专业管理人员阅读和使用，部分内容也可供从事交流变电站相关设备运行维护的生产人员及管理人员参考使用。

在本书稿完成出版之际，感谢作者的工作单位宁夏电力公司检修公司领导在本书编写过程中给予的支持和帮助。

由于作者自身水平有限，书中不当之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2012 年 10 月

目 录

前言

第一章 交、直流滤波器及并联电容器装置概述	1
第一节 装置的作用及谐波危害	1
第二节 滤波器的种类与配置原则	3
第三节 装置内设备介绍	13
第四节 换流站用电容器的类别和技术特点	27
第五节 电力电容器的制作过程	30
第二章 滤波器及并联电容器装置的运行管理	37
第一节 安装过程中的跟踪验收	37
第二节 装置的运维管理	49
第三节 装置的日常维护	51
第四节 装置运行中应急处置	53
第三章 交、直流滤波器及并联电容器的运行操作	58
第一节 交流滤波器及并联电容器运行操作	58
第二节 直流滤波器运行操作	61
第四章 交、直流滤波器及并联电容器装置检修试验	64
第一节 检修的总体要求及注意事项	64
第二节 滤波器及并联电容器的例行检修	67
第三节 滤波器及并联电容器的特殊性检修	73
第四节 滤波器及并联电容器装置故障原因分析	75
第五节 电容器寿命影响因素	87
第六节 交、直流滤波器及并联电容器装置试验	92
第五章 滤波器及并联电容器不平衡保护跳闸处置	100
第一节 跳闸后运行操作处置	100
第二节 跳闸后设备的检修处理	101

第六章 交、直流滤波器及并联电容器装置状态评价	114
第一节 滤波器及并联电容器装置评价基础	114
第二节 滤波器及并联电容器装置评价方法	116
第七章 交、直流滤波器及并联电容器装置状态检修	125
第一节 滤波器及并联电容器装置状态检修原则	125
第二节 滤波器及并联电容器装置状态检修分类及项目	126
第三节 滤波器及并联电容器装置状态检修策略	127
第八章 交、直流滤波器及并联电容器装置保护	130
第一节 滤波器及并联电容器故障及保护配置	130
第二节 直流滤波器装置保护	135
第三节 交流滤波器及并联电容器装置保护	139
第九章 滤波器及并联电容器过电压及抑制方法	151
第一节 滤波器及并联电容器过电压问题	151
第二节 滤波器及并联电容器合闸过电压问题	152
第三节 避雷器限制过电压与绝缘配合	153
第四节 选相合、分闸技术限制过电压及涌流	156
附录 A 设备连接螺栓拧紧力矩表	164
附录 B 电容器故障处理标准化作业指导书(示例)	165
附录 C 电容器不平衡电流计算的公式推导	175
附录 D Excel 表功能在不平衡电流理论计算的应用	177
附录 E 滤波器及并联电容器设备缺陷评价标准	184
参考文献	188

交、直流滤波器及并联电容器装置概述

第一节 装置的作用及谐波危害

通常直流输电换流站分为直流区域和交流区域。直流区域设备相比常规交流变电站设备存在本质区别,交流区域设备与常规的交流变电站相比并无本质区别,直流换流站交流部分包含常规变电站所有设备:主变压器、断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、母线等一次设备,以及交流保护设备、故障录波装置、通信自动化装置等二次设备。广义上讲,直流换流站交流部分近似地就是一个交流变电站。直流换流站交流部分与完全意义上的独立交流变电站最大的区别在于前者装设了大量的交、直流滤波器及并联电容器装置。

直流换流站换流器(核心换流设备)相对于交流侧而言,除了是负荷(在整流站)或电源(在逆变站)以外,还是一个谐波电流源。它畸变交流电流波形,向交流系统发出一系列高次谐波电流,同时也畸变了交流电压波形。为了减少流入交流系统的谐波电流,保证换流站交流母线电压的畸变率在允许的范围内,交流滤波器便应运而生。

