

PRINCIPLE AND APPLICATION OF
INDUCTIVE POWER FILTERING METHOD

电力感应滤波 原理与应用

李 勇 罗隆福 张志文 许加柱 曹一家 著



科学出版社

电力感应滤波原理与应用

Principle and Application of Inductive
Power Filtering Method

李 勇 罗隆福 张志文 许加柱 曹一家 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

电能质量问题广泛存在于工业定制电力系统、新能源发电系统、交直流输配电系统等领域。本书在无源滤波、有源滤波等传统的电能质量解决方法基础之上,提出了一种电力感应滤波方法。本书介绍了电力滤波技术的现状与发展趋势;分析了电力感应滤波的工作原理、电磁特性以及滤波性能;重点研究了感应滤波在应用于直流输电系统时,对系统运行与控制方面的影响;探讨了基于感应滤波的新型换流变压器保护原理以及换流变压器绕组振动;详细介绍了感应滤波应用于柔性直流输电的可行性以及在实际工业直流系统中的工程应用。

本书可供电力系统、电力电子、电机与电器及相关领域的研究生、科研工作者和工程技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电力感应滤波原理与应用—Principle and Application of Inductive Power Filtering Method/李勇等著. —北京:科学出版社,2015.9
ISBN 978-7-03-045795-0

I. ①电… II. ①李… III. ①电力-谐波-滤波理论-研究 IV. ①TM713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 220589 号

责任编辑:耿建业 陈构洪 乔丽维 / 责任校对:桂伟利

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2015 年 9 月第一次印刷 印张:18 3/4

字数:362 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,化工、冶金、轨道交通、造纸等关乎国计民生的工业领域节能减排的指标越来越严格,这需要工业定制电力系统提供更为安全与高效的电力供应。此外,风能、太阳能等新能源在电力系统中得到了一定程度的应用,由于传统化石能源的短缺以及核能使用过程中暴露出来的安全问题,新能源发电将会在电力系统中得到进一步的普及。鉴于电力与能源系统呈现出的上述发展趋势,电力电子技术在电力系统中将得到日益广泛的应用。但是,电力电子变换装置固有的非线性特性会给电力系统带来谐波污染、功率因数低、三相不平衡、电压品质低等电能质量问题。

在解决电力系统电能质量问题方面,常见的有无源滤波和有源滤波两种方法。作者在此基础上充分发掘变压器这一电力系统中普遍应用的电气设备所具有的谐波条件下电磁感应潜能,提出了一种电力感应滤波方法,能够在靠近谐波产生源处实施谐波抑制与无功功率补偿,在确保公共电网电能质量的同时,有效解决非线性负荷及其供电系统存在的电能质量问题。本书是作者在电力感应滤波领域研究成果的系统性总结,以期读者能够比较深入与系统地了解感应滤波的工作原理以及应用于输配电系统所表征出来的运行特性与技术特征。

全书共 13 章。第 1 章主要介绍电力滤波技术的现状、电力感应滤波的提出背景与意义、直流输电系统的现状与发展趋势。第 2 章详细介绍电力感应滤波的工作原理与实现条件、感应滤波装置的场路耦合模型以及感应滤波的电磁特性。第 3 章重点论述非理想参数对感应滤波性能的影响。第 4、5 章主要研究感应滤波对直流输电谐波传递特性的影响以及感应滤波抑制直流输电谐波不稳定的机理。第 6、7 章主要研究基于感应滤波的新型直流输电无功功率特性以及逆变状态下感应滤波对直流输电换流器运行特性的影响。第 8 章主要介绍采用感应滤波的新型换流变压器保护原理。第 9 章研究谐波条件下感应滤波对换流变压器绕组振动的影响。第 10 章主要探讨感应滤波应用于由电压源型换流器构建的轻型直流输电的技术可行性。第 11~13 章详细介绍感应滤波方法在牵引供电系统和工业直流供电系统中的实际应用情况。

本书得到了国家自然科学基金重点项目(61233008)、国家自然科学基金项目(51377001、51477046)、国家国际科技合作专项(2015DFR70850)、国家科技支撑计划项目(2013BAA01B01)、湖南省自然科学基金重点项目(12JJ2034、12JJ2030)、国家电网公司重大科技项目(5216A014007V)、国家青年千人计划项目等的资助,在此一并表示衷心的感谢。此外,本书还得到国内外同仁的大力支持。作者要特别感谢湖南

