

程浩忠 编著

电力系统 谐波技术

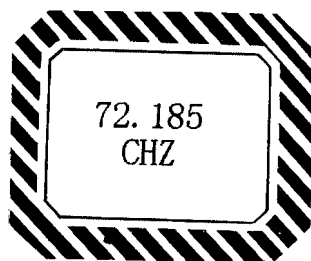
85
Z

上海交通大学出版社

上海交通大学“九五”重点教材

电力系统谐波技术

程浩忠 编著



上海交通大学出版社

电力系统谐波技术
程浩忠 编著

上海交通大学出版社出版发行
上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030
电话 64281208 传真 64683798

全国新华书店经销

常熟文化印刷厂·印刷

开本:787×1092 (mm) 1/16 印张:11.75 字数:285 千字

版次:1998 年 7 月 第 1 版

印次:1998 年 8 月 第 1 次 印数:1—1100

ISBN 7-313-02036-8/TM·104

定价: 16.50 元

本书任何部分之文字及图片,如未获得本社之书面同意,
不得用任何方式抄袭、节录或翻印。

(本书如有缺页、破损或装订错误,请寄回本社更换。)



作者简介

程浩忠 男,1962年生,浙江省人。上海交通大学电力系统及自动化专业获学士、硕士、博士学位。1993~1994年任日本国广岛大学研究员、高级访问学者。现任上海交通大学电力工程系教授、系主任。致力于电力系统规划、电压稳定、谐波、无功补偿的研究。在EI、ISTP及核心刊物上和国内、国内重要学术会议上发表论文80余篇。曾获上海市科技进步二等奖、上海市启明星等多项奖励。

内 容 简 介

本书论述有关电力系统谐波技术问题。全书共分十章,包括电力系统谐波的基本概念,电力系统非正弦波形的分析方法,电力系统谐波的来源,电力系统谐波潮流计算,电力系统谐波测量技术,谐波对电网的影响和危害,电力系统谐波的抑制,交流滤波器及其参数选择,谐波与无功补偿,电力系统谐波的标准及其管理等。只要具有电力系统分析知识的读者都能顺利理解本书的内容。本书除可作为电力工程类专业高年级本科生和研究生教材外,也可供工程技术人员学习、参考或作为专业培训班的教材及参考读物。

前 言

用频率和电压这两个指标来衡量电能的质量是很不完善的,波形畸变性和三相交流电力系统中三相电压或电流的不平衡也是衡量或影响电能质量的重要因素。电网波形问题在过去由于还未对电力系统产生十分严重的影响,也由于在一般情况下频率和电压水平对电能质量可能比波形畸变更重要些,须先研究解决电网频率和电压水平问题,因此没有引起电力部门和用电部门的足够重视。但近年来,一方面由于电力电子技术的发展以及它们在各个工业部门和用电设备上的广泛应用,包括大功率单相整流在电气化铁道上的应用,它们对电力系统各项电力设备以及用户和通讯线路的有害影响已经十分严重,因而不得不认真对待和考虑了。另一方面,近年来,电网周波已经或有能力基本保持稳定,通过无功优化管理和城市电网的改造,电网的电压水平也得到了较大的改善和控制,使得我们必须重视起波形畸变的重要性,就这样电网谐波问题被日渐提上电力生产、使用和管理的议事日程。

电力系统波形畸变并不是一个新的问题,早在 1920~1930 年间,在德国就已提出静态整流器产生的波形畸变问题,50~60 年代由于高压直流输电技术的发展,对换流器谐波问题的研究有大量文章发表。近年来更由于大容量电力整流、换流设备以及电子设备在各工业部门和电力系统控制中的广泛应用,世界各国都对谐波问题给予十分重视和关心,多次召开了国际性的学术讨论会,不少国家已制定出对电力系统谐波和用电设备谐波的国家标准或电力部门的规定。国际电工委员会(IEC)和国际大电网会议(CIGRE)都相继组成了专门的工作组,开展了这方面的工作,并正在制定包括各项电力和用电设备以及家用电器在内的谐波标准。英国电气委员会总工程师会议在 1979 年 9 月制定了供电网络谐波的有关规定(工程技术导则 G5/3),成为各国际组织和世界各国研究和制定谐波标准进行谐波管理的典范。

