

电力新技术丛书

电力网中的谐波

林海雪 孙树勤 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书共分七章，分别论述了电力网中谐波的基本概念及其分析方法、主要谐波源、谐波的危害、谐波在电力网中的传递、谐波的测量、谐波标准及对谐波的监督管理、减小谐波影响的技术措施等。

本书可供从事电力系统工作的工程技术人员和从事工业企业用电管理的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力网中的谐波/林海雪，孙树勤编著. -北京：中国电力出版社，1998

(电力新技术丛书)

ISBN 7-80125-562-3

I. 电… II. ①林…②孙… III. 电力系统结构-谐波 IV. TM131.4

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 邮政编码 100044)

北京鑫正大印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1998年4月第一版 1998年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 5.5印张 118千字

印数 0001—3470册 定价 9.40元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

《电力新技术丛书》出版说明

我国电力工业的发展取得了举世瞩目的成就,从1978年到1997年的19年中装机容量及发电容量连续上两个台阶(1987年装机容量达1亿kW及1995年装机容量达2亿kW),到1996年底已居于世界第2位。电力工业的领导者向我们提出了建“一流电网”的号召,针对当前两个根本性转变的关键时刻,提出要进行由计划经济体制向具有中国特色的社会主义市场经济体制转变的第二次创业。其目标就是要保持电力工业持续、快速、健康地发展和电力供给与需求的平衡,从而保证国民经济的发展和社会的进步以及人民生活水平的日益提高。为达到建成“一流电网”的目的,必须有一流的人才,用一流的技术,并且得到各行业的关心、支持和理解。本套《电力新技术丛书》即是用深入浅出的叙述方法介绍有关一流电网的新技术。希望关心这些问题的有关人员可以用较短的时间理解这些问题的概要,加深对这些问题关注和支持。

本丛书的作者们都是从事所写专题多年的工作者,并在该专题领域有开拓性的贡献。他们出于“甘为人梯”的想法,把自己的体会及资料尽可能深入浅出地写出,希望读者能用最少的投入,掌握作者的所知所得。

本丛书包括一些具有现实意义和广阔应用前景,并在国际上或国内处于前沿地位的高新技术。例如微机继电保护、电力网中的谐波、电网调度员培训模拟(DTS)、人工神经网络原理及其应用、配电系统自动化及其发展、面向对象设计的

开放式能量管理系统、模糊数学在电力系统中的应用、电力电子学在电力系统中的应用——灵活交流输电系统、直接法稳定分析、无功补偿的矢量控制等，读者可以根据需要与可能选用。

本丛书的宗旨是用读者容易理解的体系和叙述方法，深入浅出、循序渐进地就各专题题目的引出，专题的基本原理和理论及对电力系统的影响进行简要论述，并对专题的应用领域和前景及可能产生的效益作出评述。

本丛书的读者对象为科研、教学、生产第一线的电力工程技术人员，特别是工作五年左右的年轻工程师及大、中专院校有关专业的学生。由于科学技术的飞速发展以及我们的水平有限，丛书肯定会存在许多不足，丛书的书目和内容也应当不断发展和更新。我们热诚地希望得到社会各界和广大读者的批评指正。

王平洋 周孝信

前 言

电力网中的谐波问题已引起广泛的关注，这是由于随着现代工业技术的发展，电网中非线性负荷（例如晶闸管换流设备、电弧炉、家用电器等）大量增加，供电电压的波形发生了严重的畸变（即电网中谐波含量急剧增加），影响了电力网和电气设备的安全和经济运行，并危及广大用户的正常用电和生产。

我国在电力谐波领域的工作始于 80 年代初期，至今在电网谐波水平的普查，谐波分析、测量及危害的治理等多方面取得了不少成果。1984 年，水利电力部颁布了 SD126—84《电力系统谐波管理暂行规定》；1988 年，中国电机工程学会高次谐波分专业委员会成立。这些都促进了谐波工作的普及和提高和学术交流活动的开展。经过多年努力，国家标准 GB/T 14549—93《电能质量 公用电网谐波》已正式颁布执行。