大学的刘福生教授、德国多特蒙德工业大学(TU Dortmund University)的 Christian Rehtanz 教授、澳大利亚昆士兰大学(The University of Queensland)的 Tapan K. Saha 教授、中南大学的刘芳副教授、华侨大学的邵鹏飞博士与尚荣艳博士、株洲电力机车研究所的刘文业博士给予的大力支持。湖南大学的姚芳虹硕士、彭衍建博士为本书的出版做了大量工作,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不足或有待改进之处,敬请读者批评指正。

作 者

2015 年 5 月于湖南大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力滤波技术的现状与发展	1
1.1.1 无源电力滤波技术	1
1.1.2 有源电力滤波技术	4
1.1.3 混合型电力滤波技术	6
1.1.4 多重化谐波消除技术	7
1.2 感应滤波技术的提出及其发展现状与应用前景	7
1.2.1 多功能阻抗匹配平衡牵引变压器	8
1.2.2 谐波屏蔽单相牵引变压器	9
1.2.3 新型换流变压器及其感应滤波系统	10
1.2.4 感应滤波的实用意义	10
1.3 直流输电系统及其换流技术的现状与发展	11
1.3.1 直流系统的分类与应用范围	11
1.3.2 直流输电技术及其在我国的应用	12
1.3.3 直流输电系统在工程应用中存在的问题	13
1.4 本书的主要内容	18
第 2 章 电力感应滤波的工作机理与电磁特性	22
2.1 感应滤波的机理分析及实现条件	22
2.1.1 机理分析	22
2.1.2 实现条件	25
2.2 感应滤波装置的接线方案	25
2.2.1 新型换流变压器接线方案	25
2.2.2 感应滤波调谐装置接线方案	27
2.3 感应滤波的场路耦合电磁分析法	30
2.3.1 基本原理	30
2.3.2 主要计算量	32
2.4 感应滤波装置的场路耦合模型	33
2.4.1 感应滤波换流变压器的绕组布置	33
2.4.2 感应滤波全调谐装置的参数配置	35

2.4.3 场路耦合模型	38
2.5 感应滤波装置电磁特性分析	40
2.5.1 电场特性	40
2.5.2 磁场特性	42
2.5.3 励磁特性	43
2.5.4 试验研究	44
2.6 本章小结	46
第3章 非理想参数下感应滤波性能的灵敏度分析	48
3.1 感应滤波换流变压器的一般结构型式	48
3.1.1 传统换流变压器的结构型式	48
3.1.2 感应滤波换流变压器的结构型式及技术特点	49
3.1.3 结构型式与技术特点对比分析	50
3.2 考虑换流变压器电磁约束关系的谐波模型及其解耦电路	50
3.2.1 传统换流变压器及其网侧无源滤波器	50
3.2.2 含独立滤波绕组的感应滤波换流变压器	52
3.2.3 含自耦滤波绕组的感应滤波换流变压器	55
3.3 关键参数摄动的灵敏度函数分析法	58
3.3.1 摄动作用与灵敏度的关联性	58
3.3.2 灵敏度函数的定义	59
3.3.3 动模试验系统关键参数	60
3.4 谐波源扰动对感应滤波性能的影响	61
3.4.1 负载侧谐波电流源扰动	61
3.4.2 电网侧谐波电压源扰动	62
3.5 电网参数波动对感应滤波性能的影响	63
3.5.1 电网阻抗波动	63
3.5.2 电网频率波动	65
3.6 调谐装置参数摄动对感应滤波性能的影响	68
3.7 换流变压器阻抗参数摄动对感应滤波性能的影响	71
3.7.1 网侧绕组阻抗摄动	71
3.7.2 滤波绕组阻抗摄动	73
3.8 本章小结	75
第4章 感应滤波对直流输电谐波传递特性的影响	77
4.1 采用感应滤波的新型直流输电系统	78
4.1.1 主电路拓扑	78
4.1.2 等值电路模型	78

