

电能质量治理技术及应用

李圣清 著



科学出版社

电能质量治理技术及应用

李圣清 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以电能质量治理和无功补偿技术与装备为核心,面向工程应用实践,围绕 HAPF 和级联 STATCOM 的结构和优化设计、谐波与无功检测和控制方法、微电网并网关键技术以及相关工程应用等方面,探讨了谐波抑制、无功补偿以及 APF 对谐波源的补偿特性等诸多理论和技术问题。本书既有一定的理论深度,也有许多工程实践应用,强调理论与实际相结合,其中许多内容是作者和研究团队多年科研工作成果的结晶。

本书可供从事电气工程、控制工程及相关领域的工程技术人员在设计、制造、安装、调试各种电能质量调节装置的参考书,也可作为高等院校电气工程相关专业的本科生、研究生学习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电能质量治理技术应用 / 李圣清著. —北京: 科学出版社, 2014
ISBN 978-7-03-039832-1

I. ①电… II. ①李… III. ①电能—质量管理 IV. ①TM60

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 030465 号

责任编辑: 潘斯斯 张丽花 / 责任校对: 钟 洋

责任印制: 闫 磊 / 封面设计: 迷底书装

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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2014 年 1 月第一次印刷 印张: 24 1/2

字数: 493 000

定价: 75.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着工业化进程的不断加快、电力电子设备的不断更新和应用以及各种非线性、冲击性、波动性负载的大量增加,谐波污染日趋严重、电网功率因数降低,造成电能质量严重下降、损耗大大增加,影响了电力系统的稳定运行,给用户造成了不可估计的损失。同时,随着科学技术的发展,用户对电能质量的要求也越来越高。因此,探索新的有效的谐波和无功检测及控制方法,提高电能质量调节器的控制精度、治理能力并缩小成本等各方面具有重要的意义。

编写本书的目的是推进电能质量的研究工作,满足本科生、研究生以及相关领域的工程技术人员和管理人员对于电能质量的系统认识和前沿控制方法的了解,以适应当前形势发展的需求。本书作者和科研团队在谐波抑制和无功补偿以及探索微电网并网等方面的研究已有十余年,先后完成和正在进行的国家自然科学基金项目、省自然科学基金项目、科技厅项目以及大中型企业关于电能质量的课题和工程应用 20 多项。发表相关论文 100 余篇,其中 EI、SCI 收录 60 余篇,专利 8 项,成果分别获得省部级科技进步二、三等奖共 3 项。本书依托以上项目、论文和专利,结合相关理论的研究,对电能质量方面的工作和成果进行总结,以期对电网谐波抑制、无功补偿等电能质量相关问题的研究作出贡献。

本书以电网谐波抑制、无功补偿和微电网的并网技术与装备为核心,面向工程应用,围绕 HAPF 和级联 STATCOM 的结构和优化设计、谐波与无功检测和控制方法、微电网并网关键技术以及相关工程应用等方面,深入探讨了关于谐波抑制、无功补偿和微电网并网的诸多理论和技术问题。提出自适应谐波检测方法、改进型的单相谐波电流和无功电流检测等方法;提出前向线性预测、后向线性预测和基于快速块 LMS 算法的谐波电流预测方法;针对混合型有源滤波器,提出基于交互式多目标遗传算法和基于多岛粒子群算法的无源滤波器的优化设计方法,同时描述了有源滤波器的优化设计方案;并且探讨了有源滤波器对电动机、电容器、变压器和变流器等谐波源的补偿特性;提出在微电网背景下多功能有源滤波器的拓扑结构和控制方法;同时,针对混合型有源滤波器、统一电能质量调节器、级联 STATCOM、光伏并网,提出了系列前沿控制方法。本书有一定的理论深度,也有很直观的仿真图形和实验波形,强调理论与实际相结合,应用于多种工程实践,有许多内容是作者和研究团队多年从事科研工作的成果和经验总结。

