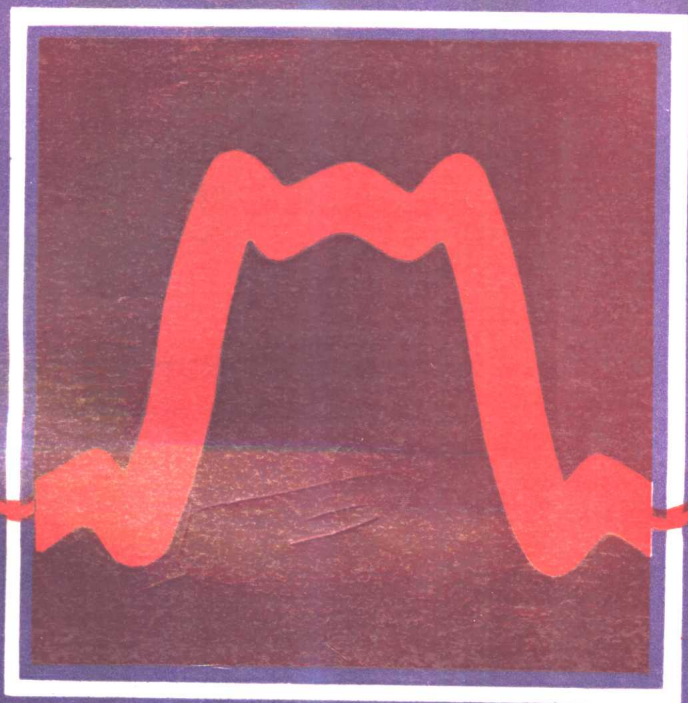


陆廷信 编著



供电系统中的 谐波分析测量 与抑制

机械工业出版社

供电系统中的谐波分析 测量与抑制

陆廷信 编著



机械工业出版社

内 容 简 介

由于晶闸管变流装置、功率半导体器件和家用电器的大量应用,由此而产生的电力系统中的稳态谐波,对供电质量、经济、安全运行的影响日益严重,已被视为供电系统的“污染”或“公害”。目前,我国和世界上许多国家都对电力系统中的谐波管理和限制有严格的规定,本书就供电系统的谐波问题作了比较系统的理论分析,对抑制与消除谐波的方法作了实用性的论述。

本书共分六章,第一章综合简要论述了电力系统中谐波的产生、危害与管理;第二章着重介绍谐波分析的数学基础知识;第三、四章主要论述各种谐波源及有关分析与计算;第五章论述谐波的测量并介绍了一些主要的测量仪器;第六章论述谐波的抑制与消除方法。

本书除适用于从事谐波问题研究的工程技术人员外,也可供配电、工业电气自动化、电力电子技术等的电气工程技术人员阅读。

供电系统中的谐波分析测量与抑制

陆延信 编著

责任编辑:刘家琼 责任校对:刘绍曾
封面设计:姚毅 版式设计:霍永明
责任印制:张俊民

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $7^{1/2}$ ·字数195千字

1990年8月北京第一版·1990年8月北京第一次印刷

印数0,001—1,890·定价:7.70元

ISBN 7-111-02074-X/TM·282

目 录

前言

第一章 绪论	1
§1-1 晶闸管电力变换装置.....	1
§1-2 电网中的高次谐波.....	2
§1-3 高次谐波的危害.....	5
§1-4 高次谐波的含量标准	17
§1-5 谐波的管理	21
第二章 谐波分析	23
§2-1 概述	23
§2-2 周期函数	23
§2-3 傅里叶分析	24
§2-4 傅里叶级数的复数形式	36
§2-5 傅里叶变换	38
§2-6 采样时间函数	41
§2-7 离散傅里叶变换	42
§2-8 快速傅里叶变换	45
第三章 供电系统中的谐波源	49
§3-1 概述	49
§3-2 大功率变流器	49
§3-3 中等容量变流器	67
§3-4 斩波器及其谐波分析	84
§3-5 交流调压装置及其谐波分析	89
§3-6 变频电路及其谐波分析	93
§3-7 小功率整流器	97
§3-8 谐波电流近似计算.....	102
§3-9 谐波阻抗和谐波等效电路.....	110
§3-10 无容性元件网络中谐波电流和谐波电压	118
§3-11 非理想条件下变流器的谐波	121