4.2	上桥新型换流变压器及其感应滤波系统谐波传递数学模型	80
4.2.1	等值电路模型	80
4.2.2	基本数学模型	80
4.2.3	谐波传递数学模型	82
4.2.4	模型正确性分析	84
4.3	下桥新型换流变压器及其感应滤波系统谐波传递数学模型	87
4.3.1	等值电路模型	87
4.3.2	基本数学模型	87
4.3.3	谐波传递数学模型	89
4.3.4	模型正确性分析	91
4.4	换流器谐波特性	94
4.4.1	未计及换相过程	94
4.4.2	计及换相过程	95
4.4.3	解析模型正确性验证	97
4.5	理论解析与系统仿真计算	99
4.5.1	未实施感应滤波	99
4.5.2	实施感应滤波	101
4.6	试验验证	103
4.7	本章小结	106
第5章	感应滤波抑制直流输电谐波不稳定的机理研究	108
5.1	直流输电谐波不稳定	108
5.1.1	产生机理	108
5.1.2	直流偏磁工作原理	110
5.1.3	抑制措施	111
5.2	采用感应滤波的新型换流器阻抗网络	112
5.3	CIGRE 直流输电标准模型及其等值转换新模型	113
5.3.1	整流侧等值转换模型	113
5.3.2	逆变侧等值转换模型	115
5.4	感应滤波对换流器阻抗特性的影响	117
5.4.1	换流器直流侧阻抗特性	117
5.4.2	换流器交流侧阻抗特性	118
5.5	感应滤波对并联谐振电流的双向抑制	121
5.5.1	机理分析	121
5.5.2	仿真验证	123
5.6	本章小结	126

第 6 章 基于感应滤波的新型直流输电无功功率特性	128
6.1 阀侧绕组无功补偿特性	129
6.2 计及无功补偿度的等值阻抗求解	132
6.2.1 数学模型	132
6.2.2 三类阻抗的定义	135
6.2.3 等值换相电抗的定义	139
6.3 感应滤波对等值换相电抗的影响	141
6.3.1 感应滤波全调谐装置投切的影响	141
6.3.2 感应滤波无功补偿度的影响	141
6.4 感应滤波对换流器无功功率特性的影响	143
6.4.1 整流器定最小触发角控制	143
6.4.2 整流器定直流电流控制	144
6.4.3 逆变器定最小关断角控制	145
6.4.4 逆变器定直流电压控制	146
6.5 动模试验	147
6.5.1 等值换相电抗测量	147
6.5.2 换流器功率因数测量	148
6.6 本章小结	150
第 7 章 逆变状态下感应滤波对换流器运行特性的影响	152
7.1 感应滤波对逆变器换相特性的影响	153
7.1.1 新型与传统逆变器正常运行时的换相特性	153
7.1.2 新型与传统逆变器故障运行时的换相特性	155
7.2 感应滤波对换流器稳态运行特性的影响	161
7.2.1 新型与传统整流器的稳态伏安特性	161
7.2.2 新型与传统逆变器的稳态伏安特性	165
7.3 感应滤波对换流器暂态响应特性的影响	168
7.3.1 整流侧交流系统故障时的暂态响应特性	168
7.3.2 逆变侧交流系统故障时的暂态响应特性	171
7.4 本章小结	175
第 8 章 感应滤波换流变压器的保护原理研究	176
8.1 基于相分量法的感应滤波换流变压器数学模型	176
8.1.1 基本数学模型	176
8.1.2 节点拓展模型	180
8.1.3 支路拓展模型	181
8.1.4 算例	182

8.2	基于模型的变压器保护基本原理	185
8.3	动作方程的推导及保护判据的整定	186
8.3.1	动作方程的推导	186
8.3.2	保护判据	188
8.4	仿真算例	188
8.4.1	空载合闸	188
8.4.2	内部故障	189
8.4.3	外部故障	191
8.5	本章小结	192
第9章	谐波条件下感应滤波换流变压器绕组振动研究	193
9.1	感应滤波换流变压器绕组电磁力的计算	193
9.1.1	计算方法的选择	193
9.1.2	绕组电磁力的计算	195
9.2	感应滤波换流变压器绕组振动的有限元计算	201
9.2.1	计算方法描述	201
9.2.2	绕组有限元建模	202
9.2.3	绕组振动有限元计算	203
9.2.4	有限元计算结果分析	208
9.3	本章小结	208
第10章	感应滤波应用于轻型直流输电的可行性研究	210
10.1	电压源型感应滤波换流器	210
10.2	可行性及技术特性分析	212
10.3	基于感应滤波的轻型直流输电测试系统	214
10.4	基于感应滤波的轻型直流输电运行特性	216
10.4.1	滤波特性	216
10.4.2	换流器 PQ 特性	221
10.4.3	双向潮流控制特性	223
10.4.4	电压稳定性	226
10.4.5	故障恢复特性	227
10.5	本章小结	231
第11章	感应滤波平衡变压器的工程应用研究	232
11.1	工程应用背景	232
11.2	样机及其配套滤波器设计和制造中的关键技术	232
11.2.1	多功能平衡变压器的设计与制造	232
11.2.2	可调电抗器的设计与制造	232

