



国际电气工程先进技术译丛



WILEY
www.wiley.com

瞬时功率理论及其 在电力调节中的应用

**Instantaneous
Power Theory and
Applications to
Power Conditioning**

(日本) Hirofumi Akagi

Edson Hirokazu Watanabe

(巴西)

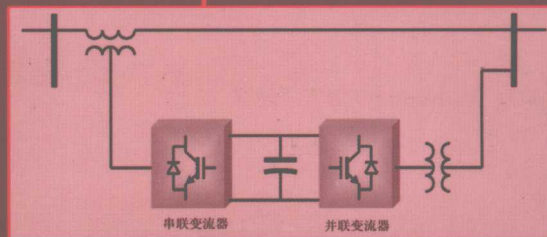
Mauricio Aredes

著

徐政译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

瞬时功率理论及其在 电力调节中的应用

Instantaneous Power Theory and Applications
to Power Conditioning

(日本) Hirofumi Akagi

(巴西) Edson Hirokazu Watanabe 著

(巴西) Mauricio Aredes

徐政 译



机械工业出版社

本书主要阐述与电力调节器密切相关的一个理论基础——瞬时功率理论,并对不同的功率定义体系进行了深入的比较和分析,指出传统的功率定义体系不能满足现代电力电子技术发展的需要。同时书中有一半章节讲述了瞬时功率理论在包括并联型、串联型和混合型有源滤波器以及统一电能质量调节器、统一潮流控制器和通用有源线路调节器等电力调节器中的应用。书中包含大量的实例,便于读者理解。本书适合于从事电力调节、电能质量和电力电子技术研究、开发、应用的技术人员和工程师,以及高等学校电气工程及其自动化专业的教师和研究生阅读。

Copyright© 2007 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

本书版权登记号:图字 01-2008-4173 号

图书在版编目(CIP)数据

瞬时功率理论及其在电力调节中的应用/(日)赤木泰文,(巴西)埃德森,(巴西)毛立赛著;徐政译. —北京:机械工业出版社,2009.5

(国际电气工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-26889-5

I. 瞬… II. ①赤…②埃…③毛…④徐… III. 输电—功率—自动控制 IV. TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 061298 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:付承桂 责任编辑:付承桂

版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:马精明 责任印制:杨 曦

北京画中画印刷厂印刷

2009 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·21 印张·407 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-26889-5

定价:68.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379764

封面无防伪标均为盗版

译者的话

由著名日本学者赤木泰文 (Hirofumi Akagi) 等人撰写的《Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning》(瞬时功率理论及其在电力调节中的应用) 一书由 IEEE Press—Wiley InterScience 出版社于 2007 年 3 月出版。

“电力调节”与“电力滤波”相比,其含义要广泛得多。电力调节并不局限于电力滤波,还包括谐波阻尼、谐波隔离、谐波终止、用于功率因数校正的无功功率控制、潮流控制、电压调节、负载平衡、降低电压闪变等内容。赤木泰文等人于 20 世纪 80 年代初期创立瞬时无功功率理论,其影响是深远的。瞬时无功功率理论改变了整个电力电子和电力调节产业,是包括有源滤波器在内的电力调节器的一个重要理论基础。目前认为该理论是现代电压源换流器 (VSC) 的两个理论支柱之一,另一个是脉宽调制理论,即 PWM 理论。我国在电力调节器领域的市场需求正在快速增长,希望本书的翻译对推进我国电力调节器的产业化进程、促进电力调节器的实际工程应用有所帮助。

本书的翻译得到了“十一五”国家科技支撑计划重大项目 2006BAA02A21 的资助。限于译者水平,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。译者联系方式:电话 0571-87952074,电子信箱 hnxuzheng@yahoo.com.cn。

徐 政

2009 年 2 月

于浙江大学求是园

原 书 前 言

“瞬时有功和无功功率”的概念最早是在 1982 年于日本提出的。自那以后，很多科学家和工程师对此概念的发展作出了重要贡献，如对其进行改进以适用于三相四线制电路，将其进行扩展以适用于多相电路，当然，还包括将其应用于电力电子装置的研究。但是，就这个主题并没有看到有专门的书籍出版，写作本书的主要目的就是为填补这个空白。瞬时功率理论，简称为“ $p-q$ 理论”，揭示了三相电路中瞬时有功和无功功率的物理意义，给出了三相电路中能量是如何从电源流向负载或在各相之间循环的清晰解释。

