

第2版

# 谐波抑制和 无功功率补偿

王兆安 杨 君 刘进军 王 跃 编著

电气自动化  
新技术丛书



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

电气自动化新技术丛书

# 谐波抑制和无功功率补偿

第 2 版

王兆安 杨 君 编著  
刘进军 王 跃



机械工业出版社

抑制谐波和提高功率因数是涉及电力电子技术、电气自动化技术和电力系统的一个重大课题。随着电力电子技术的不断进步,新型有源谐波抑制技术和无功补偿技术得到了迅速的发展。本书主要介绍有源电力滤波器、混合型电力滤波器、静止无功补偿装置、高功率因数整流器等谐波抑制和无功补偿新技术。对有关谐波和无功功率的基础理论、电力电子装置的功率因数和谐波分析以及传统无功补偿和滤波方法也做了必要的介绍。本书叙述力求简洁,强调物理概念,注重理论联系实际。

这次修订主要增加了由有源和无源电力滤波器组成的混合滤波器内容,并对有源滤波器内容做了较多的补充和修改,也对静止无功补偿装置内容做了必要的补充与修改。

本书可作为电力电子技术、电气自动化技术及电力系统领域的工程技术人员和研究人员的参考书,也可供上述专业范围的教师和研究生阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

谐波抑制和无功功率补偿/王兆安等编著.—2版.

—北京:机械工业出版社,2005.10

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-06298-1

I. 谐… II. 王… III. ①电力系统-谐波-研究  
②电力系统-无功功率-功率补偿-研究 IV. TM714

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 120787 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 孙流芳 版式设计: 霍永明 责任校对: 吴美英  
罗莉

封面设计: 姚毅 责任印制: 洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006年1月第2版·第1次印刷

850mm×1168mm<sup>1/32</sup>·14.375印张·383千字

0 001—4 000册

定价: 29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版

# 《电气自动化新技术丛书》

## 序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

## 第4届《电气自动化新技术丛书》

### 编辑委员会成员

主任：王 炎

副主任：王兆安 王志良 赵相宾 牛新国

委员：王正元 王永骥 王兆安 王 旭  
王志良 王 炎 牛新国 尹力明  
刘宗富 许宏纲 孙流芳 阮 毅  
李永东 李崇坚 陈伯时 陈敏逊  
陈维均 周国兴 赵光宙 赵 杰  
赵相宾 张 浩 张敬明 郑颖楠  
涂 健 徐殿国 黄席樾 彭鸿才  
霍勇进 戴先中

秘 书：刘凤英

## 第4届《电气自动化新技术丛书》 编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在学会领导和广大作者、读者的支持下，至今已出版发行丛书38种33万余册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了很大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断推出介绍电气传动自动化新技术的丛书。因此，本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，同时对受读者欢迎的已出版的丛书，根据技术的发展，我们将组织一些作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版期间，为加快与支持丛书出版，成立了丛书出版基金，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位的支持，在此我们对所有资助单位再次表示感谢。

第4届《电气自动化新  
技术丛书》编辑委员会  
2002年10月12日

## 第 2 版前言

1998 年 9 月《谐波抑制和无功功率补偿》一书问世以来,受到了同行读者的欢迎和好评。科技期刊论文对该书的引用次数已经超过 300 次。几年来,该书已印刷了 4 次,累积印数达到 1 万册。作为一部专业性很强、适用面并不太宽的专著,这个发行业绩还是很好的。

《谐波抑制和无功功率补偿》一书出版 6 年多来,对谐波抑制和无功补偿技术的研究逐渐形成了热潮,社会对这一技术需求的呼声也越来越高。以本书作者为主的课题组在该书出版后,持续地进行着谐波抑制和无功补偿技术的研究,除完成了国家自然科学基金重点项目“复杂供电系统谐波基础理论及其综合防治研究”(编号为 59737140)外,还培养了数名博士和一批硕士,相继取得了一些新的研究成果。

近年来,人们对无源滤波技术的缺点认识越来越清楚,有源滤波技术虽然已被不少用户所认识并接受,但其发展速度不如预想的那样快。而由无源电力滤波器和有源电力滤波器组成的混合电力滤波器却因此而受到了人们的青睐并且得到了很大的发展。所以,有必要将这部分新的内容补充到书中。本书第 2 版增加了第 8 章“混合型电力滤波器”,在第 7 章添加了“有源电力滤波器的谐波电流检测方法”,“串并联型有源电力滤波器”两小节,对其他小节进行了补充和修改,并去掉了有关混合电力滤波器的内容,原第 8 章“高功率因数变流器”相应地变为第 9 章。此外,对原书的第 5 章也进行了必要的修改和补充,其他各章内容变化不大。本书新增的第 8 章由王跃博士撰写,其他各章作者未变。