11.2.3 微机保护装置的开发与参数整定	233
11.3 试验方案	233
11.3.1 系统结构图	233
11.3.2 滤波器的构成	233
11.4 运行方式研究	235
11.4.1 两相系统运行方式研究	235
11.4.2 三相系统运行方式研究	238
11.4.3 两相系统和三相系统同时运行方式研究	240
11.4.4 运行效果分析	242
11.5 本章小结	244
第 12 章 感应滤波在工业直流系统中的工程实践研究	246
12.1 工程应用背景	246
12.1.1 原金属阳极直流供电系统	246
12.1.2 运行测试	248
12.2 基于感应滤波的新型工业直流系统	250
12.2.1 电气主接线与实物图	250
12.2.2 主要设计参数	252
12.3 运行测试与结果分析	253
12.4 本章小结	256
第 13 章 高效能感应滤波整流系统工程应用及能效分析	258
13.1 高效能 12 脉波整流系统工程应用典型案例	258
13.1.1 主电路拓扑结构与实物图	258
13.1.2 系统主要设计参数分析	264
13.2 高效能 12 脉波整流系统工程应用能效分析	266
13.2.1 系统测量接线及实施方案	266
13.2.2 系统电能质量谐波指标分析	269
13.2.3 系统电能质量功率因数指标分析	271
13.3 系统效率分析	274
13.3.1 系统总体效率指标分析	274
13.3.2 系统效率指标修正	278
13.3.3 系统额定工况下的机组效率	280
13.4 本章小结	281
参考文献	282

第 1 章 绪 论

清洁、高效、易使用的电能作为一种可交易的商品形式,是社会经济快速发展的重要物质保证^[1-3]。当今社会正进入信息时代,资源与环境协调发展已成为社会生活和经济发展的主旋律,在这种大环境下,如何发展现代电力工业,为现代社会经济发展提供优质、经济的电能,这既是时代赋予电力行业的一项重要任务,又是电力行业与时俱进需要解决的一项科学问题。

现代电力电子技术在电力行业中日益广泛地使用,为现代电力系统的发展注入了活力,但与此同时也对电能品质提出了挑战^[4-9]。电力电子设备固有的非线性特性或多或少均会对电力系统造成某种程度的污染,而这种污染对电力系统安全、稳定、高效、灵活的控制会带来一定的消极作用。直流输电技术是电力电子技术在电力系统中应用最早、也是最为成熟的一门技术^[7,10-15]。随着现代电力系统的发展和电气设备制造水平的提高,直流输电技术呈现出一些新的特征,并在配用电领域得到了一定程度的使用,但技术的应用随着电力行业的发展以及人们对环境与能源的重视而呈现出新的问题,面临着新的挑战。

本章将首先综述电力滤波技术的现状与发展,在此基础上,对感应滤波的由来及其发展现状与应用前景进行综述;然后综述直流输电技术的现状与发展,在此基础上,对感应滤波换流器的由来与技术特性以及借此构成的直流输电新模式与技术特性进行概述;最后阐述本书的研究目的、研究意义与主要的研究内容。

1.1 电力滤波技术的现状与发展

1.1.1 无源电力滤波技术

分流式滤波技术即无源电力滤波技术,它是目前在电力系统领域应用最早、也是最为广泛的谐波抑制技术^[16-18],其滤波原理是:通常由电容器、电抗器和电阻器构成在特定次谐波频率下呈低阻抗特性的无源电路网络,该无源网络对特定次频率的电流分量表现为对地短路,当其并联接入电网时(一般是在公共连接点(PCC)处接入),如果电力负荷中含有该特定次频率的谐波电流,则由于该无源电路网络对该谐波频率呈现出的对地短路特性,其被引流至该无源对地网络,从而起到抑制谐波电流的作用,使之不至于流入电网中造成谐波污染。

图 1.1 为无源电力滤波器目前常见的几种结构型式。其中,单调谐滤波器在

实际工程中,尤其是在化工、冶金、造纸等工业用户定制电力系统中的应用比较广泛,这主要是得益于其所具有的结构简单、设计方便、易于维护等特点,并且其对单一重要谐波的滤除能力比较强,通常情况下是将其与二阶高通滤波器搭配起来共同使用,用于抑制主要特征谐波以及其他更高次的谐波。单调谐滤波器的主要缺点是低负荷时的适应性差,抗失谐能力比较低,基波损耗比较大。

