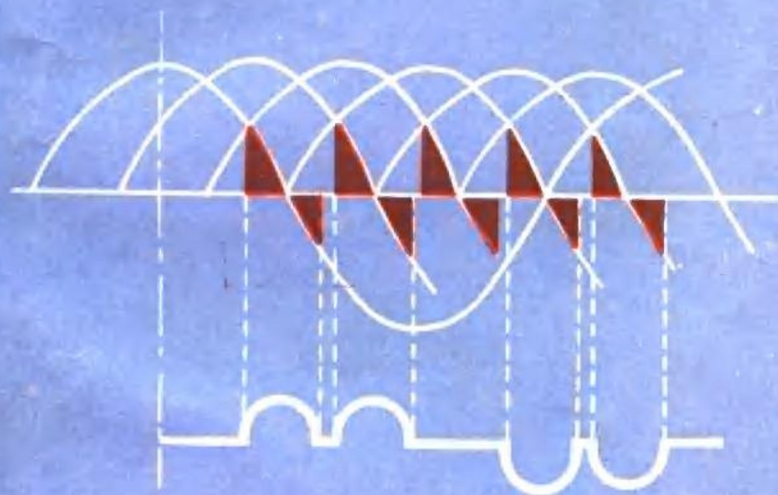


高等学校教学用书

电力系统谐波

唐统一 吴震春 孙树勤 译



中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书是讨论电力系统波形畸变问题的专著,译自1985年英文版。书中论述了电力系统谐波的基本概念和原理、谐波源、谐波的影响、分析、监测、透入和控制,介绍了当前国际上使用的各种谐波监测装置,讨论了谐波标准的制订,给出了谐波的表示方法、计算机模型和透入计算。

本书可作为大专院校和专业培训的教材,亦可供电力系统有关工程技术人员和管理人员参考。

Power System Harmonics

J. ARRILLAGA

D.A. BRADLEY

P.S. BODGER

JOHN WILEY & SONS, Ltd, 1985

*

高等学校教学用书

电力系统谐波

[新西兰] J. 阿里拉加

[英] D.A. 布莱德勒 著

[新西兰] P.S. 伯德格尔

唐统一 吴震春 孙树勤 译

责任编辑 何其华

中国矿业大学出版社出版发行

新华书店经销 中国矿业大学印刷厂印刷

开本850×1168毫米1/32 印张13.125字数334千字

1991年6月第一版 1991年6月第一次印刷

印数: 1—3000册

ISBN 7-81021-455-1

TM·9

定价: 3.40元

译者序

随着变流技术和控制技术的发展,在工矿企业和运输部门、在家用电气装置、在高压直流输电等许多领域大量使用非线性设备。这一方面有利于节能和控制,另一方面却使电力系统波形畸变、产生高次谐波、影响供电质量,甚至造成危害。在我国,随着现代化建设的发展和新技术的引用,电网中的谐波含量日益增多,个别地区已相当严重并引发了一些事故。基于这种情况,一些高等学校、科研单位和生产部门先后开展了关于电力系统谐波的分析研究,并取得了很好的成果。

虽然在谐波研究方面发表了大量论文和调查报告,但汇总这些研究成果进行系统论述的书籍还不多^[1]。

为了科研和教学工作的需要,也为了供生产部门技术人员参考,我们将1985年新西兰坎特布雷大学J.阿里拉加和P.S.伯德格尔与英国兰开斯特大学D.A.布莱德勒三人合著的《电力系统谐波》一书译出。该书比较全面系统地阐述了谐波的分析方法和谐波源性质,较详细地论述了谐波的影响和测试、谐波潮流计算和防治措施,并用对比的方法介绍一些国家的谐波限制标准。书中还汇集了大量的参考文献,供读者进一步深入研究之用。