目前，各级电力主管部门正将电网谐波监督管理工作纳入电力生产正常轨道。全国各大电网和省电力部门均开展了谐波测量和试验研究工作，并正在建立健全谐波监督管理机构，因此，进一步普及谐波专业知识势在必行。

为此，中国电力出版社委托电力部电力科学研究院组织编写谐波技术的普及读物，本书即为此目的而编写。和已出版的一些专业书相比，本书在内容上较为精简，同时反映了谐波领域的一些最新成果。

本书的绪论及第一、三、六、七章由电力科学研究院林海雪高级工程师（教授级）编写；第二、四、五章由清华大

学孙树勤教授编写。限于我们的水平和条件，书中缺点在所难免，恳请读者批评指正。

中国电力企业联合会吴竞昌高级工程师（教授级）对本书作了仔细审查，并提出了不少宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

编 者

1994 年 9 月

目 录

《电力新技术丛书》出版说明

前言

绪论	1
1. 谐波的基本概念及其分析方法	3
1.1 谐波的基本概念	3
1.2 非正弦电路的功率	9
1.3 畸变波形的频域分析	12
1.4 信号的采样和频谱分析	20
1.5 畸变波形的时域分析	25
2. 主要谐波源	28
2.1 概述	28
2.2 整流器	29
2.3 脉宽调制的变频器	40
2.4 电弧炉	42
2.5 电气化铁道	44
2.6 电力变压器	51
2.7 家用电器	54
3. 谐波的危害	56
3.1 谐振	56
3.2 对旋转电机的影响	58
3.3 对变压器的影响	62
3.4 对电容器和电缆的影响	64
3.5 对输电线的影晌	65

3.6	对断路器和消弧线圈的影响	66
3.7	对用电设备的影响	66
3.8	对测量和计量仪表的影响	68
3.9	对继电保护和自动装置的影响	71
3.10	谐波引起的电气设备等值损失的估算	76
3.11	对通信的干扰	78
4.	谐波在电力网中的传递	83
4.1	电力网元件的等值谐波参数	83
4.2	谐波潮流分析概要	85
4.3	谐波网络分析的添加支路算法	87
4.4	谐波的传递	89
5.	谐波的测量	92
5.1	概述	92
5.2	电压、电流和功率的测量	92
5.3	谐波分析仪和磁带记录仪	96
5.4	谐波阻抗的测量	99
5.5	对电流和电压互感器的要求	101
6.	谐波标准及对谐波的监督管理	103
6.1	国外谐波标准概述	103
6.2	国家谐波标准简介	108
6.3	电网谐波的监督管理	117
7.	减小谐波影响的技术措施	119
7.1	概述	119
7.2	增加换流器的相数	121
7.3	防止并联电容器组对谐波的放大	122
7.4	交流滤波装置	129

7.5 静止无功补偿装置	141
7.6 有源滤波器简介	143
附录 电磁兼容的基本概念及 IEC 相关标准简介	147
参考文献	164

绪 论

在现代工业企业和运输部门中，非线性电力负荷在大量增加。随着电力电子技术的发展，晶闸管整流和换流技术得到广泛的应用，例如：冶金、化工、矿山部门大量使用晶闸管整流电源；工业中大量使用变频调速装置；电气化铁道中采用交流单相整流供电的机车；高压大容量直流输电中的换流站；家用电器（电视机、电冰箱、洗衣机、电子节能灯）等等。炼钢电弧炉的容量不断扩大，单台容量由过去几吨发展到 300~400 吨，相应的电炉变压器容量也由几个兆伏·安发展到几十甚至一二百兆伏·安。此外，工业中广泛使用的电弧和接触焊设备、矿热炉、硅铁炉、高频炉等也均属非线性电力负荷。电力变压器容量在不断发展，已成为电力网中的一个重要非线性负荷。