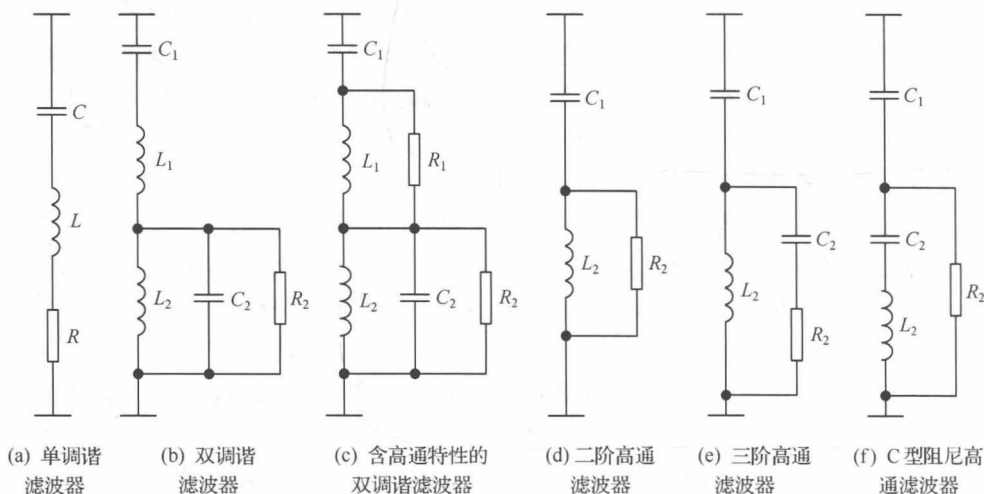


图 1.1 无源电力滤波器的常见结构型式

双调谐滤波器是目前直流输电交直流侧谐波抑制普遍选用的滤波器型式^[19-22],它可以用来同时滤除两个特征谐波,其中的串联支路主要承受电网基波电压,而并联支路主要承受谐波电压。相对于两个独立的单调谐滤波器,双调谐滤波器的基波损耗比较低,且只有串联支路这一个处于高电位的电容器组,可部分地降低滤波电容器的电压等级,节约器件的绝缘成本。

随着现代电气设备制造水平的进一步提高,一些结构更为复杂的无源电力滤波器在实际工程中得到了初步的应用。尤其是在近几年的直流输电工程中,出现了如图 1.2(b)所示的三调谐滤波器,用于 HVDC 系统直流侧高次谐波的抑制。例如,我国的贵—广第二回高压直流输电工程采用了用于抑制 12/24/36 次谐波的三调谐直流滤波器^[23],高一肇直流输电工程采用了用于抑制 3/24/36 次谐波的三调谐直流滤波器^[24]。由于多调谐滤波器的结构比较复杂,对特定次谐波的滤波性能受到多个元器件的综合影响,滤波性能受元器件参数摄动的灵敏度比较大,对失谐较为敏感^[19,25]。图 1.2(c)所示的含高通与低损耗特性的三调谐电力滤波器是国内学者提出的一种新型滤波器^[24],其本质是图 1.2(b)所示结构型式的改进型,充分利用了多调谐滤波器并联支路主要承受谐波电压的特点,将高通支路的基波损耗大为减少。