本书编著过程中除了依托作者以及研究团队的项目报告、论文和专利,还参考和引用了不少前辈和同行的研究成果,使得本书内容比较系统地反映了在电能质量

相关技术的最新研究成果,使读者较快地进入这一领域的前沿,对电能质量问题有一个全面而深刻的了解。书中主体内容由李圣清教授编写和统稿,本书能够顺利出版还凝聚了许多研究生的汗水,耿旭光、谭剑中、罗晓东、李永安、曾黎琳、何政平、栗伟周、曾欢悦、徐文祥、张彬、徐天俊、杨俊对一些章节的编写做了许多前期工作,唐琪、袁黎、白建祥进行了电脑排版的文字处理,并通读和修改了书中一些问题,株洲变流技术国家工程研究中心有限公司的吴强、黄燕艳、周方圆等工程技术人员对本书第6章的工程应用作了大量的前期工作。湖南工业大学电气与信息工程学院的领导和作者的许多同事、家人为本书的编写创造了许多有利的条件并给予了关心,也提出了不少宝贵的建议,在此一并向他们致以衷心的感谢。

由于目前国内外关于电能质量方面研究详细而又深入的相关书籍比较少,而随着时代和科技的不断发展,探讨其相关前沿控制方法并应用于工程实践的书籍更少,限于作者的水平和精力,书中难免存在一些不足之处,恳请广大读者指正,作者十分感激。

李圣清

2013年12月

于湖南工业大学

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	谐波的研究现状和危害	1
1.2	治理谐波的方法	3
1.3	有源电力滤波器相关问题的综述	7
1.3.1	有源电力滤波器参考电流的获取方法	7
1.3.2	混合型有源电力滤波器优化设计方法	10
1.3.3	有源电力滤波器的控制策略	12
1.3.4	有源电力滤波器对谐波源的补偿特性	13
1.4	级联 STATCOM 设计方法综述	14
1.5	微电网系统中多功能电能质量调节装置	15
1.6	光伏微电网控制方法综述	16
1.6.1	光伏直流微电网母线电压分层协调控制方法	16
1.6.2	光伏并网逆变器迭代比例积分电流控制方法	17
1.7	含分布式发电的配电网无功优化综述	18
1.8	本书的主要内容及创新点	19
1.8.1	主要内容	19
1.8.2	主要创新点	21
第 2 章	电能质量检测方法	23
2.1	基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测方法	23
2.1.1	三相电路谐波电流检测方法	23
2.1.2	单相电路谐波电流检测方法	39
2.1.3	四相电路谐波电流检测方法	52
2.2	基于自适应理论的谐波电流检测方法	59
2.2.1	自适应滤波理论	59
2.2.2	基于自适应噪声对消技术的改进型谐波电流检测方法	68
2.2.3	基于频谱搬移原理的自适应谐波检测方法	72
2.3	暂态电压质量检测方法	74
2.3.1	傅里叶变换法	75

2.3.2	小波变换法	80
2.3.3	人工神经网络方法	83
2.3.4	小结	86
2.4	基于 dq 变换的暂态电压质量检测方法	86
2.4.1	基于瞬时无功功率理论的 dq 变换法	87
2.4.2	基于双 dq 变换的正负序检测算法	88
2.4.3	零序的无时延 dq 检测算法	90
2.4.4	基于 dq 变化的顺序形态滤波算法	91
2.4.5	小结	100
第 3 章	谐波电流预测方法	101
3.1	产生延时的原因及解决延时的办法	101
3.1.1	产生延时的原因	101
3.1.2	解决延时的措施	103
3.2	传统预测方法	104
3.2.1	基于神经网络理论的预测方法	104
3.2.2	一种用于电力牵引系统的谐波电流预测方法	106
3.3	基于加权一阶局域理论的谐波电流预测方法	107
3.3.1	加权一阶局域方法	107
3.3.2	预测控制	110
3.3.3	仿真与实验结果分析	111
3.3.4	结论	112
3.4	基于快速块 LMS 算法的谐波电流预测方法	113
3.4.1	快速块 LMS 算法	113
3.4.2	谐波电流预测	115
3.4.3	仿真	116
3.4.4	结论	118
3.5	基于前向线性预测理论的谐波电流预测方法	118
3.5.1	前向线性谐波电流预测方法	118
3.5.2	仿真与实验	120
3.5.3	结论	123
3.6	基于后向最佳线性预测理论的风电场 HAPF 谐波电流预测方法	124
3.6.1	风电场 HAPF 工作原理	124
3.6.2	后向线性谐波电流预测与分析方法	125
3.6.3	仿真与实验	127
3.6.4	结论	130