近年来由于电气铁道的大量发展以及化工、冶金、钢铁、有色金属、煤炭和交通等工业部门大量引进了国外设备和应用电力整流和换流技术,尤其像 500 kV 高压直流输电工程葛上线的投入运行,产生了大量谐波注入电网。谐波问题在有些电力系统中已经日趋严重,对电力系统和用电设备已产生了严重危害和影响,必须认真加以研究和采取相应的限制及管理措施。

电力系统谐波问题虽然不是一个新的问题,但对许多电力工作者来说还是一个不太熟悉的问题,由于谐波问题的出现对原有的一些电工原理的概念,如无功功率和功率因数等都需要重新确定其含义。为了引起各方面对电力系统谐波问题及管理工作的重视,提高和普及这方面的技术,开展有关我国电力系统谐波的研究工作,1984 年原水利电力部根据国家经委批准的“全国供用电规则”,制定和颁布了《电力系统谐波管理暂行规定》(SD126—84),使我国的电力生产、使用单位对谐波问题有了参考标准,标志着我国电力系统谐波研究和管理的一个新时代即将出现。但 SD126—84 仅仅是一个暂行规定,尚没有成为我们的国家标准,而且离国际标准还有差距。如何才能制定出我们的国家标准,缩小与国际标准的差距,甚至达到或超过国际标准,真正开创谐波研究、管理上的新纪元,需要大批的电力工程界有识之士为之奋斗。经过一段时间的努力工作和对谐波标准的研究和讨论及其管理上的实践,国家技术监督局终于在 1993 年 7 月 31 日发布了《电能质量 公用电网谐波》(GB/T14549—93)的国家标准,并于

1994年3月1日起实施,迎来了中国电网加强谐波管理的时代。

为了推进这项工作,我们编著了这本书,作为大学生、研究生学习电力系统谐波问题的教材,也可供工程技术人员学习、参考并作为专业培训班的教材。通过学习能使熟悉电力系统谐波技术的工程技术人员更加多起来,以适应当前形势发展的需求。

本书编著过程中兼顾理论与实用方法的结合。书中内容经过多届研究生、本科生毕业论文的试用,能使读者较快地进入这一领域的前沿,对电力系统谐波问题有一个全面的了解。本书能够写成获益于编著者的许多老师及其研究生和本科毕业生在这一领域内的勤奋工作,本书承廖培鸿教授审阅了大部分章节,提出了不少宝贵意见。周波同学进行了电脑排版的中文文字处理。本书已列入上海市教育委员会研究生课程改革与教材建设项目和上海交通大学“九五”重点教材出版计划。上海交通大学出版社、研究生院、教务处的领导和编者的许多同事、朋友、家人为本书编写创造了条件并给予关心,在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于目前国内外谐波方面的书籍、教材、讲义都少,电力系统谐波这一领域又有许多问题在研究和探讨之中,作者水平有限,因此,不完善、不正确的地方在所难免,恳望读者鉴谅,并请予以批评指正为盼!