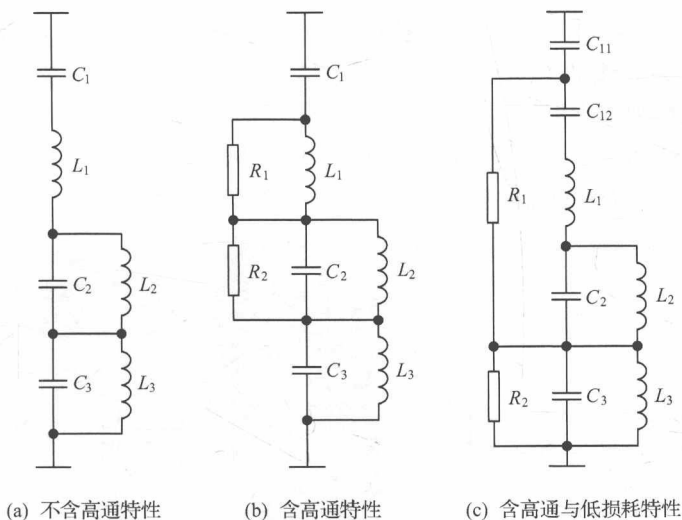


图 1.2 三调谐无源电力滤波器的结构型式

实际上,滤波装置的投入虽然能够较好地遏制谐波对电网的污染,提高电能的产品质量,但必然会带来一定的运行损耗,这对工业用户定制电力而言,尤为重要。因为电力用户从自身经济利益考虑,最为关心的还是工业供用电系统的实际运行效率。因此,目前的无源电力滤波器的工程优化设计,一般都会在保证滤波效果满足相关谐波限值标准^[16,17](《电能质量公用电网谐波标准》(GB/T 14549—93),IEEE、IEC 谐波限值标准等)的同时,综合考虑电力滤波器的设备选型、投资成本、运行损耗等因素。

分流式电力滤波技术虽然具有运行可靠性相对较高、技术比较成熟、投资成本相对较低等优点,但同时也存在如下缺点。

(1) 无源滤波网络由于其固有的阻抗频率特性,对低于该特定次数的其他次谐波而言具有一定的谐波放大作用。

(2) 滤波效果容易受系统阻抗变化的影响,当电力系统的阻抗网络(包括电网和负荷)发生改变时,可能会导致串/并联谐振的发生。

(3) 滤波装置一般是在电网公共连接点(PCC)处实施谐波抑制,能有效解决谐波与无功对电网的污染,这对于电力运营商(transmission system operator, TSO)是十分有利的,但无法改善谐波与无功对电力用户带来的不良影响。对于电力用户,谐波治理与提升运行效率是一个两难选择。

值得特别指出的是,在目前的高压/特高压直流输电(电流源型直流输电)工程中,换流站交流侧的滤波装置一般采用无源电力滤波器的结构型式,这与无源滤波技术相对比较成熟、补偿容量比较高、运行相对可靠不无关系。当然,随着无源滤波技术的发展与进步,目前出现了一种尖锐调谐度的连续调谐交流滤波器(continuously tuned AC filter, ConTune),被成功应用于基于电容换相换流器(CCC)

的直流输电系统^[12]。图 1.3 为连续调谐滤波器及其实物图^[26],其首次工程应用是安装于太平洋联络线的 Celilo HVDC 换流站。连续调谐滤波器通过控制铁心材料的饱和度,达到控制滤波电抗器的电抗值,使之与滤波电容器在一定范围的谐波频率下能够连续调谐。虽然这种滤波器具有非常好的滤波效果,但目前还只适合于在单调谐无源电力滤波器中采用,且只针对一个谐波频率,其价格也相对较贵。

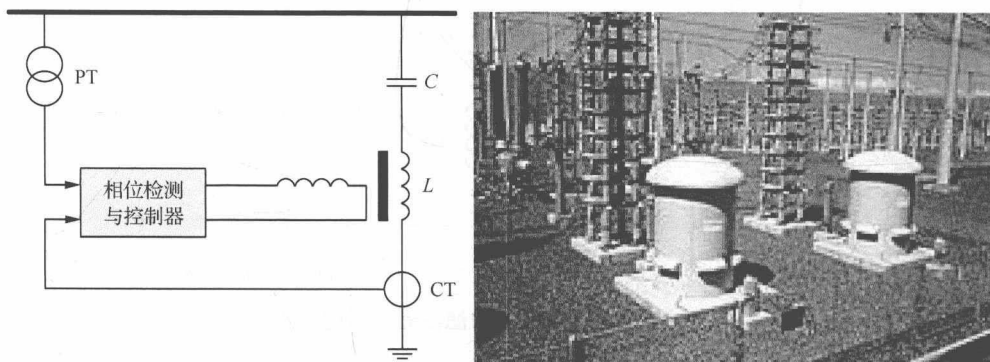


图 1.3 连续调谐无源电力滤波器

1.1.2 有源电力滤波技术

有源电力滤波技术是一种应用电力电子技术和现代控制理论与方法实现动态抑制谐波与补偿无功的滤波技术^[16,27-33],它能对变化的谐波(幅值和频率变化)以及变化的无功(无功大小、容性或感性)进行跟踪性补偿。有源电力滤波技术发展至今,出现了多种不同的拓扑结构类型,其工作原理和运行特性各有特色。但根据有源电力滤波器接入电网的方式,可分为并联型和串联型两大类。图 1.4 为这两类有源电力滤波器的简化结构图。