非线性负荷从电网吸收非正弦电流，引起电网电压畸变，因此通称为谐波源。电网谐波对各种电气设备，对继电保护、自动装置、计算机、测量和计量仪器以及通信系统均有不利的影响。由于谐波的作用引起的经济损失主要是恶化了电能质量指标，降低了电网的可靠性，增加了电网损失，缩短了电气设备的寿命，在有些情况下还使产品的质量降低，数量减少。目前，国际上公认谐波“污染”是电网的公害，必须采取措施加以限制。

电网谐波问题早在 20 年代就已提出。60 年代前后，一些工业发达国家对此开展了大量的研究，内容涉及有关基本理

论，各种谐波源的特性，谐波的危害，谐波在电网中传递的分析计算，测量仪器和测量方法，限制谐波的措施以及谐波标准等方面。从1984年开始，每两年召开一次的电力系统谐波国际会议（ICHPS），为这个领域的国际交流提供了直接的渠道，正推动着谐波研究工作的深入开展。

从1980年以来，我国许多科研和生产单位，一些高等院校陆续开展了谐波测试和研究工作。1993年，国家标准GB/T14549—93《电能质量 公用电网谐波》已正式颁布。目前，我国不少电网的谐波含量已大大超过了标准值，并出现不少问题，引起了电力部门的关注，谐波管理和监督工作正在纳入电力生产的正常轨道。

本书全面扼要地介绍现代电网中谐波的有关问题，供广大电力工程技术和管理人员参考，也可以用作专业普及培训教材。

1. 谐波的基本概念及其分析方法

1.1 谐波的基本概念

习惯上,认为电网稳态的供电电压波形为工频正弦波形,其数学表达式为

$$u(t) = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \alpha) \quad (1.1)$$

其中 $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

式中 U ——电压的有效值,其幅值为 $\sqrt{2}U$;

α ——初相角;

ω 、 f 和 T ——工频角频率、频率和周期。

在电路中线性无源元件上的电压和电流的关系,不外乎比例 ($u= Ri$), 微分 $\left(u=L \frac{di}{dt}\right)$ 和积分 $\left(u=\frac{1}{C} \int i dt\right)$ 等关系。正弦周期函数在进行加、减、微分和积分等运算时仍保持正弦函数的特点,所以在电网中要求尽可能由正弦波形的电源供电。但是由于非线性负荷的存在,目前电网电压的波形往往偏离正弦波形而发生畸变。畸变波形可以用一系列不同频率的正弦函数之和来近似。以图 1.1 所示的周期性方波为例,可以用若干个正弦波形叠加来近似表示。 $\sin \omega_1 t$ 项称为基波,其周期与原畸变波形的周期相同,在电网中就是工频的周期;其他各项均称为谐波。由于谐波的频率是基波频率的整数倍,

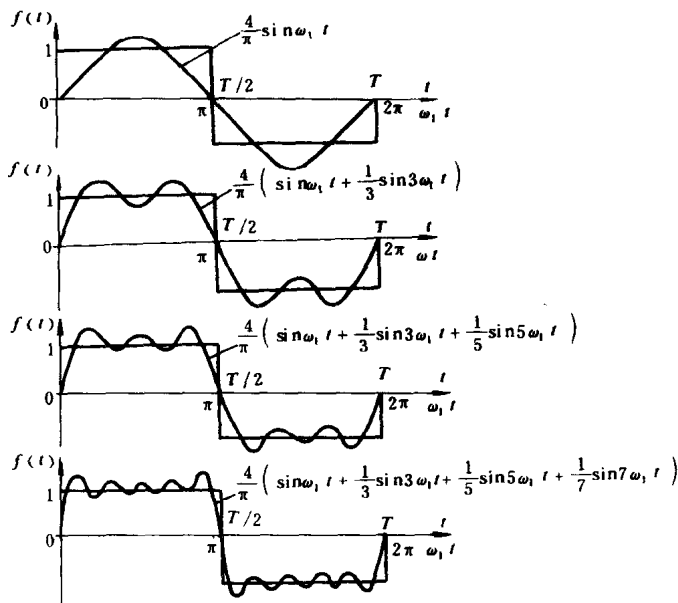


图 1.1 用一组正弦波叠加起来近似表示方波

所以 $\sin 3\omega_1 t$ 项称为 3 次谐波, $\sin 5\omega_1 t$ 项称为 5 次谐波,……。通常将各奇次的谐波统称为奇次谐波, 偶次的谐波统称为偶次谐波。图 1.1 所示的方波中不含偶次谐波。

