



电力科技专著出版资金资助项目

(第二版) Second Edition

电力系统谐波

Power System Harmonics

[新西兰] Jos Arrillaga Neville R. Watson 著

林海雪 范明天 薛 蕙 译



 WILEY



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



电 力 系 统 谐 波

Power System Harmonics

(第二版)

Second Edition

[新西兰] Jos Arrillaga Neville R. Watson 著

林海雪 范明天 薛 蕙 译

电力科技专著出版资金资助项目

中国电力科学研究院专著出版基金资助

 WILEY



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书原著是国际知名电能质量专家 Jos Arrillaga 和 Neville R. Watson 的著作。主要内容包括：概论、谐波分析、谐波源、谐波畸变的影响，谐波监测，谐波的消除、谐波潮流计算，以及先进的谐波评估方法。

本书可供电力科研、设计、生产和运行专业技术人员，以及高等院校电力专业师生阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统谐波：第 2 版/（新西兰）阿里拉加（Arrillaga J.），（新西兰）沃森（Watson N. R.）著；林海雪，范明天，薛蕙译. —北京：中国电力出版社，2008

书名原文：Power System Harmonics, Second Edition

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7629 - 5

I. 电… II. ①阿…②沃…③林…④范…⑤薛… III. 电力系统 - 谐波 - 研究 IV. TM714

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 091850 号

北京市版权局著作权合同登记

图字：01 - 2007 - 4119 号

POWER SYSTEM HARMONICS, Second Edition

ISBN 0470851295

Copyright © 2003 John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England

All Rights Reserved. Authorised translation form the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

本文中文简体字版由 John Wiley & Sons, Ltd. 授权中国电力出版社独家出版。版权所有，侵权必究。

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>）

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 11 月第一版 2008 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 21.75 印张 445 千字

印数 0001—3000 册 定价 65.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

译者序

《电力系统谐波》第一版由新西兰 J. Arrillaga 等所著, 于 1985 年由 John Wiley & Sons 公司出版, 是世界上较早的一本关于谐波的专著。第一版由唐统一、吴震春和孙树勤于 1991 年翻译出版(中国矿业大学出版社 1991 年 6 月)。J. Arrillaga 是新西兰坎特布雷大学(University of Canterbury)教授, 国际知名的资深电能质量专家, 多年来在此领域发表过许多研究文章, 还编著过《Power System Harmonic Analysis》和《Power System Quality Assessment》两书(无中文译本)。本书的第一版对国内谐波研究的开展以及分析和治理工作起到了积极推动作用。

《电力系统谐波》原文的第二版于 2003 年由同一家公司出版, 和第一版相比, 内容上有较大增加。例如, 在“谐波分析”中增加了 FFT 的算法效率和小波分析内容; 在“谐波源”中增加了线路换相变流器系统中频率交叉调制、三相电压源换流和 TCR 的谐波; 在“谐波的影响”中引入了“互补和混合谐振”概念, 并且综述了有关畸变波形的各种功率定义; 在“谐波监测”中则以 1991 年 IEC 61000-4-7 标准为主要依据进行了重新编写, 加进现代监测网的内容; 在“谐波消除”中增加了有源滤波器的介绍; 在“谐波计算”中专门增加了“先进的谐波评估”一章, 介绍了迭代谐波分析法、谐波状态估计和电磁暂态解法等。第二版的另一个显著特点是增加了不少说明性的算例。总体上, 第二版比第一版论述上更为条理、内容更为深入, 反映了谐波领域近 20 年来的发展(例如大型电力电子设备应用、标准和分析方面)。本书提供的电力系统谐波产生、影响、监测、分析、计算、消除和标准等方面专业基础知识, 比较适合于高等院校电力专业师生阅读, 并可以供电力研究、设计、生产和运行专业技术人员参考。

本书第 1、3、4、6 章由中国电力科学研究院林海雪高级工程师(教授级)翻译; 第 7、8 章以及索引由范明天高级工程师(教授级)翻译, 第 2、5 章由中国农业大学薛蕙副教授翻译。全书由林海雪统稿。本书翻译过程中, 还对原书中的个别错误进行了修正。由于本书内容丰富, 涉及的专业面相当广, 限于译者水平, 翻译不妥或错误之处在所难免, 恳请读者指正。

本书的翻译得到了清华大学孙树勤教授的推荐和热情帮助, 以及中国电力科学研究院副总工程师胡学浩的大力支持, 在此深表谢意。中国电力科学研究院工程师周莉梅、汲亚飞, 以及研究生蒋利民、梁双也参与了部分章节的初译工作, 在此一并表示感谢。

