

电力系统 谐波

J. Arrillaga D. A. Bradley
D. S. Bodger

容健纲 译
张文亮

华中理工大学出版社

电力系统谐波

J. ARRILLAGA 07.11.86

D. A. BRADLEY

P. S. BODGER

容健纲 张文亮 译

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

Power System Harmonics

Copyright ©1985 by John Wiley & Sons Ltd.

All rights reserved. (版权所有)

Authorised Translation from English language edition published by
John Wiley & Sons Ltd.

译自 John Wiley & Sons Ltd. 英文版

电力系统谐波

容健纲 张文亮 译

责任编辑 李 德

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 430074)

新华书店北京发行所经销

湖北省供销学校印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 12.125 字数: 284 000

1994 年 6 月第 1 版 1994 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—1 000 册

ISBN7-5609-0857-8/TM · 47

定价: 10.80 元

内 容 提 要

该书是迄今为止世界上第一本全面、系统地深入阐述电力系统谐波问题的权威著作。谐波是电力系统的公害。它造成电力系统中各种电力设备,如电容器、电抗器和电机的过热和损坏;引起电力系统局部谐波共振;对继电保护、自动控制和通信系统产生干扰等。该书概括了现代关于谐波问题研究的全部成就,透彻地论述了谐波产生的原因、危害,谐波的分析、测量方法,限制谐波的标准,谐波的消除等。

前 言

尽管人们对主发电频率下电力系统的性能已有相当深的理解,但谐波频率的出现对不同的人各有不相同的认识,甚至认为它无任何实际意义。

在现阶段是否有必要和可能写出有普遍意义和实际应用价值的论著呢?

根据有关国际委员会的现有活动,以及电力系统谐波领域内的会议和论文的数量和增长的情况来看,出版一本有关这一课题的书是恰当和及时的。

对单一的作者而言,选择主要基本概念和可普遍被接受的技术论点难免是主观和困难的任务。但是,我们三个参与写作者在经过多次磋商后,终于有了一个合理统一的方案。我们希望这一方案将能满足参与电力系统规划和运行的专业工程师们的实际需要。

本书在描述主要谐波原因和影响的同时,还包括了谐波分析,测试设备,谐波扩散和消除这四个领域。对于建立谐波标准和限值的现行准则也进行了讨论。

在准备手稿时,参阅了大量的文献,在这里不可能对文献的作者们表示感谢,只好将参考文献著录于章末。但是我们必须特别提到英国坎特伯雷大学电气和电子工程系主任 J. K. 巴夫教授,新西兰电气公司,特别是 K. D. 麦库尔总经理, P. S. 巴尼特, M. C. 昂德希尔, P. J. 莫菲, L. A. 威尔逊, P. R. 海兰以及 R. J. 辛普森,对他们的支持和鼓励表示感谢。

我们还想对来自于 J. F. 贝尔德(新西兰赖斯特彻奇系统软件和仪表公司), N. W. 罗斯(坎特伯雷电力中心)以及我们的两位同

事 D. B. 沃逊和 D. J. 拜尔斯的帮助表示感谢,他们在和我们的多次讨论中提供了材料和建议。

一些研究生也参加了与这一工作有关的某些部分的研究计划,我们对 B. J. 哈克、T. J. 登森姆, J. F. 埃格尔斯顿和 S. J. 格林德茹德的协助表示感谢。

最后,对 A. 霍汉夫人积极参与手稿的准备工作表示感谢。

目 录

前言	(1)
----------	-------

第一章 绪论

1.1 背景	(1)
1.2 谐波的特性	(2)
1.3 课题的重要性	(3)
1.4 参考文献	(4)

第二章 谐波分析

2.1 概述	(5)
2.2 基本概念	(5)
2.3 傅里叶分析	(7)
2.4 有限区间函数	(13)
2.5 傅里叶级数的复数形式	(15)
2.6 傅里叶变换	(17)
2.7 采样时间函数	(24)
2.8 离散傅里叶变换	(25)
2.9 快速傅里叶变换	(28)
2.10 线性调频脉冲 Z 变换	(32)
2.11 奈奎斯特频率和混淆现象	(34)
2.12 窗函数	(36)
2.13 参考文献	(45)

第三章 谐波源——静止换流器

3.1 概述	(47)
3.2 大功率换流器	(48)
3.3 中等功率换流器	(64)

