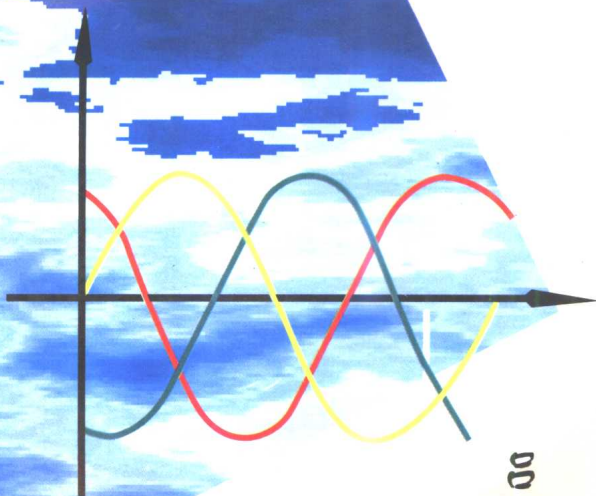


第三分册

电力系统高次谐波

吕润餘 编著

电能质量技术丛书



中

社

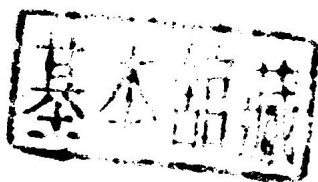
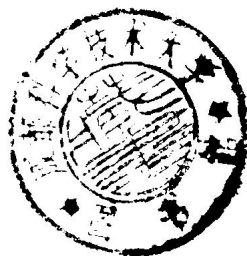
992888



第三分册

电力系统高次谐波

吕润餘 編著



中国电力出版社

内 容 提 要

本书是电能质量技术丛书的第三分册,介绍电力系统波形的畸变问题。

全书共分七章,主要内容有高次谐波的产生、谐波分析、正弦波形畸变指标,电力系统的谐波源,谐波对电力系统的危害和影响,电网谐波的标准,谐波测量,电网谐波的评估计算,电网谐波的限制措施。

本书写得有理、有据,深入浅出,说明问题清楚,可供电力科研、设计部门,电厂和供用电部门的管理人员、技术人员以及工人阅读,也可作为大专院校和专业培训的教材及参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统高次谐波/吕润余编著. -北京:中国电力出版社, 1998(电能质量技术丛书;第3分册)

ISBN 7-80125-582-8

I. 电… II. 吕… III. 电力系统-谐波 IV. TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第27376号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 邮政编码100044)

梨园印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1998年5月第一版 1998年5月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 7.875印张 173千字

印数0001—3080册 定价8.70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)

丛 书 前 言

随着我国国民经济的蓬勃发展、电力网负荷急剧加大,特别是冲击性、非线性负荷容量的不断增长,使得电网发生电压波形畸变、电压波动、闪变和三相不平衡等电能质量问题。这些项的数字特征量和标准是评定电能质量的重要指标,也是电力技术工作者选用补偿方法、装置和技术措施的依据。

编写一套电能质量技术丛书,是许多供用电工作者的愿望,经孙树勤教授推荐,得到中国电力出版社的支持,由电能质量系列国家标准的主要起草人林海雪高级工程师(教授级)作为本丛书主编。针对业已制订的五项电能质量国家标准,丛书也分为五个分册。丛书主编和各分册的作者皆多年从事该问题的研究,从所掌握大量国内外的文献资料、参加实践所积累的丰富经验以及指导科研所获得的成果中,概括出处理该问题的脉络而编辑成书。电能质量的重要性与日俱增,所以当前编写这套丛书显得特别及时有用。

这套丛书的各分册相互联系,而每一分册又能独立成书并都有其独到之处,丛书的编著具有较高的学术水平和实用价值。限于篇幅仅以第四分册为例,说明本丛书的这一特点。该分册以大量观察者对闪变反应所形成的单位闪变曲线为出发点,进而用自动控制理论的传递函数来表达此曲线,以此作为基础探讨闪变的检测和预估方法,指导检测仪器的研究和开发,阐述闪变标准的制订和采取补偿措施等,使全书形成一个能提供给读者从头至尾阅读的独立分册。

