

电气自动化新技术丛书

# 谐波抑制和无功功率补偿

王兆安 杨君 刘进军 编著

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、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。

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学生阅读。

## 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. —北京:机械工业出版社, 1998.9

(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-控制-技术②电力系统-无功功率-无功补偿-技术 IV. TM714.3

中国版本图书馆CIP数据核字(98)第16655号

出版人: 马九荣(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: 张世琴 责任校对: 李汝庚

封面设计: 姚毅 责任印制: 王国光

北京交通印务实业公司印刷·新华书店北京发行所发行

1998年9月第1版第1次印刷

850mm×1168mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·11.75印张·306千字

0 001 - 4 000册

定价: 23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

# 《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建设“四化”、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

## 《电气自动化新技术丛书》

### 出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究开发中心

天津普辰电子有限公司

中国电工技术学会

## 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，今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。王兆安拟订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院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，刘晓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

1998年3月

于西安交通大学

# 目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

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 .....	26
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 .....	78
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 .....	93
3.3	交流调压电路的功率因数和谐波分析 .....	100
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 .....	101
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 .....	109
3.3.3	通断控制交流调压电路的功率因数和谐波分析 .....	121
3.4	周波变流电路的功率因数和谐波分析 .....	124
3.4.1	用开关函数法对输入电流进行谐波分析 .....	126
3.4.2	输入电流中的谐波频率和谐波含量 .....	129
3.4.3	输入电流中的基波分量和输入端功率因数 .....	132
第 4 章	无功补偿电容器和 LC 滤波器 .....	138
4.1	无功补偿电容器 .....	138
4.1.1	并联电容器补偿无功功率的原理 .....	139
4.1.2	并联电容器补偿无功功率的方式 .....	140
4.1.3	并联电容器补偿容量的计算 .....	140
4.1.4	并联电容器的放电回路和自动投切 .....	143
4.1.5	并联电容器和谐波的相互影响 .....	144
4.2	LC 滤波器 .....	148
4.2.1	LC 滤波器的结构和基本原理 .....	148
4.2.2	LC 滤波器的设计准则 .....	151
4.2.3	单调谐滤波器的设计 .....	155
4.2.4	高通滤波器的设计 .....	161
第 5 章	静止无功补偿装置 .....	164
5.1	无功功率动态补偿的原理 .....	166
5.2	晶闸管控制电抗器(TCR) .....	172

5.2.1	基本原理	172
5.2.2	主要接线形式和配置类型	173
5.2.3	控制系统	177
5.2.4	动态性能和动态过程分析	183
5.3	晶闸管投切电容器(TSC)	185
5.3.1	基本原理	185
5.3.2	投入时刻的选取	187
5.3.3	控制系统	189
5.3.4	动态过程分析	190
5.4	采用全控型器件的静止无功发生器(SVG)	192
5.4.1	基本原理	193
5.4.2	控制方法	198
5.4.3	应用实例	205
第6章	瞬时无功功率理论和应用	209
6.1	三相电路瞬时无功功率理论	209
6.2	谐波和无功电流的实时检测	215
6.2.1	三相电路谐波和无功电流实时检测	216
6.2.2	单相电路谐波和无功电流实时检测	231
6.3	瞬时无功功率理论的其他应用	239
6.3.1	SVC控制所需的信号和传统检测方法	239
6.3.2	基于瞬时无功功率理论的 SVC 信号检测方法	241
第7章	有源电力滤波器	245
7.1	有源电力滤波器的基本原理	245
7.2	有源电力滤波器的系统构成和主电路形式	247
7.2.1	有源电力滤波器的系统构成	248
7.2.2	有源电力滤波器的主电路形式	254
7.3	并联型有源电力滤波器	258
7.3.1	单独使用的并联型有源电力滤波器	258
7.3.2	与 LC 滤波器混合使用的并联型有源电力滤波器	285
7.4	串联型有源电力滤波器	291
7.4.1	单独使用的串联型有源电力滤波器	291
7.4.2	串联混合型有源电力滤波器	294
第8章	高功率因数变流器	312

