



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

电力系统谐波

HARMONICS AND
POWER SYSTEMS

(美) Francisco C. De La Rosa 著
赵 琰 孙秋野 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

电力系统谐波

(美) Francisco C. De La Rosa 著

赵琰 孙秋野 译



机械工业出版社

本书全面地讨论了电网中谐波电流的产生、传播和控制等有关方面问题。作者巧妙地结合了自身以往的工作实例,并利用当前的工业软件工具来阐述相关的概念和公式,概述了用以描述和分析谐波电流的有关原理和公式以及谐波环境下功率损耗的基本理论,并对无源滤波技术、谐波传播分析及其他滤波技术等方面的内容进行了详尽的阐述。此外,本书还介绍了目前广泛应用的有关抑制谐波畸变等级的最重要的工业标准。

本书可作为电力行业和工矿企业用电等相关工程技术人员的学习和参考用书,也可作为相关专业高校师生的教材。

Harmonics and Power Systems/by Francisco C. De La Rosa ISBN: 978 - 0 - 8493 - 3016

- 2

Copyright © 2006 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版,并经其授权翻译出版,版权所有,侵权必究。

本书中文简体翻译版授权机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis Sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

本书版权登记号:图字 01 - 2007 - 3984。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统谐波/(美)德拉罗萨(Rosa, F. C.)著;赵琰,孙秋野译.
—北京:机械工业出版社,2009.8
(国际电气工程先进技术译丛)
ISBN 978 - 7 - 111 - 27850 - 4

I. 电… II. ①德…②赵…③孙… III. 电力系统-谐波 IV. TM714

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 127187 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:张俊红 责任编辑:林 楦

版式设计:张世琴 责任校对:魏俊云

封面设计:马精明 责任印制:乔 宇

北京京丰印刷厂印刷

2009 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·10 印张·190 千字

0 001 — 3 000 册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 27850 - 4

定价:48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

译 者 的 话

近年来,随着工业中非线性负载的不断増加,电力系统中的谐波畸变问题日趋严重。电网中的电压或电流信号波形畸变将产生变压器过热、中性线过载、熔断器和电子继电器的误动作以及电话干扰等诸多问题。国际上电气工程领域内的两大权威学术性组织——IEEE(美国电气电子工程师学会)和IEC(国际电工委员会)分别起草了抑制电力系统谐波的相关标准,并多次进行修订。由此可见,电力系统中的谐波抑制问题已经引起了研究者们的高度重视。

De La Rosa 博士先后在美国、加拿大和墨西哥等国的电力、石油和钢铁等工业领域工作二十余年,长期致力于电力系统中谐波问题的研究。2006年,De La Rosa 博士所著的《电力系统谐波》一书,由美国 Taylor & Francis 集团的 CRC 出版社出版。该书详细介绍了电力系统中谐波的产生、传播、度量及抑制方法等方面的内容,重点阐述了包括无源滤波技术在内的多种谐波治理方法。书中列举了作者在工作实践中所积累的许多实例,并采用了当前主流的专业软件工具来进行相关的分析和研究。我们相信,将这本书翻译出来,一定会对我国的相关研究人员有所帮助。

在本书的翻译过程中,东北大学电气自动化研究所刘秀翀、闫士杰、褚恩辉老师给予了大力支持和帮助,硕士研究生盛科、傅振宇、辛红、孙羽、邢颖、董晶晶、孙艳、邱越、董艳博、李钟旭等在参与部分章节翻译和整理书稿过程中付出了大量辛苦,在此一并表示由衷的感谢。

由于时间仓促,加之译者水平有限,书中难免存在错误或不足之处,恳请广大读者不吝赐教,予以斧正。

译 者

2009年10月

原 书 前 言

本书全面地讨论了电网中谐波电流的产生、传播和控制等问题。如今，很多实际应用都需要大量的从交流电变换而来的其他形式的电能。正因为如此，谐波畸变已成为电力工业中不得不面对的一个最重要的问题，也成为致力于制定波形畸变限制值的标准和推荐值的技术工作组所热衷的话题。电力设备制造商以及整个电力行业都在试图找到设计和运行电力设备的合适条件，即在该条件下，所设计的电力设备能够在谐波环境下可靠运行，同时，该电力设备运行时所引起的谐波畸变等级应在推荐值之内。