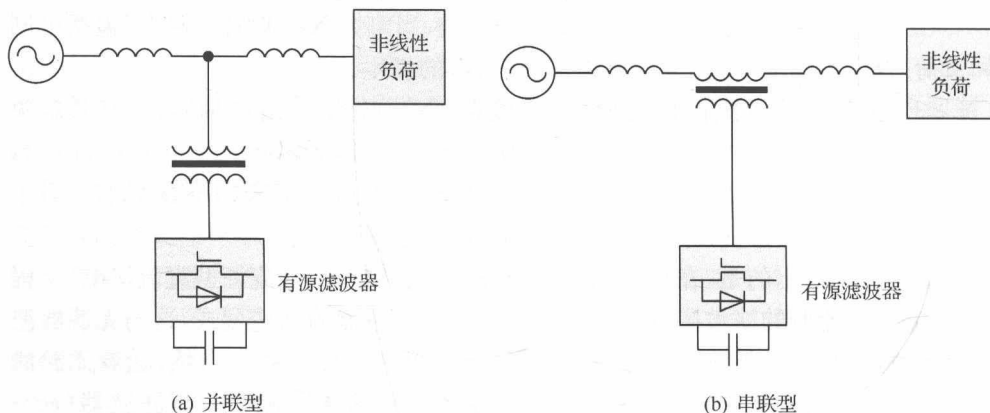


图 1.4 有源电力滤波器的简化结构图

有源电力滤波技术基本的工作原理是,检测补偿对象的电流和电压,经过指令运行电路得到补偿电流的指令信号,该指令信号经过补偿电流发生电路,产生与电网谐波电流大小相等、方向相反的补偿电流注入电网,从而实现补偿电流与电网谐波和无功电流相抵消,最终得到期望的电源电流。

并联型有源电力滤波器是目前应用比较广泛的有源滤波器类型,通常情况下,它与无源电力滤波器组成各种类型的混合型电力滤波器。图 1.4(a)为并联型有源电力滤波器最基本的结构型式。由于电网电压经过变压器直接施加到变流器上,且补偿电流基本上由变流器提供,这使得所需的变流器容量较大,难以在高压大功率的谐波抑制场合得到应用。

串联型有源电力滤波器可被看成一个受控谐波电压源,这种谐波源的一个典型应用是电容滤波型整流电路。与并联型有源电力滤波器相比,串联型有源滤波器的基波损耗较大,并且其投切、故障后的退出及各种保护也比并联型有源电力滤波器复杂。因此,目前单独使用串联型有源电力滤波器的工程应用很少,国内外研究较多的是由无源电力滤波和串联型有源电力滤波构成的混合电力滤波技术。

为了有效降低有源电力滤波器的容量,目前主要有两种方法:一种是混合型电力滤波,这将于 1.1.3 节阐述;一种是如图 1.5 所示的谐振注入式^[16,34,35]。这种方式利用电容器和电抗器构成基波谐振回路,使得有源电力滤波器部分只承受极小部分的基波电压,从而大大降低有源滤波器的容量。如图 1.5(a)所示,电容器 C_2 和 L 构成串联基波谐振回路,使得基波电压绝大部分降落在电容器 C_1 上;如图 1.5(b)所示,电容器 C_1 和 L_1 构成并联基波谐振回路,使得基波电压绝大部分加在该谐振回路上。通过这两种基波谐振方式,均能够使得有源电力滤波器只承受谐波分量,从而降低有源电力滤波器的基本容量和总容量。