§3-12 利用计算机仿真对非理想条件下大功率整流器 谐波的分析	129
§3-13 整流装置与电容器并联运行时对电容器的影响	140
第四章 其它的谐波源	158
§4-1 概述	158
§4-2 变压器非线性激磁特性	158
§4-3 旋转电机的谐波	164
§4-4 电弧炉引起的谐波	171
§4-5 荧光灯的高次谐波	174
第五章 高次谐波的测量	177
§5-1 概述	177
§5-2 示波器	177
§5-3 波形分析仪	178
§5-4 频谱分析仪	179
§5-5 实时频谱分析仪	183
§5-6 傅里叶分析仪	184
§5-7 具有微型计算机的FFT频谱分析仪	184
第六章 高次谐波的抑制与消除	188
§6-1 概述	188
§6-2 增加整流器的脉波数	189
§6-3 系统短路容量与电压畸变率的关系	191
§6-4 注入谐波电流	197
§6-5 并联滤波器	200
§6-6 滤波器设计技术要求及滤波效果的评价	202
§6-7 电网阻抗对滤波器的影响	204
§6-8 单调谐滤波器的设计	205
§6-9 双调谐滤波器	213
§6-10 高通滤波器	215
§6-11 滤波装置组成举例	217
§6-12 滤波器的投资费用	218
§6-13 有源型高次谐波抑制装置	225
参考书目	230

第一章 绪 论

§ 1-1 晶闸管电力变换装置

自从50年代末晶闸管问世后，20多年的时间里，使电力变换与控制领域发生了革命性的变化，利用晶闸管作为主要功率控制元件的各类电力半导体装置在整流、逆变、变频、斩波和交流电压调整等方面得到了很大的发展，随着我国国民经济的发展，电力半导体装置将在以下几个领域还会得到更为广泛的应用。

（一）在煤炭工业中的应用

作为矿山主要运输工具的矿用晶闸管脉冲调速的电机车，由于其具有节能、调速范围宽、无火花断流、起动制动平稳等一系列优点，正在矿山大力推广应用，并向高电压大功率方向发展。运行速度快、耗电量大、安全运行要求高的矿山提升设备，也被晶闸管调速装置所代替。其它如矿山隔爆型充电设备等电力半导体装置均在安全可靠地运行，随着煤炭工业生产的发展，可以预见，今后对这些装置的需求量则将更大。

（二）在电化学和电解、冶金工业中的应用

大功率整流装置已广泛应用于水和食盐的电解，提炼铝、铜等有色金属，若应用晶闸管装置，则可以节省电能，减少有功和无功功率损耗，提高变流效率和电解产品质量，所以，我国冶炼系统开始将电化学的整流设备逐步改用晶闸管装置。显然，随着电化学和电热、冶金用电电源的技术改造，电力半导体装置在这一领域的应用，也将会有新的发展。

（三）交流调速技术日趋完善

在风机、水泵类负载中应用晶闸管串级调速技术，已是一项节电效果比较显著的措施，它大多用于容量大而调速范围不大的场合，目前已在金属轧制、轻纺、制糖等行业中推广应用。变频

调速装置在容量和技术上均有新的发展，脉宽调制技术和矢量控制的感应电动机调速装置新产品在我国也即将问世，预计将会在各行各业中推广使用。

(四) 广泛用作交流电力控制器

晶闸管调压器和调功器与常用电磁型的同类产品比较，它具有节能、维修量少、运行可靠等优点，故已广泛应用于民用工业，机场调光、国防设施、以及电力工业中的同步发电机励磁和合闸电源等方面，其它需要调压、调功的场合，也已十分普遍地采用了晶闸管装置。