西安交通大学卓放教授、肖国春副教授为本书部分内容提供了参考资料，在此表示谢意。

本书第2版的编写和出版，是在机械工业出版社电工电子分社社长牛新国编审和孙流芳编审的指导和支持下完成的。没有他们的鞭策和鼓励，本书第2版的编写任务是不可能完成的。在此，谨对他们致以深切的感谢。

本书的许多研究工作还得到了台达电力电子科教发展基金的资助，谨致衷心的感谢。



## 第 1 版前言

近年来，随着全球工业化进程的不断加快，对地球环境的污染和破坏也空前加剧。为此，在全世界范围内掀起了环境保护的热潮。电力系统也是一种“环境”，也面临着污染，公用电网中的谐波电流和谐波电压就是对电网环境最严重的一种污染。

电力电子装置是公用电网中最主要的谐波源，随着电力电子装置的应用日益广泛，电网中的谐波污染也日趋严重。另外，大多数电力电子装置功率因数很低，也给电网带来额外负担，并影响供电质量。因此，抑制谐波和提高功率因数已成为电力电子技术、电气自动化技术及电力系统研究领域所面临的一个重大课题，正在受到越来越多的关注。

设置无功补偿电容器和  $LC$  滤波器是传统的补偿无功功率和谐波的主要手段，已获得了广泛的应用。有关这方面已有较多的著作进行了详细的论述。但这种无源补偿装置的补偿性能较差，难以对变化的无功功率和谐波进行有效的补偿。晶闸管获得广泛应用后，以晶闸管控制电抗器（TCR）为代表的静止无功补偿装置（SVC）有了长足的发展，可以对变化的无功功率进行动态补偿。近年来，随着以 GTO 晶闸管、BJT 和 IGBT 为代表的全控型器件向大容量化、高频化方向的不断发展，采用电力电子技术的各种有源补偿装置发展很快。主要用于补偿无功功率的静止无功发生器（SVG）比起 TCR 有更为优越的性能。主要用于补偿谐波的有源电力滤波器的研究十分活跃，这种滤波器比  $LC$  滤波器有更优越的补偿性能，技术上已经成熟，在国外已有许多工业应用实例。

另一种抑制谐波和提高功率因数的方法是开发新型高功率因数整流器。这种整流器除具有负载所要求的性能外，不产生谐波，且具有很高的功率因数。

有关 SVG、有源电力滤波器和高功率因数整流器等有源谐波和无功补偿装置，近年已有大量论文发表，与之相关的理论，如瞬时无功功率理论也取得了突破性的成就，但目前尚未见到有关专著问世。十余年来，作者在这一领域进行了许多研究工作，曾承担了多项国家自然科学基金项目（编号为 59077308、59477020、69072915）及国家攻关项目，1998 年又承担了国家自然科学基金重点项目“复杂供用电系统谐波基础理论及其综合防治研究”（编号为 59737140）。在参阅大量文献的基础上，作者结合多年的研究成果写成本书，以期对我国公用电网的谐波抑制和无功补偿作出贡献。同时，本书也是上述国家自然科学基金重点项目研究工作的一部分。

本书除上述内容外，还包括谐波和无功补偿的基础理论、电力电子装置的功率因数和谐波分析等内容。对无功补偿电容器和 LC 滤波器也进行了简要的论述。

本书由王兆安、杨君和刘进军合作撰写。王兆安拟定了本书的大纲并编写了第 1、2 和 8 章，杨君编写了第 4、6 和 7 章，刘进军编写了第 3 和 5 章。全书由王兆安统稿。西安交通大学葛文运教授对本书进行了仔细的审阅，提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到了本丛书编委副主任委员、天津电气传动设计研究所喻士林教授级高级工程师的鼎力支持和指导，东南大学戴先中教授审阅了本书大纲并提出中肯的修改建议，作者深表谢意。

博士研究生董晓鹏和杨旭为本书部分内容提供了参考资料，部分插图由硕士研究生吴东、高军、胡军飞和王建军绘制，刘娟娟工程师完成了本书的部分计算机录入工作，在此表示谢意。