另一方面,换流器相对于直流侧而言,除了是电源(在整流站)或负荷(在逆变站)以外,还是一个谐波电压源。它畸变直流电压波形,向直流侧发出一系列的谐波电压,在直流线路上产生谐波电流。为了保证直流线路上的谐波电流在允许的范围内,需在直流侧装设直流滤波器。当然特殊的直流换流站(如背靠背直流换流站)不安装直流滤波器。

直流滤波器是专门为降低流入直流线路和接地极引线中的谐波分量而装设的,一般装设于极母线和极中性线之间。作用主要有:①减少直流侧谐波分

量,使直流电流波形平滑。②小电流时保持电流连续。③滤除直流侧高次谐波。

除了以上所讲的滤除交、直流侧的谐波电流外,直流换流站换流器在进行换流时需消耗大量的无功功率(占直流输送功率的40%~60%),交流滤波器及并联电容器还共同组成了直流换流站的无功补偿设备,这也是交流滤波器及并联电容器在直流换流站首要的功能。

换流器在交流和直流两侧均会产生谐波电压和谐波电流,这些谐波既有特征谐波也有非特征谐波,如果进入交流电网和直流线路的谐波分量过大,将对电力系统设备及通信产生危害,主要分为两类:

(1)第一类危害。在电气设备的基波电压上叠加谐波电压,引起电气应力的增加,这种危害对电力电容器最为显著;谐波通过电气设备引起附加发热,这种危害对变压器和发电机类设备最为显著;在一些情况下,可能产生谐波谐振过电压,造成某些设备损坏或异常发热;谐波的存在还可能引起控制保护设备工作不稳定或误动作。

谐波使得旋转电机和电容器产生附加损耗并发热,具体表现在,同步电机中谐波电流引起的谐波磁动势会在转子表面产生涡流损耗,引起电机发热。叠加在基波电流中的高次谐波除了会引起发电机局部发热外,还会使发电机产生振动。在感应电机中,较大谐波电流的谐波磁场还会产生一定的寄生转矩,使电机不能启动或达不到正常转速。电容器由于谐波所增加的损耗为

$$\sum_{n=2}^{\infty} C(\tan\delta)\omega_n U_n^2 \times 10^{-3} \quad (1-1)$$

式中 C ——电容, μF ;

$\tan\delta$ ——介质损耗系数,一般假定对各次谐波电压是相同的;

ω_n —— n 次谐波的角频率, rad/s ;

U_n —— n 次谐波电压的有效值, kV 。

为了不使换流站内运行的电容器因谐波附加损耗而引起过热问题的发生,电容器基波和谐波的总无功功率 $Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n$ 不应大于电容器的额定无功容量。另外,由于谐波电压可能使直流电压或交流电压的峰值增高或降低,因此将影响电容器介质所承受的应力。

直流系统的谐波,表现在凡是直流侧设备有谐波流过的,谐波电流都会在这些设备中造成附加发热,因而增加了设备的额定值要求和运行费用。

谐波谐振过电压主要表现在,当交流系统中一组大的并联电容器和系统中

其他部分之间,可能在某一谐波频率下产生谐振。例如当交流系统在连接电容器处的短路容量为 Q_s 、电容器的额定容量为 Q_c 时,则可能发生谐振的谐波频率次数为

$$n = (Q_s/Q_c)^{1/2} \quad (1-2)$$

当 $Q_c \approx 0.1Q_s$ 时,则可能发生接近 3 次谐波的谐振。谐振可使电容器上出现过电压,造成电容器发热,也会使换流器的定电流调节器工作不稳定。

(2) 第二类危害。通过电力线路的谐波电流将通过感应作用在邻近的电话线上产生谐波电动势,对通信系统产生干扰(通常音频通道的工作频率范围为 200~3500Hz,而直流输电系统中的许多谐波就在这个频率范围内)。流过电力线路的大谐波电流可能在邻近的弱信号线路上产生感应电动势,从而造成人员伤亡或设备损坏。因此,在交流侧和直流侧都需装设滤波器装置。