3.4	小功率换流器	(81)
3.5	非理想化的系统条件	(89)
3.6	调制的相控制	(96)
3.7	整数周期控制	(103)
3.8	参考文献	(105)
第四章 其它谐波源		
4.1	概述	(108)
4.2	变压器的非线性励磁	(108)
4.3	旋转电机的谐波	(114)
4.4	电弧炉引起的波形畸变	(121)
4.5	荧光照明谐波	(124)
4.6	参考文献	(127)
第五章 谐波的影响		
A 对电力系统内部		
5.1	概述	(129)
5.2	谐振	(129)
5.3	谐波对旋转电机的影响	(132)
5.4	谐波对静止电力设备的影响	(136)
5.5	谐波对纹波控制系统的干扰	(137)
5.6	谐波对电力系统保护的干扰	(138)
5.7	谐波对用户设备的影响	(140)
5.8	谐波对电力测量的影响	(141)
5.9	谐波畸变对功率因数的影响	(143)
B 对通信的干扰		
5.10	概述	(144)
5.11	电话电路的简单模型	(145)
5.12	影响干扰的因素	(146)
5.13	对通信线路的耦合	(146)
5.14	对通信线路的影响(敏感度)	(151)

5.15	缓解技术	(156)
5.16	参考文献	(157)
第六章 电力系统谐波测量		
6.1	引言	(160)
6.2	电力系统谐波测量的发展	(161)
6.3	滤波器	(163)
6.4	信号平均	(171)
6.5	模拟频谱和谐波测量	(174)
6.6	频谱分析的数字方法	(183)
6.7	离线测量	(187)
6.8	谐波数据的表示	(190)
6.9	参考文献	(201)
第七章 变换器和数据传输		
7.1	引言	(203)
7.2	电流测量	(204)
7.3	电压测量	(207)
7.4	高压探头和钳型电流互感器	(217)
7.5	非常用的电流和电压互感器	(217)
7.6	数据传输	(221)
7.7	参考文献	(230)
第八章 电力系统谐波的限值标准和控制		
8.1	概述	(233)
8.2	影响控制电力系统谐波标准发展的因素	(235)
8.3	国家谐波标准	(238)
8.4	家用电器标准	(250)
8.5	参考文献	(250)
第九章 谐波在交流系统中的扩散		
9.1	概述	(253)
9.2	谐波潮流	(253)

9.3	阻抗/频率轨迹图	(255)
9.4	等值谐波阻抗的试验导出	(257)
9.5	网络分析用于谐波扩散	(259)
9.6	网络元件的模拟	(271)
9.7	算法的发展	(310)
9.8	谐波扩散算法的计算要求	(315)
9.9	谐波扩散算法的应用	(322)
9.10	参考文献	(338)
第十章 谐波的消除		
10.1	谐波滤波器的用途	(344)
10.2	定义	(344)
10.3	滤波器设计准则	(346)
10.4	调谐滤波器	(348)
10.5	阻尼滤波器	(355)
10.6	典型的滤波器结构	(358)
10.7	12 脉冲换流器的带通滤波	(359)
10.8	滤波器元件参数	(362)
10.9	滤波器的成本	(363)
10.10	直流侧滤波器	(370)
10.11	消除谐波的其它方法	(372)
10.12	参考文献	(376)
后记		(378)

第一章 绪 论

1.1 背景

理想的电力系统是以单一而固定的频率以及规定的固定幅值的电压水平供应电能的。但是实际上这些条件没有一个能满足。电压和频率偏移问题以及如何使它们处于控制之下的方法是常规的电力系统分析的课题。波形畸变问题在电力系统论述中一般是略去不计的，但它们是本书的基本内容。

电力系统的波形畸变并不是个新现象，从交流电的出现初期以来，如何将其限在可以接受的比率下一直是电力工程师所关心的问题。现在对这一问题日益增长的关心，是由电器和电力系统控制所用的高度非线性设备的数量和额定容量的日益增大所引起的。

偏离正弦的量一般是用谐波分量的项表示的。在绪论这一章中，我们通过扼要的定义谐波的特性及其重要性来勾画出全貌。以后各章中将详细阐述谐波起因、影响、监测和扩散问题，并提出了对确定限值的某些见解。

从历史的观点提出课题，必须回到 18 世纪和 19 世纪，当时好几位数学家，特别是 J. B. J 傅里叶 (1768—1830)，为谐波计算奠定了基础。

至于电力系统中的谐波，在 20 年代和 30 年代的德国研究了由静止换流器引起波形畸变的课题。那个时期以英文出版的最有影响的换流器理论教程是里西克所著的一本书^[1]。一篇有关静态换流器产生谐波的经典论文是 J. C. 里德在 1945 年写的^[2]，至今仍被设计师广泛的应用。

50 年代和 60 年代在高压直流输电方面推进了换流器谐波的

研究。在这一时期发表了大量的论文。金巴克在一本书中对此进行了总结^[3]，该书包括了电力系统谐波方面 60 篇以上的参考文献。在过去几年内，这一课题定期在国际会议上讨论，其文献经常登出广泛的书刊目录。最近的一个例子是 IEEE 电力系统谐波工作组报告^[4]。