在本书写作的开始阶段，我们就决定对瞬时功率理论的基本概念尽量以循序渐进的教学方式进行讲述。因此，本书的结构是按如下方式安排的。第 1 章讲述与非线性负载相关的谐波问题。第 2 章讲述与电功率定义相关的背景情况，主要基于传统理论。第 3 章讲述瞬时功率理论。在这一章中，为了方便读者理解该理论，特别是有源滤波器的控制器设计理论，特意给出了大量相关材料。第 3 章的另一部分专门讲述瞬时功率定义的其他体系。其中的一个体系被称为“改进的 $p-q$ 理论”，它将原始虚功率定义扩展到具有 3 个分量的虚功率矢量。另外一个体系，被称为“ abc 理论”，则直接采用 abc 相电压和相电流来定义有功电流分量和非有功电流分量。第 3 章还阐述了这些功率定义体系的物理意义和相互之间的差别。

第 4 章专门讲述并联型有源滤波器，包括不同结构的有源滤波器。本章清楚地展示了诸如电容器和电感器等储能元件是否必需的原因，以及有源滤波器对这些储能元件理论上的依赖程度。这种对储能元件必要性的评估是瞬时功率理论的一个强项。第 5 章讲述串联型有源滤波器，包括有源和无源滤波器相结合的混合型结构。混合型结构也许能提供一种解决谐波问题的经济方案，特别是对于中压变速驱动装置。

第 6 章讲述串联和并联电力调节器的结合，包括统一电能质量调节器 (UPQC) 和属于柔性交流输电系统 (FACTS) 的统一潮流控制器 (UPFC)。最后，引出了通用有源线路调节器 (UPLC)，它是 UPQC 和 UPFC 功能的集成。

将 $p-q$ 理论开拓性地应用于电力调节的例子遍布全书，它有助于读者理解瞬时功率理论的真实本质，以及与传统理论的根本差别。

笔者们要感谢来自很多同事的不同形式的鼓励和支持。第一作者要感谢日本 Nagaoka 技术大学他的前同事 A. Nabae 教授、已故的 I. Takahashi 教授，以及

Y. Kanazawa 先生，在这所大学里， p - q 理论于 1982 年诞生，而将其应用于有源和混合型滤波器的研究激发了很多科学家和工程师对此理论和应用进行更深入的研究。

笔者们的祖国相距万里，但这不是一个严重问题，因为研究的资助机构，如 CNPq（巴西国家科学和技术发展委员会）和 JSPS（日本科学促进会），资助了笔者们到巴西或日本参加会议，当然这些会议在两个国家之一召开，从而使笔者们有机会面对面地讨论本书的细节问题，这是在互联网上不容易做到的。另外还要感谢巴西 FAPERJ 基金会的资助。

最后，特别感谢曾经与笔者们一起工作的前研究生和访问学者：S. Ogasawara、K. Fujita、T. Tanaka、S. Atoh、F. Z. Peng、Y. Tsukamoto、H. Fujita、S. Ikeda、T. Yamasaki、H. Kim、K. Wada、P. Jintakosonwit、S. Srianthumrong、Y. Tamai、R. Inzunza 和 G. Casaravilla，他们现在已在工业界或学术界工作。他们提出了很多好的想法，设计并制造了实验系统且取得实验结果，如果没有他们的热情支持，笔者们是不可能完成本书的。