程浩忠

1998年5月于上海交通大学

目 录

1 电力系统谐波的基本概念	1
1.1 电力系统中非正弦波形的出现	1
1.2 谐波的含义和性质	1
1.3 非正弦波形的有效值和畸变率	4
1.4 特征谐波和非特征谐波	6
1.5 谐波和非谐波	8
1.6 谐波计算的等值电路参数	9
2 电力系统非正弦波形的分析方法	10
2.1 非正弦波形及其频域分解	10
2.2 非正弦电路的电压和电流	17
2.3 非正弦电路的功率和功率因数	21
2.4 非正弦波形的时域分析	26
3 电力系统谐波的来源	30
3.1 发电机和电动机	30
3.2 变压器和电抗器	32
3.3 电弧的非线性伏安特性形成的高次谐波	36
3.4 换流装置	38
3.5 电力机车	45
3.6 家用电器	48
4 电力系统谐波潮流计算	49
4.1 电网各元件等值电路的谐波参数	49
4.2 对称系统的谐波潮流计算	52
4.3 不对称系统谐波潮流的序分量分析	56
4.4 不对称系统的谐波潮流计算	62
4.5 谐波潮流的简化算法	66
5 电力系统谐波测量技术	68
5.1 概述	68
5.2 非正弦周期信号的采样	69
5.3 非正弦波形下常用电量的测量	70
5.4 SXF—1 型双三相谐波分析仪	81
5.5 谐波阻抗的测量	83
5.6 对电压互感器与电流互感器的要求	88

6	谐波对电网的影响和危害	91
6.1	谐波对电网络的影响	91
6.2	谐波对高压设备的影响	93
6.3	谐波对低压用电设备的影响	95
6.4	谐波对继电保护的影响和危害	100
6.5	谐波对远动自动装置的影响	103
6.6	谐波对通信线路的干扰	104
7	电力系统谐波的抑制	106
7.1	减少谐波源的谐波含量	106
7.2	在电容器回路串接电抗器	108
7.3	安装交流滤波器	109
7.4	有源滤波器	111
7.5	加大供电系统容量和合理选择供电电压	111
7.6	相数倍增法	112
7.7	电力机车谐波的抑制措施	112
8	交流滤波装置及其参数选择	114
8.1	滤波装置的结构及接线方式和滤波方案的确定	114
8.2	滤波器的滤波效益	115
8.3	单调谐滤波器	116
8.4	高通滤波器	121
8.5	系统谐波阻抗及其统计分析	125
8.6	系统等值谐波阻抗对滤波效益及参数选择的影响	130
8.7	滤波装置参数选择的条件	133
8.8	单调谐滤波器的参数选择	134
8.9	高通滤波器的参数选择	139
8.10	交流滤波装置参数选择的设计流程	141
9	谐波与无功补偿	145
9.1	具有饱和电抗器的补偿器	145
9.2	具有可控硅控制电抗器的补偿器	147
9.3	具有可控硅控制电抗器—变压器的补偿器	150
9.4	具有可控硅投切电容器的补偿器	152
9.5	具有可控硅控制电抗器和可控硅投切电容器的补偿器	153
9.6	静止补偿器中谐波的产生	155
9.7	谐波对并联电容器的影响	158
9.8	电力电容器组的谐波过载能力	161
9.9	电容器对系统谐波阻抗的影响	163
9.10	并联电容器对谐波电流的放大作用	164
9.11	电容器的无功补偿方案	165
10	电力系统谐波的标准及其管理	167

10.1	国外的谐波标准·····	167
10.2	公用电网谐波管理的标准·····	170
10.3	家用和低压电器的谐波限制标准·····	171
10.4	电力系统谐波的管理·····	172
10.5	电力系统谐波的监测·····	174
	参考文献 ·····	176

1 电力系统谐波的基本概念

1.1 电力系统中非正弦波形的出现

电力系统中工作在正弦稳态情况下的电网电压可表示成

$$u(t) = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \alpha) \quad (1-1)$$

式中 U ——电压的有效值,其幅值为 $\sqrt{2}U$;

α ——初相角;

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

ω 、 f 和 T ——角频率、频率和周期。

幅值、初相角和频率是确定正弦波三个特征量,通常称其为正弦波的三要素。

在电路中线性无源元件上的电流和电压的关系,有比例($u = Ri$)、微分($u = L \frac{di}{dt}$)和积分($u = \frac{1}{C} \int i dt$)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,所以在电力系统中要求尽可能由正弦波形的电源供电。但是,目前电网电压的波形往往偏离正弦波形而发生畸变,而且波形的畸变日益严重。