本书的主要内容涵盖了谐波理论的诸多重要方面知识，我相信读者能够通过本书更好地理解谐波问题。本书的第1章简要地阐述谐波的定义，并给出了非正弦条件下多种电气参数的解析表达式。然后，第2章介绍引起电力工业广泛关注的谐波问题的起因。

到目前为止，工业设备是谐波电流的主要来源。大多数工业生产过程都包括各种形式的电力变换过程，以便大型直流电动机或变频装置能够正常运行。另外，大型电炉、电焊机或蓄电池充电设备是谐波电流的另一主要来源。由于需要整流电提供能源的个人计算机和娱乐设施的广泛普及，谐波电流的来源已经从工业设施蔓延到商业设施和居民设施。此外，诸如商业照明中的电子镇流器及在电源中断情况下提供电压的不间断电源设备等节能设备的应用使得谐波问题更为严重。

在这种背景下，标准组织在制定谐波等级标准化规程的过程中，试图使之更加符合现实情况，同时又能保证供电端和用户端的设备正常运行。本书的第3章介绍控制谐波畸变等级的最重要的和广泛应用的行业标准。

很多专业文献详尽地阐述了谐波带来的各种效应。从加速设备的老化到高灵敏工序或保护装置的异常运行都可能由谐波引起的。本书的第4章总结谐波效应在不同情况下给居民用户、商业用户及工业用户带来的各种不利影响，并详细地介绍了谐波对电机的影响，即谐波将影响电机中的脉动转矩从而导致电机产生过于激烈的轴向振动。

由于谐波源广泛分布于电力网络，因此，对电力用户和电力供应商之间的连接部分的谐波畸变进行监测已经变得至关重要。此外，对谐波畸变等级进行长期的监测和建模也有助于掌握工业负载的动态特性。第5章汇总对给定设备产生的谐波等级进行建模时应该考虑的相关方面问题和行业建议。

无源滤波技术是抑制谐波最有效的方法之一。第6章详细地阐述单调谐滤波器和高通滤波器等类型的无源滤波器的工作原理和设计方法,并给出一些包含交流电源数据以及其他重要元件(特别是谐波产生源)的参数在内的简单方程式。滤波元件的确定取决于有关设备运行性能的行业标准。本章最后给出一些实例用来说明不同滤波方法的应用。

谐波滤波器的成本是比较高的,因此谐波滤波器主要在工业设施中应用。除此之外,还可以应用许多其他的方法来缓解谐波畸变问题。书中第7章介绍这些减少谐波畸变影响的方法,包括提供更加严格的交流电源,利用多脉波的功率变流器、串联电抗器或对负载进行重新配置等。

本书第8章介绍在配电网中谐波电流传输的研究中起到关键作用的一些相关元件。这些元件包括交流源、输电线路、电缆、变压器、谐波滤波器、电容器组等。在处理大规模电力网络中谐波电流的传输这个问题的过程中,非常重要的一点是要充分认识到电力网络所能达到的复杂程度。因此,书中给出的一些例子说明利用专门的分析工具来分析带有多谐波源的复杂电力网络所带来的便捷性。谐波电流在电力网络中的传输可能会影响到邻近的用户,甚至会影响到变电站的变压器,书中对这一问题也进行了讨论。

最后,本书的第9章介绍由于谐波波形畸变所引起的变压器和旋转电机等电气设备功率损耗的关键因素。

书中的多数实例都是来源于作者在电力行业的实际工作经历。

作者希望这本书能够有助于理解电力网络中的严重谐波畸变这一复杂现象,并解决当中的一些实际问题。

Francisco C. De La Rosa

目 录

译者的话

原书前言

第 1 章 谐波畸变的基本原理及电力系统的电能质量指标	1
1.1 引言	1
1.2 谐波基本理论	2
1.3 线性和非线性负载	3
1.3.1 线性负载	3
1.3.2 非线性负载	5
1.4 傅里叶级数	8
1.4.1 正交函数	10
1.4.2 傅里叶系数	11
1.4.3 偶函数	11
1.4.4 奇函数	12
1.4.5 波形对称的影响	12
1.4.6 利用傅里叶级数计算谐波的例子	12
1.5 谐波畸变下的电能质量指标	14
1.5.1 总谐波畸变率	14
1.5.2 总负荷畸变率	14
1.5.3 电压干扰因数 (TIF)	15
1.5.4 C 信息指标	15
1.5.5 $I \cdot T$ 与 $V \cdot T$	15
1.5.6 K 因数	15
1.5.7 位移、畸变和总功率因数	16
1.5.8 电压相关参数	16
1.6 非正弦条件下的电量	17
1.6.1 瞬时电压和瞬时电流	17
1.6.2 瞬时功率	17
1.6.3 有效值	17
1.6.4 有功功率	17
1.6.5 无功功率	17
1.6.6 视在功率	18