2008 年 8 月 于北京

序

在1982年英国曼彻斯特举办的第一届电力系统谐波国际会议之后, John Wiley & Sons 公司委托 J. Arrillaga 写一本关于谐波方面的书。1985年由 J. Arrillaga、D. A. Bradley 和 P. S. Bodger 合著的《电力系统谐波》一书问世, 该书为涉及电能质量问题的许多课程和研讨会提供了基础资料, 同时也给电力系统设计人员以颇大的帮助。

过去20年来, 在关于谐波的技术文献中又出现了一些书和大量的刊物。Wiley 公司或许已成为这方面主要的出版商, 又推出了三本书, 这三本书是: 《Power System Harmonic Analysis》和《Power System Quality Assessment》(这两本书均由 J. Arrillaga 及其同事编著), 以及《Power System Harmonics Computer Modelling and Analysis》(由 E. Acha 和 M. Madrigal 编著)。所有这些著作的材料都包含学术研究和基于计算机模拟技术的成果。在北美, 谐波方面的资料通常以 IEEE 光盘教材《Modelling and Simulation of Power System Harmonics》以及 IEEE 五小时录像带《Power System Harmonics》的形式提供。

近年来, 有众多的呼声希望修订我们的原版著作, 同时保持书中谐波方面的实用方法。因此新版的内容与原版没有特别的不同, 也就是说, 对电力系统谐波的产生、影响、监测、分析和消除做总体的论述, 并同时反映过去20年来电力工业的主要发展(特别是在电力电子方面)。

对于大多数用户来说, 开发自己的谐波评估程序是不现实的。因此本书的分析部分提供了包括谐波评估在内的多项技术的基础知识, 并且依托现成的软件, 特别强调通用的程序, 诸如 EMTF 和 MATLAB。唯一的例外是, 介绍了由作者开发的一个先进的综合频域程序, 称为 Harmonic Domain, 此程序以光盘形式提供, 以便演示。

我们感谢许多同事对完成本书所做的贡献, 特别是 P. S. Bodger、D. A. Bradley、G. Bathurst、S. chen、A. R. Wood、B. C. Smith、E. Acha、J. F. Eggleston、G. Heydt、A. Medina、M. L. Viana · Lisboa、S. Round、A. Semlyen、R. Yacamini 以及 J. D. Ainsworth。

Jos Arrillaga
Neville R. Watson

目 录

译者序

序

1 概论	1
1.1 引言	1
1.2 谐波产生的机理	1
1.3 定义和标准	4
1.3.1 影响谐波标准进展的因素	5
1.3.2 现有的谐波标准	6
1.3.3 通用谐波指标	8
1.4 相关的课题	10
1.5 参考文献	12
2 谐波分析	13
2.1 引言	13
2.2 傅里叶级数和系数	13
2.3 根据波形对称所作的简化	15
2.4 傅里叶级数的复数形式	17
2.5 谐波相量的卷积	20
2.6 傅里叶变换	21
2.7 采样时间函数	23
2.8 离散傅里叶变换	23
2.9 奈奎斯特频率和混叠	25
2.10 快速傅里叶变换 (FFT)	27
2.11 窗函数	29
2.11.1 栅栏效应	31
2.11.2 减少频谱泄漏	32

2.11.3	窗函数的选择	32
2.11.4	主瓣宽度减小	34
2.11.5	间谐波的分析	35
2.12	快速傅里叶变换 (FFT) 的算法效率	36
2.12.1	基-2 FFT	36
2.12.2	混合基 FFT	37
2.12.3	实值 FFT	38
2.12.4	局部 FFT	39
2.13	其他变换	40
2.13.1	小波变换	41
2.13.2	扰动的自动识别	44
2.14	讨论	45
2.15	参考文献	46
3	谐波源	48
3.1	引言	48
3.2	变压器磁化的非线性	49
3.2.1	正常励磁特性	49
3.2.2	电流波形的确定	49
3.2.3	对称过励磁	50
3.2.4	励磁涌流谐波	51
3.2.5	直流磁化	52
3.3	旋转电机谐波	53
3.3.1	交流绕组的磁势分布	53
3.3.2	三相绕组	54
3.3.3	槽谐波	54
3.3.4	同步电机产生的电压谐波	55
3.3.5	转子凸极效应	56
3.3.6	异步电动机产生的谐波电压	57
3.4	电弧装置产生的畸变	58
3.4.1	电弧炉	58
3.4.2	放电类型的照明	60
3.5	单相整流	61