在供电系统中波形畸变问题主要由两大因素所造成。

(1) 大功率换流设备和调压装置等的广泛应用。大量家用电视机和调光灯等普遍采用晶闸管以及各种非线性负荷的增加导致波形畸变。

(2) 设备设计思想的改变。过去倾向于采用在额定情况以下工作或余量较大的设计。现在为了竞争,对电工设备倾向于采用在临界情况下的设计。例如有些设计者为节省材料使磁性材料工作在磁化曲线的深饱和区段,在此区段内运行会导致激磁电流波形严重畸变。

由此可见,非线性负荷接至供电系统,以及供电系统本身存在非线性元件,是造成电网电压波形畸变的根本原因。

1.2 谐波的含义和性质

国际上公认的谐波含义为“谐波是一个周期电气量的正弦波分量,其频率为基波频率的整数倍”。由于谐波的频率是基波频率的整数倍,也常称它为高次谐波。

国际电工标准中(IEC555—2, 1982),国际大电网会议(CIGRE)的文献中(工作组报告36—05)对谐波也都有明确的定义。“谐波分量为周期量的傅里叶级数中大于1的 n 次分量”(见IEV101—04—39),对谐波次数 n 的定义则为“以谐波频率和基波频率之比表达的整数”(见IEV101—04—40)。

IEEE标准中(见IEEE标准519—1981)定义为“谐波为一周期波或量的正弦波分量,其频率为基波频率的整数倍”。

我们知道,畸变波形可以用一组正弦函数来近似表示。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;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,所以 $\sin 3\omega_1 t$ 项称为三次谐波, $\sin 5\omega_1 t$ 项称为五次谐波,……。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。谐波分析是计算周期性波形的基波和谐波的幅值与相角的方法。谐波分析又称为频域分析,所得到的表达式通常称为傅里叶级数。

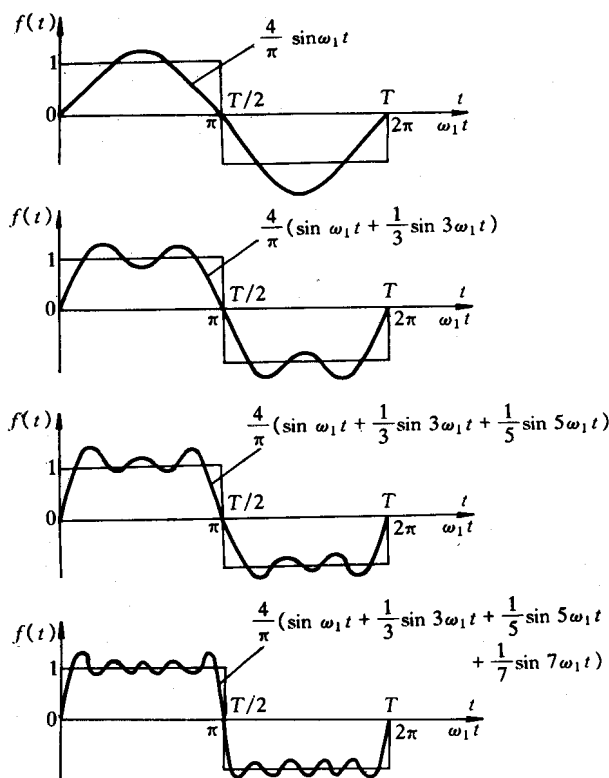


图 1-1 用一组正弦波叠加来近似表示方波

以上定义明确了谐波性质:

(1) 谐波次数 n 必须是正整数。例如,我国电力系统的额定频率为 50 Hz,则其基波为 50 Hz,二次谐波为 100 Hz,三次谐波为 150 Hz;有些国家电力系统的额定频率为 60 Hz,则其基波为 60 Hz,二次谐波为 120 Hz,三次谐波为 180 Hz。 n 不能为非整数,因此也不能有非整数谐波。