1.6.7 三相平衡系统中的电压	18
1.6.8 三相不平衡系统中的电压	19
参考文献	20
第2章 谐波源	21
2.1 引言	21
2.2 谐波畸变的特征	22
2.3 传统谐波源	25
2.3.1 变压器	26
2.3.2 旋转电机	30
2.3.3 功率变流器	31
2.3.4 荧光灯	42
2.3.5 电炉	43
2.4 未来的谐波源	44
参考文献	44
第3章 谐波等级的标准化	46
3.1 引言	46
3.2 谐波畸变限制值	47
3.2.1 符合 IEEE-519: 1992 标准	48
3.2.2 符合 IEC 谐波畸变限制值	51
参考文献	53
第4章 谐波对配电系统的影响	54
4.1 引言	54
4.2 变压器的热效应	54
4.2.1 中性线过载	55
4.3 电容器组的混合效应	55
4.3.1 过载	55
4.3.2 谐振条件	56
4.3.3 熔断器误动	57
4.4 电子继电器的异常动作	57
4.5 照明设备	58
4.6 电话干扰	58
4.7 旋转电机的热效应	58
4.8 旋转电机中的脉动转矩	59
4.9 固态设备的异常动作	64
4.10 谐波环境下电缆和设备运行中应考虑的问题	64

VIII 电力系统谐波

4.10.1 发电机	64
4.10.2 导线	65
4.10.3 能量计量设备	66
参考文献	66
第5章 谐波测量	67
5.1 引言	67
5.2 谐波测量的相关问题	68
5.2.1 谐波测量原因	68
5.2.2 谐波测量方法	68
5.2.3 谐波测量重点	69
5.2.4 谐波测量位置	69
5.2.5 谐波测量持续时间	70
5.3 测量步骤	71
5.3.1 设备	71
5.3.2 互感器	71
5.4 其他问题	72
参考文献	73
第6章 谐波滤波技术	74
6.1 引言	74
6.2 无源滤波器设计概述	74
6.3 单调谐滤波器	75
6.3.1 单调谐滤波器设计方程	77
6.3.2 并联谐振点	77
6.3.3 品质因数	80
6.3.4 滤波元件的推荐运行值	82
6.3.5 不平衡检测	83
6.3.6 滤波器的选择和性能评估	83
6.4 带通滤波器	84
6.5 无源滤波器设计过程中需要考虑的相关问题	86
6.6 调谐滤波器的设计方法	87
6.6.1 选择电容器组将功率因数提高到0.9~0.95	87
6.6.2 在串联电容器中选择合适的调谐电抗器	87
6.6.3 根据IEEE-18标准确定电容器的运行参数	87
6.6.4 检测谐振条件	88
6.7 例1: 5次谐波滤波器的功率因数电容器组整定	88
6.8 例2: 单调谐滤波器的数字仿真	91

6.9 例3:利用高通滤波器控制发电机终端的谐振条件	98
6.10 例4:利用德克萨斯大学的 HASIP 程序软件来比较几个谐波抑制方案	101
参考文献	106
第7章 降低谐波畸变限制值的其他方法	107
7.1 引言	107
7.2 网络拓扑重构	108
7.3 供电模式刚性增长	108
7.4 利用多脉波变流器消除谐波	109
7.5 作为谐波抑制元件的串联电抗器	111
7.6 相位平衡	112
7.6.1 相电压的不平衡	112
7.6.2 相电压不平衡的影响	112
参考文献	113
第8章 谐波分析	114
8.1 引言	114
8.2 电源频率与谐波电流传播	114
8.3 谐波源的表示方法	119
8.3.1 干扰的时间/频率特性	119
8.3.2 谐振条件	122
8.3.3 瞬时脉冲型谐波	123
8.4 谐波传播	123
8.5 谐波电流通量	124
8.5.1 建模方法	125
8.5.2 单相建模与三相建模	126
8.5.3 架空线和电缆模型	126
8.5.4 谐波分析的变压器模型	127
8.5.5 功率因数校正电容器	128
8.6 交流系统与负载参数的相互关系	128
8.6.1 配电系统中的一些细节问题	129
8.6.2 工业设施中的一些细节问题	130
8.7 分析方法	131
8.7.1 简化计算	131
8.7.2 利用商业软件进行仿真	132
8.8 谐波分析的例子	133
8.8.1 变压器并网过程中产生的谐波电流	133
8.8.2 A 相接地故障	135