随着高压直流输电工程，电弧炉静止无功补偿装置、PWM脉宽调制装置，微机在交直流拖动系统和轧钢供电系统中的应用等投入电网运行，在供电系统中非线性负载的比例，无论是数量还是容量必然会迅速增多。据1981年日本电气协调研究会对9个电力公司调查的结果，电力半导体装置所占负荷的比重已达总负荷的73%。这意味着供电系统的负荷日趋非线性化，这一发展趋势，应引起我们的关注。

§ 1-2 电网中的高次谐波

电力半导体装置在电网中的应用，通常有整流、交流电压调整以及变频三种主要型式，并应用晶闸管作为功率控制元件，只有当直流输出电压无需调整时才使用二极管，而功率晶体管目前只是在小功率场合下使用。

晶闸管等电力半导体器件是以开关方式工作的，按一定的顺序接通和切断电流。尽管电力半导体装置的功能不同，线路结构各异，但电力变换的机理完全一样。晶闸管直接接在交流输入系统与负荷电路之间，并按照人们所期望的次序交替地通断，在各相输入电压波上截取不同的时间波段，从而获得一个人们所期望的波形或频率的输出电压。例如，三相桥式联接的整流电路，是截取36个正弦波的波头而组成的直流电压，因此，电力半导体装置从交流电力系统取用的电流是非正弦的，这种非正弦电流，流

经系统中包括发电机、输电线路、变压器在内的各阻抗元件，必然要产生非正弦的电压降，使交流系统内各点的电压波形也发生不同程度的畸变，这些畸变波形按傅里叶级数分解为除含有与电网工频相同的基波外，还含有一系列不同频率和振幅的谐波，但通常不包含直流分量，因此，电力半导体装置是从电网中取用谐波电流的用电设备，至于谐波的频率、振幅与相位等参数是与变换装置类型、相数、运行条件、系统参数等因素有关的，其谐波次数 n 由电力半导体装置的相数决定，可以用一个简单的通式 $n = kp \pm 1$ 来表达， p 代表相数(脉波数)， k 为 $1, 2, 3, \dots$ 正整数，则

对于整流器 单相全控桥式整流装置 $n = 4k \pm 1$

三相全控桥式整流装置 $n = 6k \pm 1$

三相半控桥式整流装置 $n = 3k \pm 1$

(共阳极组或共阴极组为晶闸管，其余用二极管)

对于交流调压器 单相双向控制 $n = 4k \pm 1$

三相双向控制 $n = 6k \pm 1$

三相单向控制 $n = 3k \pm 1$ (晶闸管与二极管反并联)

对于交—交变频器 单相正弦波输出 $n = f_1 \pm 2kf_1$

三相正弦波输出 $n = f_1 \pm 6kf_1$

式中 f_1 ——基波频率；

f_1 ——变频器输出频率； $k = 0, 1, 2, \dots$ 。

电力半导体装置的谐波有特征谐波和非特征谐波之分，上面指的是特征谐波，它是装置运行于理想条件下所产生的谐波，理想条件是指电源三相电压是对称系统，供电回路为三相对称的回路。各相控制角及特性没有差异等。若电力半导体装置运行于非理想条件下，除产生特征谐波外，还有非特征谐波。

当电力半导体装置输入电压为正弦波时，其输入电流则为一定形状的方波或阶梯波，电流波形的幅值和形状，则决定于装置的电路和整流电流，常用的三相桥式 6 脉波整流电路，从理论上