本书的第一、六、七章由清华大学唐统一教授和东南大学戴先中副教授合译,前言和第五、八、九、十章由中国矿业大学吴震春教授翻译,第二、三、四章由清华大学孙树勤教授翻译。孙树勤教授还对全部译稿进行了统审。在翻译过程中对原书中的个

别错误进行了修改更正。但限于译者水平，如仍有不当之处，尚希读者及时提出以便修正。

本书出版得到中国矿业大学出版社总编谢桂林教授和中国矿业大学电工基础教研室主任周化仁副教授的热情支持和帮助，在此表示衷心感谢。

1990年5月

1. 吴竞昌、孙树勤、宋文南、曲涛编著。“电力系统谐波”，水利电力出版社，1988年

前 言

虽然我们对电力系统在主要发电机频率下的运行情况有相当充分的了解。但对系统中存在的谐波频率，不同的人理解为不同的事物。更为经常的则是理解为什么都不是。

那么，在现阶段，有没有需要和可能提供足够充分的信息，使大家都感兴趣并加以利用呢？

从当前国际委员会在电力系统谐波领域的活动看，从讨论会的数目和技术论文的不断增加看，编写一本关于这个课题的书是合适的，也是及时的。

如果只有一位作者，在选择主要的基本概念和普遍认可的技术方面，主观成分会较多，并且是一件困难的工作。但是，当本书三位作者多次交换意见之后，一个合理的统一的章节安排终于提了出来。我们希望这本书能够满足从事电力系统设计和运行的工程师需要，对于担任电力系统和电力电子学课程的教师、研究人员和学生也能有所帮助。

在本书中，除说明主要谐波产生原因和影响外，还包括分析、测定、透入和消除等四部分内容，并且讨论了现阶段制订谐波标准和限额的基本准则。

在准备书稿过程中引用了大量的报告和论文，以致我们无法分别对他们表示感谢，只能用替代的办法，将这些参考文献列在各章的后面。但是，我们必须提出坎特伯雷大学电工和电子系主任J.K.巴赫教授和新西兰电力公司，特别是K.D.马库尔总经理

以及P.S.巴纳特、M.C.温德希尔、P.J.墨菲、L.A.威尔逊、P.H.赫兰德和R.J.辛普生等人所给予的支持和鼓励。

我们还要感谢多次参加讨论并提供材料和意见的J.F.伯尔德（系统软件和测定，克赖斯特彻奇）、N.W罗斯（坎特伯雷电力中心管理局）以及我们的同事D.B.瓦特生和D.J.拜尔斯。

一些研究生也参加了这项工作的程序研究，我们要特别感谢B.J.哈克尔、T.J.丹塞姆、J.F.爱格斯顿和S.J.格林罗德等人的协助。

最后，对A.豪安女士在准备手稿过程中的主动合作表示我们的谢意。

目 录

译者序.....	(1)
前言.....	(1)
第一章 绪论.....	(1)
第一节 背景.....	(1)
第二节 谐波的性质.....	(2)
第三节 谐波问题的重要性.....	(3)
第二章 谐波分析.....	(5)
第一节 引言.....	(5)
第二节 基本概念.....	(6)
第三节 傅里叶分析.....	(7)
第四节 有限区间函数.....	(14)
第五节 傅里叶级数的复数形式.....	(16)
第六节 傅里叶变换.....	(18)
第七节 采样时间函数.....	(26)
第八节 离散傅里叶变换.....	(27)
第九节 快速傅里叶变换.....	(30)
第十节 线性调频Z变换.....	(35)
第十一节 奈魁斯特频率和混叠.....	(37)
第十二节 窗函数.....	(39)
第三章 谐波源—静止变流器.....	(50)
第一节 引言.....	(50)