参考文献.....	138
第9章 谐波环境下功率损耗的基本理论	139
9.1 引言	139
9.2 谐波引起的功率损耗的含义	139
9.3 电力设备与配电系统中的功率损耗	141
9.4 设备中的谐波损耗	141
9.4.1 电阻元件	141
9.4.2 变压器	143
9.5 确定 K 因数的例子	144
9.6 旋转电机	145
参考文献.....	147

第1章 谐波畸变的基本原理及电力系统的电能质量指标

1.1 引言

理想情况下，电力供应应该总是为每一个客户端提供完美的正弦电压信号。然而，由于一些原因，供电企业往往很难保持这种理想的状态，实际的电压和电流波形总是与标准的正弦波存在偏差，即存在所谓的波形畸变。我们把这种波形畸变称为谐波畸变。

谐波畸变存在于电力系统已经很多年了。目前，谐波畸变已成为电力行业中能源利用领域的技术人员所关注的主要问题。在一次电力系统中，谐波畸变主要是由变压器饱和、工业电弧炉及其他诸如大型电焊机等电弧设备引起的。谐波畸变会对电机造成不良影响，还可能产生电话干扰或引起过电压情况的发生，从而增加功率因数校正电容器故障的风险。

在过去，谐波还不是一个严重的问题，这是由于当时电力设备的设计还比较保守，而且在配电变压器中普遍采用的是中性线接地的星形联结方法。

工业中非线性负载的大量增加加重了配电网络中谐波畸变问题的严重性。最常见的非线性设备是广泛应用于钢铁、造纸及纺织工业中的静态功率变流器。静态功率变流器在多功能电机调速控制、电气运输系统及家用电器中也有所应用。

目前，电力公司为改善功率因数而在工业对象中大量地使用电容器组，这无疑加重了配电网络中的谐波畸变程度。由此产生的电容和系统的电感组成的回路在一定条件下（即外加信号频率等于回路固有并联谐振频率）产生并联谐振。这种情况会引起大振荡电流并加重绝缘的电压。这些问题给工业界和电力行业的工程师们带来了严峻的挑战，他们需要查明并校正过于严重的谐波畸变。而且，谐波畸变随着灵敏电子设备的不断投入使用而变得日益严重。

毫无疑问，在电力公司和工业生产的从规划到设计阶段中，谐波研究是在非线性负载不断增加的前提下保证电网和设备可靠运行并预测潜在问题的有效手段。

1.2 谐波基本理论

“谐波”一词起源于声学领域，指的是弦或空气柱以一定的频率振动，这个频率是基频的整数倍。交流电力系统中谐波分量的定义为系统中畸变周期波形的正弦分量，它们的频率是系统基波频率的整数倍。

电压或电流波形中的谐波可以看作为一定频率（基波频率的整数倍）的正弦分量，即

$$f_h = h \times \text{基波频率} \quad (1-1)$$

式中， h 为一整数。

举例来说，在 50Hz 或 60Hz 的系统中，5 次谐波会产生如下谐波分量：

$$f_h = 5 \times 50\text{Hz} = 250\text{Hz} \text{ 或 } f_h = 5 \times 60\text{Hz} = 300\text{Hz}$$

图 1-1 显示了一个周期的峰值约为 100A、频率为 60Hz 的理想电流波形，同时，图中给出了 3 次谐波、5 次谐波和 7 次谐波的波形，从图中可以看出，它们的波幅分别为基波电流的 1/3、1/5、1/7，而频率分别为基波频率的 3 倍、5 倍、7 倍。可见，在电力系统中，谐波分量的波幅是随着谐波次数的增加而减小的。