分析, 其谐波电流幅值的大小可以下式表示:

$$I_n = \frac{I_1}{n} f(a \cdot \gamma) \quad (1-1)$$

式中 I_1 ——交流侧基波电流;
 n ——谐波次数;
 a ——控制角 (又称延迟角);
 γ ——换相角。

高次谐波的相位通常是指各次谐波对基波的相位关系, 而不同次频率的谐波相互间无相量关系, 不能进行相量运算, 因此, 绘制谐波相量图时, 应按谐波次数分别绘制, 其相角数值也应以该次谐波频率为参考, 亦即各次谐波的相量图相角均可以 2π 为周期绘制, 但应注意, 同一个相角对于不同次谐波时所代表的时间并不相等, 对于基波, 其周期 T_1 以时间表示为

$$T_1 = \frac{1}{f_1}$$

$$\text{对于 } n \text{ 次谐波 } T_n, \text{ 则为 } T_n = \frac{1}{f_n} = \frac{1}{nf_1}$$

$$\text{所以 } T_n = \frac{T_1}{n}$$

以角度表示周期时:

$$\text{对于基波 } \theta_{T_1} = 2\pi f_1 T_1 = 2\pi$$

$$\text{对于谐波 } \theta_{T_n} = 2\pi f_n T_n = 2\pi$$

上式表示, 在绘制相量图时, 以角度表示周期, 不管频率如何都是 2π 。

但在绘制不同频率的谐波曲线图时, 常需要将不同频率的谐波绘在同一图上, 此时宜以时间为横坐标, 按 $T_n = \frac{T_1}{n}$ 划分周期, 尽管不同频率的谐波周期对应的角度相同, 但代表的时间长短将因谐波次数不同而异。

还可以最常用的三相 6 脉波桥式整流电路为例, 分析并得到各次谐波的相序, 5 次谐波相序为负序, 而 7 次谐波为正序, 进而

推广到当谐波次数较6的整倍数高一次时为正序，低一次时为负序。

供电系统中的电弧炉、气体放电式光源、电焊机、变压器、电抗器等铁磁元件，都会产生不同频率、不同振幅的高次谐波，但其中电力半导体装置所产生的谐波具有较大的振幅，是电网中的主要谐波源。据国内外对谐波实测和在调查报告中指出，有关工矿企业均存在着程度不同的谐波危害，谐波电流和电压畸变率大的单位，还经常发生由谐波造成的事故。

§ 1-3 高次谐波的危害

向供电系统注入高次谐波电流是电力半导体装置及其它非线性负荷在使用过程中造成的重要危害，其危害范围波及到工矿企业电网的各个部分，并通过电力系统影响到其它用电部门，谐波电流及电网电压畸变的有害影响表现为：

(一) 由于电压畸变，含有的高频成分将造成用电和输电设备热过载和损耗加大

对于工频电流来说，有色金属导体中电流的分布可以近似地认为在整个截面内是均匀的，通过高频电流时，集肤效应严重，导体的有效电阻增加，例如，截面为 300mm^2 的导体，通过 60Hz 电流时，若靠近中心一半面积上的电流密度为平均值的90%，表面一半面积上为110%，那么，电流在导体上的总损耗为内外两部分损耗之和，即

$$I^2 R_i + I^2 R_o = \left(\frac{0.9I}{2}\right)^2 2R + \left(\frac{1.1I}{2}\right)^2 2R = 1.01 I^2 R \quad (1-2)$$

直流电流通过同样的导体，由于电流均匀分布，则损耗为 $I^2 R$ 。由此可见，该导体在 60Hz 交流电流时，所呈现的交流电阻为直流电阻的1.01倍。随着频率的上升，导体的交流电阻与直流电阻的关系如表1-1所示，从表可见，频率越高，集肤效应影响越大，导体对谐波电流的有效电阻也就增加越多。

由于电流波形畸变，流过导体的电流除基波电流外，还增加

了高次谐波电流分量, 所以, 向非线性负载供电的网络, 其功率损耗、电能损耗都增加, 导体发热也就越严重。

表1-1 大截面导体的集肤效应

谐波次数	谐波频率/Hz	交流电阻/直流电阻
1	60	1.01
5	300	1.21
7	420	1.35
11	660	1.69

(二) 影响用电设备的正常运行, 降低使用寿命

1. 对感应电动机的影响

感应电动机和同步电机中的谐波电流, 要引起附加损耗和发热, 这是由谐波中的低次谐波具有较大幅值造成的, 现在, 用静止型变频装置调速的感应电动机越来越普遍, 而静止变频器供给的电压和电流本身就是非正弦的, 此谐波电流将给电机造成严重的附加损耗。