第二节	大功率变流器	(51)
第三节	中型变流器	(67)
第四节	小功率变流器	(86)
第五节	非理想系统的情况	(93)
第六节	相控调制	(100)
第七节	整周波控制	(108)
第四章	其他谐波源	(112)
第一节	引言	(112)
第二节	变压器磁化的非线性	(112)
第三节	旋转电机谐波	(118)
第四节	电弧炉产生的畸变	(125)
第五节	荧光灯的谐波	(128)
第五章	谐波的影响	(133)
第一部分 在电力系统内部		
第一节	引言	(133)
第二节	谐振现象	(133)
第三节	谐波对旋转电机的影响	(137)
第四节	谐波对静止电力设备的影响	(140)
第五节	谐波对纹波控制系统的干扰	(142)
第六节	谐波对电力系统保护的影响	(143)
第七节	谐波对用户设备的影响	(145)
第八节	谐波对功率测量的影响	(146)
第九节	谐波畸变对功率因数的影响	(148)
第二部分 对通讯的干扰		
第十节	引言	(150)
第十一节	电话线路的简单模型	(151)
第十二节	影响干扰的因素	(152)
第十三节	电力系统对通讯线路的耦合	(152)

第十四节	谐波在通讯线路上的效应(感受度).....	(157)
第十五节	减轻干扰的措施.....	(163)
第六章	电力系统谐波测量.....	(168)
第一节	引言.....	(168)
第二节	电力系统谐波测量的发展.....	(169)
第三节	滤波器.....	(171)
第四节	信号平均法.....	(181)
第五节	模拟法频谱与谐波的模拟测量.....	(184)
第六节	用于频谱分析的数字方法.....	(193)
第七节	离线测量.....	(198)
第八节	谐波数据的展示.....	(200)
第九节	急待解决的问题.....	(211)
第七章	传感器与数据传送.....	(215)
第一节	引言.....	(215)
第二节	电流测量.....	(216)
第三节	电压测量.....	(219)
第四节	高压探头与钳式电流互感器.....	(230)
第五节	非传统的电流和电压互感器.....	(230)
第六节	数据传送.....	(234)
第八章	限制和控制电力系统谐波的标准.....	(247)
第一节	引言.....	(247)
第二节	影响制订谐波控制标准的因素.....	(249)
第三节	国家谐波标准.....	(253)
第四节	家用设备标准.....	(264)
第九章	交流系统中的谐波透入.....	(268)
第一节	引言.....	(268)
第二节	谐波潮流.....	(268)
第三节	阻抗的频率轨迹.....	(270)

第四节	用实验方法求等值谐波阻抗.....	(273)
第五节	网络分析在谐波透入计算中的应用.....	(275)
第六节	网络元件的模拟.....	(288)
第七节	算法的演变.....	(331)
第八节	谐波透入算法的计算要求.....	(337)
第九节	谐波透入算法的应用.....	(343)
第十章	谐波的消除.....	(369)
第一节	谐波滤波器的作用.....	(369)
第二节	定义.....	(369)
第三节	滤波器的设计准则.....	(371)
第四节	调谐滤波器.....	(373)
第五节	减幅滤波器.....	(381)
第六节	滤波器的典型结构.....	(385)
第七节	12脉冲变流器的带通滤波.....	(387)
第八节	滤波器元件的特征.....	(390)
第九节	滤波器的费用.....	(391)
第十节	直流侧滤波器.....	(399)
第十一节	消除谐波的其他设想.....	(401)

第一章 绪 论

第一节 背 景

一个理想的电力系统是以单一恒定频率与规定幅值的稳定电压供电。但实际上，这些条件都不能得到满足。电压与频率的偏离问题及使它们处于控制下的各种方法是传统电力系统分析的主题。一直为电力系统论著所忽略的波形畸变问题构成本书的主要内容。

电力系统波形畸变并不是一个新现象，在交流电的早期，电力工程师即已关心如何使畸变限制在可接受的范围内。近年来，由于在电力设备和系统的控制中，大量增加了容量很大的非线性电力电子装置，加重了人们对这一问题的关心。