实际电网中有时存在一些频率不是基波频率整数倍的正弦分量, 其中有称为分数次谐波和间谐波 (fractional-harmonics 和 inter-harmonics) 的; 低于工频的间谐波又称为次谐波 (subharmonics)。在近代的交—交变频器中还存在“旁频”, 即在整数次谐波附近的非整数次谐波。但电网中主要存在整数次谐波, 它可以根据周期性波形, 用傅立叶级数分解得到。本书主要论述的就是这类谐波。

在工程实际中常采用有效值来衡量电流和电压的大小。以周期电流 $i(t)$ 为例，其有效值 I 定义为

$$I \triangleq \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (1.2)$$

由此可见，周期量的有效值等于它的瞬时值的平方在一周期内平均值的平方根值，所以有效值又称为方均根值。

对于非正弦周期电压和电流的瞬时值，可用三角级数表示，即

$$u(t) = U_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} U_h \sin(h\omega_1 t + \alpha_h) \quad (1.3)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_1 t + \beta_h) \quad (1.4)$$

式中 h ——谐波次数， $h=1, 2, 3, \dots$ 。

将式 (1.4) 代入式 (1.2)，则得电流的有效值为

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [I_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_1 t + \beta_h)]^2 dt} \\ &= \sqrt{I_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \end{aligned} \quad (1.5)$$

同理得

$$U = \sqrt{U_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \quad (1.6)$$

所以，非正弦周期电流或电压的有效值，等于它的恒定分量（直流分量）的平方与各次谐波电流或电压有效值的平方之和的平方根。在正弦电流电路中，正弦量的最大值与有效值之间存在 $\sqrt{2}$ 关系，但对于非正弦量就不存在这种简单关系。例如图 1.2 所示的两个不同波形，由于图 1.2 (a)、

(b) 的基波及 3 次谐波的振幅分别相等, 因此, 它们的有效值是相等的; 但两个波形的基波与三次谐波之间的相位关系不同, 因而两个非正弦波形的最大值就不同了。

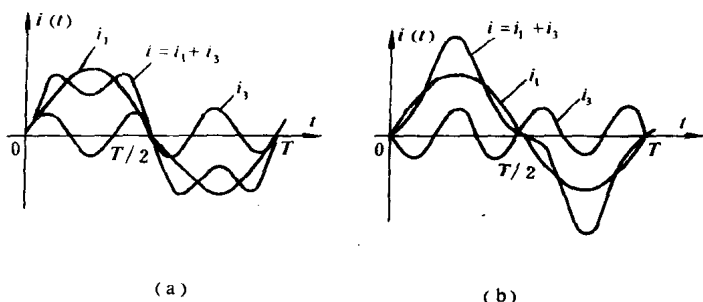


图 1.2 有效值相同、最大值不同的实例

(a) 基波与谐波初相角相同; (b) 基波与谐波初相角相反

为了表示畸变波形偏离正弦波形的程度, 最常用的特征量有谐波含量、总畸变率和 h 次谐波的含有率。

所谓谐波含量, 就是各次谐波的平方和开方。谐波电压含量为

$$U_H = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \dot{U}_h^2} \quad (1.7)$$

谐波电压总畸变率为

$$THD_U = \frac{U_H}{U_1} \times 100\% \quad (1.8)$$

第 h 次谐波电压含有率为

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (1.9)$$

同理可以写出谐波电流的相应表达式 I_H 、 THD_I 、 HRI_h 。

需指出, 作用在同一线性无源元件 (电容和电感) 上的

非正弦电压和电流的波形一般不再保持相似关系。例如，非正弦电压加在电容两端，则电流的 h 次谐波为

$$i_h = \frac{\sqrt{2}U_h}{x_h} \sin(h\omega t + \alpha_h + \frac{\pi}{2}) \quad (1.10)$$