第 4 章 混合型有源电力滤波器参数设计与控制方法	131
4.1 无源滤波器优化设计方法	131
4.1.1 基于交互式多目标遗传算法的无源滤波器优化设计方法	131
4.1.2 基于多岛粒子群算法的无源滤波器多目标优化设计	137
4.2 并联型有源电力滤波器的工作原理	143
4.2.1 无源电力滤波器的功能	144
4.2.2 有源电力滤波器的功能	144
4.3 并联型有源滤波器参数优化设计	145
4.3.1 低通滤波器的优化设计	145
4.3.2 逆变器直流侧电容的设计	147
4.3.3 逆变器开关器件选择	149
4.4 并联型有源电力滤波器的控制策略	150
4.4.1 检测负载谐波电流控制方式	150
4.4.2 检测电网谐波电流控制方式	151
4.4.3 同时检测负载和电网谐波电流控制方式	153
4.4.4 仿真结果分析	154
4.4.5 交流侧 LC 电路的设计	157
4.5 串联型有源电力滤波器的工作原理	158
4.6 串联型有源电力滤波器主电路参数的设计	159
4.6.1 串联型有源电力滤波器整体优化设计	160
4.6.2 串联型有源电力滤波器内部优化设计	164
4.7 串联型有源电力滤波器的控制方法	169
4.7.1 PWM 脉冲信号产生方式	170
4.7.2 串联型有源电力滤波器分析与数学模型	172
4.7.3 PWM 逆变器前馈控制方式	173
4.7.4 PWM 逆变器电压反馈控制方式	175
4.7.5 PWM 逆变器双闭环反馈控制方式	177
4.7.6 仿真	181
4.8 UPQC 优化控制研究	183
4.8.1 基于鲁棒 H_2/H_∞ 理论的 UPQC 优化控制方法	183
4.8.2 基于变约束预测控制的 UPQC 控制方法	190
4.9 级联 HAPF 的拓扑结构及设计	195
4.9.1 硬件电路设计	196
4.9.2 系统软件设计	201
4.9.3 变流器机组设计	205
4.9.4 施工设计	205

第 5 章 有源电力滤波器对谐波源的补偿特性	208
5.1 APF 对电动机和电容器谐波源的补偿特性	208
5.1.1 感应电动机谐波源	208
5.1.2 并联电容器谐波源	210
5.1.3 电感性与电容性谐波源模型	212
5.1.4 并联型 APF 对电动机和电容器谐波源的补偿特性	213
5.1.5 串联型 APF 对电动机和电容器谐波源的补偿特性	214
5.1.6 实验结果分析	216
5.1.7 结论	217
5.2 APF 对变压器谐波源补偿特性的研究	217
5.2.1 变压器谐波源模型	218
5.2.2 变压器谐波源模型	220
5.2.3 串联型 APF 对变压器谐波源的补偿特性	220
5.2.4 并联型 APF 对变压器谐波源的补偿特性	221
5.2.5 仿真和实验结果分析	221
5.2.6 结论	223
5.3 APF 对变流器谐波源的补偿特性	223
5.3.1 变流器谐波源模型	223
5.3.2 并联型 APF 对变流器谐波源的补偿特性	224
5.3.3 串联型 APF 对变流器谐波源的补偿特性	224
5.3.4 结论	224
5.4 串联混合型 APF 对三相负载谐波源补偿特性的研究	225
5.4.1 三相负载谐波源模型	225
5.4.2 串联混合型有源电力滤波器模型	228
5.4.3 串联混合型 APF 对负载谐波源的补偿特性	229
5.4.4 实验研究	230
5.4.5 结论	232
第 6 章 级联 STATCOM 结构原理及设计方法	233
6.1 STATCOM 的无功补偿原理及拓扑结构	233
6.1.1 STATCOM 的无功补偿原理	233
6.1.2 STATCOM 的主电路拓扑结构	234
6.2 控制软件设计	236
6.2.1 级联 STATCOM 直流侧电压控制方法	236
6.2.2 三相电压不平衡下级联 STATCOM 的控制方法	242