H. Akagi, E. H. Watanabe 和 M. Aredes

2006 年 8 月于日本东京和巴西里约热内卢

目 录

译者的话

原书前言

第 1 章 引言	1
1.1 电功率理论的概念及其发展过程	1
1.2 p - q 理论在电力电子装置中的应用	3
1.3 电力系统中的谐波电压	4
1.4 已知和未知的谐波源负载	5
1.5 谐波电流源和谐波电压源	6
1.6 谐波补偿的基本原理	9
1.7 潮流控制的基本原理	12
参考文献	14
第 2 章 电功率的定义：背景情况	16
2.1 正弦条件下的功率定义	16
2.2 电压和电流相量与复阻抗	18
2.3 复功率与功率因数	19
2.4 非正弦条件下的功率概念——传统方法	20
2.4.1 Budeanu 的功率定义	20
2.4.2 Fryze 的功率定义	24
2.5 三相系统中的电功率	25
2.5.1 三相系统的分类	26
2.5.2 三相对称系统中的功率	28
2.5.3 三相不对称系统中的功率	30
2.6 小结	31
参考文献	31
第 3 章 瞬时功率理论	34
3.1 p - q 理论的基础	34

3.1.1	p-q 理论的历史背景	34
3.1.2	Clarke 变换	35
3.1.3	基于 Clarke 分量的三相瞬时有功功率	39
3.1.4	p-q 理论定义的瞬时功率	40
3.2	三相三线制系统中的 p-q 理论	40
3.2.1	与传统功率理论的比较	44
3.2.2	将 p-q 理论用于并联电流补偿	49
3.2.3	对偶 p-q 理论	58
3.3	三相四线制系统中的 p-q 理论	60
3.3.1	三相正弦电压源中的零序功率	61
3.3.2	存在负序分量时	62
3.3.3	电压和电流中包含不对称和畸变时的一般性情况	63
3.3.4	瞬时实功率、虚功率和零序功率的物理意义	67
3.3.5	在 p-q 理论中避免 Clarke 变换	68
3.3.6	改进的 p-q 理论	70
3.4	瞬时 abc 理论	74
3.4.1	采用最小化方法计算有功电流和非有功电流	75
3.4.2	广义 Fryze 电流最小化方法	80
3.5	p-q 理论与 abc 理论的比较	83
3.5.1	选择需要补偿的功率分量	86
3.6	小结	88
	参考文献	89
第 4 章	并联型有源滤波器	93
4.1	并联型有源滤波器的一般性描述	94
4.1.1	用于并联型有源滤波器的 PWM 变流器	95
4.1.2	有源滤波器的控制器	96
4.2	三相三线并联型有源滤波器	99
4.2.1	用于功率恒定补偿的有源滤波器	100
4.2.2	用于电流波形正弦化控制的有源滤波器	116
4.2.3	用于电流最小化的有源滤波器	126
4.2.4	用于谐波阻尼的有源滤波器	130
4.2.5	数字控制器	149
4.3	三相四线并联型有源滤波器	158
4.3.1	用于三相四线制系统的变流器拓扑	158

4.3.2 动态滞环电流控制器	159
4.3.3 有源滤波器的直流电压调节器	161
4.3.4 最优功率流条件	162
4.3.5 瞬时功率恒定控制策略	164
4.3.6 电流波形正弦化控制策略	166
4.3.7 性能分析和参数优化	169
4.4 并联型选择谐波补偿	180
4.5 小结	187
参考文献	188
第5章 混合型与串联型有源滤波器	192
5.1 基本串联型有源滤波器	192
5.2 串联型有源滤波器与并联型无源滤波器的结合	194
5.2.1 一个实验系统的例子	196
5.2.2 关于混合型滤波器的几点评述	205
5.3 串联型有源滤波器与双串联二极管整流器的结合	206
5.3.1 第1代控制电路	209
5.3.2 第2代控制电路	212
5.3.3 稳定性分析和特性比较	212
5.3.4 开关纹波滤波器的设计	215
5.3.5 实验结果	218
5.4 纯有源滤波器与混合型有源滤波器的比较	220
5.4.1 低压无变压器的混合型有源滤波器	220
5.4.2 低压无变压器的并联型纯有源滤波器	223
5.4.3 仿真结果的比较	224
5.5 结论	226
参考文献	227
第6章 串联与并联相结合的电力调节器	229
6.1 统一潮流控制器	230
6.1.1 FACTS 和 UPFC 原理	231
6.1.2 UPFC 的一种设计方法	237
6.1.3 采用并联多脉波变流器的 UPFC 方案	243
6.2 统一电能质量调节器	253
6.2.1 UPQC 的一般性描述	254

