

POWER HARMONICS

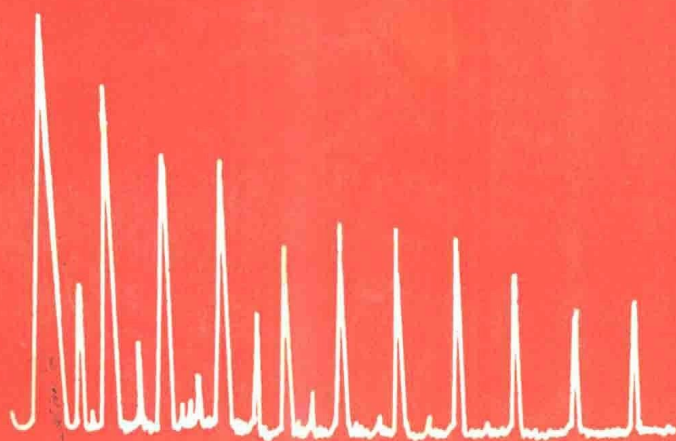
POWER HARMONICS

电力谐波

电力谐波

电力谐波

张一中 宁元中 宋永华 朱光永



成都科技大学出版社

电 力 谐 波

张一申 宁元中 宋 华 朱光永 编著

成都科技大学出版社

1992年

(川)新登字015号

内 容 简 介

本书是介绍电力谐波问题的专著，较全面地反映了国内外谐波研究的主要成果，系统、详细地论述了电力谐波研究的理论与实践。全书共分八章，主要内容有谐波分析的基本概念和原理、谐波产生的机理和危害、测量技术、治理和标准。

本书可作为电力、冶金、化工，电气化铁道、电力电子器件及家用电器等专业的硕士研究生和高年级大学生的教材或教学参考书，也适合有关专业的科研、设计人员参考。

电 力 谐 波

张一中 宁元中 宋永华 朱光永 编著

成都科技大学出版社出版发行

成都科技大学印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：11.5625

1992年2月第1版 1992年2月第1次印刷

字数：290千字 印数：1—2300

ISBN 7-5616-1019-X/TB·35

定价：7.80元

Socrates said that the unconsidered life is not worth living. If the statement is valid, as I believe it is, then those of us who are engineers in the final quarter of the twentieth century are confronted with certain questions of compelling interest. What is the nature of the engineering experience in our time? What is it like to be an engineer at the moment that the profession has achieved unprecedented successes, and simultaneously is being accused of having brought our civilization to the brink of ruin?

Samuel C. Florman

The Existential Pleasures of Engineering

前 言

本世纪20—30年代在美国和德国都曾发生过电冶厂汞弧整流器投入运行后，使厂内及附近单位电话听不清的事情，近年来又发现电气化铁道一通车，就引起供电网继电保护动作，供电中断，电气列车停下来；甲地某厂电弧炉开炉，本厂的其它自动装置失灵或乙地精密仪器不能正常工作；装有换流设备的工厂厂内电缆寿命大大缩短；同一种装置在甲地能正常工作，在乙地就不能正常运行；三相四线制电网中线电流比相线电流大若干倍等等，为什么会出现这些“反常”现象？原来随着科学技术的发展，电能用户投入了大量的新设备，这些设备就其自身的功能来讲是先进的，但对电能的消耗特性来讲却带来了新的问题——使交流电的波形发生畸变，波形畸变给电能用户、电力系统以及周围的电磁环境带来了严重危害，上述奇特现象就是波形畸变引起的，当前已把这类问题与现代工业发展带来的环境污染类比，称之为“谐波污染”，对这种波形畸变引起的一系列响应，常用频域法进行分析，习惯上称为“电力谐波”。