6.3	控制硬件设计	249
6.3.1	控制部分硬件组成	250
6.3.2	主控制板 MPU	250
6.3.3	功率单元控制系统	253
6.3.4	可扩展光纤网络	257
6.4	变流器模块设计	259
6.4.1	主要元件选型	259
6.4.2	模块散热设计	262
6.4.3	低感母排设计	263
6.4.4	模块结构设计	264
6.4.5	模块旁路设计	265
6.5	变流器机组设计	266
6.5.1	变流器柜结构设计	266
6.5.2	变流柜散热设计	268
6.6	施工设计	270
6.7	STATCOM 监控界面	271
	本章小结	274
第 7 章	微电网多功能电能质量调节装置	275
7.1	微电网多功能电能质量调节装置的背景及意义	275
7.2	微电网储能单元与有源电力滤波器的组合	277
7.2.1	储能单元和 APF 运行及控制原理	278
7.2.2	储能单元与 APF 组合原理及数学模型	278
7.2.3	组合装置的控制策略	281
7.2.4	仿真及运行结果分析	287
7.3	含分布式电源 (DG) 的新型电能质量调节器	289
7.3.1	新型电能质量调节器设计与原理	289
7.3.2	复合指令电流的检测及合成	291
7.3.3	仿真与实验	292
7.4	高渗透率微电网接入下的配电网电能质量调节器	295
7.4.1	高渗透率微电网接入下对配电网电能质量的作用机理	296
7.4.2	高渗透率微电网接入下配电网电能质量调节器的研制	297
7.4.3	仿真与实验	299
第 8 章	光伏并网控制技术及直流分量抑制方法	303
8.1	光伏直流微电网母线电压分层协调控制方法	303

8.1.1	电压分层协调控制原理	304
8.1.2	第1层控制	305
8.1.3	第2层控制	305
8.1.4	第3层控制	306
8.1.5	仿真	307
8.1.6	实验	308
8.1.7	结论	309
8.2	光伏并网逆变器迭代比例积分电流控制方法	309
8.2.1	迭代比例积分控制方法	309
8.2.2	迭代比例积分控制器	310
8.2.3	仿真	311
8.2.4	实验	313
8.2.5	结论	313
8.3	光伏并网逆变系统 MPPT 的人工鱼群控制方法	313
8.3.1	光伏并网逆变系统拓扑结构及控制原理	314
8.3.2	传统的 MPPT 算法	315
8.3.3	人工鱼群算法	316
8.3.4	仿真	317
8.3.5	实验	318
8.3.6	结论	319
8.4	光伏并网电流直流分量抑制策略	319
8.4.1	检测补偿法抑制直流分量原理	320
8.4.2	直流分量采样	321
8.4.3	直流分量放大处理	322
8.4.4	基波直流分量反馈叠加调制	323
8.4.5	仿真	323
8.4.6	实验	324
8.4.7	结论	325
第9章	含分布式发电的配电网无功优化方法	326
9.1	分布式发电配电网无功优化	326
9.2	基于 MODCEA 的电力系统无功优化	327
9.2.1	电力系统无功优化数学模型	327
9.2.2	MODCEA 算法	328
9.2.3	基于 MODCEA 的多目标无功优化	329