6.2.2 三相四线 UPQC	256
6.2.3 UPQC 与无源滤波器结合 (混合型 UPQC)	283
6.3 通用有源线路调节器	298
6.3.1 UPLC 的一般性描述	298
6.3.2 UPLC 的控制器	302
6.3.3 UPLC 的性能	309
6.3.4 一般性问题	322
6.4 小结	322
参考文献	323

第1章 引言

瞬时有功和无功功率理论，即所谓的“ $p-q$ 理论”，是由 Akagi、Kanazawa 和 Nabae 于 1983 年提出的。自那以后，这个理论由笔者以及其他的研究者进行了扩展。本书首次完完整整地讲述这个理论，并与其他瞬时功率定义体系进行比较。 $p-q$ 理论的有用性在后续的章节中将会得到验证，这些章节主要讨论该理论在补偿器的控制器中的应用，本书将这些补偿器统称为有源电力线路调节器。

本书所使用的术语“电力调节 (power conditioning)”与术语“电力滤波”相比，其含义要广泛得多。换句话说，电力调节并不局限于电力滤波，还包括谐波阻尼、谐波隔离、谐波终止、用于功率因数校正的无功功率控制、潮流控制、电压调节、负载平衡、降低电压闪变以及其他的组合。有源电力线路调节器是以电力电子学的前沿技术为基础的，它包括了功率变换电路、功率半导体器件、模拟和数字信号处理、电压和电流传感器以及控制理论等。

下面将简短描述电功率的概念及其发展过程。然后重点说明为了处理非正弦条件下的电气系统，需要建立一个相容的功率定义体系。本章还对交流系统中的谐波污染问题进行了分类，列出了主要的谐波源负载，另外还介绍了谐波补偿的基本原理。最后，本章还描述了潮流控制的理论基础。所有这些主题都将在本书的后续章节中进行更深入的讨论。

1.1 电功率理论的概念及其发展过程

19 世纪末，交流输配电系统能够发展起来的一个很重要的原因，是采用恒定频率、正弦电压的发电机。频率恒定的正弦电压使得设计变压器和输电线路，包括极长距离的输电线路，变得容易。如果电压不是正弦波形，那么在变压器、发电机和输电线路设计时就会出现很复杂的问题。显然，这些复杂问题会阻碍目前已达到的“人类社会总体电气化”进程。今天，世界上不具有以“恒定”电压和频率为特征的交流电力系统的社区已非常少。

随着交流电压源的出现，如果负载电流与电源电压同相位，那么电力网络可以做得更加高效。因此，就提出了无功功率的概念，用来描述与电源电压不同相位的负载电流所产生的电功率的量。这个无功功率在电网频率一个周期内的平均值为零。换句话说，这个功率对从电源到负载的能量传递不作贡献。与此同时，还提出了视在功率和功率因数的概念。视在功率描述如果电压与电流是正弦波形

并完全同相位时, 有多大的功率可以被传递或消耗。功率因数给出了一个电路中某点实际传递或消耗的平均功率与视在功率之间的关系。自然地, 功率因数越高, 电路的利用率就越高。这样, 功率因数不但在电气上有效, 而且在经济上也有效。因此, 电力公司对功率因数已经指定了最低限值。运行在较低功率因数的负载因没有高效地使用电路, 需要支付额外的费用。

很长时间以来, 与电气设备相关的一个主要问题是功率因数校正, 它可以采用电容器组来实现, 在某些情况下, 需要采用电抗器。在任何情况下, 作为线性电路的负载从正弦电压源汲取的是正弦电流。因此, 以有功功率、无功功率和视在功率定义为基础的传统功率理论, 用于设计和分析电力系统是足够的。尽管如此, 20 世纪 20 年代还是发表了一些论文^[1,2], 证明无功功率和视在功率的传统概念在非正弦条件下将失去其有用性。然后, 由 Budeanu^[3,4] 在 1927 年和 Fryze^[5] 在 1932 年, 提出了非正弦条件下功率定义的两重要方法。Fryze 在时域中定义功率, 而 Budeanu 在频域中定义功率。但那时, 非线性负载可以忽略不计, 对此问题在很长时间内并没有引起注意。