第二节 滤波器的种类与配置原则

交、直流滤波器在换流站的配置主要依据换流站交、直流侧的谐波成分和无功需求,并联电容器配置依据换流站交流侧的无功需求。换流器工作过程中,会消耗大量的无功功率,并在交、直流侧产生大量的谐波,对运行的电气设备产生危害和通信干扰等不利因素。为了保持系统无功平衡并消除谐波,换流站需加装交、直流滤波器。直流滤波器仅用于滤波;交流滤波器在满足滤波要求后,还能提供换流器所需的容性无功。当由交流滤波器提供的无功不足以满足换流器容性无功的要求时,其余的容性无功需求由并联电容器装置补充提供。

一、换流站的谐波成分

1. 概述

换流阀按照一定的导通顺序循环导通连接换流电路的交流端和直流端,换流器无论是整流方式还是逆变方式运行时,都会从交流系统中吸收容性的无功功率,并在交、直流侧产生谐波电压和电流,导致交流侧电压和电流的工频正弦波畸变,同时直流侧电压和电流也不是平滑的,而带有纹波。谐波次数就是谐波的频率与交流电网基波频率的比值。理想条件下,由换流产生的谐波称为特征谐波,换流器产生的谐波都与基本的脉动单元 6 脉动换流单元有关。

下面先从 6 脉动换流器原理进行说明,6 脉动换流单元原理接线图如图 1-1 所示。6 脉动换流单元由换流变压器、6 脉动换流器以及相应的交流滤波器、直流滤波器和控制保护设备组成。

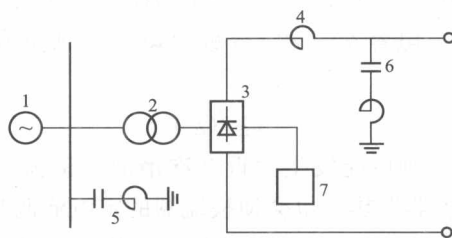


图 1-1 6 脉动换流单元原理接线图

1—交流系统；2—换流变压器；3—6 脉动换流器；4—平波电抗器；
5—交流滤波器；6—直流滤波器；7—保护装置

6 脉动换流器在交流侧和直流侧分别产生 $6K \pm 1$ 和 $6K$ 次的特征谐波 (K 为正整数)。因此，在交流侧需配置 $6K \pm 1$ 次的交流滤波器，在直流侧对于架空线路来说通常需要配置 $6K$ 次的直流滤波器。6 脉动是基本的也是能构成换流器的最小单元，通常大多数的直流系统采用 12 脉动，即两个基本的 6 脉动换流单元在直流侧串联连接而成，如图 1-2 原理接线图所示。

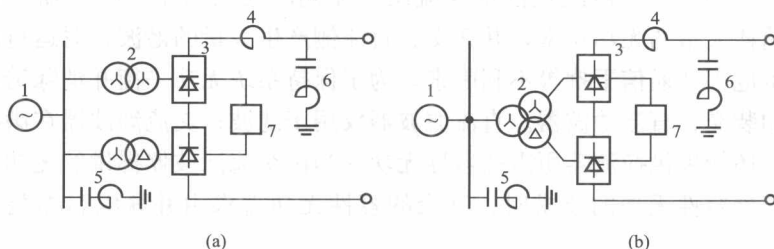


图 1-2 12 脉动换流单元原理接线图

(a) 单相双绕组换流变压器；(b) 单相三绕组换流变压器
1—交流系统；2—换流变压器；3—12 脉动换流器；
4—平波电抗器；5—交流滤波器；6—直流滤波器；
7—控制保护装置

12 脉动换流单元由两个交流侧电压相位差 30° 的 6 脉动换流单元在交流侧并联（在直流侧串联）组成。12 脉动换流器在交流侧和直流侧分别产生 $12K \pm 1$ 和 $12K$ 次的特征谐波。因此，在交流侧和直流侧只需分别配置 $12K \pm 1$ 和 $12K$ 的滤波器，从而简化滤波器装置，缩小占地面积，降低换流站造价。这是选择 12 脉动换流单元作为基本换流单元的主要原因。由此可知，特征谐波次数与脉动数的关系，如表 1-1 所示。

表 1-1

特征谐波次数与脉动数的关系

脉动数	特征谐波次数 (次)	
	直流侧	交流侧
p	Kp	$Kp \pm 1$
6	6、12、18、24...	5、7、11、13、17、19、23、25...
12	12、24、36、48...	11、13、23、25、35、37、47、49...