“电力谐波”虽然在交流电一问世就提出来了，但把它作为电工理论、电气技术中的一个重大课题还是近20—30年的事，它的出现给电工理论、电网理论、电气技术、电力电子学、测量技术及控制技术等提出了一系列的新课题，它正在逐步成为与上述理论和技术紧密结合的一门边缘学科，“电力谐波”也可以认为是“电磁兼容学(EMC)”的一个分支，它主要研究电力谐波产生的物理机理和分析方法；有关的测量技术与信息处理；产生危害的机理、范围及可容度；消除或抑制的措施以及由此而引

起的理论与技术问题。

“电力谐波”问题还在不断发展。如：高压直流输电(HVDC)；直接将热能转换成电能的磁流体发电、电气体发电、热电子发电和温差发电；直接将化学能转换成电能的燃料电池；直接利用光电转换的光电池等新型发电方式，都有一个如何保证以正弦波电压向电网供电的问题。在用户方面，工业、冶金、矿山、化工、交通，以及人们的日常生活，都日益广泛地采用电力电子装置(如整流、逆变、交流调速等)，电热熔炼，热处理装置以及其它带有时变和非线性元件的装置，这些都会引起波形畸变，这就有一个如何保持电压波形不受损害的问题。对于电机和电器制造厂来讲，一是要考虑不向或少向电网注入谐波，二要考虑设备对谐波的承受能力。

值得特别强调的是，谐波问题是一个系统问题，它不仅与引起谐波的“谐波源”有关，而且与系统的接线方式、设备参数和运行状态有密切的关系。如由四个6脉动换流器组成的24脉动换流器，全部投入工作时没有什么问题，但在部分投入时就可能出现問題。又如有的装置在特征谐波上没有問題，但在非特征谐波上发生了問題。

为了安全、可靠、经济地发、供、用电和保证电能质量，在电气工程技术人員及工人中树立“电力环境”的观念是很有必要的，要时刻警惕电力系统受到谐波污染。为此，应在大学的相应专业开设有关的课程。本书就是为电力、电气技术以及工业企业电气化、自动化等类专业高年级大学生及研究生编写的一本教材。本书也可作为从事电力系统及工厂用电方面的在职人員继续教育的教材和自修读物。

本书由张一中主编，第一、二、五、六章由宁元中执笔；前言及第三、四章由张一中执笔；第七章及第八章8.1—8.3节由宋永华执笔；第八章8.4—8.6节由朱光永执笔。

本书是在我们近年来开展这方面的科研工作并为研究生开设“电力谐波分析”课程的基础上编写的。目的是力图反映电力谐波方面国内外的基本情况。这作为大学生的教材，在国内外尚不多见。算是我们的一次尝试。限于水平，书中难免存在缺点，恳请读者批评指正。

最后，感谢成都科技大学电力系的领导和老师们，他们对本书的编写与出版给予了热情的鼓励与大力支持。

编 者

1991年8月15日于成都科技大学

目 录

前言

第一章 绪论

- 1.1 引言..... (1)
- 1.2 电力谐波..... (2)
- 1.3 电力谐波与波形畸变..... (8)
- 1.4 研究电力谐波的意义..... (11)

第二章 谐波分析的数学基础

- 2.1 傅里叶级数..... (15)
- 2.2 傅里叶变换..... (30)
- 2.3 离散傅里叶变换..... (38)
- 2.4 快速傅里叶变换..... (43)
- 2.5 均匀抽样定理与频谱混叠..... (49)
- 2.6 窗函数与频谱泄漏..... (52)
- 2.7 沃尔什级数..... (58)

第三章 谐波源

- 3.1 引言..... (68)
- 3.2 大功率换流器..... (69)
- 3.3 中等容量换流器..... (86)
- 3.4 小容量换流器..... (101)
- 3.5 换流装置的非特征谐波..... (107)
- 3.6 相位调制控制..... (114)
- 3.7 开关函数法..... (117)

3.8	整周波控制.....	(123)
3.9	变压器.....	(125)
3.10	旋转电机.....	(130)
3.11	电弧炉.....	(139)
3.12	荧光灯.....	(140)