研究电能质量并制订标准的目的是作为管理和补偿的判

3A012/12.09

据。首先需要找出负荷的变动量及其对电能质量的影响，然后采取对策。但补偿方法繁多，丛书作者通过系统论述对各种方法进行比较，找出内在联系，结合以实验为基础所作的假定，力求对负荷补偿问题总结出一些具有指导意义的原则。负荷补偿是一个复杂的、内容多样化的问题，特别是以三相系统为主要无功补偿对象的情况，不但牵涉到电压波动、闪变、谐波、频率变动，而且增加了三相不平衡这一因素。为求经济有效，从实用的角度出发，目前负荷补偿的指导原则是采用工程处理方式，即对三相作综合考虑。假定三相为简单对称，即电源电压为三相对称的正弦波，利用坐标变换，例如将不平衡三相电流变换到 d, q, o 坐标系中，其中电流的 d 轴直流分量反映三相基波有功功率。在总电流中排除此电流分量后，余下的电流、结合各次谐波电流都作为被补偿对象统筹处理。显然在此领域中尚有大量研究和实践问题有待进一步深入探讨。

丛书的取材和编写就是按上述思路而安排的。在叙述上力求条理清楚，深入浅出并且益以实例，以便于读者接受和应用。丛书所论述的问题不但会引起我国电力部门和有关科研部门的重视，而且在供电资源丰富的工业国家也将这一问题提到日程表内，显然必将继续发展。丛书对此问题系统、深入地总结了近年来的研究和实践成果，相信它将有损于从事这一领域的科技工作者开展工作。

唐统一

1996年12月

序 言

本书是电能质量技术丛书的第三分册，介绍电力系统波形的畸变问题。

由于电力电子技术的发展，以及铁芯设备的饱和、电弧炼钢炉容量增大和家用电器大量使用等原因，注入电力系统的高次谐波日益增多，造成系统电压、电流正弦波形的畸变，使电能质量下降，对电力系统包括用户的安全、经济运行产生危害和影响，引发了一些事故。国家技术监督局发布了谐波国家标准《电能质量 公用电网谐波》(GB/T 14549-93)，并已实施。

本书结合电力系统实际，对高次谐波的产生、谐波源、谐波的危害和影响、谐波标准、谐波测量、谐波评估计算以及限制电网谐波的技术措施和管理措施作了较为系统的介绍，可供贯彻执行谐波国家标准的科技人员及有关人员参考。

谐波国家标准是由原能源部组织领导、在中国电机工程学会电力系统高次谐波分专业委员会的协助下，针对我国电网的具体情况，经过多年调查研究、测试分析和专题论证，并在广泛征求意见的基础上起草制订而成的。书中介绍的有关内容，均为标准起草工作组所做的工作。

本书按照电能质量技术丛书的统一要求编写，华北电力大学肖湘宁教授对本书初稿作了仔细审阅，提出了不少宝贵的意见和建议；曲涛教授级高级工程师对本书的编写给予大力的支持和鼓励。在此一并表示感谢。

书中错误之处，请批评指正。

编著者

1996年12月

目 录

丛书前言

序 言

第一章 概述	1
第一节 高次谐波的产生	1
第二节 谐波分析	6
第三节 正弦波形畸变指标	28
第二章 电力系统的谐波源	30
第一节 谐波源概述	30
第二节 铁芯设备	32
第三节 交直流换流设备	35
第四节 电气铁道的谐波	62
第五节 交流电弧炉	89
第六节 家用电器	91
第三章 谐波对电力系统的危害和影响	94
第一节 谐波对旋转电机的危害	94
第二节 谐波对变压器和线路的影响及谐波网损	98
第三节 谐波放大及其危害	99
第四节 谐波对继电保护和自动装置的干扰	118
第五节 谐波引发某些系统事故实例	129
第四章 电网谐波的标准	140
第一节 概述	140
第二节 国外谐波的标准和规定	141
第三节 谐波国家标准介绍	153
第五章 谐波测量	185

第一节	概述	185
第二节	谐波测量仪器	187
第三节	传感器及信号传输	197
第四节	测量方法及数据处理	205
第六章	电网谐波的评估计算	211
第一节	交流系统的基波及谐波潮流概述	211
第二节	电网谐波的简化计算	213
第七章	电网谐波的限制措施	220
第一节	增加换流装置的脉动数	220
第二节	交流滤波器	223
第三节	有源电力滤波器	231
第四节	谐波管理	236
参考文献		240

第一章 概 述

第一节 高次谐波的产生

一、电力系统的工频电源

电力系统的工频电源,主要为发电厂中的同步发电机。由于在其设计上采取了一系列削弱高次谐波的措施,例如:在转子方面,凸极同步发电机改善磁极的形状,隐极同步发电机采用分布绕组,使气隙磁通密度的波形较接近于正弦波;在定子方面,采用短距绕组和分布绕组进一步削弱以 5、7 次为主的谐波电动势,以及三相绕组采用星形 (Y) 接线以消除 3 及 3 的倍数次谐波等。因此,同步发电机产生的谐波电动势极为微小,与日益增长的系统谐波水平相比,可以忽略不计。