8.1 整流电路的多重化和自换相整流电路 .....	312
8.1.1 移相多重联结 .....	313
8.1.2 多重联结电路的顺序控制 .....	318
8.1.3 自换相整流电路 .....	320
8.1.4 电容滤波二极管整流电路的多重联结 .....	323
8.2 PWM 整流电路 .....	325
8.2.1 PWM 整流电路的拓扑和工作原理 .....	325
8.2.2 PWM 整流电路的控制方法 .....	332
8.3 带斩波器的二极管整流电路 .....	335
8.3.1 单相有源功率因数校正电路 .....	335
8.3.2 三相有源功率因数校正电路 .....	338
8.4 矩阵式变频电路 .....	342
参考文献 .....	349

# 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。

我国对谐波问题的研究起步较晚。吴竞昌等人 1988 年出版的《电力系统谐波》一书是我国有关谐波问题较有影响的著作<sup>[3]</sup>。夏道止等 1994 年出版的《高压直流输电系统的谐波分析及滤波》是近年出版的代表性著作<sup>[4]</sup>。此外，唐统一等人和容健纲等人分别独立翻译了 J. Arrillaga 等的《电力系统谐波》一书<sup>[5,6]</sup>，也在国内有较大的影响。

谐波研究的意义，首先是因为谐波的危害十分严重。谐波使电能的生产、传输和利用的效率降低，使电气设备过热、产生振动和噪声，并使绝缘老化，使用寿命缩短，甚至发生故障或烧毁。谐波可引起电力系统局部并联谐振或串联谐振，使谐波含量放大，造成电容器等设备烧毁。谐波还会引起继电保护和自动装置误动作，使电能计量出现混乱。对于电力系统外部，谐波对通信设备和电子设备会产生严重干扰。

谐波研究的意义，还在于其对电力电子技术自身发展的影响。电力电子技术是未来科学技术发展的重要支柱。有人预言，电力电子连同运动控制将和计算机技术一起成为 21 世纪最重要的两大技术<sup>[7]</sup>。然而，电力电子装置所产生的谐波污染已成为阻碍电力电子技术发展的重大障碍，它迫使电力电子领域的研究人员必须对谐波问题进行更为有效的研究。

谐波研究的意义，更可以上升到从治理环境污染、维护绿色环境的角度来认识。对电力系统这个环境来说，无谐波就是“绿色”的主要标志之一<sup>[8,9]</sup>。在电力电子技术领域，要求实施“绿色电力电子”的呼声也日益高涨。目前，对地球环境的保护已成为全人类的共识。对电力系统谐波污染的治理也已成为电工科学技术界所必须解决的问题。

有关谐波问题的研究可以划分为以下四个方面：

- (1) 与谐波有关的功率定义和功率理论的研究；
- (2) 谐波分析以及谐波影响和危害的分析；
- (3) 谐波的补偿和抑制；
- (4) 与谐波有关的测量问题和限制谐波标准的研究。

当电压或电流中含有谐波时，如何定义各种功率是一个至今尚未得到圆满解决的问题。如何使定义科学严谨，又能满足各种工程和管理需要，还有许多问题需要研究。本书将不在这一问题上展开讨论，但在 2.2 节对研究现状作简要介绍，在第 6 章介绍对谐波补偿有很大实用价值的瞬时无功功率理论。

谐波分析包括谐波源分析和电力系统谐波分析。在电力电子装置普及以前，变压器是主要的谐波源。目前变压器谐波已退居很次要的地位，各种电力电子装置成为最主要的谐波源。在电力电子装置的谐波分析中，对电容滤波整流电路等的研究还不充分。在本书第 3 章中，将对各种电力电子电路进行谐波分析。