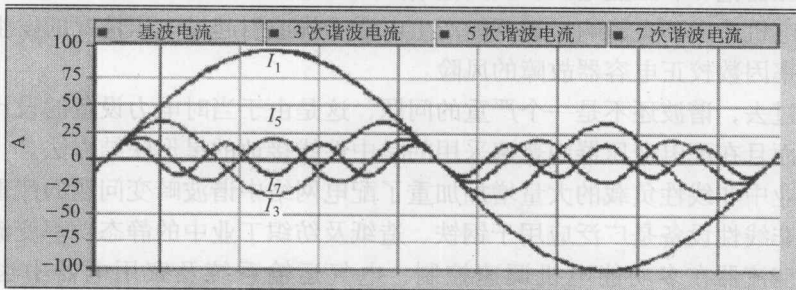


图 1-1 60Hz 的电流正弦波及一些谐波

这些谐波波形可以表示为

$$i_1 = Im_1 \sin \omega t \quad (1-2)$$

$$i_3 = Im_3 \sin(3\omega t - \delta_3) \quad (1-3)$$

$$i_5 = Im_5 \sin(5\omega t - \delta_5) \quad (1-4)$$

$$i_7 = Im_7 \sin(7\omega t - \delta_7) \quad (1-5)$$

式中，“ Im_h ”是谐波电流 h 的有效峰值。

图 1-2 在图 1-1 的基础上，对基波电流和 3 次谐波、5 次谐波及 7 次谐波进行了叠加，得出总电流 “ I_{total} ”。如果我们只取如图 1-1 所示的 3 个谐波分量，可以得到如图 1-2 所示的 6 脉波变流器终端输出的谐波畸变电流波形。如果存在更

高次的谐波, 电流波形畸变将更加严重。

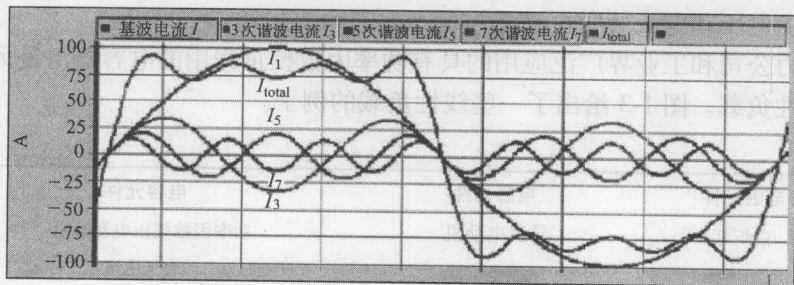


图 1-2 3 次、5 次、7 次谐波下的畸变电流正弦波

由此产生的波形畸变可以表示为

$$I_{\text{total}} = Im_1 \sin \omega t + Im_3 \sin(3\omega t - \delta_3) + Im_5 \sin(5\omega t - \delta_5) + Im_7 \sin(7\omega t - \delta_7) \quad (1-6)$$

这样, 一些原本完美的正弦波叠加在一起产生了畸变的波形。相反地, 畸变的波形可看作为基本频率的波形与其他不同频率和幅度的波形的叠加。

1.3 线性和非线性负载

通过学习本节内容, 我们可以知道, 如果一个负载在交流电源下的电流波形类似于图 1-2 中的“ I_{total} ”, 那么这个负载显然不是一个线性负载。

1.3.1 线性负载

线性负载是指那些经过它的电压和电流信号变化非常相近的负载, 比如常值电阻就是一个线性负载, 经过常值电阻的电压降和电流成正比。这种关系可用著名的欧姆定律进行描述。即

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} \quad (1-7)$$

这就是为什么带有线性负载的电路的电压和电流波形十分相近的原因。因此, 如果电源是一种清洁正弦电压, 那么电流波形看起来应该是与电压波形一致的, 不存在任何畸变, 计算带有线性负载的电路的电压和电流波形也十分容易。甚至诸如电热元件或白炽灯之类的阻抗型线性负载产生的热量也很容易确定, 因为它与电流的二次方成正比。另外, 功率也可以通过计算电压和电流的乘积求得。

其他线性负载, 如电风扇、水泵、油泵、起重机、电梯等, 都无需诸如变频器或整流器/逆变器等功率转换设备提供电能, 而是包含了依赖于铁或铜的物理

特性的磁心损耗。如果铁磁心设备在饱和区工作（即超过设备额定值），那么就可能产生电压和电流畸变。

电力公司和工业界广泛应用的具有功率因数校正作用的电容器组是另一种类型的线性负载。图 1-3 给出了一些线性负载的例子。

电阻元件	电感元件	电容元件
白炽灯	异步电动机	功率因数校正电容器组
电加热器	限流电抗器	地下电缆
	异步发电机	谐波滤波器中的电容器
	抑制谐波的衰减电抗器	
	谐波滤波器中的调谐电抗器	