(2) 谐波和暂态现象必须加以区别。为了区分谐波和暂态现象,根据傅里叶级数的基本理论,被变换的波形必须是周期性的和不变的,虽然实际上很难完全做到,因为电力系统负荷是变动的,而负荷的变动会影响系统中谐波含量。但在实际分析中只要被分析的现象或情况持续一段适当的时间,就可以应用傅里叶级数。因此,需要区分清楚什么是谐波现象(波形保持不变)、什么是暂态现象(每周的波形都发生变化、有衰减现象等)。

此外根据国际大电网会议工作组的意见,图 1-2 所示的波形畸变虽然也是周期性的,但不

属于谐波范畴。这种波形畸变仅在正弦波一周期的极小部分发生陷波,这种波形畸变陷波,一般以基波峰值 U_{1m} 的百分数来表示,其畸变偏差百分值 δ_u^* ,用下式计算:

$$\delta_u^* = 100 \frac{\Delta u}{U_{1m}} \%$$

式中 Δu 为畸变偏差值。

对畸变偏差百分值 δ_u^* 的最大允许值要加以限制。

在国际大电网会议工作组 36—05 的报告中指出,这种畸变虽然也可用一系列的谐波分量表示,但不作为谐波现象考虑,而只作为一种暂态现象。

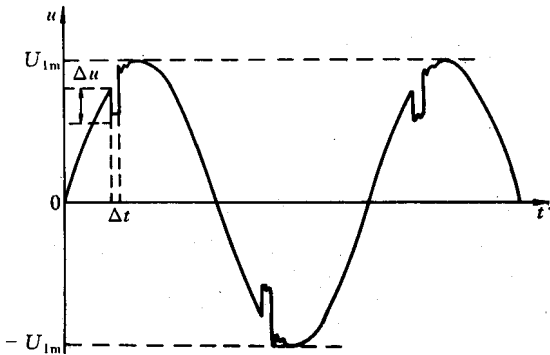


图 1-2 被通信信号或其他信号造成的畸变波形图

为了对暂态现象和谐波加以区别,工作组一致同意在计算电压(或电流)畸变率时,采用谐波电压(或电流)的平均有效值或平均总畸变率,其时间区间段 Δt 取 3s,即取 3s 中的测量或计算的平均有效值或平均值,以电压为例,即

$$U_n = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m U_{nk}^2}$$

$$D_u = 100 \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left(\frac{U_{nk}}{U_{1k}} \right)^2} (\%)$$

式中 m —— Δt 分成的区间数;

U_n ——第 n 次谐波电压的 3s 平均有效值;

D_u ——电压总畸变率的 3s 平均值(%);

U_{1k} ——第 k 个区间测出的基波电压有效值;

U_{nk} ——第 k 个区间测出的第 n 次谐波电压有效值。

(3) 短时间谐波(Short Duration Harmonics)和暂态现象中的谐波分量。这是指晶闸管控制的轧钢机等设备工作时产生的短时间的突发电流脉冲(burst)。这种突发的脉冲包含着暂态分量及谐波分量。如果这类电流脉冲及其引起的电压畸变是间断性质的(Intermittent),也就是说电流脉冲的持续时间不超过 2s,且两个电流脉冲之间的时间间隔不小于 30s,则这种暂态分量和谐波分量是允许的。关键的问题是防止对其他电力设备,例如对电力电容器造成的损坏和对电子设备的干扰。如果在供电点的基波电压不超过额定供电电压的 106%,应当不会有发生损坏的危险。对于这类用电设备,控制的因素常常不是电流脉冲而是在其生产过程中造成的电压波动所引起的闪变(flicker)。为了使闪变减小到可以容许的限度,供电点处的

短路电流必须保持在一定水平或是装设电压波动补偿装置,并附带谐波滤波器。

1.3 非正弦波形的有效值和畸变率

以周期电流 $i(t)$ 为例,它的有效值 I 定义为

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

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,所以有效值又称为均方根值。

在电网中,如果电压和电流都具有非正弦波形,将电压和电流分别分解为傅里叶级数,即

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{2} U_n \sin(n\omega_1 t + \alpha_n) \quad (1-3)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \beta_n) \quad (1-4)$$