另外，本书能顺利出版，有赖于电气自动化新技术丛书编委

会和机械工业出版社的支持和帮助，在此致以深切的感谢。

本书的许多研究工作都是在国家自然科学基金委员会的资助下完成的，谨致衷心的感谢。

作者

于西安交通大学

# 目 录

《电气自动化新技术丛书》序言	
第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话	
第2版前言	
第1版前言	
第1章 绪论 .....	1
1.1 谐波问题及研究现状 .....	1
1.2 谐波抑制 .....	4
1.3 无功补偿 .....	6
1.4 本书内容概述 .....	9
第2章 谐波和无功率 .....	12
2.1 谐波和谐波分析 .....	12
2.1.1 谐波的基本概念 .....	12
2.1.2 谐波分析 .....	15
2.1.3 公用电网谐波电压和谐波电流限值 .....	18
2.2 无功功率和功率因数 .....	21
2.2.1 正弦电路的无功功率和功率因数 .....	21
2.2.2 非正弦电路的无功功率和功率因数 .....	23
2.2.3 无功功率的时域分析 .....	25
2.2.4 三相电路的功率因数 .....	27
2.2.5 无功功率的物理意义 .....	27
2.2.6 无功功率理论的研究及其进展 .....	30
2.3 谐波和无功率的产生 .....	31
2.4 无功功率的影响和谐波的危害 .....	39
2.4.1 无功功率的影响 .....	39
2.4.2 谐波的危害 .....	40

2.4.3	谐波引起的谐振和谐波电流放大	41
2.4.4	谐波对电网的影响	44
2.4.5	谐波对旋转电机和变压器的危害	45
2.4.6	谐波对继电保护和电力测量的影响	47
2.4.7	谐波对通信系统的干扰	49
第3章	电力电子装置的功率因数和谐波分析	52
3.1	阻感负载整流电路的功率因数和谐波分析	52
3.1.1	忽略换相过程和直流侧电流脉动时的情况	53
3.1.2	计及换相过程但忽略直流侧电流脉动时的情况	65
3.1.3	计及直流侧电流脉动时的情况	72
3.1.4	阻感负载整流电路的非特征谐波	79
3.2	整流电路带滤波电容时的功率因数和谐波分析	83
3.2.1	电容滤波型桥式整流电路的功率因数和谐波分析	84
3.2.2	感容滤波型桥式整流电路的功率因数和谐波分析	94
3.3	交流调压电路的功率因数和谐波分析	101
3.3.1	移相控制单相交流调压电路的功率因数和谐波分析	102
3.3.2	移相控制三相交流调压电路的功率因数和谐波分析	110
3.3.3	通断控制交流调压电路的功率因数和谐波分析	123
3.4	周波变流电路的功率因数和谐波分析	127
3.4.1	用开关函数法对输入电流进行谐波分析	128
3.4.2	输入电流中的谐波频率和谐波含量	132
3.4.3	输入电流中的基波分量和输入端功率因数	135
第4章	无功补偿电容器和LC滤波器	140
4.1	无功补偿电容器	140
4.1.1	并联电容器补偿无功功率的原理	141
4.1.2	并联电容器补偿无功功率的方式	141
4.1.3	并联电容器补偿容量的计算	143
4.1.4	并联电容器的放电回路和自动投切	145
4.1.5	并联电容器和谐波的相互影响	146
4.2	LC滤波器	150

4.2.1	LC 滤波器的结构和基本原理	151
4.2.2	LC 滤波器的设计准则	154
4.2.3	单调谐滤波器的设计	157
4.2.4	高通滤波器的设计	164
第 5 章	静止无功补偿装置	167
5.1	无功功率动态补偿的原理	168
5.2	晶闸管控制电抗器 (TCR)	175
5.2.1	基本原理	175
5.2.2	主要接线形式和配置类型	176
5.2.3	控制系统	180
5.2.4	动态性能和动态过程分析	187
5.3	晶闸管投切电容器 (TSC)	189
5.3.1	基本原理	189
5.3.2	投入时刻的选取	191
5.3.3	控制系统	193
5.3.4	动态过程分析	194
5.4	采用全控型器件的静止无功发生器 (SVG)	196
5.4.1	基本原理	197
5.4.2	控制方法	202
5.4.3	应用实例	209
5.4.4	发展趋势	216
第 6 章	瞬时无功功率理论和应用	220
6.1	三相电路瞬时无功功率理论	220
6.2	谐波和无功电流的实时检测	226
6.2.1	三相电路谐波和无功电流实时检测	227
6.2.2	单相电路谐波和无功电流实时检测	242
6.3	瞬时无功功率理论的其他应用	250
6.3.1	SVC 控制所需的信号和传统检测方法	250
6.3.2	基于瞬时无功功率理论的 SVC 信号检测方法	252
第 7 章	有源电力滤波器	257