自从 20 世纪 60 年代后期出现电力电子学后, 汲取非正弦电流的非线性负载大量增加。在有些情况下, 它们在总负载中占到很高的比例。今天, 找到一个不存在诸如传统白炽灯等线性负载的房子是很平常的事。在大多数情况下, 这些灯已被电子控制的荧光灯所替代。在工业应用场合, 稳态下可以认为是线性负载的异步电动机, 现在也安装了整流器和逆变器用于实现变速控制的目的。异步电动机与其驱动器一起不再是一个线性负载。不幸的是, 在非正弦电流情况下, 前面的功率定义是有问题的, 在有些情况下会导致错误的解释。第 2 章对非正弦条件下的一些理论进行了回顾。

正如前面所指出的, 与非线性负载相关的问题随着电力电子装置的扩散已经大大增加。特性与非线性负载一样的现代装置从电网汲取相当数量的谐波电流。因此, 在有些情况下, 电力系统必须在非正弦条件下进行分析。这使得建立一个在暂态和非正弦条件下都成立的相容的功率定义体系成为必须。

由 Budeanu^[3,4] 和 Fryze^[5] 提出的功率理论其基本关注点在于平均功率和电压与电流的方均根值 (有效值) 计算。电力电子技术的发展对功率理论提出了新的边界条件。准确地说, 新的边界条件不是来自于电力电子工程师的研究, 而是来自于使用半导体器件的功率变流器的扩散, 这些半导体器件包括二极管、晶闸管、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)、门极关断 (GTO) 晶闸管等。虽然这些功率变流器在控制其电压或电流时具有快速的响应特性, 但它们会从电网汲取无功功率以及谐波电流。这清楚地表明, 以平均功率或电压和电流有效值为基础的传统功率理论不适合用于分析和设计电力变流器和电力网络。这个问题在对用于无功功率和谐波补偿的有源滤波器进行全面的分析和设计时, 变得越来越严重和清晰。

从 20 世纪 60 年代末到 70 年代初, Erlicki 和 Emanuel-Eigeles^[6]、Sasaki 和

Machida^[7], 以及 Fukao、Iida 和 Miyairi^[8] 发表了他们开创性的论文, 提出了可以认为是受控无功功率补偿的基本原理。例如, Erlicki 和 Emanuel-Eigeles^[6] 提出了一些诸如“对畸变功率进行补偿至今仍然是未知的。……”那样的基本想法。他们还确认, “一个非线性电阻其行为就像一个无功发生器, 但没有储能元件”, 并提出了有源功率因数控制的最早方法。Fukao、Iida 和 Miyairi^[8] 认为, “通过与负载并联连接一个无功电源, 并且控制该电源使其向负载供给无功功率, 电网可以只向负载提供有功功率”。这样, 理想的功率输送就成为可能。

Gyugyi 和 Pelly^[9] 提出了无功功率可以通过无储能元件且自然换相的周波变流器进行补偿的想法, 并根据物理的观点对此想法进行解释。1976 年, Harashima、Inaba 和 Tsuboi^[10] 针对单相电路提出, 也许是第一次提出术语“瞬时无功功率”。同年, Gyugyi 和 Strycula^[11] 第一次使用了术语“有源交流电力滤波器”。几年以后, 在 1981 年, Takahashi、Fujiwara 和 Nabae 发表了两篇论文^[12,13], 预示了瞬时无功理论即“p-q 理论”的诞生。事实上, 他们所推导的公式可以认为是 p-q 理论的一个子集, 而本书的主要内容就是 p-q 理论。但是, 他们没有解释在该子集中所引入的变量的物理意义。

p-q 理论的第一个版本是 1982 年在日本一个本地会议上用日文发表的^[14], 其后在日本电机工程学会的会刊上发表^[15]。稍后, 1983 年, 在一个国际会议上用英文发表了一篇论文^[16], 该文证明了没有储能元件也能对瞬时无功功率进行补偿。然后, 1984 年, 一篇包括实验验证的更加完整的论文发表在 IEEE 工业应用学会的会刊上^[17]。