3.5.1	直流电源供电	61
3.5.2	铁道线路换相整流器	64
3.6	三相电流源变流	66
3.6.1	基本(6脉波)结构	68
3.6.2	变压器联结的影响	69
3.6.3	12脉波变流器的谐波	69
3.6.4	多脉波结构	71
3.6.5	变压器和系统阻抗的影响	71
3.6.6	直流电压的谐波	74
3.6.7	不稳定的直流电压平滑	76
3.6.8	半控整流	78
3.6.9	非特征谐波和间谐波的产生	80
3.6.10	线路换相变流器系统中频率交叉调制	86
3.7	三相电压源变流	89
3.7.1	多电平VSC结构	89
3.8	逆变器馈供的交流驱动	91
3.9	晶闸管控制电抗器(TCR)	97
3.9.1	静止无功补偿器(SVC)	97
3.9.2	晶闸管控制的串联补偿(TCSC)	99
3.10	相控调制	101
3.10.1	开关函数法	102
3.10.2	输入电流谐波的推导	103
3.11	交流调节器	105
3.11.1	单相全波控制器	105
3.11.2	整周波控制	106
3.12	讨论	107
3.13	参考文献	108
4	谐波畸变的影响	111
4.1	引言	111
4.2	谐振现象	111
4.2.1	并联谐振	111
4.2.2	串联谐振	112

4.2.3 谐振对系统运行的影响	112
4.2.4 互补和混合谐振	114
4.2.5 欠阻尼	115
4.3 谐波对旋转电机的影响	115
4.3.1 谐波损耗	115
4.3.2 谐波转矩	116
4.3.3 其他影响	118
4.4 谐波对静止电力设备的影响	118
4.4.1 输电系统	118
4.4.2 变压器	118
4.4.3 电容器组	120
4.5 畸变波形的功率评估	121
4.5.1 单相系统	121
4.5.2 三相系统	125
4.5.3 谐波畸变对功率因数的影响	130
4.5.4 谐波对测量仪器的影响	131
4.6 谐波对纹波控制系统的干扰	132
4.7 谐波对电力系统保护的干扰	133
4.7.1 故障情况的谐波问题	133
4.7.2 非故障情况的谐波问题	134
4.8 谐波对用户设备的影响	135
4.9 对通信的干扰	135
4.9.1 电话线路的简单模型	136
4.9.2 影响干扰的因素	136
4.9.3 电力系统对通信线路的耦合	137
4.9.4 谐波在通信线路上的效应(感受度)	140
4.9.5 电话线路的对地平衡	146
4.9.6 屏蔽	146
4.9.7 减轻干扰的措施	147
4.10 电动机产生的噪声	148
4.11 讨论	148
4.12 参考文献	148

5 谐波监测	151
5.1 引言	151
5.2 测量要求	151
5.2.1 IEC 61000 4-7 文件	151
5.2.2 间谐波	152
5.2.3 谐波的相位移	153
5.2.4 谐波对称分量	154
5.3 互感器	154
5.3.1 电流互感器	154
5.3.2 电压互感器	156
5.4 谐波仪器	158
5.4.1 数字仪器	160
5.4.2 现代监测系统的结构	162
5.5 数据传输	164
5.6 谐波信息的表示	164
5.7 应用举例	166
5.7.1 同步测试	166
5.7.2 群联结高压直流变流器测试	171
5.8 讨论	172
5.9 参考文献	173
6 谐波的消除	174
6.1 引言	174
6.2 无源滤波器定义	174
6.3 滤波器的设计准则	175
6.3.1 常规的设计准则	175
6.3.2 先进的滤波器设计准则	177
6.4 用于性能计算的网路阻抗	177
6.4.1 系统表示范围	177
6.4.2 低频时交流电网电阻的影响	178
6.4.3 阻抗包络线图	178
6.5 调谐滤波器	180
6.5.1 图解法	182