9.2.4	算例分析	331
9.2.5	小结	332
9.3	基于 CAIA 算法含 DG 的配电网无功优化	332
9.3.1	含分布式发电的配电网潮流计算	332
9.3.2	分布式发电接入对配电网的影响	335
9.3.3	算例分析	335
9.3.4	含 DG 的配电网无功优化数学模型	338
9.3.5	基于 CAIA 算法的配电网无功优化方法	340
9.3.6	算例分析	344
9.3.7	小结	349
9.4	基于 ICAPSO 算法含 DG 的配电网无功优化	349
9.4.1	传统粒子群算法	349
9.4.2	基于 ICAPSO 算法的配电网无功优化方法	351
9.4.3	算例分析	358
9.4.4	小结	359
	参考文献	361

第 1 章 绪 论

本章首先介绍了国际国内电网谐波的研究现状和危害，接着介绍了当前常用抑制谐波和补偿无功的措施，综述了当前常用的谐波电流检测与预测方法、有源电力滤波器的优化设计方法与控制策略、有源电力滤波器对谐波源的补偿特性、级联 STATCOM 设计方法、微电网系统中多功能电能质量调节装置、光伏微电网控制方法以及含分布式发电的配电网无功优化方法；最后介绍了本书的主要研究内容及创新点。

1.1 谐波的研究现状和危害

电能质量,特别是谐波问题早在 20 世纪 20 年代和 30 年代就引起了人们的注意。当时在德国,由于使用静止汞弧变流器而造成了电流波形畸变。1945 年 J.C.Read 发表了有关变流器谐波的论文,是早期谐波研究比较有影响的论文^[1],到了 20 世纪 50 年代和 60 年代,高压直流输电技术的发展使得谐波污染加剧,人们对其研究的力度加大,发表了一些有学术价值的研究电力系统谐波的论文^[2]。近年来,各种非线性负载特别是新型电力电子器件在电力系统、工业各部门和家用电器产品中的日益广泛应用,使得谐波电流和无功电流大量流入电网。在日本,换流装置在 2000 年的普及率和增长率为 1987 年的 2.5 倍,谐波电流和电力系统容量的比例上升到 1990 年的 2 倍左右^[3]。在美国,电力电子装置 1999 年上升到 1992 年的 4~5 倍,电力谐波上升到 1992 年的 2.5 倍左右^[3]。英国有学者认为,自 60 年代以来,由于电力电子技术的发展,若不对谐波进行有效的控制,80 年代末英国的供电电压畸变率可能高达 10%。随着我国改革开放政策的实施,国民经济的高速发展,直流输电和柔性交流输电技术的采用,电气化铁道的快速发展,化工、冶金和煤炭等工业部门中电力电子设备大量应用,以及节能工作中电力电子技术的应用等,谐波污染源的使用数量不断增加,电网电压畸变率不断上升,使得电力系统的谐波问题日益严重。总之,现在世界各地的谐波污染问题呈逐渐上升趋势。

正是由于电力电子技术的飞速发展和各种电力电子装置的广泛应用,谐波污染的日趋严重,谐波问题已在世界范围内得到了十分广泛的关注。1982 年,国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)第一次制定了通用电器设备产生谐波的限制标准——IEC-55,并且在以后的执行过程中不断地修订和完善,是一部最早最具权威的谐波限制标准,在欧美等发达国家已强制执行^[4]。1993 年,美国电气和电子工程师学会(Institute of Electric and Electron, IEEE)在以上标准的基础

上进行了修改和补充,制定了 IEEE-519 谐波限制标准^[5]。另外,国际大电网会议(Conference of International Greatness Ratiary Eleticity, CIGRE)、国际供电会议(Conerence of Internatinal Ratiary Eleticity, CIRED)等国际性学术组织,也相继成立了专门的电力系统谐波工作组,并已制定出了限制电力系统谐波的相关标准^[2]。国际国内召开了多次有关谐波问题的学术会议,探讨和交流谐波治理的方法和经验。我国也将谐波的管理、监测和治理等摆到了十分重要的位置,于 1984 年和 1993 年分别制定了限制电力谐波的规定和国家标准^[5-7]。王兆安等于 1998 年出版的《谐波抑制和无功功率补偿》是我国近年来在谐波治理方面发表的具有较大影响的著作。