1.2 谐波的特性

“谐波”这一名词起源于声学，在声学中谐波表示一根弦或一个空气柱以基本循环（或基波）频率的倍数频率振动。对电气信号也与此相仿，谐波被定义为一个信号量，该信号的频率是实际系统频率（即发电机所产生的频率）的整数倍。

用示波器显示一个复杂的信号，是在时域中观察信号的形状，亦即对任意给定的瞬间显示出波形的大小。若同一信号加在高灵敏的放大器上，则耳朵听到的合成声音是诸频率的混合信号，因而波形可用其时域或其频域的数据来描述，这两者之间的变换构成第二章的基础。

从一开始就必须说明清楚，只有畸变的波形持续无限的周期数时，才能完善地应用这种变换。实际情况并非如此，因为负载变动将会改变系统谐波的含量，但是，只要所分析的条件持续相当的时间，这一问题就不难解决。因此，必须在谐波和暂态波之间加以区别，谐波是波形保持不变，暂态波是波形逐个周期有明显的变化。

谐波对基频波的相角关系在决定波形时是重要的。虽然在声学中通常认为听力效应不受这种相角关系的影响，对于电气信号则并非如此，由不同来源产生之同一谐波，其位置和相对相位之变化可能显著地改变其总的效应。

1.3 课题的重要性

和许多其它形式的污染一样，谐波的产生影响整体（电气）环境，而且可能影响到距其源点较远的距离之处。

电力系统谐波最明显的后果也许是因感应谐波噪音所引起的电话通信的劣化。但是还有其它的较少出现、然而却常常有更为灾难性影响的情况，例如重要的控制和保护装置引起系统的误动作以及电力设备的过载。波形的污染存在常常是仅在代价昂贵的事件（例如无功补偿电容器的损坏）之后才被发现。此外，在没有电气福利的国家，上述损坏必须由用户来修复和更换，即便采用由用户安装保护设备的滤波器这一措施，也只是对整体电气环境进行了少许改善。

近些年，工业方面由于采用了晶闸管整流而有了可观的发展，但也因此产生了电流谐波。设计设备时通常是假设有一个没有谐波畸变的电压源，这种假设只是在向该设备供电的系统具有很低的谐波阻抗时才能成立。因而，较小的电力用户正在面临其自身的控制设备和供电电流的相互作用而引起的日益增加的困难。

供电部门为了避免谐波问题的副作用，对用户间公共耦合点上的电压谐波水平，一般要给出谐波限值的允许标准。

但是，确定谐波水平的限值不是件简单的事。现有的知识还不够充分和先进到足以确定这样一个限度：即在这个限度内，任一给定的电力系统，都可以承受这个谐波水平，在此水平下，系统具备对它所要求的各种功能。因为大部分现有的谐波知识是从事件背景中产生出来的，迄今为止所制定的标准和限值都反映了过去的实际经验，以防止类似问题将来再出现。这一课题在第八章讨论。

在达到对电力系统谐波现象合理的理解之前，电力工业将处于难以接受的风险的处境，并且必须对其产生之难题负责。

对这种理解的两个主要障碍是，进行准确测量的能力（于第六和第七章讨论）和能够表征现有供电系统的数学模型（于第九章讨论）。

所有的电气工程师都应该对波形畸变予以关心，以便在谐波影响控制和在控制下防止畸变之间建立正确的平衡。这是利害相关部门之间为了相互配合，早期作出决策的一种需要，目的是达到各方可以接受的经济的解决办法。这种可接受性的基础必须于尽可能早的阶段在制造厂家、供电和通信部门间进行讨论。

为了在这方面训练专业人员，电气工程课程应该传播必要的跨学科信息，特别是电力系统的教育者应力图拓宽对频谱的认识而放松对时^①域的注意，还应阐明这一事实，零序和三次谐波并非必然是同一个东西，功率因数并非唯一的与主电力频率（基波频率）有关系。傅氏分析，特别是快速傅氏变换应该联系电力和通信波形来讨论。最后，对电力电子技术应充分阐述它所造成的不利影响，即波形畸变问题。

1.4 参考文献

- 1 Rissik, H. (1935). *The Mercury Arc Current Converter*, Pitman, Lodon.
- 2 Read, J. C. (1945). 'The calculation of rectifier and invertor performance characteristics'. J. IEE, Pt I, 92, 495.
- 3 Kimbark, E. W. (1971). *Direct Current Transmission*, Vol. I, Wiley-Interscience, New York.
- 4 Bibliography of power system harmonics, Parts I and I'. IEEE papers 84WM 214-3 and 84WM 215-0, presented at the Winter Power Meeting, Dallas, January 1984.