第四章 谐波的危害

4.1	引言.....	(144)
4.2	谐振.....	(144)
4.3	谐波对旋转电机的危害.....	(147)
4.4	谐波对静止电力设备的危害.....	(150)
4.5	谐波对继电保护装置的干扰.....	(153)
4.6	谐波对用电设备的影响.....	(160)
4.7	波形畸变对功率测量的影响.....	(162)
4.8	波形畸变对功率因数的影响.....	(164)
4.9	电力谐波对通信的干扰.....	(166)
4.10	通信回路对干扰信号的敏感度.....	(172)

第五章 交流电网的谐波模型

5.1	引言.....	(177)
5.2	交流电网的时域模型.....	(177)
5.3	交流电网的频域模型.....	(180)
5.4	交流电网的导纳矩阵.....	(183)
5.5	并、串联装置的电路模型.....	(195)
5.6	输电线模型.....	(199)
5.7	变压器电路模型.....	(219)
5.8	负载模型.....	(230)

第六章 交流电网的谐波分析

6.1	引言	(232)
6.2	谐波潮流分析	(232)
6.3	电流注入法	(248)
6.4	谐波分析的计算程序结构	(265)
6.5	交流电网的谐波特性分析	(272)

第七章 谐波测量

7.1	引言	(288)
7.2	测量用互感器	(289)
7.3	畸变波形下各种电量的测量	(297)
7.4	谐波分析仪	(308)
7.5	谐波数据处理	(317)

第八章 电力谐波的治理与标准

8.1	引言	(326)
8.2	国外限制电力谐波的标准	(328)
8.3	我国电力系统谐波管理的暂行规定	(333)
8.4	无源滤波装置	(339)
8.5	有源滤波装置	(347)
8.6	减小谐波的其它方法	(353)

第一章 绪 论

1.1 引言

早在19世纪末，当交流电以一种新兴的动力形式出现时，人们就发现了电力系统中电压、电流的波形畸变问题，并同时波形畸变的原因及消除方法等开始研究。到本世纪20—30年代，德国科学家们围绕静止换流器(汞弧整流器)产生波形畸变的问题，对电力系统的谐波进行了较为系统的观察和分析。1935年瑞塞克(H. Rissik)出版了一本专著，总结了这一期间的成果。稍后，在1945年里德(J. Read)发表了一篇有关静止换流器谐波产生及消除等问题的著名论文，该文至今仍为工程技术人员所重视。到本世纪50—60年代，关于换流器谐波的研究已经深入到高压直流输电领域，在此期间又有大量的文章发表，1971年金巴克(E. Kimbark)的著作中汇集了有关电力系统谐波问题的60多篇文献，基本上全面地反映了在这段时间内电力系统谐波研究理论和实践两方面的进展。

最近十几年间，对电力系统谐波问题的研究，已经越过了电力系统自身的研究范围，渗透到了数字信号处理、计算技术、系统仿真、通信理论、电力电子学、网络理论和非线性系统理论等其它学术领域。同时，电力系统谐波问题已经受到了世界各国经济、行政管理部門的重视，不少国家已先后制定了限制电力系统谐波的标准，其中也包括一些限制和管理措施。如许多国家相继颁发了限制带有电子控制器件的家用电器和低压电器产生谐波的标准。国际电工委员会(IEC)、电气和电子工程师协会(IEEE)等国际学术机构，也成立了专门的电力系统谐波工作组，在世界

范围开展包括制定标准和定期召开国际学术会议等项内容的工作。IEEE组织的两年一度的国际电力系统谐波会议(ICHPS), 1990年在匈牙利召开了第四次例会。中国电机工程学会也成立了专门的下属机构, 在国内开展学术活动和组织与国际学术界的交流。尽管近十几年来, 在电力系统谐波问题的研究中取得了前所未有的进展, 但是目前人们对此问题的兴趣仍是有增无减, 其中有一个很重要的原因, 就是学术上还有许多问题需要人们去研究、去解决, 只有在研究、解决这些问题的同时, 才能真正谈得上制定合适的法规或标准来限制和管理电力系统的谐波, 和对其进行有效的治理。这些问题可以归纳为以下几个方面:

(1) 如何从器件(如: 变压器和其它电磁器件、换流器、特别是各种电力电子器件等)的角度出发去分析和理解谐波产生的原因。

(2) 如何利用先进的信号分析设备、数字仪表、智能仪表等, 对谐波的幅值和相位进行准确的测量。

(3) 如何利用网络分析方法对谐波分布进行分析, 以及如何建立模型和进行数字仿真。

(4) 如何从谐波角度去衡量电能的质量。

有人曾经预言: 通过对这几方面问题的研究, 将会导致新方法、新技术乃至新的边缘分支学科的诞生。

1.2 电力谐波

电力系统中出现的电压、电流等的周期性波形畸变, 即周期性非正弦变化, 通常可以用谐波分析的方法来加以研究。物理学上对谐波问题的研究, 可以追溯到18世纪甚至更早。但是, 只是在1822年法国数学家傅里叶(J. B. Fourier)提出并证明能将周期函数展开为正弦级数之后, 对谐波的研究才真正被纳入了数学的严谨轨道。众所周知, 任何一个随时间作永无休止重复变化的

量，都可以“分解为它的简谐分量”，这里所指的量，可以是电力系统中的电压或电流，也可以是振动着的弦上某点与平衡位置的偏移，也可以是室内某点因声波通过而变化着的压强，关键在于只要这个量是以某个基本频率(即已知周期的倒数)不断重复变化的，不管其在一个周期内有多么复杂多么不规则，从数学上讲如果满足“狄义赫利(Dirichlet)条件”，它都可以展成一个常数、一个频率是基本频率的正弦函数和一系列频率是基本频率的二倍、三倍……等整数倍的正弦函数之和，即可展成傅里叶级数。一个已知周期的电压或电流展成傅里叶级数后，我们把上面所说的那些项称为这个电压或电流的直流分量、基波分量和一系列的谐波分量。

目前，世界上在电力工程中，几乎全部都是采用正弦方式供电的。在理想的电力系统中，电源应是按单一恒定的频率，以正弦函数的变化规律向电网供电。如果电力系统中各种电气设备的电气特性，是不随时间变化而变化的(时不变性)，当输入增加或减少一定比例时，输出也同时增加或减少同样的比例(齐次性)，以及当有多个输入同时作用时产生的输出，总是各个输入分别作用时产生的输出之总合(叠加性)，那么这个电力系统就可称为是一个线性(同时具有齐次和叠加性)时不变系统，系统中的电压、电流一定都是以单一恒定的供电频率随时间变化而变化的正弦量。这些电压和电流彼此只存在着幅值和相位的差异，它们与电源电压之间也只存在着幅值和相位的差异，都是具有相同频率的正弦量。用复指数或复平面上的旋转矢量来表示这些同频正弦量，以及电力系统中各种电气设备在一定条件下的线性时不变特性，构成了传统的电力系统分析方法的基础。在此基础上人们通过几十年的努力，对电力系统的各种理想的正弦特性，已经有了深入和全面的了解。

电力系统中电压、电流产生周期性畸变的原因中，最显而易

见的是：电力系统本身存在有周期性的非正弦独立电源。如象电流源

$$i_s(t) = \sum_{n=0}^m \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n),$$

它是由不同频率的正弦电流分量叠加而成的，当它注入线性时不变的电力系统后，产生的电压、电流仍然是由这些频率的正弦分量组合而成的，输入的畸变直接造成了输出的畸变。当电力系统不能近似为线性时不变系统时，输出的情况会变得异常复杂。