6.5.2 双调谐滤波器	184
6.5.3 自动调谐滤波器	186
6.6 减幅滤波器	186
6.6.1 减幅滤波器的类型	186
6.6.2 减幅滤波器设计	187
6.7 常规滤波器的结构	188
6.7.1 6 脉波的设计	188
6.7.2 12 脉波结构	192
6.8 12 脉波变流器的带通滤波	192
6.9 配电系统滤波器规划	194
6.10 滤波器元件的特性	195
6.10.1 电容器	195
6.10.2 电感器	195
6.11 滤波器的费用	196
6.11.1 单调谐滤波器	197
6.11.2 带通滤波器	199
6.12 直流侧滤波器	202
6.13 有源滤波器	204
6.13.1 有源滤波器的串联连接	204
6.13.2 有源滤波器的并联连接	205
6.14 讨论	206
6.15 参考文献	206
7 谐波潮流计算	208
7.1 引言	208
7.2 直接谐波分析	208
7.2.1 频率扫描分析	210
7.2.2 谐波电压源的加入	210
7.2.3 不同线路段的串联	211
7.3 由现场测试获得网络谐波电抗	212
7.3.1 利用现有谐波源的方法（非外加谐波源在线测试）	212
7.3.2 直接注入方法（外加谐波源在线测试）	213
7.3.3 暂态波形分析方法（非外加谐波源在线测试）	214

7.4	输电线模型	214
7.4.1	三相线路的相互耦合	217
7.4.2	在终端外接电路的情况	219
7.4.3	等值 Π 模型	220
7.4.4	输电线参数的计算	223
7.5	地下电缆和海底电缆	227
7.6	三相变压器模型	230
7.7	发电机模拟	233
7.8	并联元件	233
7.9	串联元件	234
7.10	配电系统的模拟	235
7.11	负荷模型	236
7.11.1	感应电动机模型	237
7.11.2	民用负荷的诺顿等值	238
7.11.3	基于测量的经验模型	239
7.12	计算机实现	239
7.12.1	谐波渗透概况	240
7.12.2	先进的程序结构	240
7.12.3	数据结构	241
7.13	模型应用的实例	244
7.13.1	同型输电线中的谐波潮流	244
7.13.2	阻抗轨迹	250
7.13.3	换位输电线路的谐波分析	256
7.13.4	具有无功补偿的输电线路谐波分析	261
7.13.5	HVDC 输电线路的谐波分析	264
7.14	基于现场测试的仿真	269
7.14.1	输电线路谐波的后处理（以便与测试结果比较）	271
7.15	讨论	272
7.16	参考文献	272
8	先进的谐波评估方法	276
8.1	引言	276
8.2	传递函数模型	276

8.3 迭代谐波分析法 (IHA)	278
8.3.1 定点迭代法	278
8.3.2 诺顿等值法	278
8.3.3 时域/频域混合法	279
8.3.4 谐波域法	280
8.4 谐波潮流	282
8.4.1 三相牛顿 HPF 算法的构成	283
8.5 谐波状态估计	287
8.5.1 负荷和谐波源辨识	289
8.6 电磁暂态仿真法	290
8.6.1 时间步长的选择	291
8.6.2 交流系统的表示	291
8.6.3 频率相关的网络等值电路	291
8.6.4 实例分析	292
8.7 关于先进谐波模拟方法的讨论	307
8.8 参考文献	307
中英文对照表	311

概 论

1.1 引言

当一个电气信号加到示波器上,在时域上观察到它的波形,屏幕上显示每个时刻的信号幅值。如果把同样的信号加到高保真的放大器上,听到的是包含一个完整乐弦各种谐波频率的混合总音调。因此,电气信号既可以用时域,也可以用频域数据来描述。本书论述在电力系统环境下时域频域之间的关系,波形畸变的原因和影响以及现行有效的测量、模型和控制的技术。

从交流电的早期开始,电力系统设计中已把降低电压和电流波形畸变,使其在可以接受的水平内作为一个问题。近年来,由于电力电子装置和对波形敏感的负荷设备不断发展,增加了人们对这一问题的关注。

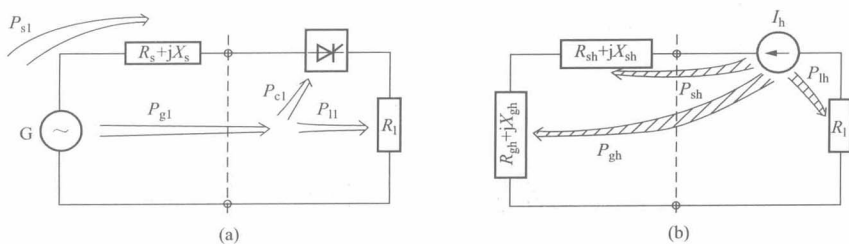
电能的利用越来越依赖于具有可控频率和可控电压的电源供应,而发电和输电仍以标称不变的水平在运行,因此需要某种电源调节或变换形式加以弥补。通常采用电力电子电路来实施,这种电路使电压和电流波形产生畸变。