图 1-3 线性负载的例子

带有线性负载的电路的电压和电流波形是同相的。带有电感元件的电路中电压超前于电流，带有功率因数电容器的电路中电流超前于电压。因此，在这两种情况下，这两个波形不是同相的，但是，不会产生波形畸变。

图 1-4 显示了一个交流电源和纯电阻组成的线性电路的电压、电流和功率之间的关系。值得注意的是，该电路中的电压和电流是同相的，它们的积是非负的，因此该电路的瞬时功率 $P = V \cdot I$ 也总是非负的。从瞬时功率的另一计算式 $P = I^2 \cdot R$ 也可以看出，瞬时功率应该总是非负的。

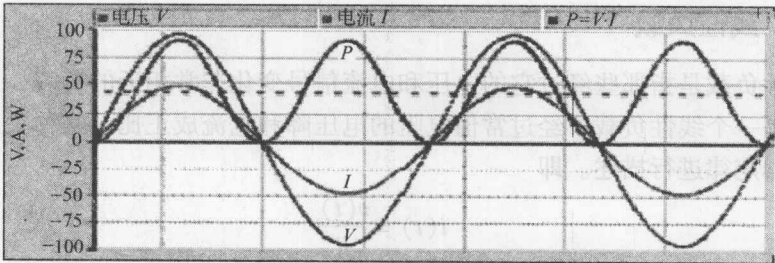


图 1-4 一个纯电阻电路中电压、电流和功率之间的关系

如果电路中的负载是电感元件，那么电路中的电流滞后于电压，图 1-5a 给出了这种情况下电压、电流和功率之间的关系；如果电路中的负载是电容元件，那么电路中的电流超前于电压，图 1-5b 给出了这种情况下电压、电流和功率之间的关系。

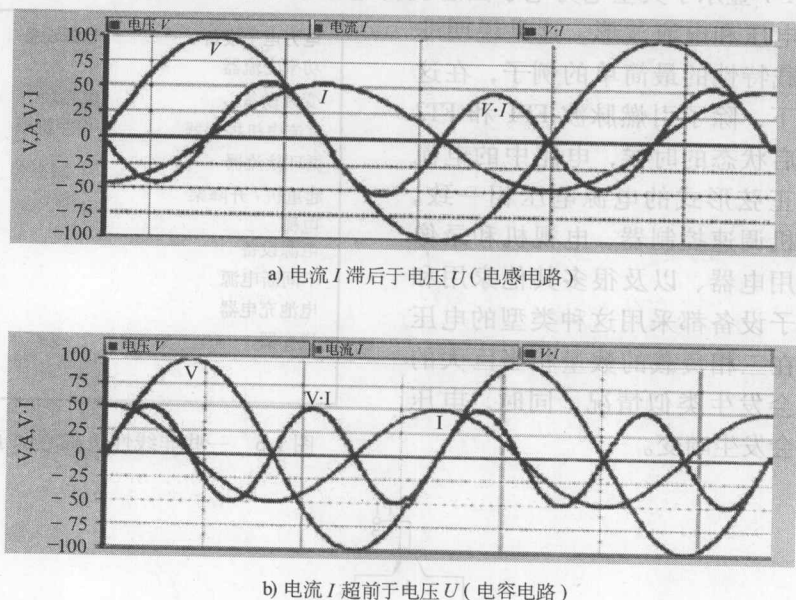


图 1-5 电感电路和电容电路中的电压、电流和功率之间的关系

在图 1-5a 中, 电压和电流的乘积 " $V \cdot I$ " 是正的, 位移功率因数(将在 1.5 节讨论)是负的, 即为充电过程; 而在图 1-5b 中, 电压和电流的乘积 " $V \cdot I$ " 是负的, 位移功率因数是正的, 即为放电过程。

在任何情况下, 对于线性负载(如图 1-4 中的纯电阻负载)来说, 电压和电流的波形始终保持为正弦形式。可以看出, " $V \cdot I$ " 的值具有相同的正负周期而均值为 0。当 V 和 I 都为正时, " $V \cdot I$ " 的值也是正的; 而当 V 或 I 为负时, " $V \cdot I$ " 的值是负的。