电力系统的谐波分析是以电力系统为对象，当系统中有一个或多个谐波源时，就要计算和分析系统中各处的谐波电压和谐波电流的分布情况。高压直流输电工程的建立及静止无功补偿装置(Static Var Compensator——SVC)的应用有力地推动了这方面研究工作的进展，我国学者夏道止在这一领域的研究在国际上产生了广泛的影响<sup>[4,10~13]</sup>。其研究的主要特点是把交直流电力系统一直作为一个整体统一求解，使得分析结果更为准确。目前这一领域还有一些问题有待进一步研究解决<sup>[4,14,15]</sup>，例如，当系统的谐波源为时变或同时存在多个谐波源时，如何进行建模和分析；如何计算或估计负载及系统的等效谐波阻抗；如何对待背景谐波等。有关电力系统谐波分析的问题已超出了本书的讨论范围，有兴趣的读者可参阅文献[3,4]和有关论文。

在谐波危害及影响的分析方面有关文献已很多<sup>[3,5,16]</sup>，但随着谐波源种类和分布的变化，又有新的问题不断出现。本书在 2.4 节对这一问题进行简要的叙述。

谐波抑制是本书的核心内容之一，在 1.2 节对其进行扼要介绍之后，将在第 4 章 4.2 节、第 6 章和第 7 章进行详细的论述。

电力系统中谐波的实际测量结果是谐波问题研究的主要依据，也常常是研究分析问题的出发点。由于电子技术，特别是数字电子技术的进步，已有许多仪器能对谐波进行连续的测量，提供必

需的信息。但如何合理地选择采样时间、测量间隔及测量位置,如何处理波形瞬态畸变和闪变等问题还需要深入研究。

在有谐波时各种电学量的测量中,以功率和电能的测量最为重要。这项工作除与谐波标准有关外,更和存在谐波时功率的分类和定义直接相关。数字采样测量技术的发展正在突破以前存在的各种技术限制,但因为缺少统一的功率分解和定义,这一问题尚未得到合理的解决<sup>[17]</sup>。

制定限制谐波的标准是解决电力系统谐波危害和影响的重要措施。世界上许多国家都已制定了限制谐波的国家标准或全国性规定<sup>[18~21]</sup>。我国也先后于 1984 年和 1993 年分别制定了限制谐波的规定和国家标准<sup>[22,23]</sup>。在国际上,各个国际组织,如国际电气电子工程师协会(IEEE)、国际电工委员会(IEC)和国际大电网会议(CIGRE)也纷纷推出了各自建议的谐波标准,其中较有影响的是 IEEE519-1992 和 IEC555-2<sup>[24,25]</sup>。前者是修订后第二次发表,后者正在修订之中。本书在 2.1 节将介绍我国的现行谐波标准。

近年来,国际上有关谐波的研究十分活跃,每年都有大量的论文发表。这一方面说明了这一研究的重要性,另一方面也预示着这一领域的研究将取得重大突破。

## 1.2 谐波抑制

为解决电力电子装置和其他谐波源的谐波污染问题,基本思路有两条:一条是装设谐波补偿装置来补偿谐波,这对各种谐波源都是适用的;另一条是对电力电子装置本身进行改造,使其不产生谐波,且功率因数可控制为 1,这当然只适用于作为主要谐波源的电力电子装置。

装设谐波补偿装置的传统方法就是采用 LC 调谐滤波器。这种方法既可补偿谐波,又可补偿无功功率,而且结构简单,一直被广泛使用。这种方法的主要缺点是补偿特性受电网阻抗和运行状态影响,易和系统发生并联谐振,导致谐波放大,使 LC 滤波

器过载甚至烧毁。此外，它只能补偿固定频率的谐波，补偿效果也不甚理想。尽管如此，LC滤波器当前仍是补偿谐波的最主要手段。

目前，谐波抑制的一个重要趋势是采用有源电力滤波器(Active Power Filter——APF)。有源电力滤波器也是一种电力电子装置。其基本原理是从补偿对象中检测出谐波电流，由补偿装置产生一个与该谐波电流大小相等而极性相反的补偿电流，从而使电网电流只含基波分量。这种滤波器能对频率和幅值都变化的谐波进行跟踪补偿，且补偿特性不受电网阻抗的影响，因而受到广泛的重视，并且已在日本等国获得广泛应用<sup>[9,26,27]</sup>。