对理想正弦波的偏离一般用谐波分量的多少来表示。在本章中我们对谐波性质和它们的重要性简单地做一个概括性阐述，后继各章再详细讨论谐波的产生原因、效应、监测和透入。对谐波限制的制定也将做一些讨论。

从历史的角度看这个问题，有必要回溯到18和19世纪，当时不少数学家，特别是傅里叶 (J.B.J. Fourier, 1768~1830) 的工作奠定了谐波计算的基础。

至于电力系统的谐波，主要是20世纪20年代和30年代期间，在德国，由于使用静止变流器造成波形畸变，遂开始引起重视。在此期间关于变流器理论最有影响的著作是里西克用英文出版的

一本书^[1]。而论述静止变流器产生谐波的经典论文则是瑞德写于1945年的一篇文章^[2]，今天仍为设计师所广泛使用。

在20世纪50年代和60年代期间，对变流器谐波的研究步入直流高压输电领域，并有大量论文发表。在金巴克所著的书^[3]中对这些论文做了扼要的论述，涉及电力系统谐波的文献有60余篇。过去的几年中，在一些国际会议中经常讨论此问题，并不时提出内容广泛的著作目录。最近的例子是美国电子与电工学会(IEEE)电力系统谐波工作组的报告。

第二节 谐波的性质

“谐波”这一术语源自声学，它指的是一根弦或一个空气柱以其基波频率的倍数频率振动。对于电信号，谐波的定义则是指频率为系统实际频率（即发电机产生的主要频率）整倍数的信号分量。

在示波器屏幕上观察到的复杂信号形状属于时域观测，即展示出波形每一瞬间的幅值。如将信号加到一个高保真的放大器上，则人耳听到的是频率混合后的总音调；它像一根音乐的和弦。所以，波形既可用时域表示也可用频域的数据描述。此两域间的相互变换组成第二章的主要内容。

从一开始就必须明确，只有当畸变波形能在无穷多个周波过程中保持不变的条件下这种转换才是完满可行的。实际上负载的改变将使系统的谐波含量发生变化。但是，只要所研究的情况能在一个合理的长时间内保持不变，上述问题不致引起困难。所以有必要将波形保持不变的谐波与波形逐周发生显著变化的瞬变情况区分清楚。

最后，在确定波形时，谐波对基波的相位关系是很重要的。在声学中，一般认为听觉不受相位关系的影响。但对于电信号却

不同，谐波的状况和来源各异同类谐波的相对相位关系都可能使总体效应发生显著变化。

第三节 谐波问题的重要性

像很多其他形式的污染一样，谐波的发生要影响整个（电）环境，而且可能波及到离谐波源很远的地方。

电力系统谐波最明显的恶果或许是在电话通讯中因感生谐波噪声而使通话质量下降。可是还有一些较少听说、却更具有灾难性后果的情况，例如使重要的控制和保护设备发生误动作以及使电力装置与系统过载等。波形污染的存在常常在遭受昂贵损失（如改善功率因数用的电容器被损坏）之后才被探测出来。在那些尚未将供电做为社会福利的国家里，受损部件的修理或替换，以及安装保护设备用的滤波器等，即便这些防护措施可以对环境起普遍改善的效果，也得由用户支付所有的费用。

近年来，在工业生产过程中，利用可控整流器操作有很大发展。从而产生了电流谐波，但在设计各种电工设备时，一般都假定电源电压中没有谐波畸变。实际上，只有当系统谐波阻抗很低时才发生这种情况。因此，一些较小的工业电能用户，会由于它们自身的控制设备与供电系统的相互作用而使困难不断增多。

供电部门对谐波的管理，通常是制订用户公共联接点处的电压谐波含量限制标准，或者提出限制建议。但如何确定谐波含量的限额并不是一件容易的事。现有知识还很不充分，还不能断言某个电力系统能承受谐波含量到什么程度，而不影响系统应该履行的功能。这是因为大部分现有的谐波知识来源于已发生的事故。到现在为止，所提出的标准和建议只不过反映了过去的经验，可以防止将来发生类似的问题。有关这方面的情况将在第八章中讨论。