在理想情况下，电力系统中所有的电源都是按相同的单一恒定频率向电网提供正弦电压。一般说来，一个实际的电力系统基本上也能满足上述理想条件。然而，当电力系统中存在有非线性(时变或时不变)负载时，即使电源都是以同一工频(工业频率，50Hz或60Hz)供电，当工频电压或电流作用于非线性负载时，也会产生不同于工频的其它频率的正弦电压或电流，这种由非线性负载引起的变化可以用下面的例子作一个简单的说明。例如：当正弦电压

$$v(t) = \sqrt{2} V_1 \sin \omega_1 t$$

作用在一个电流-电压关系为

$$i(t) = k v^3(t)$$

的非线性时不变电阻两端时，由简单的三角函数关系可以得到此时流过非线性电阻的电流应为

$$i(t) = \frac{3}{2} \sqrt{2} k V_1^3 \sin \omega_1 t - \frac{1}{2} \sqrt{2} k V_1^3 \sin 3\omega_1 t,$$

可见输入电压的频率为 ω_1 ，而输出电流则包含了频率为 ω_1 和 $3\omega_1$ 的不同频率的正弦分量。

在电力系统中，电动机、变压器、各种电子设备、家用电器和照明设施等，都具有形式各异的非线性特性。在工频供电时它们都会产生频率为工频的整数倍或分数(分子为1，分母为整数)

倍的正弦电压或电流。

电力系统中也存在时变(线性或非线性)负载, 这类负载的电气特性是随时间变化而变化的。例如, 时变电导

$$G(t) = G_0 \sin \omega_g t,$$

它所表示的是一个电导随时间作正弦规律变化的线性时变元件, 元件的电流-电压关系依然由欧姆定律确定, 即

$$i(t) = G(t)v(t),$$

如果元件两端的电压为

$$v(t) = \sqrt{2} V_1 \sin \omega_1 t,$$

那么, 流过线性时变电导的电流则为

$$i(t) = \frac{1}{2} \sqrt{2} V_1 G_0 \{ \cos(\omega_1 - \omega_g)t - \cos(\omega_1 + \omega_g)t \},$$

式中, 当 ω_g 是 ω_1 的偶数倍时, $i(t)$ 中的频率就是 ω_1 的奇数倍; 当 ω_g 是 ω_1 的奇数倍时, $i(t)$ 中的频率则为 ω_1 的偶数倍。如果 ω_g 与 ω_1 之比是一个有理分数, 那么, 电流 $i(t)$ 中的最低频率可能小于 ω_1 , 电流中大于 ω_1 的频率也可能出现在 ω_1 的整数倍频率之间, 而且输入频率 ω_1 也可能在输出中消失。在电力系统中, 具有周期性或非周期性开关功能的各类电子器件, 它们的电压和电流特性, 都可以用一个时变元件来表示。

从以上对电力系统中谐波产生原因的简要说明中, 不难理解: 当实际电力系统中产生的谐波电压或电流, 作用于系统中具有非线性时变特性的器件时, 要确定这些实际器件的电压或电流, 或者说要问它们的电压或电流中包含的各种频率的正弦分量的幅值和相位, 这已不是仅仅依靠传统的电力系统分析方法所能直接解决的问题了。

在电力系统中, 如果一个电流或电压的畸变是周期性的, 而且变化的周期 T 是已知的, 那么, 我们就能确定这个畸变电流或

电压的基本频率(fundamental frequency) $f_1=1/T$, 或者用角频率 ω_1 表示为 $\omega_1=2\pi/T$. 将这个电流或电压表示为傅里叶级数, 级数中的三角函数项除了频率为 f_1 的之外, 其余的三角函数项的频率都是基本频率 f_1 的大于1的整数倍, 即 $2f_1, 3f_1, \dots$ 等, 它们就是基本频率 f_1 的谐波(harmonics), 而 $2f_1, 3f_1, \dots$ 等则分别称为基本频率 f_1 的第二次谐波、第三次谐波、 $\dots$ 等.