$u(t)$ 和 $i(t)$ 具有相同的基波频率 f_1 ($\omega_1 = 2\pi f_1$)。由于负荷可能是非线性的,所以电压和电流不一定具有相同阶次的谐波分量。

将式 1-4 代入式 1-2,则得此电流的有效值的平方

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t + \beta_1) + \sqrt{2} I_2 \sin(2\omega_1 t + \beta_2) + \dots + \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \beta_n) + \dots \right]^2 dt$$

将上式的右边展开以后,即可分成许多项的积分,一类项含有各谐波瞬时值平方的平均值

$$\frac{1}{T} \int_0^T 2 I_n^2 \sin^2(n\omega_1 t + \beta_n) dt = I_n^2$$

而另一类项含有不同次数谐波瞬时值的乘积的两倍的平均值,这类项应等于零,即

$$\frac{1}{T} \int_0^T 4 I_n \sin(n\omega_1 t + \beta_n) I_m \sin(m\omega_1 t + \beta_m) dt = 0, m \neq n$$

因此

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2 + \dots$$

由此可见,非正弦周期电流的有效值,等于它的各次谐波电流有效值平方和的平方根值

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{n=1}^m I_n^2} \quad (1-5)$$

所以,非正弦量的有效值只与非正弦量所含各次谐波的有效值有关,而与它们的相位无关。

如果非正弦电流中只含有奇次谐波,可只由半个周期内均方根值来确定有效值,即

$$I = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i^2(t) dt} \quad (1-6)$$

尽管在含有整流装置的负荷中,它的电流会含有直流分量,但经过变压器隔离在交流侧是不会含直流分量的。在交流电网中是不允许注入直流电流的,所以在式 1-5 中略去直流分量。

所以,非正弦周期电压 $u(t)$ 有效值为

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{n=1}^m U_n^2} \quad (1-7)$$

应当指出,基波和各次谐波等正弦量的最大值和有效值之间存在 $\sqrt{2}$ 的关系,但对于非正弦量便不存在这个简单关系。例如图 1-3 和图 1-4 所示的两个不同的畸变波形,由于两个波形所含的基波和三次谐波的幅值分别相等,所以它们的有效值是相同的;但两个波形的基波与三次谐波之间的相位关系不同,所以它们的最大值却是不同的。

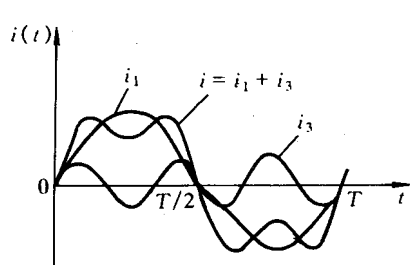


图 1-3 三次谐波初相角与基波相同

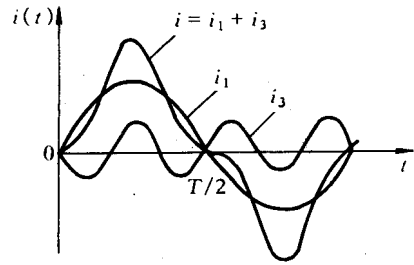


图 1-4 三次谐波初相角与基波相反

畸变波形偏离正弦波形的程度,常以其正弦波形畸变率表示。各次谐波有效值的平方和的方根值与其基波有效值的百分比,称为正弦波形畸变率 THD(Total Harmonic Distortion),或简称畸变率。电压正弦波形的畸变率

$$DFU = \frac{100\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} (\%) \tag{1-8}$$

式中 U_1 为额定基波电压,有时也用实际基波电压的有效值。

在工程上,为了抑制和补偿某次谐波,有时要求给出畸变波形所含某次谐波的数值,并常以其谐波含量来表示。电压畸变波形的第 n 次谐波含量为第 n 次谐波电压的有效值 U_n 与基波电压有效值 U_1 的百分比。