在直流系统实际运行中,运行工况不可能是理想的,换流器运行过程中各种参数和控制的不对称以及系统内变压器饱和等因素都会产生非特征谐波。非特征谐波就是除特征谐波外的所有其他各次谐波。如很多换流站在交流侧装设的 HP3 滤波器,用于滤除 3 次非特征谐波,某些换流站直流侧装设的 6/42 次双调谐滤波器等,用于滤除直流侧非特征谐波。

减少换流器换相过程中产生谐波的方法有增加换流器脉动数和装设滤波器 2 种。换流器脉动数越大,特征谐波电流次数越高,谐波电流有效值越小。一般情况下, n 次交流谐波电流有效值等于基波电流有效值的 $1/n$ 。但是当换流单元达到 12 脉动以上时,就会使得换流变压器的结构复杂、制造困难、经济性差,故 12 脉动是最佳的方案。当 12 脉动换流器确定后,为消除 12 脉动产生的特征与非特征谐波,便要依靠装设滤波器的方法来限制谐波。

2. 交流侧特征谐波

(1) 换流变压器交流侧特征谐波。在不计换流器的换相角 μ 时,换流变压器阀侧(即换流装置交流侧)线电流的波形为一系列等时间间隔,并轮流出现正值和负值的矩形脉冲波。

换流变压器阀侧线电流的表达式为

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\cos\omega t - \cos 5\omega t/5 + \cos 7\omega t/7 - \cos 11\omega t/11 + \cos 13\omega t/13 - \cos 17\omega t/17 + \cos 19\omega t/19 - \dots) \quad (1-3)$$

由式 (1-1) 可知,在 $\mu=0$ 时,三相 6 脉动换流变压器阀侧线电流中除了基波电流外,只含有 $Kp \pm 1$ 次谐波,而基波电流幅值为 $\frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d$,基波电流的有效值为幅值除以 $\sqrt{2}$,大小为 $\frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$, n 次谐波电流的有效值为基波电流有效值的 $1/n$ 。

(2) 换流变压器交流侧线电流。当换流变压器接线方式为 Yy 或 Dd 接线,变比为 1:1 时,交流侧线电流与阀侧电流大小一致,展开的傅里叶级数相同;

当换流变压器接成 Yd, 变比为 $1:\sqrt{3}$ 时, 交流侧电流的傅里叶级数表达式为

$$i_a = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\cos\omega t + \cos 5\omega t/5 - \cos 7\omega t/7 - \cos 11\omega t/11 + \cos 13\omega t/13 + \cos 17\omega t/17 - \cos 19\omega t/19 - \cos 23\omega t/23 \cdots) \quad (1-4)$$

(3) 12 脉动换流变压器交流侧电流。双桥 12 脉动换流单元由 2 组 6 脉动换流单元组成, 可设置 1 台单相三绕组换流变压器, 也可设置 2 台单相双绕组换流变压器。绕组接线分别为 Yy 和 Yd, 变比为 $1:1$ 和 $1:\sqrt{3}$ 时, 双桥 12 脉动交流侧总电流表达式为

$$i_{a12} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d (\cos\omega t - \cos 11\omega t/11 + \cos 13\omega t/13 - \cos 23\omega t/23 + \cos 25\omega t/25 - \cdots) \quad (1-5)$$

换相角 μ 和延时角 α 对谐振电流的影响主要有:

- 1) 换相角 μ 增大, 谐振电流下降, 谐波次数越高, 谐波电流下降的越快。
 - 2) 在一定范围内, 谐振电流下降的速度也随 μ 角的增大而加快。
 - 3) 每次谐波电流在 $\mu = 360^\circ/n$ 附近时, 谐波电流 I_n 下降到最小值, 然后再略有增大。
 - 4) 如果 μ 为定值, 各次谐波电流随不同的 α 角值的变化是微小的。
 - 5) 在任何情况下, 谐波电流的有效值不会超过 $0.78I_d/n$ 。
3. 直流侧特征谐波

直流侧特征谐波计算通常是根椐直流电压曲线, 利用傅里叶级数进行展开, 求出各次谐波的直流分量与正、余弦分量, 从而求得各次谐波电流; 再根椐各次谐波所对应的等值电路, 由谐波电压和阻抗求得谐波电流大小。

(1) 换流器直流侧谐波电压表达式为

$$\left. \begin{aligned} U_{d(n)} &= U_d(a, 0) + \sum U_{d(n)}(a, 0) = U_d(a, 0) + \sum [A_{(n)}(a, 0) \cos n\theta + B_{(n)}(a, 0) \sin n\theta] \\ A_{(n)}(a, 0) &= U_{d0} \left[\frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \right] \\ B_{(n)}(a, 0) &= U_{d0} \left[\frac{\cos(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} \right] \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

式中: $U_d(a, 0)$ 为谐波电压的直流分量; $U_{d(n)}(a, 0)$ 为 n 次谐波电压; α 为延迟角; U_{d0} 为 $\alpha=0$ 时的空载直流电压。

(2) 直流侧的谐波电流表达式为

$$I_{d(n)} = \frac{U_{d(n)}}{Z_{(n)}} = \frac{U_{d(n)}}{\sqrt{R^2 + [n\omega(L_d + L)]^2}} \quad (1-7)$$

式中： $Z_{(n)}$ 为换流器的负荷阻抗； R 为换流器的负荷电阻； L_d 为平波电抗器的电感； L 为换流器的内电感。

4. 换流站非特征谐波

直流输电系统的运行工况在实际中不可能是理想化的，这些不理想的因素导致在系统内产生非特征谐波。

(1) 换流站交流侧产生非特征谐波的原因。直流电流中存在纹波电流；交流电压中存在纹波电压；交流基波电压不一定严格对称，即存在负序电压；换流变压器阻抗存在相间差异；Yy组6脉动换流器和Yd组6脉动换流器触发角可能存在差异；换流变压器变比不同造成Yy组换流器和Yd组换流器换相电压不同；触发脉冲很难做到完全等距。

(2) 换流站直流侧非特征谐波产生的原因。交流电压中存在谐波；Yy组换流器和Yd组换流器漏抗和变比都不相等；构成一个换流站两极换流器的任何运行参数不相等；换流变压器三相漏抗不平衡。

5. 换流站交流侧其他谐波源

对于换流站交流滤波器而言，在换流站除有换流器产生的特征谐波以及换流站设备参数及运行参数不同产生的非特征谐波外，还有交流系统的背景谐波和换流变压器或其他变压器饱和产生的谐波。

(1) 背景谐波。自有了交流电力系统网络，以及各种用户终端（如牵引站、电气化铁路负荷、各类工业电机负荷、小型化的整流负荷终端等），背景谐波便由这些负荷带入交流网络。另一个产生背景谐波的重要因素是交流系统变压器饱和引起的低次谐波，这个需要通过合理选择变压器额定分接头位置和优化调度交流系统运行电压水平来解决。系统背景谐波对电网危害巨大，特别是对装设了大量交流滤波器的换流站尤其明显，主要是电力系统这些背景谐波具有向附近换流站流动的趋势，交流滤波器装置会像磁铁一样吸收这些谐波，因此合理地确定这些背景谐波对于滤波器是否能经济运行影响很大。