实际测量一个畸变电压或电流时, 往往并不能预先准确地知道畸变波形的实际周期, 甚至不能确定所测的畸变波形是否是周期性变化的. 在这种情况下, 一般可以首先选择电力系统的工频(50Hz或60Hz)作为畸变电压或电流的拟定基本频率, 然后用傅里叶级数来近似被测的畸变波形, 再将以工频作为基本频率展成的傅里叶级数与实际波形相比较, 把两者不吻合的部分按重新选择的基本频率——工频的某个有理分数倍——展成傅里叶级数, 这个过程只要能反复进行下去, 就可以按预先指定的精确度, 获得被测畸变波形的傅里叶级数展开形式. 在按照上述方法获得的傅里叶级数中, 频率为工频整数倍的那些频率就是通常意义下的工频的谐波, 而对于那些频率为工频的分数倍的频率, 当它们小于工频时, 则称为工频的次谐波(subharmonics), 当它们大于工频时, 则称为工频的中间谐波(interharmonics).

如果电力系统中的畸变电压或电流, 能够在合理的数学模型的基础上, 运用网络分析的方法, 通过计算而获得这些畸变波形的傅里叶级数, 那么, 在一般情况下, 傅里叶级数中的最低频率或者级数中各频率的最大公约数, 就是这个畸变波形的基本频率; 畸变波形的周期等于基本频率的倒数. 傅里叶级数中的其它频率都是这个基本频率的谐波, 尽管这些频率可能是工频的次谐波或者中间谐波. 应当注意到, 往往当我们谈到第几次谐波时, 一定是相对于某一个特定的基本频率而言的.

电力系统中某一设备、器件或局部电路, 在工频电源激励下

正常工作时，所必然要产生的谐波(包括工频的次谐波和中间谐波)称为该设备、器件或局部电路的特征谐波(characteristic harmonics)，而把在电压不平衡时、相位或触发角不对称时、或者在其它非正常工作条件下产生的谐波称为该设备、器件或局部电路的非特征谐波(uncharacteristic harmonics)。例如：三相六脉动换流器的特征谐波为工频的 $6k \pm 1 (k=1, 2, \dots)$ 倍，而变频换流器的特征谐波因为与输出频率有关，所以会包含工频的次谐波和中间谐波。

在理想的三相对称电力系统中，畸变波形的谐波相电压也应呈对称分布，谐波相电压彼此仅在时间上相差周期 $T=2\pi/\omega_1$ 的三分之一，所以电力系统中第 n 次三相谐波电压可以表示为

$$v_{a.}(t) = \sqrt{2} V_{.} \sin(n\omega_1 t + \theta_{.}),$$

$$v_{b.}(t) = \sqrt{2} V_{.} \sin \left[n\omega_1 \left(t - \frac{T}{3} \right) + \theta_{.} \right],$$

$$v_{c.}(t) = \sqrt{2} V_{.} \sin \left[n\omega_1 \left(t + \frac{T}{3} \right) + \theta_{.} \right].$$

其对称分量中的零序分量为

$$\begin{aligned} v_{..0}(t) &= \frac{\sqrt{2}}{3} V_{.} \left[\sin(n\omega_1 t + \theta_{.}) + \sin \left(n\omega_1 t + \theta_{.} - \frac{2\pi n}{3} \right) \right. \\ &\quad \left. + \sin \left(n\omega_1 t + \theta_{.} + \frac{2\pi n}{3} \right) \right] \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} V_{.} \sin(n\omega_1 t + \theta_{.}) \left[1 + 2\cos \left(\frac{2\pi n}{3} \right) \right], \end{aligned}$$

正序和负序分量为

$$v_{..+}(t) = \frac{\sqrt{2}}{3} V_{.} \sin(n\omega_1 t + \theta_{.}) \left[1 + 2\cos \frac{2\pi(n-1)}{3} \right],$$