有源电力滤波器的基本思想在六七十年代就已经形成<sup>[28,30]</sup>。80年代以来，由于大中功率全控型半导体器件的成熟，脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation——PWM)控制技术的进步，以及基于瞬时无功功率理论的谐波电流瞬时检测方法的提出<sup>[31~33]</sup>，有源电力滤波器才得以迅速发展<sup>[9,26]</sup>。

有源电力滤波器的变流电路可分为电压型和电流型，目前实际应用的装置中，90%以上是电压型。从与补偿对象的连接方式来看，又可分为并联型和串联型，目前运行的装置几乎都是并联型<sup>[26,27]</sup>。上述类型都可以单独使用，也可以和LC滤波器混合使用。有关内容将在第7章中介绍。

对于作为主要谐波源的电力电子装置来说，除了采用补偿装置对其谐波进行补偿外，还有一条抑制谐波的途径，就是开发新型变流器，使其不产生谐波，且功率因数为1。这种变流器被称为单位功率因数变流器(Unity Power Factor Converter)。高功率因数变流器可近似看成为单位功率因数变流器<sup>[34~38]</sup>。

大容量变流器减少谐波的主要方法是采用多重化技术，即将多个方波叠加，以消除次数较低的谐波，从而得到接近正弦波的阶梯波。重数越多，波形越接近正弦波，当然电路结构也越复杂。因此这种方法一般只用于大容量场合。多重化技术如果能与PWM技术相配合，可取得更为理想的结果。



几千瓦到几百千瓦的高功率因数整流器主要采用 PWM 整流技术。迄今为止，对 PWM 逆变器的研究已经很充分，但对 PWM 整流器的研究则较少。对于电流型 PWM 整流器，可以直接对各开关器件进行正弦 PWM 控制，使得输入电流接近正弦波且和电源电压同相位。这样，输入电流中就只含与开关频率有关的高次谐波，这些谐波频率很高，因而容易滤除。同时，也得到接近 1 的功率因数。对于电压型 PWM 整流器，需要通过电抗器与电源相连。其控制方法有直接电流控制和间接电流控制两种。直接电流控制就是设法得到与电源电压同相位、由负载电流大小决定其幅值的电流指令信号，并据此信号对 PWM 整流器进行电流跟踪控制。间接电流控制就是控制整流器的人端电压，使其为接近正弦波的 PWM 波形，并和电源电压保持合适的相位，从而使流过电抗器的输入电流波形为与电源电压同相位的正弦波。

PWM 整流器配合 PWM 逆变器可构成理想的四象限交流调速用变流器，即双 PWM 变流器<sup>[7]</sup>。这种变流器，不但输出电压、电流均为正弦波，输入电流也为正弦波，且功率因数为 1，还可实现能量的双向传送，代表了这一技术领域的发展方向。

小容量整流器，为了实现低谐波和高功率因数，通常采用二极管加 PWM 斩波的方式。这种电路通常称为功率因数校正 (Power Factor Corrector——PFC) 电路，已在开关电源中获得了广泛的应用。因为办公和家用电器中使用的开关电源数量极其庞大，因此这种方式必将对谐波污染的治理做出巨大贡献。

除上述各种高功率因数变流器外，采用矩阵式变频器，也可以使输入电流为正弦波，且功率因数接近 1。有关各种高功率因数变流器的内容将在第 8 章中叙述。

### 1.3 无功补偿

人们对有功功率的理解非常容易，而要深刻认识无功功率却并不是轻而易举的。在正弦电路中，无功功率的概念是清楚的，而在含有谐波时，至今尚无获得公认的无功功率定义。但是，对