例如,某 500MW 汽轮发电机,额定电压 20kV,通过单元接线的 (Y, d 接线) 主变压器升压为 500kV。并网前,机组额定空载运行时,发电机及高压侧相电压的实测谐波水平如表 1-1 所示。发电机相电压谐波的主要成分为 3 次谐波,通过绕组的 Y 接线和主变压器的 Y, d 接线,3 及 3 的倍数次谐波在高压网中得到消除。

表 1-1 某汽轮发电机的实测谐波电压水平 (%)

谐波次数 h	1	3	5	7	9	11	13	15	谐波总量
发电机相电压	100	1.072	0.177	0.148	0.146	0.022	0.092	0.031	1.124
高压侧相电压	100	0.02	0.17	0.17	0	0.02	0.15	0	0.28

根据发电机的结构及基本理论，可以估算出各项措施的谐波削弱效果。该发电机转子 40 槽分布于极轴两侧，基本槽角 6.4° ，线包匝数基本相同。若按 20 个满距线包产生的空间矩形波磁通势，相角依次位移 6.4° 叠加形成的阶梯形波磁通势，计算转子空间磁通势的谐波分量，每个矩形波 h 次谐波的幅值为基波幅值的 $1/h$ ，仅有奇次谐波，则转子阶梯形波的空间谐波磁通势与基波磁通势的比值 F_h/F_1 如表 1-2 第 1 行所示。通过转子绕组的分布，各次磁通势谐波分量大为削弱，合成谐波磁通势主要为 3、5、7 次。若略去气隙各点的磁阻差别和磁路饱和，则相同的磁通密度空间波通过转子的同步速旋转，在定子绕组中产生相应的感应电动势时间波。

定子绕组通过分布和短距把相电动势中的谐波进一步削弱。该发电机定子槽角 7.5° ，绕组短距角 30° ，每极每相 8 槽，可计算得该绕组对于基波及谐波包括分布和短距在内的绕组系数 K_{w1} 和 K_{wh} ，则相电动势谐波相对于基波的削弱系数 K_{wh}/K_{w1} 如表 1-2 中第 2 行所示。可见，定子绕组的分布和短距，主要削弱相电动势中的 5、7 次谐波和 11、13 次谐波，对 3 及 3 的倍数次谐波削弱较少，将通过三相绕组的 Y 接线，在线电动势中予以消除。

不计气隙磁通密度产生的畸变，粗略估算相电动势中的谐波含量为 $E_h/E_1 = (F_h/F_1)(K_{wh}/K_{w1}) \times 100\%$ ，如表 1-2 中第 3 行所示，与表 1-1 的发电机相电压实测数据相近。接成 Y 形后的线电动势谐波，则与表 1-1 中高压侧相电压的实测数据相近，3 及 3 的倍数次谐波不进入系统。

发电机有载时因定子绕组电枢反应产生的谐波也受到同样的削弱。

表 1-2

某汽轮发电机的各特征系数(%)

序号	谐波次数 h	1	3	5	7	9	11	13	15
1	F_h/F_1	100	2.58	2.89	2.32	0.84	0.27	0.67	0.48
2	K_{wh}/K_{w1}	100	49.08	5.42	3.90	17.23	9.97	8.67	11.49
3	E_h/E_1	100	1.27	0.16	0.09	0.15	0.03	0.06	0.06

因此可以认为, 电力系统的电源是频率按单一恒定工业频率 (50Hz, 国外有的为 60Hz)、波形按正弦规律变化的三相对称的电压源, 是电力系统中一切工频电能 (电功率) 的来源。

二、高次谐波的产生

高次谐波产生的根本原因是由于电力系统中某些设备和负荷的非线性特性, 即所加的电压与产生的电流不成线性 (正比) 关系而造成的波形畸变。

对于伏·安特性为线性的设备或负荷, 如图 1-1 中的直线 1, 当施加电力系统的正弦波形电压 u 时, 产生正弦波形的电流 i , 反之也一样, 不会造成波形的畸变, 故不产生高次谐波。

对于伏·安特性为非线性的设备或负荷, 如图 1-1 中的曲线 2, 当施加电力系统的正弦波形电压 u 时, 由于其非线性特性, 产生的电流 i' 为非正弦波, 其频率仍和系统频率 (工频) 相同。波形的畸变, 产生高次谐波。