即

$$DFU_n = \frac{100U_n}{U_1} (\%) \tag{1-9}$$

对于方波来说,其第 n 次谐波的含量则为 $\frac{100}{n} (\%)$ 。

许多国家规定低压供电电压的畸变率不许超过 5% (前苏联等国则要求电压波形与其基波相对应的纵坐标之差不超过其基波幅值的 5%)。为此,要求各用户应采取措施保证其向电网注入的谐波电流不超过规程的限制,并要求对谐波敏感的设备采取措施,使之能适应于正常的畸变波形的电压。

电流正弦波形的畸变率为 DFI 则为 $\frac{100\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} (\%)$,第 n 次谐波的含量 DFI_n 则为 $100 \frac{I_n}{I_1} (\%)$ 。

应当指出,实际上的畸变波形所含各次谐波分量的幅值,在各个周期内不会完全相同,其数值可能相差较大,而且还可能是随机变化的。国际大电网会议工作组建议,在测量和计算各次谐波的有效值时,应当给出它在 3 s 内平均的有效值,这可对暂态现象和谐波加以区别。例

如对于第 n 次谐波, 设在第 k 次谐波分析时所得到的第 n 次谐波的有效值为 U_{nk} , 在 3 s 内设共取得 m 个数据(为排除偶然因素可舍去其中最大和最小者), 则在 3 s 内第 n 次谐波平均的有效值应

$$U_n = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m U_{nk}^2}$$

1.4 特征谐波和非特征谐波

在应用晶闸管的整流装置和调光装置中, 都是以晶闸管作为开关切换交流电源使其输出电流的大小和波形变化, 所以它的交流电流波形偏离正弦而发生畸变。这类电流的畸变波形所含谐波的次数, 在各种装置中是各有特点的。下面以图 1-5 所示的单相桥式整流电路为例, 分析其交流侧电流所含谐波的特征。

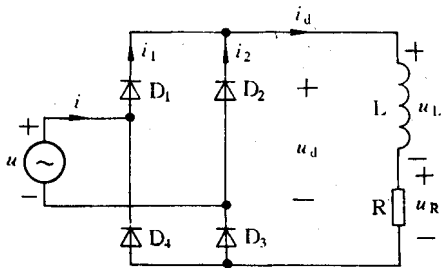


图 1-5 单相桥式整流电路

在图 1-6 中画出交流侧电压 u 、直流侧电压 u_d 和电阻器 R 上的电压 u_R 、电感器 L 上的电压 u_L 、直流侧电流 i_d 、通过 D_1 和 D_3 的电流 i_1 、通过 D_2 和 D_4 的电流 i_2 以及交流侧电流 i 的波形。

在电源电压的正半周 D_1 和 D_3 导电, 直流侧电压 u_d 等于交流侧电压 u 。在 t_0 至 t_1 , t_2 至 t_3 区间, 电感电压 u_L 为负。在 t_1 至 t_2 区间, 电感电压 u_L 为正。

在电源电压的负半周 D_2 和 D_4 导电, 直流侧电压 $u_d = -u$ 仍为正值。在 t_2 至 t_4 , t_5 至 t_6 区间, 电感电压 u_L 为负。在 t_1 至 t_2 区间, 电感电压 u_L 为正。