1.3.2 非线性负载

非线性负载指的是由于某些原因经过它的电流和电压波形不相类似的负载。例如, 只在一小部分工频期内用以导通负载电路的电子开关的动作将在电路中产生非线性负载。因此, 我们可以把不能用欧姆定律描述电压和电流之间关系的负载称为非线性负载。电力系统中常见的非线性负载包括广泛应用于功率变流器、功率源、不间断电源(UPS)等中的各种整流设备和各种电弧设备, 如电炉、荧光灯等。图 1-6 列出了另外一些非线性负载的例子。从本书的第 4 章可知, 非线性负载引起了许多不良后果, 如电压波形畸变、变压器和其他电力设备过热、设备连接点过电流、电话干扰、微处理器控制问题等。

图 1-7 显示了典型电力电子固态设备绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 开关动作时的电压和电流波形。这是说明非线性负载特性的最简单的例子,在这种情况下,除了引燃脉波 FP1 和 FT2 处于开启状态的时候,电路中的电流都不与正弦形式的电源电压相一致。有些电机调速控制器、电视机和录像机等家用电器、以及很多其他家用和商业电子设备都采用这种类型的电压控制。在三相负载的数量相当巨大的时候也会发生类似情况,同时,电压信号也会发生畸变。

电力电子设备	电弧设备
功率变流器	荧光灯
变频设备	电弧炉
直流电机控制器	焊接机械
循环换流器	
起重机 / 升降架	
电梯	
电源设备	
不间断电源	
电池充电器	
逆变器	

图 1-6 一些非线性负载的例子

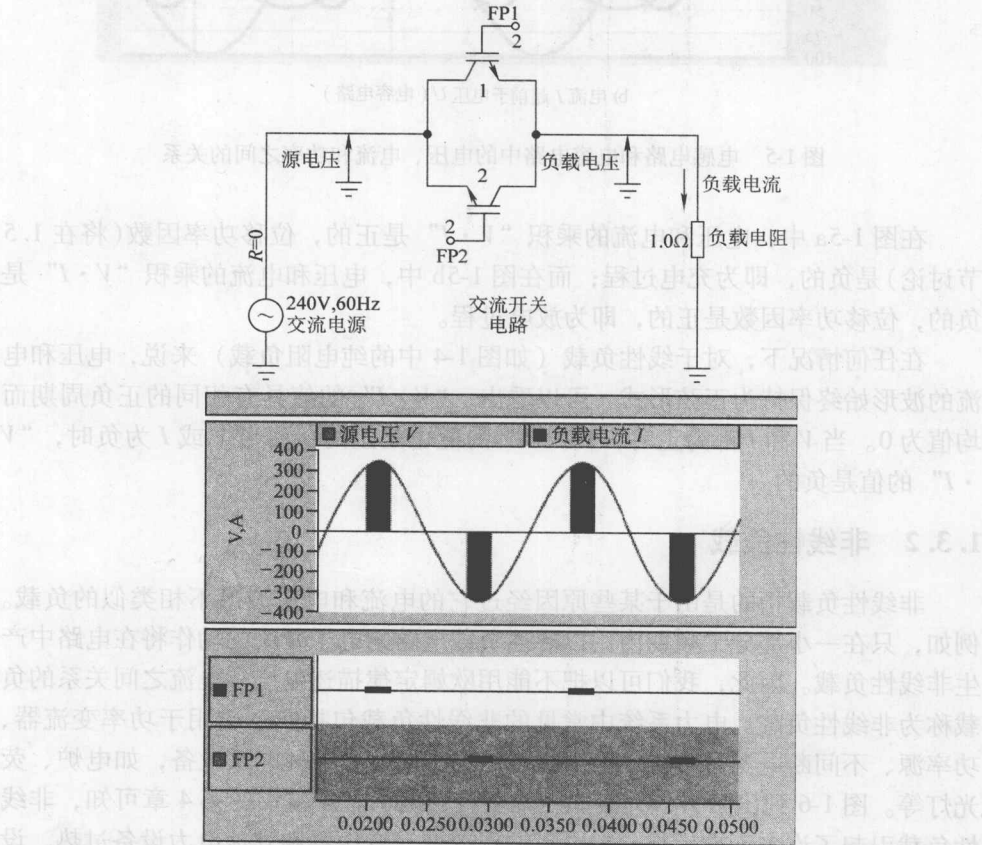


图 1-7 典型非线性电源中电压和电流的关系