p-q 理论在时域中定义了一整套瞬时功率。因为对电压和电流的特性没有施加任何限制, 它适用于有中性线或无中性线的三相系统以及一般性的电压和电流波形。这样, 它不但在稳态下成立, 而且在暂态过程中也成立。与其他传统的功率理论将三相电路处理成三个单相电路相反, p-q 理论将整个三相系统作为一个整体同时处理。因此, 该理论总是将三相系统统一考虑, 而不是将它看作是三个单相电路之和或者叠加。p-q 理论是采用 $\alpha\beta 0$ 变换来定义的, $\alpha\beta 0$ 变换又称为 Clarke 变换^[18], 它是一个实数矩阵, 将三相电压和电流变换到 $\alpha\beta 0$ 静止坐标系中。正如后面将会看到的, p-q 理论为基于电力电子器件的电力调节器的控制策略设计和控制器实现奠定了非常高效和灵活的基础。

在时域中对功率进行定义还有其他方法。第 3 章专门讨论三相电路中功率的时域分析法, 并主要介绍 p-q 理论。

1.2 p-q 理论在电力电子装置中的应用

非线性负载的扩散激起了对新的功率理论进行研究的兴趣, 从而导致了 p-q

理论的产生。这个理论可用来设计电力电子装置，特别是那些用于无功补偿的装置。与电力系统中谐波污染相关的很多问题已经研究和讨论了很长时间，这些问题罗列如下：

(1) 变压器和电动机的过热。电压或电流中的谐波分量在变压器和电动机的磁心中引起高频磁通，这样就产生高的损耗，从而导致这些电气设备过热。为了克服这个问题，将变压器或电动机的容量放大 5% ~ 10% 是很平常的事^[19]。

(2) 用于功率因数校正的电容器过热。如果电网电抗与功率因数校正电容器构成的谐振频率与某个非线性负载产生的谐波电流频率相同，电容器中将会出现过电流。这可能会使它过热，有可能导致损坏。

(3) 电压波形畸变。谐波电流可能会引起电压波形畸变，从而干扰其他电子设备的运行。当采用整流器时这是一件常见的事情。整流器电流使电压波形畸变，出现凹口，从而改变电压的过零点时刻。这会使整流器本身的控制电路紊乱，也会使其他设备的控制电路紊乱。

(4) 电压闪变。在某些情况下，由非线性负载产生的谐波频谱具有低于电网频率的频率分量。这些不合需要的频率分量，特别是 8 ~ 30Hz 频率范围内的分量，会在白炽灯中引起闪变效应，使人眼会产生非常不舒服的感觉。电弧炉是造成此类问题的一个主要根源。

(5) 干扰通信系统。非线性负载产生的谐波电流会对诸如电话、无线电、电视等通信系统产生干扰。

过去，这些问题是孤立的并且很少发生。现在，随着电网中非线性负载数量的增加，它们已越来越常见。另一方面，对高效率和高可靠性系统的需求已迫使研究者寻找解决这些问题的方案。在很多情况下，谐波污染是不能容忍的。

正如第 3 章将会证明的，对瞬时实功率和瞬时虚功率进行定义的 $p-q$ 理论是一个灵活的工具，它不但可用于谐波补偿，而且可用于无功功率补偿。举例来说，如果熟悉 $p-q$ 理论，那么就能更好地理解本章参考文献 [20] 所提出的柔性交流输电系统 (FACTS) 装置。

上述的所有问题激励了笔者写作本书，它将对消除电力系统的谐波作出贡献。此外，本书还将给出一个 $p-q$ 理论有意义的应用例子，即用于输电线路的潮流控制。 $p-q$ 理论也可用于控制接在电网上的变流器，例如用于太阳能系统的变流器^[21]，并可扩展用于其他分布式发电系统，例如风力发电系统和燃料电池。

1.3 电力系统中的谐波电压

表 1-1 和表 1-2 展示了日本某典型电力系统的总谐波畸变率 (THD) 和主导次谐波电压的最大值和最小值，该数据是 2001 年 10 月实测得到的^[22]。高压输

电系统中的单次谐波电压及总谐波畸变率（THD）通常比 6.6kV 配电系统的低。主要原因是高压输电系统的扩展和互连使其短路容量提高，系统变得很强。而对于配电系统，在一个受测试的商业区中，其 5 次谐波电压最大值已超出日本标准规定的允许水平 3%，而最大的 THD 值勉强低于允许水平 5%。