(2) 变压器饱和产生的谐波。这里所指的变压器，既包含普通的电力变压器，又包括直流换流站用的换流变压器。换流变压器和普通电力变压器饱和会产生谐波，这类谐波也属于背景谐波范畴。在换流站内引起换流变压器饱和有3种情况：①变压器投入和短路故障切除后的电压恢复过程中，换流变压器产生的暂态饱和，对滤波器产生暂态应力，这种应力对滤波器的元件额定值一般不起作用，因此在滤波器设计中通常不加考虑。②交流母线电压升高，对于设计合理的直流系统，换流变压器抽头总是随着交流电压升高而上调，不会产生

明显的饱和现象。③换流变压器中存在的直流分量，可能长期运行在过饱和状态，由此产生的谐波电流可能要交流滤波器长期负担。

二、滤波器的种类

交、直流滤波器有常规无源交、直流滤波器和有源交、直流滤波器。对于交流滤波器除以上两种外，还有连续可调的交流滤波器。也就是说，交流滤波器有 3 种：无源、有源、连续可调；直流滤波器有 2 种：无源、有源。

无源滤波器由电阻、电容和电感构成，在 1 个或 2 个谐波频率的指定范围内或高通频带下呈低阻抗，使换流器产生的谐波电流绝大部分流入滤波器，从而减少注入交流系统的谐波，达到降低谐波含量的要求。直流换流站广泛使用的交流滤波器有单调谐滤波器、双调谐滤波器和两阶高通滤波器 3 种，目前新建直流换流站趋向于采用双调谐带高通的滤波器和多调谐高通滤波器。

有源滤波器有通过磁通补偿、谐波注入以及直流纹波注入等多种型式，通过检测线路中的电流和电压，分析计算出相应的谐波电流，再产生与该谐波电流大小相同、方向相反的补偿电流，两者相互抵消以达到消除谐波的目的。它能动态地对谐波和无功功率进行控制，并且不会受频率影响，不易发生谐振，但它的主电路一般采用全控型的电力电子器件，而当前技术水平下的全控型器件的容量较小、工作频率不高，所以有源滤波器的补偿容量受到限制，属于有待进一步开发的实用技术。

连续可调交流滤波器是在无源滤波器的基础上，利用控制信号连续调节电抗器的电感量，使之始终处于理想的调谐状态的滤波器型式。目前，国内已运行的直流输电工程中，基本采用无源交、直流滤波器。无源滤波器在设计、制造、调试、安装及运行等方面技术已非常成熟。有源交、直流滤波器以及连续可调交流滤波器仅在个别直流输电工程中应用。本章节仅讲述无源交、直流滤波器。

1. 无源滤波器分类

直流输电系统中的无源滤波器就是指 LC 无源滤波器。LC 无源滤波器可以分为调谐滤波器和阻尼滤波器。换流站用调谐滤波器包括单调谐滤波器、双调谐滤波器、三调谐滤波器；阻尼滤波器包括一阶高通滤波器（不常用）、二阶高通滤波器（目前基本不用）、三阶高通滤波器、C 型阻尼滤波器（由三阶高通滤波器衍生而来）。确定滤波器阶数的最简单方法就是根据非线性元器件（电容、电感为非线性元器件）的个数来判断，由几个非线性元器件构成就是几阶滤波器。

2. 无源滤波器阻抗特性

单调谐滤波器是由电阻 R 、电感 L 和电容 C 等元器件串联组成的滤波电路，它在某一低次谐波（或低次谐波附近）频率下的阻抗最小，是一种并联滤波器。对低次的滤波频率就有 1 条滤波器支路，如图 1-3 所示，其中 f_r 为二阶电路发生谐振时的频率， $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。

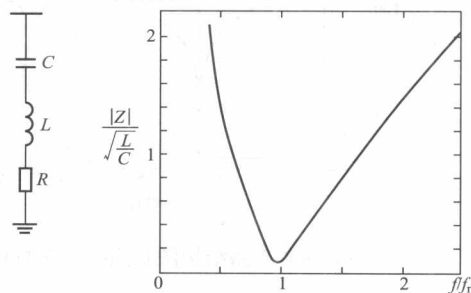


图 1-3 单调谐滤波支路结构图及阻抗频率特性

双调谐滤波器对两种低次频率同时具有很低的阻抗，即可同时吸收（滤除）两种特征谐波。它实际相当于两个单调谐滤波器，且具有 2 条 RLC 并联的支路，如图 1-4 所示。