近十多年来对电力谐波问题的研究已经大大超过了电力系统自身的研究范围,渗透到电工理论、非线性系统理论、数字信号处理、电力电子等学科领域,对电力谐波的研究已取得了前所未有的进展,并有了许多重要发展。谐波问题逐渐被认识和了解,对其产生的原因,计算方法的分析,危害与影响的机理,测量与评估标准的制定,以及研究综合治理措施等方面的探索也在不断深入。但由于谐波问题复杂,涉及领域宽,目前仍有大量问题需要解决。谐波研究工作概括起来,可以划分为四个方面^[8]:①谐波功率理论研究;②谐波及其危害和影响分析,制定限制谐波的标准;③谐波有关的测量问题;④谐波的补偿和抑制。

本书主要研究后两个方面的内容。

供用电系统中的谐波危害具体表现在以下几个方面^[3,4]。

(1) 增加了发、输、供和用电设备的附加损耗,使设备过热,降低设备的效率和利用率。由于谐波电流的频率为基波频率的整数倍,高频电流流过导体时,因集肤效应的作用,使导体对谐波电流的有效电阻增加,从而增加了设备的功率和电能损耗,使导体的发热加剧。

(2) 影响继电保护和自动控制装置的工作可靠性。谐波对电力系统中以基波负序量为基础的继电保护和自动装置的影响十分严重,会引起发电机负序电流保护装置误动作、变电站主变的复合电压启动过电流保护装置负序电压元件误动作,母线差动保护的负序电压闭锁元件误动作等,严重威胁电力系统的安全运行。

(3) 使测量和计量仪器的指示和计量不准确。由于电力计量装置都是按 50Hz 标准的正弦波设计的,当供电电压或负荷电流中有谐波成分时,会影响感应式电能表的正常工作。在有谐波源的情况下,谐波源用户处的电能表记录了该用户吸收的基波电能并扣除一小部分谐波电能,从而谐波源不仅污染了电网,而且还少交了电费;而与此同时,在线性负荷用户处,电能表记录的是该用户吸收的基波电能及部分的谐波电能,这部分谐波电能不但使线性负荷性能变坏,而且还要多交电费。

(4) 干扰通信系统的工作。电力线路上流过的 3、5、7 和 11 次等幅值较大的奇次低频谐波电流通过磁场耦合,在邻近电力线路的通信线路中产生干扰电压,干扰通信系统的工作,影响通信线路通话的清晰度,甚至在极端情况下,还会威胁通信

设备和人员的安全。另外高压直流换流站换相过程中产生的电磁噪声会干扰电力载波通信的正常工作,并使利用载波工作的闭锁和继电保护装置误动作。

(5) 对用电设备的影响。谐波会使电视机和计算机的图形畸变,画面亮度发生波动变化,并使机内的元件出现过热,使计算机及数据处理系统出现错误。对于带有启动用的镇流器和提高功率因数用电容器的荧光灯及汞灯,因为在一定参数的配合下,形成某次谐波频率下的谐振,使镇流器或电容器因过热而损坏。对于采用晶闸管的变速装置,谐波可能使晶闸管误动作,或使控制回路误触发。

日本电气学会 1997 年发表了一项有关谐波危害的报告^[4],该报告指出进入 20 世纪 90 年代以后,每年由谐波引起的电网故障率比 90 年代之前要高得多。在调查的 363 次事故中,引起设备烧毁的故障次数最多,有 124 次,占总数的 34.3%。其次是引起设备工作异常的故障,有 89 次,占总数的 24.6%。