表 1-1 高压输电系统中的 5 次谐波电压及电压 THD 值

	187kV 以上		22 ~ 154kV	
	THD	5 次谐波	THD	5 次谐波
最大值	2.8%	2.8%	3.3%	3.2%
最小值	1.1%	1.0%	1.4%	1.3%

表 1-2 中压配电系统中 5 次谐波电压及电压 THD 值

	6kV			
	居 民 区		商 业 区	
	THD	5 次谐波	THD	5 次谐波
最大值	3.5%	3.4%	4.6%	4.3%
最小值	3.0%	2.9%	2.1%	1.2%

根据本章参考文献 [23]，在日本的中心城区 6.6kV 配电系统中，晚上轻载条件下 5 次谐波电压最大值超过 7%。该文还指出了另一个重要现象，晚上轻载条件下，5 次谐波电压在变电站变压器的二次侧 6.6kV 母线上是增加的，而在变压器的一次侧 77kV 母线上是下降的。这些基于实测的结果表明，晚上 6.6kV 母线上 5 次谐波电压的增加是由于“谐波扩散”引起的，而安装在配电系统中的功率因数校正并联电容器与线路电感之间的串联或并联谐振，则是造成这种谐波扩散的原因。上述现象意味着不但谐波补偿，而且谐波阻尼，都是解决配电系统谐波污染的可行且有效的方法。因此，电力公司应当主动抑制谐波在配电系统中的扩散。独立用户和末端用户的责任是将其自身用电设备所产生的谐波电流控制在指定的限值之内。本书将对谐波消除和谐波阻尼这两个问题进行透彻的讨论和分析。

1.4 已知和未知的谐波源负载

从三相对称正弦电源中汲取非正弦电流的非线性负载可分为已知的和未知的两种。大功率的二极管或晶闸管整流器、周波变流器和电弧炉等是典型的已知谐波源负载。在很多情况下，电力公司能够确认大容量用户安装在配电系统中的独立非线性负载，每个这样的负载都会产生大量的谐波电流。另外，电力公司能够确定在配电系统中安装了谐波源负载的大容量用户的公共连接点（PCC），还能够确定一个独立用户注入电网的谐波电流的数量。

一个“单独”的低功率二极管整流器所产生的谐波电流与系统的总电流相比，可以忽略不计。但是，多个低功率二极管整流器可以向配电系统注入一个相当大的谐波电流。电气设备中作为电网接口的二极管整流器是典型的未知谐波源负载。

到目前为止，与已知谐波源负载相比，对未知谐波源负载关注较少。现在使用的谐波标准或条例，例如 IEEE 519—1992，要求将电压和电流的谐波水平保持在受控状态，而惩罚是以自愿为基础的。这些标准或条例的最终目标是在电力系统和装置设计两方面促进更好惯例的采用，以使社会成本最低。

表 1-3 展示了谐波污染与空气污染在已知源和未知源方面的相似性。汽车工业中研究人员和工程师为遵守 1970 年通过的洁净空气修正案所作出的努力，导致汽车排放中所包含的 CO、HC 和 NO_x 被成功地抑制。其结果是，20 世纪 90 年代与 70 年代初期相比，以汽油作燃油的小轿车的废气排放量降低了 90%。此外，当前技术已使以汽油作燃油的小轿车的废气排放量得到了更大的降低。有意义的是，伴随汽车扩散而发展的汽车工业，可以吸收为减少燃油汽车有害物质排放而增加的成本^[24]。

表 1-3 谐波污染和空气污染的相似性比较

源	谐波污染	空气污染
未知源	电视机和个人计算机 基于逆变器的家用电器，例如变速热泵和空调器等 电机变速驱动装置	汽油汽车 柴油汽车
已知源	大容量二极管/晶闸管整流器 周波变流器 电弧炉	化工厂 燃油或燃煤发电厂

谐波的标准或条例在克服“谐波污染”方面是有效的。用户会为由电力电子技术所带来的高性能、高效率，以及节能、可靠和紧凑而支付成本；但是，他们不愿意支付为解决由电力电子装置造成的谐波污染而产生的成本，除非实施相关的标准或条例。可以期望，通过电力电子学研究人员和工程师的努力，吸收因解决谐波污染而增加的成本是可能的。