空载试验表明, 有谐波存在时, 激磁电流的基波分量要比没有谐波时要大, 这就使感应电动机的功率因数下降, 例如, 当 $I_5=20\%I_1$, $I_7=15\%I_1$ 时, 电动机的功率因数较额定值下降2.6%。

由非正弦波电流供电时, 多相感应电动机除具有一般的电机损耗外, 由于谐波的存在, 还造成一些附加的损耗, 其表达式为

$$\Delta p_1 = m R_1 I_1^2 + m R_n I_n^2 \quad (1-3)$$

上式说明, 定子损耗不仅是增加了第二项谐波电流的损耗, 而且第一项内由于激磁电流的增加, 其损耗也相应加大。

由于集肤效应的缘故, 在谐波电流的作用下, 感应电动机转子电阻增加很快, 它随谐波频率的变化而变化, 并与导线截面、转子槽的几何形状有关, 由谐波引起的转子附加损耗, 可分别计算各次谐波引起的转子附加损耗后求和, 即

$$\Delta p_{2n} = \sum_{n=2}^{\infty} m (I_n)^2 R_n \quad (1-4)$$

式中 m ——感应电动机相数；

I_n ——转子第 n 次谐波电流；

R_s ——计及集肤效应后的转子交流电阻。

端部漏磁损耗是沿着轴向进入铁心端部叠片的漏磁通所引起的涡流损耗，定子端部损耗：

$$\Delta p_{1e} = 0.3 C_1 m \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 n f_1 \quad (1-5)$$

式中 f_1 ——基波频率；

C_1 ——电机常数（查电机设计手册）。

由转子槽磁导和磁势谐波引起的转子齿的磁通脉动造成的转子曲折损耗，可近似地用下式计算：

$$\Delta p_z = m C_{db} \cdot R_1 (C_0 I_0^2 + C_L I^2) \quad (1-6)$$

式中 I_0 ——空载基波电流；

I ——包括谐波在内的定子全电流；

C_0 和 C_L ——电机常数（查电机设计手册）；

C_{db} ——计及转子槽在谐波频率下的深槽效应的常数。

转子曲折损耗比正弦波供电情况下要大好几倍。除上述损耗外，还有诸如铁心损耗、转子绕组损耗、摩擦和通风损耗等，这与谐波电流的影响甚小或者无关。

有人曾对功率为16kW的电动机进行过试验，分别以正弦波和方波电压供电，在电机满负荷时，前者总损耗为1303W，而后者则为1600W。

高次谐波和电压不平衡对电机寿命有严重影响，实验证明，其性质相同，引起的损失相近，三相不平衡电压也会在感应电动机转子中感应出2倍于基频的负序电流，此时交流电阻将增加很大，为使电机温升不超过规定值，通常对电压的不平衡度，在电机的标准中也有规定，从电压不平衡度对电机影响的角度来看，3.5%的电压不平衡度，可以使得电机温升增加25%，电机绝缘的寿命缩短1/2。

谐波电流还会使感应电动机的稳定转矩略有减小，并产生波

动转矩，但对实际运行没有什么影响。

2. 对变压器的影响

和电机一样，变压器在高次谐波作用下，将产生集肤效应和邻近效应，在绕组中引起附加铜耗，铁心损耗也相应增加，其附加损耗可用下式表示：

$$\Delta p_r = 3 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_r k_{nr} \quad (1-7)$$

式中 I_n ——通过变压器的 n 次谐波电流；

R_r ——变压器的短路电阻；

k_{nr} ——计及集肤效应和邻近效应时短路电阻增加的影响系数，一般电力变压器 k_{nr} 的值，当谐波次数 n 分别为 5、7、11、13 时，则 $k_{5r}=2.1$ ， $k_{7r}=2.5$ ， $k_{11r}=3.2$ ， $k_{13r}=3.7$ ，谐波电压还会使变压器激磁电流增大，效率降低，并恶化了功率因数。