式中
$$x_h = \frac{1}{h\omega C}$$

h 愈大，对这次谐波而言的容抗就愈小，因此，虽然电压谐波相对于基波很小，但它在电容器里所引起的电流能和基波电流相比拟，甚至超过基波电流。因此，即使电压接近于正弦波形，但由于谐波，电容器里的电流可能是很显著的非正弦波形。

在进行谐波计算时，可以对各次谐波分别进行相量或复数运算，不同次谐波的电压及电流是不能作上述运算的。在描绘各次谐波的曲线时，应记住：各次谐波的周期是与谐波的次数成反比例的。因此，如果取横坐标轴为 ωt ，则为了保持同一标度，必须取 $\frac{\alpha_h}{h}$ 角以代替 α_h 角。

在对称三相电路中，各相电量在时间上相差 $\frac{1}{3}$ 周期，即在基波的电度角上相差 120° ，所以对于对称三相非正弦电量中所含的第 h 次谐波来说

$$\begin{aligned} u_{ah} &= \sqrt{2}U_h \sin(h\omega_1 t + \varphi_h) \\ u_{bh} &= \sqrt{2}U_h \sin[h(\omega_1 t - 120^\circ) + \varphi_h] \\ &= \sqrt{2}U_h \sin(h\omega_1 t + \varphi_h - h \times 120^\circ) \\ u_{ch} &= \sqrt{2}U_h \sin[h(\omega_1 t + 120^\circ) + \varphi_h] \\ &= \sqrt{2}U_h \sin(h\omega_1 t + \varphi_h + h \times 120^\circ) \end{aligned} \quad (1.11)$$

对于不同次的谐波，由式 (1.11) 可推出下列特点：

(1) 当 $h=3k$ ($k=1, 2, \dots$)，即为 3, 6, 12, 15, ... 次谐波时， $u_{ah}=u_{bh}=u_{ch}=\sqrt{2}U_h\sin[h\omega_1 t+\varphi_h]$ ，即三相的谐波电量有相同的数值和方向，称为零序性谐波。

(2) 当 $h=3k+1$ ，即为 4, 7, 10, 13, ... 次谐波时，有

$$u_{ah} = \sqrt{2}U_h\sin(h\omega_1 t + \varphi_h)$$

$$u_{bh} = \sqrt{2}U_h\sin(h\omega_1 t + \varphi_h - 120^\circ)$$

$$u_{ch} = \sqrt{2}U_h\sin(h\omega_1 t + \varphi_h + 120^\circ)$$

即三相谐波电量的相序与基波的相序相同，称为正序性谐波。

(3) 当 $h=3k-1$ ，即为 2, 5, 8, 11, ... 次谐波时，有

$$u_{ah} = \sqrt{2}U_h\sin(h\omega_1 t + \varphi_h)$$

$$u_{bh} = \sqrt{2}U_h\sin(h\omega_1 t + \varphi_h + 120^\circ)$$

$$u_{ch} = \sqrt{2}U_h\sin(h\omega_1 t + \varphi_h - 120^\circ)$$

即三相谐波电量的相序与基波的相序相反，称为负序性谐波。

当对称三相电路接成星形而且相电压为非正弦波时，因为 3 的倍数次谐波为零序性谐波，所以在线电压中就不含 3 的倍数次谐波，线电压的有效值小于 $\sqrt{3}$ 倍相电压的有效值；当对称三相电路接线三角形而且相电流为非正弦波时，零序性谐波在三相中同相，在三角形内部成环流，因此线电流就不含零序谐波电流，线电流的有效值小于 $\sqrt{3}$ 倍相电流的有效值。

在谐波作用下电路参数的确定也是比较复杂的。线性电感和电容的电抗分别和谐波次数成正比和成反比。实际上一个电工设备，在不同频率的电量下，常常表现出很不相同的电磁特性。例如，一个感应线圈在低频下可以看成是一个电感，而在高频下就不能忽略其匝间的分布电容。又如一条不长的