1.5 谐波电流源和谐波电压源

在大多数情况下，从实用的观点来看，谐波源负载要么可用电流源来表示，要么可用电压源来表示。

图 1-1a 展示了一个带感性负载的三相二极管整流器。注意，一个直流电感器直接串联接在二极管整流器的直流侧。这里， L_{ac} 是公共连接点（PCC）下游的交流电感器。在二极管整流器的交流侧可以接这样一个电感器，也可以安装一

个变压器以达到匹配电压和隔离的作用。注意在图 1-1a 中这个变压器没有画出。另一方面, PCC 上游交流系统的简化等效电感用 L_s 来表示。大多数情况下, L_s 的值比 L_{ac} 的值小得多。换句话说, PCC 上游的短路容量比 PCC 下游的短路容量大得多, 因而 L_s 非常小, 可以忽略不计。

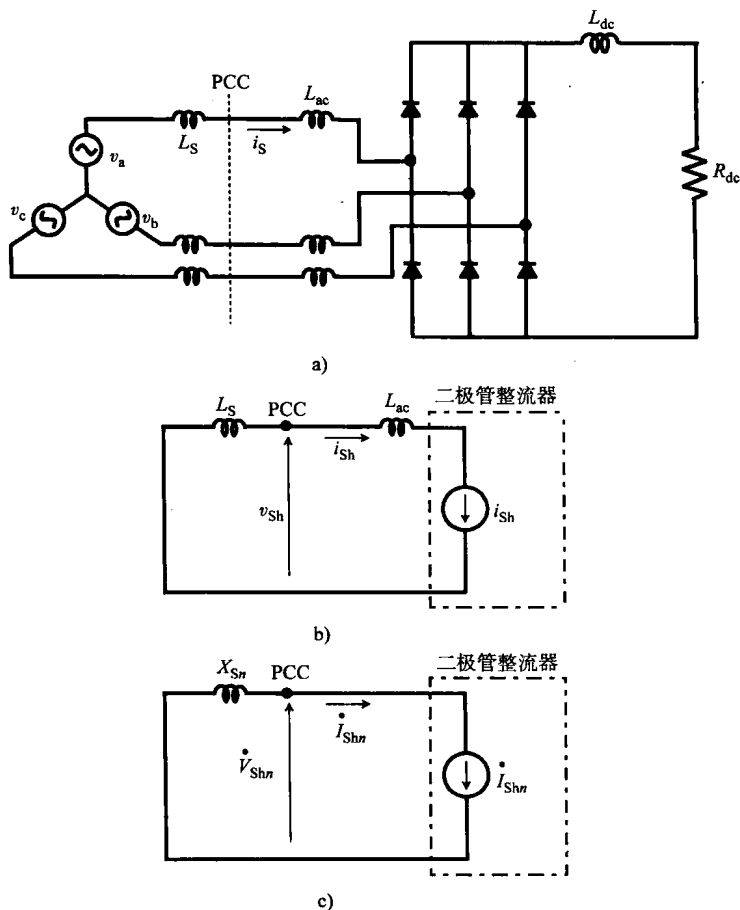


图 1-1 一个带感性负载的三相二极管整流器

a) 主电路 b) 谐波电压和电流的分相等效电路 c) 简化电路

由于在很多情况下 L_{dc} 的电感值比 L_{ac} 的电感值大, 因而 i_{sh} 的波形与 L_{ac} 无关。因此如果我们的关注点是谐波电压和谐波电流, 就可以将整流器作为一个谐波电流源来处理, 如图 1-1b 所示。严格地说, 只要 L_{ac} 不等于零, 就存在所谓的“电流重叠效应”, 该电流波形会受到交流电感 L_{ac} 的轻微影响。注意, 系统电感 L_s 是在 PCC 处产生谐波电压的基本因素, 而交流电感 L_{ac} 对此没有作用。

图 1-1c 展示了根据图 1-1b 而导出的简化电路, 其中, I_{shn} 不是瞬时值电