3. 对电力线路绝缘的影响

对于架空线路，谐波电流通过时，可能产生串联谐振，导致危险的过电压，对于电缆线路，由于其绝缘中含有少量气体，气体在谐波电压作用下电离而形成电荷，并逐渐变为中性，在变为中性过程中，散发电能，在绝缘介质中引起一系列电气、机械、物理、化学变化，从而加速绝缘老化，并降低其绝缘强度，泄漏电流增大，缩短了寿命，据有关部门试验，同样的电缆敷设条件，若是通过一般的工频电流和含有 5、7 次等非正弦波电流，前者使用寿命为 25 年，而后者只有 9 年。出现高频高振幅的谐波电压分量时，还可能引起放电和击穿电缆。

4. 对电力电容器的影响

电力电容器由于谐波所增加的损耗为

$$\Delta p_c = \sum_{n=2}^{\infty} 2\pi n f_1 C \tan \delta u_n^2 \quad (1-8)$$

式中 δ ——介质损耗角；

f_1 ——基波频率；

C ——电容，单位为 μF ；

u_n —— n 次谐波电压，单位为 kV 。

从上式可见，随着谐波电压的增高，加速电容器的老化，损耗系数 $\tan\delta$ 增大，容易产生故障或缩短寿命。

由于电容器的阻抗为

$$Z_c = \frac{1}{n\omega C} \quad (1-9)$$

所以，电容器是一种频率敏感的元件。如果电容器的端电压为 u_c 。那么

$$u_c^2 = \sum_{n=1}^{\infty} u_n^2 \quad (1-10)$$

流过电容器的电流为

$$I_c^2 = \sum_{n=1}^{\infty} (u_n n\omega C)^2 \quad (1-11)$$

为了估计一下高次谐波电压的影响，假定电压仅由基波和 n 次谐波组成，在这种情况下：

$$\begin{aligned} \left(\frac{u}{u_1}\right)^2 &= 1 + \left(\frac{u_n}{u_1}\right)^2 \\ \left(\frac{I_c}{I_{c1}}\right)^2 &= 1 + \left(\frac{nu_n}{u_1}\right)^2 \end{aligned} \quad (1-12)$$

上式说明，当 n 次谐波电压的有效值为某一定值时，它叠加在电容器基波电压上，使电容器运行的电流有效值增大，并且随着 n 的增加而增加。

电力电容器在电力系统中像一个谐波吸收器，各处产生的谐波电流都会“汇集”于电容器组上，这种现象，将造成电力电容器组的严重过电流。另一方面，电力电容器与电力系统的感抗还会构成谐振电路，本书将电容器、谐波源和电力系统相联接的点称为公共联接点，如图1-1所示，这种谐振回路的谐振频率为

$$f_n = f \sqrt{\frac{P_{st}}{P_{qc}}} \quad (1-13)$$

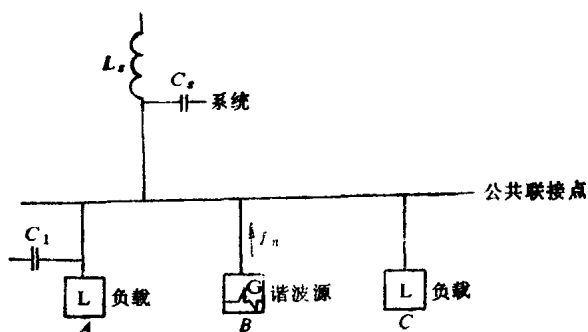


图1-1 在公共联接点处的并联

P_{sk} 为接入电容器处的电力系统短路容量； P_{qc} 为电力电容器组的额定容量。如果这个谐振回路的谐振频率等于或接近于系统中某次谐波分量的频率，就会产生振荡，谐波电流放大，造成突发性的电气故障，例如电容器过热、过电压，电容器跳闸而不能正常运行等。日本电气协调研究会于1973~1978年对几个电力公司调查的结果表明，以电力电容器在高次谐波作用下受害最为严重，其结果如表1-2。