1.2 治理谐波的方法

解决电力谐波污染问题,目前主要有两种途径。一种是对谐波源本身进行改造^[9],使其不产生谐波也不消耗无功,在产品计时时就考虑减少和抑制谐波措施,这就是所谓的“防病”方法。通常采用以下几种措施^[2,8]。

(1) 多相整流技术。对于大功率相控整流器,一般是采用增加整流相数,通过采用适当的控制方法,可以大大减少相控整流器产生的谐波。但由于相控整流方式中增加整流相数会受到许多限制,另外,也不可能无限地增加相数,因而采用多相整流技术不能从根本上解决谐波问题。必须考虑采用另外的治理谐波措施解决。

(2) 脉宽调制整流技术。对于中等容量的变流器,可采用自关断器件构成的 PWM 整流器。对于电流型 PWM 整流器,可直接控制整流桥中的电力电子半导体器件,使其输入电流为接近正弦波且与电源电压同相的 PWM 波形,从而得到接近于 1 的功率因数。对于电压型整流器,需要将整流器通过电感与电源相连,通过控制电感中的电流,使整流器的输入成为与输入电压相同的正弦波。

(3) 功率因数校正器。近年来,随着彩电、个人计算机以及大量办公设备的广泛使用,每一个这样的负载都是一个小功率的谐波源,大量小功率谐波源对电力系统也构成了严重的谐波污染。而且这种谐波源由于分布很广而很难集中治理。目前一般采用在整流二极管与滤波电容之间插入一个电流整形器或叫做功率因数校正器。

以上讨论的“防病”方法仅是对自身性能的改进,可以减少谐波源对电网的污染。但由于电力系统的庞大和复杂,电力电子器件的开关工作状态,电力系统本身存在较大的谐波污染。

因此,必须采用另外一种途径,即加装谐波抑制装置^[2,9,10]。

1) 无源电力滤波器

在电力系统中,采用无源电力滤波器(Passive Power Filter, PPF)一直是传统补偿谐波和无功的主要手段,其突出的优点是结构简单、可靠性高、运行费用低。但是无源滤波器对电网频率的变化是极其敏感的,电网频率稍微偏离额定频率点,无源滤波器的滤波性能将大幅度下降。此外,电网阻抗的变化、滤波器元件的生产误差、老化或其他原因引起的参数偏离理想的设计值,也将导致无源滤波器滤波性能的下降。并且,安装 LC 无源滤波器很有可能在系统中形成串、并联谐振回路^[2,4],导致电网谐波电流的传播和放大,造成电网电压波形的畸变。为了避免在主要谐波频率处发生串、并联谐振,无源滤波器的调谐频率往往设计成稍微偏离主要的谐波频率,而这又将影响无源滤波器的滤波性能。此外,由于无源滤波器由大容量的电抗器和电容器组成,整机体积庞大。因此,无源电力滤波器必将被效率高、动态补偿特性好的有源电力滤波器所取代。

2) 有源电力滤波器

有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)是一种用于动态抑制谐波和补偿无功功率的新型电力电子装置,其基本工作原理是从补偿对象即谐波源中检测出需要补偿的分量,如谐波电流或无功电流分量,由 APF 产生一个与补偿分量大小相等方向或极性相反的补偿分量,以使被补偿分量和 APF 产生的补偿分量相互抵消,从而使电网电流只含基波分量,重新成为正弦电流^[10-18]。有关 APF 的思想早在 20 世纪 60 年代已有学者提出。Bird.B.M 和 Marsh.J.F 等在 1969 年发表的论文中,描述了向交流电网注入三次谐波电流来减少电源电流中的谐波成分,从而改善其波形,这实际上是 APF 思想的萌芽。1971 年 Sasaki.H 和 Machida.T 的论文最先较为完整地描述了 APF 的基本工作原理。由于当时在 APF 中采用线性放大器来产生补偿电流,损耗较大,成本较高,APF 没有能够实用化。1976 年,在 Gyugyi.L 等提出了采用脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)控制变流器构成的 APF 后,才确立了 APF 较为完整的概念和主电路的拓扑结构。而实际上直到进入 80 年代以后,由于新型电力半导体开关器件的出现, PWM 控制技术的发展,以及 Akagi.H 等学者基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测方法的提出, APF 才得以迅速发展^[18-22]。