一直到人们对电力系统的谐波现象有透彻理解之前，供电部

门只能处在比出现事故后担当责任并接受风险稍微好一点的境遇之中。

不能透彻了解的两个主要障碍是进行准确测量的能力（在第六章和第七章中讨论）和所采用的电力系统模型能否使分析深入到所需要的复杂程度（在第九章中讨论）。

所有电力工程师都应关心波形畸变，以便在运用畸变进行控制和使畸变处于控制之下两者之间取得恰当的平衡。因此，有必要在关心这一问题的各方之间进行事先协调，达成在经济上可以接受的解决方案。换句话说，必需尽早在生产厂家、供电部门和通信部门之间进行磋商，确定一个大家都能接受的基础。

为了培养这方面的人才，电工课程中应该传授跨学科的知识。特别是电力系统教师应该加强讲授频谱知识和有关频域方面的内容。必须明确说明零序与3次谐波不是一回事，并且功率因数也不只关系到主要工频。傅里叶分析，特别是傅里叶变换，必须既结合电力，也结合电信来讨论。最后，在讲授电力电子学时，也要对它所起的负作用，即引起波形畸变问题，给予充分的阐述。

参 考 文 献

1. Rissik, H(1935). *The Mercury Arc Current Converter*, Pitman, London.
2. Read, J. C. (1945). 'The calculation of rectifier and inverter performance characteristics'. *J. IEE*, Pt II, 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 II'. IEEE papers 84WM 214-3 and 84WM 215-0, presented at the Winter Power Meeting, Dallas, January 1984.

第二章 谐波分析

第一节 引言

法国数学家傅里叶 (1768~1830) 于1822年在其著作《热的理论分析》^[1]中, 提出周期为 T 的任何连续函数, 能够用正弦基波分量和一系列高次谐波分量之和来表示。这些高次谐波的频率是基波频率的整数倍。

谐波分析是计算周期性波形的基波和高次谐波幅值和相角的方法。谐波分析所得到的结果, 通常称之为傅里叶级数, 并由其建立时域函数与频域函数之间的关系。

本章的前一部分给出一般周期性波形的傅里叶级数, 并通过简单波形讨论它们的特性。

更普遍地说, 在时域和频域之间均可通过傅里叶变换或反变换, 将在 $-\infty$ 至 ∞ 区间内的任何函数映射到另一域的连续函数。由此可见, 傅里叶级数是傅里叶变换用于周期性信号的特殊情况。

实际的数据, 常以采样时间函数的形式给出。它是在有限的区间内按固定的时间间隔表述幅值的时间序列。通常用离散傅里叶变换来处理采样的数据。离散傅里叶变换用快速傅里叶变换的算法作为工具, 形成现代频谱和谐波分析方法的基础。为介绍快速傅里叶变换, 在本章还将介绍傅里叶变换和离散傅里叶变换的发展过程。

第二节 基本概念

一、周期函数^[2]