表1-2 高次谐波危害情况

受害的电力设备	受害台数	预测而未受害台数
电力电容器	34台	3台
变压器	4台	
其它	3台	
合计	41台	3台

(三) 降低供电系统的功率因数

一般情况下，电压的瞬时值用下式表示：

$$u = U_m \sin \omega t = \sqrt{2} U \sin \omega t \quad (1-14)$$

式中 u ——电压的瞬时值；

U_m ——电压的最大值；

U ——电压的有效值；

ω ——角频率。

前已述及，对于非线性负荷，流过它的电流将是非正弦波，一个非正弦的周期波是由基波和一系列频率为基波频率整数倍的谐波构成的，即

$$i = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1-15)$$

i 为电流的瞬时值， I_n 为 n 次谐波电流的有效值， φ_n 为 n 次谐波相位，当 $n=1$ 时，指的是基波， n 为所含最高次谐波的次数， I_n 、 φ_n 的数值取决于非线性负载的特性。

电流的有效值

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2 d\omega t} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$$

$$I^2 = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \quad (1-16)$$

这样，负荷所吸收的瞬时功率

$$P_i = u_1 i = 2U \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin \omega t \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

$$= u \sum_{n=1}^{\infty} I_n \{ \cos[(n-1)\omega t + \varphi_n] \cos[(n+1)\omega t + \varphi_n] \}$$

$$\text{有功功率} \quad P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u i d\omega t \quad (1-17)$$

将式 (1-14)、式 (1-15) 代入式 (1-17)，由于三角函数的正交性，除了 $n=1$ 的一项外，其它各项的积分均等于零，最后得到

$$P = UI_1 \cos \varphi_1 \quad (1-18)$$

$$\text{视在功率} \quad P_s = UI = U \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (1-19)$$

而功率因数是负荷吸收的有功功率和视在功率之比

$$\text{功率因数} = \frac{P}{P_s} = \frac{UI_1 \cos \varphi_1}{UI} = \cos \varphi_1 \left(\frac{I_1}{I} \right) = \mu \cos \varphi_1 \quad (1-20)$$

由上式可知,非线性负荷的功率因数由两项构成,第一项为基波电流和电源电压相位差的 $\cos \varphi_1$,称为移相因数,而第二项 μ 是基波电流的有效值与总谐波电流有效值之比,它是由于电流波形不是正弦波而造成的,称为电流的畸变因数,此值小于1,所以对非线性电路:

$$\text{功率因数} = \text{移相因数} \times \text{畸变因数}$$

$$\text{而视在功率的平方 } P_s^2 \text{ 是: } P_s^2 = U^2 I^2 = U^2 I_1^2 + U^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 = U^2 I_1^2$$

$$\cos^2 \varphi_1 + U^2 I_1^2 \sin^2 \varphi_1 + U^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 = P^2 + P_q^2 + D^2$$

上式中 $P = UI_1 \cos \varphi_1$ 是有功功率, $P_q = UI_1 \sin \varphi_1$ 是无功功率,

$$D = U \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \text{ 也是无功功率, 它是因为电流中含有谐波造成的}$$

的,称它为畸变功率。

$$D^2 = U^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 = U^2 (I^2 - I_1^2) \quad (1-21)$$

上式表明,在非线性交流电路中,电流的谐波分量是无功性质的,因为增加了一部分叫畸变功率的无功功率,因此,同样功率的非线性负荷比线性负荷的功率因数要低,功率因数低意味着供电设备的容量必须增大,系统的能量损耗也必然增加。

(四) 对测量仪表的影响

有功和无功电度表是用于工矿企业所消耗的有功和无功电能的计量,既要正确记录线性负荷所消耗的电能,也要记录非线性负荷或者混合负荷所消耗的电能,不论供电部门还是用电单位都