① 原文为 frequency，疑为 time 之误——译注

第二章 谐波分析

2.1 概述

1822年,法国数学家傅里叶(1768—1830)在他的著作 *Theorie analytique de la chaleur* 中假设^[1],任何以周期 T 重复的连续函数,都能以基波分量与一系列频率为基波频率的整数倍的高次谐波分量之和来表示。

谐波分析是计算周期性波形的基波和高次谐波的幅值和相位的过程。由此得到的级数称为傅里叶级数,并且在时域和频域函数之间建立了一个关系。

在本章的第一部分推导出一般周期性波形的傅里叶级数,并讨论有关简单波形的特性。

更一般地说,傅里叶变换和反变换被用来将 $-\infty$ 到 $+\infty$ 区间内时域或频域中的任一函数变为相反域内的一个连续函数。所以傅里叶级数代表了傅里叶变换用于周期性信号的特殊情况。

实际上,通常得到的是以采样时间函数形式表示的数据,这些数据由一系列幅值表示,这些幅值为固定的有限宽度的时间间隔所分开。在处理这样的数据时,使用改进的傅里叶变换——离散傅里叶变换。借助于快速傅里叶变换实现离散傅里叶变换,形成了最现代化的频谱和谐波分析系统的基础。本章分析快速傅里叶变换的实现并研究傅里叶变换和离散傅里叶变换的发展。

2.2 基本概念

周期函数^[2]

如果函数 $x(t)$ 对所有的实数 t 有定义, 并存在正数 T , 且

$$x(t + T) = x(t) \quad \forall t \quad (2.2.1)$$

则 $x(t)$ 称为周期性函数, T 称为函数的周期。这样的函数可以由以间隔 T 周期性重复的波形表示, 如图 2.1 所示。

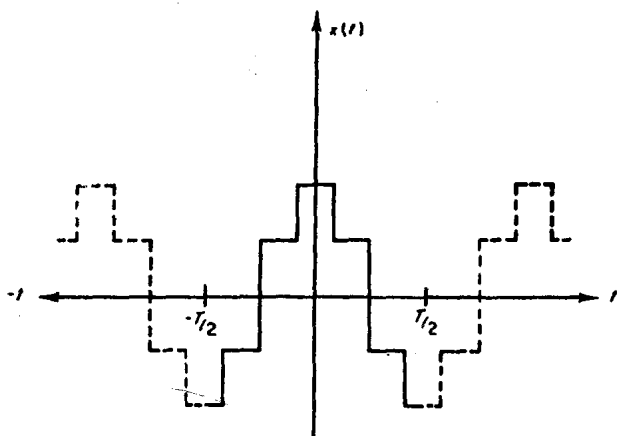


图 2.1 周期性函数

如果 k 是任意整数, 则有

$$x(t + kT) = x(t) \quad \forall t \quad (2.2.2)$$

如果两个函数 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 有相同的周期 T , 则函数

$$x_3(t) = ax_1(t) + bx_2(t) \quad (2.2.3)$$

式中, a 和 b 是常数, 周期为 T 。

应该注意到, 函数

$$x(t) = \text{常数} \quad (2.2.4)$$

按定义也是周期函数, 因为对于任何正的周期 T , 它满足等式 (2.2.2)。

正交函数^[2]

对于在区间 $T_1 \rightarrow T_2$ 上的两个非零函数 $x_1(t)x_2(t)$, 如果

$$\int_{T_1}^{T_2} x_1(t)x_2(t)dt = 0 \quad (2.2.5)$$

则 $x_1(t)$ 与 $x_2(t)$ 正交。此外，一组 r 个函数 $\{x_1(t), x_2(t), \dots, x_r(t)\}$ ，如果在 $T_1 \rightarrow T_2$ 区间上满足

$$\int_{T_1}^{T_2} x_i(t)x_j(t)dt = 0 \quad i = 1, \dots, r$$

$$j = 1, \dots, r, i \neq j \quad (2.2.6)$$

则形成一个正交集。

2.3 傅里叶分析

傅里叶级数和系数^[2,3]

周期性函数 $x(t)$ 的傅里叶级数可用下式表达

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right] \quad (2.3.1)$$

这是周期性函数的时域表示。式中， a_0 是函数 $x(t)$ 的平均值，而级数的系数 a_n 和 b_n 是第 n 次谐波的直角分量，相应的第 n 次谐波向量是

$$A_n/\phi_n = a_n + jb_n \quad (2.3.2)$$

这个向量的幅值和相角是

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \phi_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

对于给定的函数 $x(t)$ ，常系数 a_0 可以通过对 (2.3.1) 式两边从 $-T/2$ 到 $T/2$ (在周期 T 内) 积分得到，即

$$\int_{-T/2}^{T/2} x(t)dt = \int_{-T/2}^{T/2} \left[a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right] \right] dt \quad (2.3.3)$$

的傅里叶级数可以逐项积分，得