APF 可分为串联型 APF 和并联型 APF。在串联型和并联型 APF 中,又可根据有源电力滤波器与补偿对象的连接关系,分成单独使用的串联型 APF、单独使用的并联型 APF 和混合型 APF 等多种形式,其系统构成如图 1.1 所示。单独使用的串联型 APF 和并联型 APF 如图 1.2 所示。

串联型 APF 主要用于补偿电源电压畸变,保证负荷用电质量,提高系统稳定性,适用于对电压型谐波源负载进行补偿。构成的系统具有有源滤波装置容量小、运行效率高等优点。但存在要求绝缘强度高、难以适应线路故障条件等缺点。并联型 APF

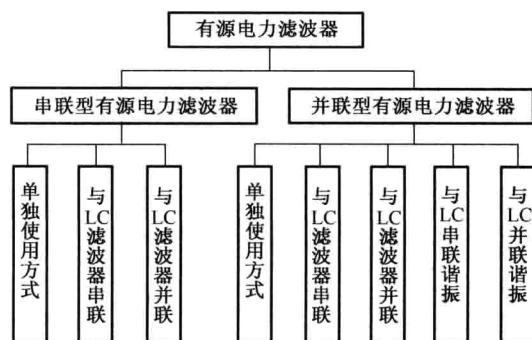


图 1.1 APF 的分类

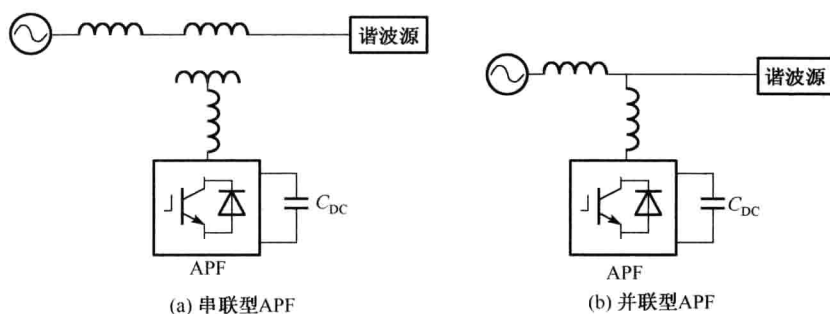


图 1.2 单独使用的 APF

主要用于补偿电网电流谐波、负载无功和提高电网功率因数，适用于对电流型谐波源负载进行补偿，其补偿特性不受电网阻抗变化的影响，是一种较为理想的补偿装置。目前投运的绝大部分是并联型 APF。但是并联型 APF 由于有源滤波装置容量相对较大，存在初期投资大和运行效率低的缺点。

与无源电力滤波器相比，具有明显以下的优势^[2,4,8]。

(1) 跟踪补偿频率和幅值都变化的谐波以及变化的无功，对补偿对象的变化响应快。

(2) 实现对谐波和无功功率同时补偿，且补偿无功功率的程度连续可调。

(3) 补偿无功功率时理论上不需储能元件，补偿谐波时储能元件的容量也不必太大。

(4) 可跟踪电网频率的变化，故补偿性能不受电网频率变化的影响。

(5) 补偿特性基本上不受电网阻抗的影响，不易与电网阻抗发生谐振。

(6) 即使补偿对象电流过大，也不容易发生过载，并能正常发挥补偿作用。

(7) 既可对一个谐波源单独补偿，也可对多个谐波源集中补偿。

国外有源电力滤波器的研究以日本为代表，1982 年第一台实用的有源电力滤波器装置投入实际运行，现已步入实用化阶段。尽管如此，由于 APF 初期投入大，补