波形畸变而使频率拓扑改变的电路性能不可以用传统的单一频率相量理论来描述。在这种情况下,稳态由一个接一个的周期性瞬态构成,后者需要动态模拟。不过,在设定一段合理长的时间内为稳态性能,电压和电流波形符合傅里叶分析(Fourier analysis)的条件^[1],则可以用谐波分量来表达。定义谐波是频率为系统基波频率整数倍的函数成分。

1.2 谐波产生的机理

通常是在 50Hz 或 60Hz 恒定频率下发电,而发电机的电动势波形实际上可以视为正弦的。但是当个正弦电压源加在一个非线性装置或负荷上,产生的电流不是完全正弦形的。由于存在系统阻抗,这个电流造成一个非正弦电压降,因而在负荷端引起电压畸变,也就是电压中含有谐波。

为了直观理解这个现象,我们来看图 1.1 所示的电路。图中发电机 G 经过阻抗为 $(R_s + jX_s)$ 线路馈电给一个纯电阻负荷 R_l 和一个静止变流器。

图 1.1 基波和谐波潮流示意图^①

(a) 基波潮流; (b) 谐波潮流

发电机向负荷与其他用户的公共连接点(PCC)供给功率(P_{gl})。图 1.1 (a) 表明, 这个功率的大部分(P_{ll})输入负荷, 而相对较小的部分(P_{cl})在静止变流器中转换成不同频率的功率。此外, 在输电和发电系统电阻中, 还有一些工频附加功率损耗(P_{sl})。

图 1.1 (b) 说明谐波潮流。由于已经假定发电机的内电动势为完全正弦波形, 发电机只是供给基频功率, 因此发电机的电动势在该图中被短路掉, 也就是交流线路和发电机分别用它们的谐波阻抗($R_{sh} + jX_{sh}$)和($R_{gh} + jX_{gh}$)表示。在这个图中, 静止变流器表示为谐波电流源。一小部分基波功率(P_{cl})转换为谐波功率: 这个功率某些部分($P_{sh} + P_{gh}$)消耗在系统电阻(R_{sh})和发电机电阻(R_{gh})中, 其余部分(P_{lh})消耗在负荷中。

因而总的功率损耗由基频分量(P_{sl})和变流器产生的谐波功率($P_{sh} + P_{gh} + P_{lh}$)构成。

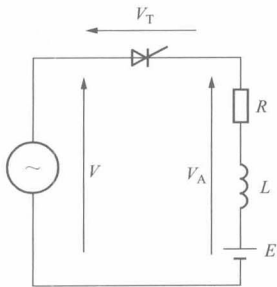


图 1.2 解释功率变换机制的基本电路

为了更准确解释功率变换机制, 我们来考察图 1.2 的情况。图中 V 是正弦电压源, E 是电池的恒定电动势, 其内电阻忽略不计。

设晶闸管在 $\omega t = \alpha$ 时开通而在 $\omega t = \beta$ 时关断, 忽略导通时电压降。

图 1.3 (a)、(b) 和 (c) 分别表示电源电压、晶闸管两端电压以及负荷电压, 而图 1.3 (d) 表示电流波形。

负荷电压 V_A 可由图 1.4 所示的三个分量所取代, 这些分量由傅里叶变换推出, 即

$$V_A = V_{A1} + V_{Ah} + V_{A0} \quad (1.1)$$

式中

$$V_{A1} = \sqrt{2} V_{A1} \sin(\omega t + \theta_1) \quad (1.2)$$

为基波分量,

① 总图名为译者所加。——译者

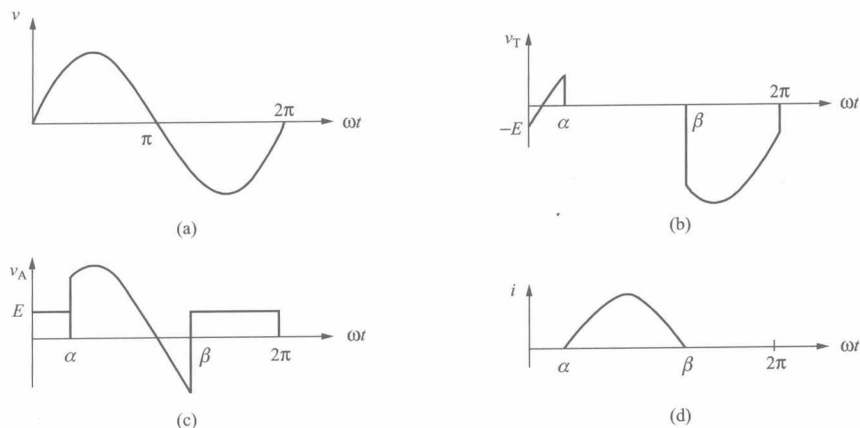


图 1.3 图 1.2 电路中波形

(a) 电压源; (b) 晶闸管两端的电压; (c) 负荷电压; (d) 电流

$$V_{Ah} = \sum_{h=2}^n \sqrt{2} V_{Ah} \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (1.3)$$