一个非正弦的周期波 (如电压、电流、磁通等), 可以分解为一个同频率和很多整数倍频率的正弦波之和。如图 1-2 为矩形波电流 $i=f(\omega t)$ 的分解, $\omega=2\pi f$ rad/s 为电网的工频角频率。分解出的 $i_1=f_1(\omega t)$ 为工频正弦波, 其频率与原非正弦波相同, 称为基本波或基波; $i_3=f_3(3\omega t)$ 、 $i_5=f_5(5\omega t)$ 等为 3 倍工频、5 倍工频的正弦波, 称为 3 次谐波、5

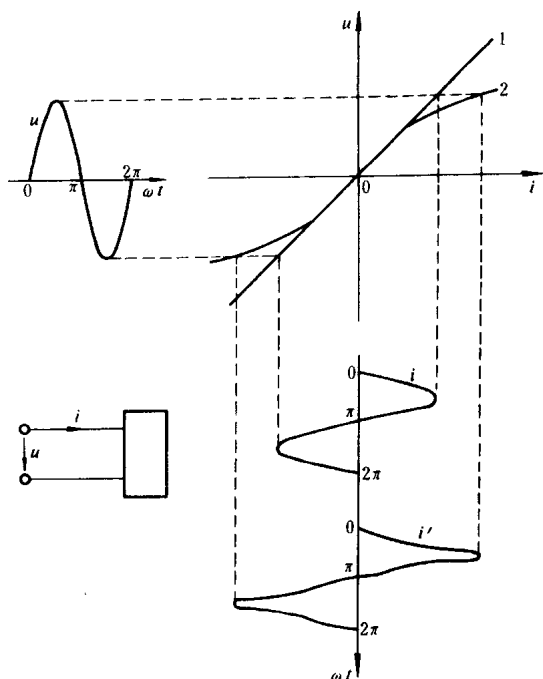


图 1-1 畸变波形的产生

次谐波等，统称高次谐波或谐波。当高次谐波不断增多时，与基波的合成波形便逐渐逼近于原有的矩形波。可见，高次谐波是由于设备或负荷的非线性所造成的波形畸变而产生的。

一般情况下，非正弦周期波 $f(\omega t)$ 的正弦波分解可表示为

$$\begin{aligned}
 f(\omega t) &= a_0 + f_1(\omega t) + f_2(2\omega t) \\
 &\quad + f_3(3\omega t) + \cdots + f_h(h\omega t) + \cdots \\
 &= a_0 + \sum_h f_h(h\omega t) \quad (h = 1, 2, 3 \cdots) \quad (1-1)
 \end{aligned}$$

式中 a_0 ——直流分量；

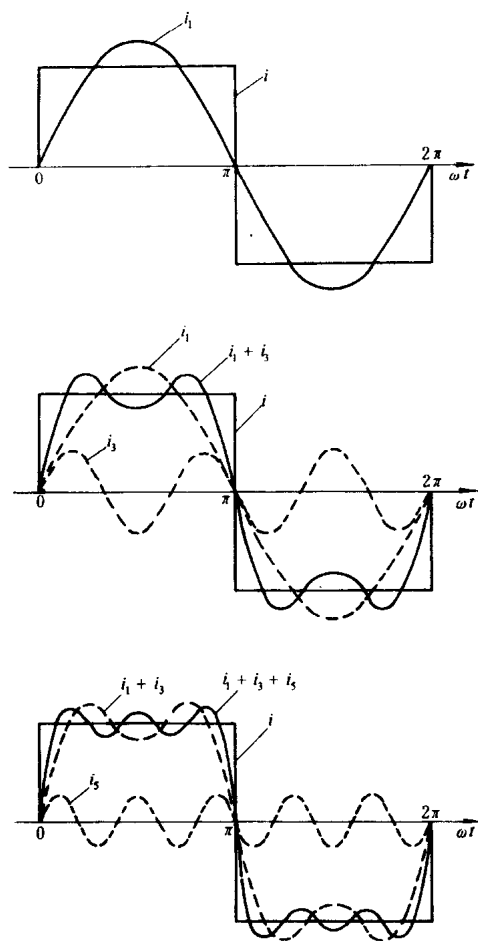


图 1-2 矩形波的分解

h ——正整数, $h=1, 2, 3\cdots$, 称为谐波次数 (阶次);
 $f_h(h\omega t)$ ——基波频率 h 倍的正弦波分量。其中: $h=1$ 的正弦波分量为基波; $h=2, 3, 4\cdots$ 的各正弦波分量,

即为高次谐波或谐波,其频率为基波频率的 2, 3, 4 倍等等。

因此,谐波是一个周期性电气量的正弦波分量,其频率为基波频率的整数倍。

应注意谐波现象和其它类似物理现象的区别。例如:谐波次数 h 必须为正整数,而铁磁分频谐振现象,则可能出现分数次电气量;产生谐波的畸变波形为不变的周期波,而暂态过程中每周期波形都在发生变化。