7.1	有源电力滤波器的基本原理 .....	257
7.2	有源电力滤波器的系统构成和主电路形式 .....	259
7.2.1	单独使用的有源电力滤波器的系统构成 .....	260
7.2.2	有源电力滤波器的主电路形式 .....	263
7.3	有源电力滤波器的谐波电流检测方法 .....	266
7.3.1	基于傅里叶分析的检测方法 .....	267
7.3.2	采用人工神经网络的检测方法 .....	268
7.4	并联型有源电力滤波器 .....	271
7.4.1	指令电流运算电路 .....	272
7.4.2	电流跟踪控制电路 .....	275
7.4.3	主电路设计 .....	279
7.4.4	直流侧电压的控制 .....	284
7.4.5	并联型有源电力滤波器的控制方式 .....	289
7.4.6	并联型有源电力滤波器的稳定性分析 .....	295
7.5	串联型有源电力滤波器 .....	298
7.5.1	串联型有源电力滤波器的结构和基本原理 .....	298
7.5.2	检测负载谐波电压控制方式 .....	302
7.5.3	复合控制方式 .....	309
7.5.4	串联型和并联型有源电力滤波器的简要对比 .....	317
7.6	串并联型有源电力滤波器 .....	318
7.6.1	UPQC 的结构和基本工作原理 .....	319
7.6.2	UPQC 的补偿电压和电流指令生成方法 .....	320
7.6.3	UPQC 的补偿结果 .....	321
第 8 章	混合型电力滤波器 .....	328
8.1	混合型电力滤波器的系统构成 .....	328
8.1.1	并联混合型电力滤波器的系统构成 .....	328
8.1.2	串联混合型电力滤波器的系统构成 .....	333
8.2	并联混合型电力滤波器 .....	335
8.2.1	直流并联混合型电力滤波器 .....	335
8.2.2	APF 与 PF 串联后与电网并联的交流混合型	

电力滤波器 .....	342
8.2.3 一种新型交流并联混合型电力滤波器 .....	347
8.3 串联混合型电力滤波器 .....	368
8.3.1 串联混合型电力滤波器的系统构成及工作原理 .....	368
8.3.2 有源装置的容量估算 .....	370
8.3.3 串联混合型电力滤波器的控制方法 .....	374
8.3.4 串联混合型电力滤波器的补偿特性 .....	376
第9章 高功率因数变流器 .....	386
9.1 整流电路的多重化和自换相整流电路 .....	386
9.1.1 移相多重联结 .....	387
9.1.2 多重联结电路的顺序控制 .....	392
9.1.3 自换相整流电路 .....	394
9.1.4 电容滤波二极管整流电路的多重联结 .....	397
9.2 PWM 整流电路 .....	399
9.2.1 PWM 整流电路的拓扑和工作原理 .....	399
9.2.2 PWM 整流电路的控制方法 .....	406
9.3 带斩波器的二极管整流电路 .....	409
9.3.1 单相有源功率因数校正电路 .....	410
9.3.2 三相有源功率因数校正电路 .....	413
9.4 矩阵式变频电路 .....	416
参考文献 .....	423



# 第1章 绪 论

谐波抑制和无功功率补偿（以下简称无功补偿）是涉及电力电子技术、电力系统、电气自动化技术、理论电工等领域的重大课题。由于电力电子装置的应用日益广泛，使得谐波和无功问题引起人们越来越多的关注。同时，也由于电力电子技术的飞速进步，在谐波抑制和无功补偿方面也取得了一些突破性的进展。本章首先介绍谐波及无功问题的研究历史和现状，并扼要叙述谐波抑制和无功补偿的主要手段，然后介绍编写本书的基本指导思想和各章主要内容。

## 1.1 谐波问题及研究现状

“谐波”一词起源于声学。有关谐波的数学分析在 18 世纪和 19 世纪已经奠定了良好的基础。傅里叶等人提出的谐波分析方法至今仍被广泛应用。

电力系统的谐波问题早在 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压、电流波形的畸变。1945 年 J. C. Read 发表的有关变流器谐波的论文是早期有关谐波研究的经典论文<sup>[1]</sup>。

到了 20 世纪 50 年代和 60 年代，由于高压直流输电技术的发展，发表了有关变流器引起电力系统谐波问题的大量论文。E. W. Kimbark 在其著作中对此进行了总结<sup>[2]</sup>。70 年代以来，由于电力电子技术的飞速发展，各种电力电子装置在电力系统、工业、交通及家庭中的应用日益广泛，谐波所造成的危害也日趋严重。世界各国都对谐波问题予以充分的关注。国际上召开了多次有关谐波问题的学术会议，不少国家和国际学术组织都制定了限制电力系统谐波和用电设备谐波的标准和规定。