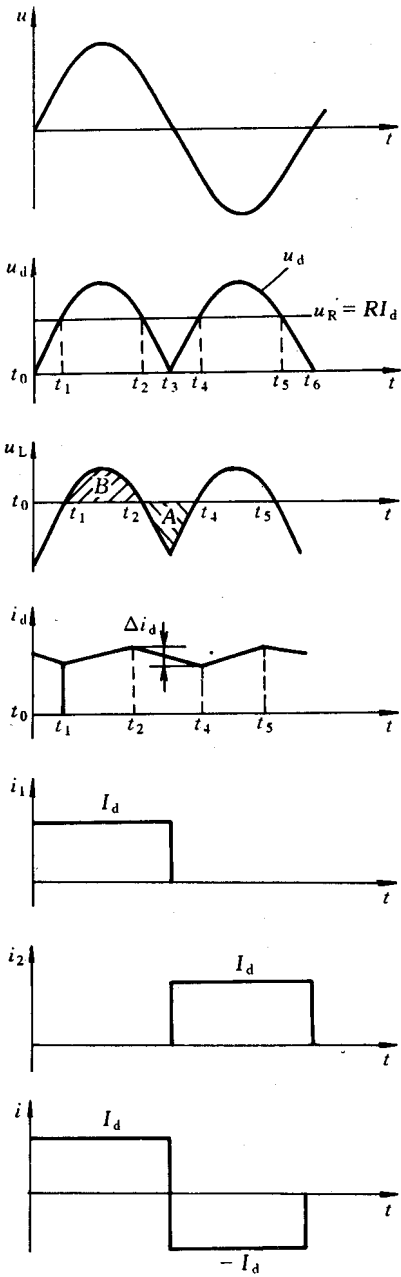


图 1-6 单相桥式整流电路的波形

由公式 $u_L = L \frac{di_d}{dt}$ 即 $L\Delta i_d = \int u_L dt$ 可知, 在 t_1 至 t_2 区间, 电流 i_d 上升 Δi_d 的值与面积 B 成比例。在 t_2 至 t_4 区间, 电流 i_d 下降 Δi_d 的值与面积 A 成比例。电感上电压 u_L 的平均值为零, 面积 A 等于面积 B 。当电感 L 的值足够大时, 则 Δi_d 值足够小, 以至可以忽略不计, 即可以认为直流侧电流是平滑的, 也就是说可以认为 i_d 等于其平均值 I_d 。

直流侧电压 u_d 的平均值 U_d , 等于电阻上电压 u_R 的平均值 U_R , 也等于直流侧电流 i_d 的平均值 I_d 乘以电阻 R 的值。由此可以看出, 在整流的直流侧通常采用平均值是方便的, 而在交流侧通常采用有效值。

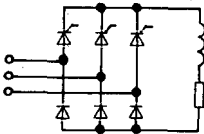
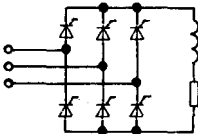
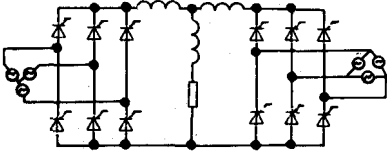
当电网电压为正弦波形, 并且直流侧串联足够大的电感使得直流电流 $i_d = I_d$ 时, 在交流侧的交流电流波形中所含谐波的次数为 3, 5, 7... 次谐波。我们称这些次数的谐波为单相桥式整流装置的特征谐波。单相桥式整流电路特征谐波次数的一般表达式可写作 $n = 4k \pm 1, k = 1, 2, \dots$ 。

在表 1-1 中列举的三相桥式各种接线的整流装置中, 假设交流系统电网三相正弦波形的电压是平衡的, 晶闸管的触发脉冲是等间隔的, 则各种接线的整流装置的特征谐波却是不同的。在上述情况下各装置的特征谐波次数与其晶闸管的触发脉冲数有关。对于各种三相整流电路的交流侧电流来说, 每周期内触发的脉冲若为 p , 则其产生特征谐波的次数

$$n = kp \pm 1, k = 1, 2, \dots \tag{1-10}$$

每周期的脉冲数愈多, 最低次的特征谐波次数愈高, 而其幅值也愈小。这可作为减小整流装置谐波的一个措施。

表 1-1 三相整流装置的特征谐波次数

主 电 路	特征谐波次数
三相半控电桥 	$n = 3k \pm 1$ $k = 1, 2, \dots$
三相全控电桥 	$n = 6k \pm 1$ $k = 1, 2, \dots$
三相 YΔ 双电桥 	$n = 12k \pm 1$ $k = 1, 2, \dots$