如果对所有的实数 t 定义函数 $x(t)$ 为周期性的, 则当存在某正数 T 时, 对所有的 t 应有

$$x(t+T) = x(t) \quad (2-1)$$

式中 T 称为函数的周期。周期函数能用区间 T 上的波形作周期性地重复描述, 如图2-1所示。

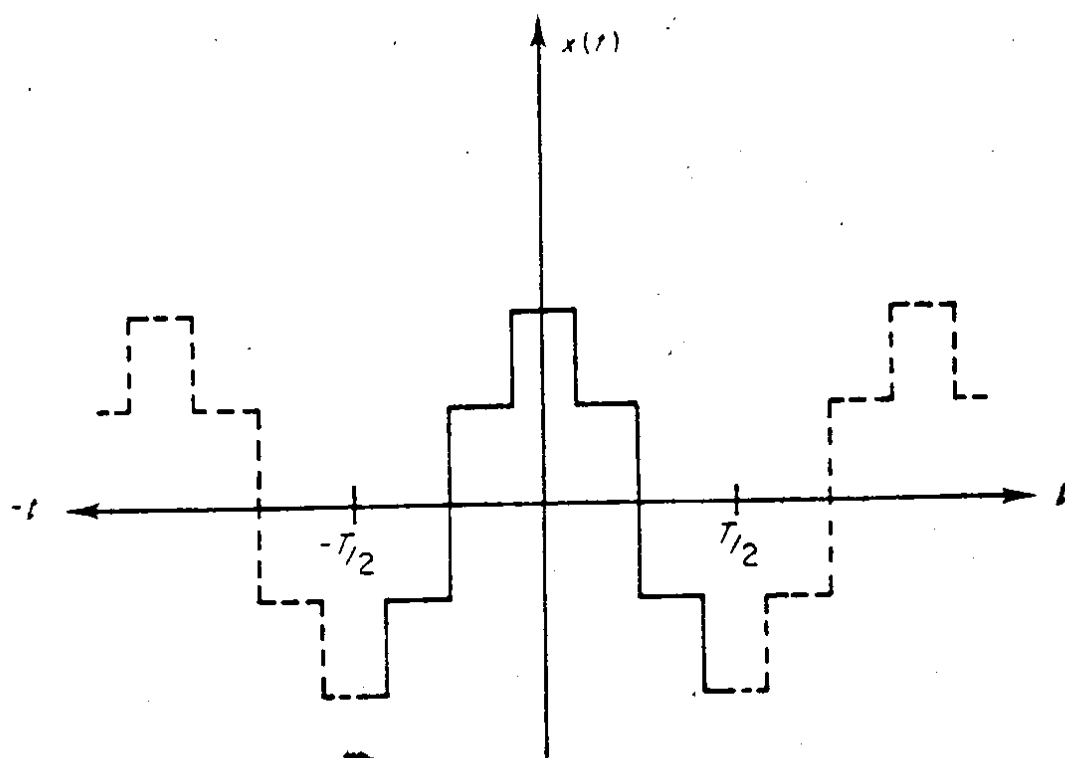


图2-1 周期函数

若 k 为任何整数, 则对于所有的 t 有

$$x(t+kT) = x(t) \quad (2-2)$$

若两个函数 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 具有相同的周期 T , 则函数

$$x_3(t) = ax_1(t) + bx_2(t) \quad (2-3)$$

也有相同的周期 T , 式中 a 和 b 均为常数。

应当指出, 根据上述定义可以认为函数

$$x(t) = \text{常数} \quad (2-4)$$

也是周期性函数, 因为对于任何正周期 T , 它满足式 (2-2)。

二、正交函数^[2]

两个非零函数 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 在区间 T_1 至 T_2 内正交, 则

$$\int_{T_1}^{T_2} x_1(t)x_2(t)dt = 0 \quad (2-5)$$

推广之, 设有一组 r 个函数 $\{x_1(t), x_2(t), \dots, x_r(t)\}$, 在区间 T_1 至 T_2 内相互正交, 则

$$\int_{T_1}^{T_2} x_i(t)x_j(t)dt = 0, \text{ 对于 } i = 1, \dots, r; j = 1, \dots, r; \\ i \neq j, \quad (2-6)$$

第三节 傅里叶分析

一、傅里叶级数和系数^[2.3]

周期函数 $x(t)$ 的傅里叶级数表达式为

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (2-7)$$

上式构成周期函数的频域表达式。式中 a_0 为函数 $x(t)$ 的平均值, 而系数 a_n 和 b_n 为第 n 次谐波的两个直角坐标分量。对应于第 n 次谐波的矢量为

$$A_n \angle = a_n + jb_n \quad (2-8)$$

其幅值为

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

相角为

$$\phi_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$