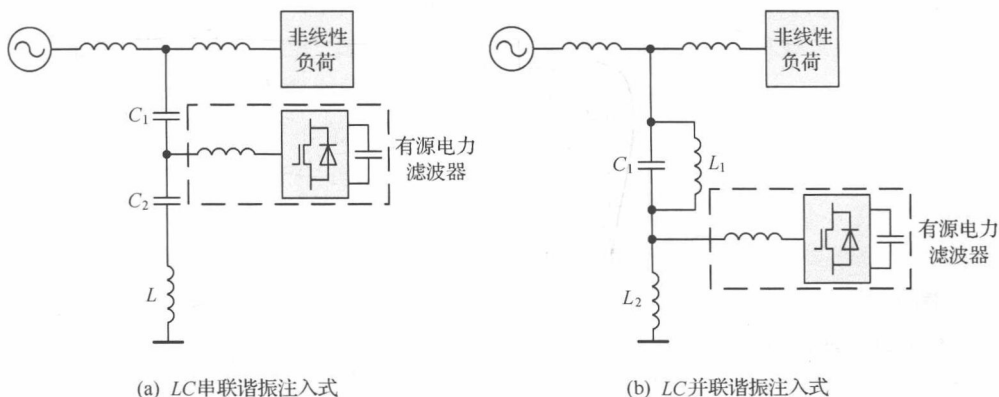


图 1.5 谐振注入式有源电力滤波器简化结构图

1.1.3 混合型电力滤波技术

混合型电力滤波技术是目前有源滤波技术工程应用的一种最为成功和典型的类型,它有效结合了无源滤波结构简单、补偿容量大、成本相对较低,以及有源滤波动态抑制谐波与无功补偿的优点^[16,36-42]。图 1.6 为混合型电力滤波器的三种主要结构型式。

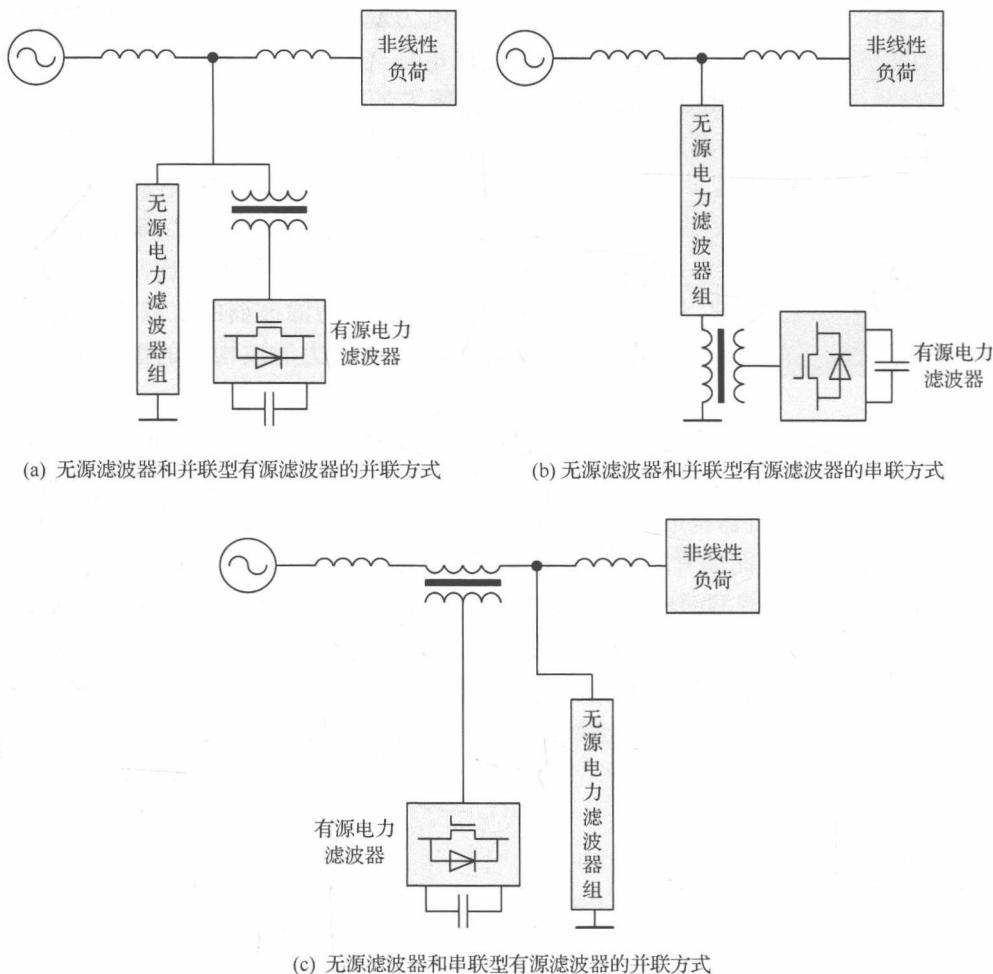


图 1.6 混合型电力滤波器简化结构图

图 1.6(a)为无源滤波器和并联型有源滤波器的并联混合方式。在这种方式中,无源电力滤波器组包括多组单调谐滤波器及高通滤波器,承担主要的谐波抑制与无功补偿任务;有源电力滤波器是进一步改善整个系统的性能,其所需的容量与单独使用方式相比大幅降低。图 1.6(b)为无源滤波器和并联型有源滤波器的串联混合方式。这种串联混合方式与上述的并联混合方式相比,有源电力滤波器基