为谐波分量, 而

$$V_{A0} = \frac{1}{T} \int_0^T V_A dt = V_{dc} \quad (1.4)$$

为直流分量。

同样, 电流可由以下三个分量所取代:

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \xi_1) \quad (1.5)$$

$$i_h = \sum_{h=2}^n \sqrt{2} I_h \sin(h\omega t + \xi_h) \quad (1.6)$$

$$I_0 = \frac{V_{dc} - E}{R} \quad (1.7)$$

下面来考虑功率分配。

电源发出的有功功率为

$$P_G = V_1 I_1 \cos \xi_1 \quad (1.8)$$

供到负荷的功率为

$$P_A = P_{A1} + P_{Ah} + P_{A0} \quad (1.9)$$

式中

$$P_{A1} = V_{A1} I_1 \cos(\theta_1 - \xi_1) = I_1^2 R \quad (1.10)$$

为供出的基波分量功率,

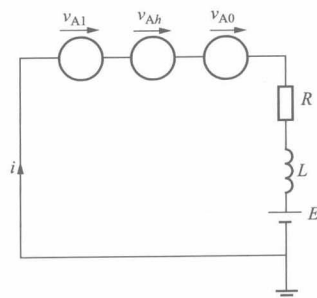


图 1.4 图 1.2 电路中负荷电压各分量

$$P_{Ah} = \sum_{h=2}^n V_{Ah} I_h \cos(\theta_h - \xi_h) = \sum_{h=2}^n I_h^2 R \quad (1.11)$$

为供出的谐波功率,且

$$P_{A0} = V_{dc} I_0 = E I_0 + I_0^2 R \quad (1.12)$$

为直流功率。

因此晶闸管就像一个功率转换器,也就是把理想电压源电流波形的基波分量所产生的总功率 P_G 转换为式 (1.9) 所示的各分量。

由于忽略了晶闸管的损耗,故 $P_G = P_A$, 且有下列关系:

$$P_G = P_A = I^2 R + E I_0 \quad (1.13)$$

式中

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \sum_{h=2}^n I_h^2}$$

为电流的方均根 (r. m. s) 值 (即有效值)。

1.3 定义和标准

电力系统谐波定义为电源所产生的频率 (或基波频率) 整数倍频率的正弦电压和电流。谐波构成电源电压和负荷电流波形的主要畸变成分。但是电力系统的间谐波成分在不断增加,间谐波是非整数倍基波频率的畸变成分,需要给予更大的关注。

在过去,大多数国家都已制定了各自的谐波标准或推荐规程以适应本国的条件。但是随着全球贸易的增长,各国制造的设备彼此交流的需要,促进共同努力制定谐波和间谐波方面的国际标准。

制定国际标准的理论基础是维持一个全球可以接受的电磁环境,以协调发射和抗扰度限值。利用电磁骚扰的参考水平 (称为兼容水平) 能做到这一点。兼容水平可以看作在相关环境中可能存在的骚扰水平。因此在那种环境中工作的所有设备,至少需要具备该环境骚扰水平的抗扰度。于是,适合于相关设备的抗扰度裕量一般是抗扰度水平和兼容水平之差。

为了确定适当的发射限值,还使用规划水平的概念。规划水平是一个地方性的特定骚扰水平,用来作为大型设备发射限值的参考,以使发射限值和接到电力系统的设备所采用的限值相协调。此外,规划水平通常比兼容水平低一特定的裕量,该裕量视地方电网的结构和电气特性而定。这个裕量为系统可能的谐振,以及将来可能接入不需要评估的负荷而使谐波水平升高,留有必要的余度。这类的负荷包括计算机和含有开关模式电源的其他家庭和办公室用的电子设备。此外,在谐波频率下,供电系统和用户设备的阻抗具有不确定性。

图 1.5 表示上述各种水平间的关系。