第二节 谐波分析

谐波分析方法是指周期性的非正弦波形(畸变波形)利用傅立叶级数及傅立叶变换,分解为基波及各次谐波的方法。本节作简要介绍。

一、非正弦周期函数分解为傅立叶级数

1. 傅立叶级数

一个非正弦的时间周期波,如电压、电流等,可用对于时间 t 的周期函数表示为

$$f(t) = f(t + kT) \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (1-2)$$

式中 T ——周期函数以时间表示的周期, s。

该周期函数变化的频率为 $f = 1/T$, 角频率为 $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ 。把时间轴用角度 $\theta = \omega t$ 表示后,周期函数可表示成为

$$f(\omega t) = f(\omega t + k\theta_T) \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (1-3)$$

式中 θ_T ——周期函数以角度表示的周期, rad, $\theta_T = \omega T = 2\pi$ 。

用傅立叶级数的方法可把上列周期函数分解为基波和无数高次谐波之和的三角级数,其一般形式为

$$f(t) = a_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2)$$

$$\begin{aligned}
& + \cdots + A_h \sin(h\omega t + \varphi_h) + \cdots \\
& = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} A_h \sin(h\omega t + \varphi_h) \\
& = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (a_h \cosh \omega t + b_h \sinh \omega t) \quad (1-4)
\end{aligned}$$

式中 a_0 ——直流分量；

A_h 和 φ_h —— h 次谐波的幅值和初相角；

a_h 和 b_h —— h 次谐波的余弦项系数和正弦项系数。

其相互关系为

$$\begin{aligned}
a_h &= A_h \sin \varphi_h, \quad b_h = A_h \cos \varphi_h \\
A_h &= \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (1-5) \\
\varphi_h &= \begin{cases} \arctg a_h / b_h & \text{当 } b_h > 0 \\ \arctg a_h / b_h + 180^\circ & \text{当 } b_h < 0 \end{cases}
\end{aligned}$$

各次谐波的频率为已知，利用三角函数的正交性，即可从式 (1-4) 得到 a_0 、 a_h 和 b_h 的计算式为

$$\left. \begin{aligned}
a_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d(\omega t) \\
a_h &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cosh \omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cosh \omega t d(\omega t) \\
b_h &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sinh \omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sinh \omega t d(\omega t)
\end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

上列积分区间可在保持一个周期 T 或 2π 的条件下任意移动。

一般来说，电力系统的畸变波形，都满足傅立叶级数的存在条件，都能分解得到基波和无限个高次谐波之和。在波形的连续点处，该无穷三角级数收敛于该点的函数值，而在波形的有限个有穷型的跳跃点处，则收敛于该点左、右极限

的平均值，如图 1-2 所示。

2. 对称波形的傅立叶级数

畸变波形的某些对称性可使傅立叶级数简化。

(1) 奇对称。波形对称于原点，函数 $f(t)$ 为奇函数，即

$$f(t) = -f(-t)$$

而 $\cosh \omega t$ 为偶函数，式 (1-6) 中 a_0 和 a_n 的被积函数为奇函数，其积分为零，傅立叶级数仅有正弦项谐波。

(2) 偶对称。波形对称于纵轴，函数 $f(t)$ 为偶函数，即

$$f(t) = f(-t)$$

而 $\sinh \omega t$ 为奇函数，式 (1-6) 中 b_n 的被积函数为奇函数，其积分为零，傅立叶级数仅有余弦项谐波。当波形的正、负面积不等时，还存在直流分量。

(3) 镜对称。波形镜对称于横轴，即后半周波与前半周波的波形相同但符号相反，函数 $f(t)$ 满足

$$f(t) = -f(t + T/2)$$

代入式 (1-6)，把整周期积分分成对应于正、负半波的两段半周期积分和，可得 a_0 及 h 为偶数次的 a_n 和 b_n 为零，傅立叶级数仅有奇次谐波。

(4) 双对称。当波形兼有两种对称性质时，谐波成分得到进一步简化。对称于原点且镜对称于横轴的波形只含有奇次正弦项谐波，对称于纵轴且镜对称于横轴的波形只含有奇次余弦项谐波。

上列对称波只要用基波及若干个谐波“拟合”，便可得出其谐波特性。偶对称的余弦型谐波不可能形成奇对称的畸变波；奇对称的正弦型谐波不可能形成偶对称的畸变波；而偶次谐波不可能形成镜对称的畸变波。

需要指出，畸变波形的对称性与坐标的选择有关。但基