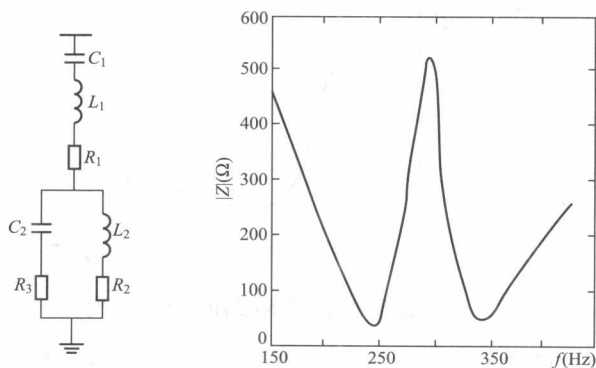


图 1-4 双调谐滤波支路结构图及阻抗频率特性

以上两种在直流换流站非常常用，如换流站 HP3、HP11/13、HP24/26 滤波器，都是典型的单、双调谐滤波器。

三调谐滤波器对 3 种低频率谐波同时具有很低的阻抗，即可同时吸收（滤

除) 3 种特征谐波。它实际相当于 3 个单调谐滤波器, 且具有 3 条 RLC 并联的支路, 如图 1-5 所示。三调谐滤波器在国内部分换流站也已应用, 但不如单调谐和双调谐应用普遍。

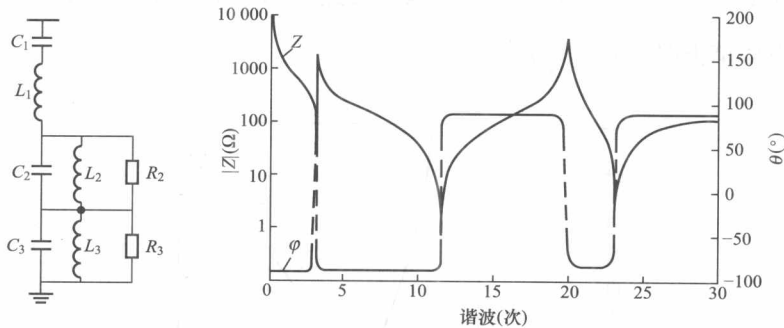


图 1-5 三调谐滤波支路结构图及阻抗频率特性

阻尼滤波器是将一个阻尼电阻与滤波电抗器并联来实现, 与单调谐滤波器相比, 在物理元件上多了一个并联电阻, 在功能上阻尼滤波器在谐振频率附近一个宽频带范围内, 滤波器阻抗都处于较低值, 因为其谐振频率是一个频率带, 故对失谐不敏感。在较高频率范围内, 滤波器阻抗接近由阻尼电阻所确定的极限值, 如图 1-6 所示。

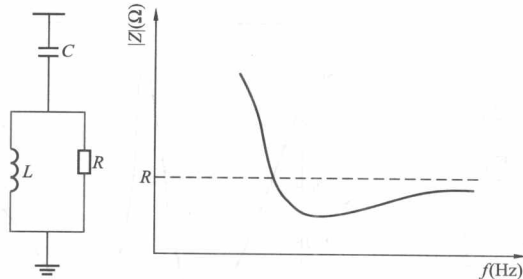


图 1-6 高通滤波器支路及阻抗频率特性

阻尼滤波器可使滤波器支路得到简化, 其目的是当运行方式发生变化时, 所需滤波器容量不同时, 便于切换。由于高压直流系统的额定参数同系统短路水平具有相同的数量级, 因此增大了系统和滤波器电容之间发生低次谐波谐振的可能性。至于发生串联还是并联谐振, 取决于低次谐波源是在交流系统中还是在换流站内, 而采用阻尼型滤波器可以较好地解决该问题。

阻尼滤波器的优点: 滤波器的性能和承载负荷对于温度、系统频率偏移和