

功率因数校正原理 与控制 IC 及其应用设计

毛兴武 祝大卫 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TM933.3/2

2007

功率因数校正原理 与控制 IC 及其应用设计

毛兴武 祝大卫 编著

内 容 提 要

本书全面地介绍了功率因数校正(PFC)的类型、控制技术、工作原理和控制IC及其应用与设计。全书共分九章,主要内容包括功率因数与功率因数校正、功率因数校正的基本类型和控制技术及其工作原理、临界导电模式(CRM)PFC控制器、连续导电模式(CCM)平均电流控制PFC控制器、单级PFC控制器、其他类型的PFC控制器、PFC与镇流器控制器组合IC、开关电源PFC与PWM控制器组合IC及PFC功率模块等。对于各种PFC控制IC的介绍,具体内容涉及其基本结构、引脚功能、性能特点、工作原理、典型应用电路与设计等。

本书涵盖的内容广泛,资料翔实,插图丰富,技术新颖,具有系统性、实用性、指导性和前瞻性,并且深入浅出,通俗易懂。

本书适合于电力与电子行业、电源行业和电光源行业从事研发和生产的工程技术人員阅读,并可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

功率因数校正原理与控制IC及其应用设计/毛兴武,
祝大卫编著. —北京:中国电力出版社,2007

ISBN 978-7-5083-5818-5

I. 功… II. ①毛… ②祝… III. 功率测量
IV. TM933.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第088754号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007年11月第一版 2007年11月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 29.75印张 732千字

印数 0001—3000册 定价 46.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



众所周知,功率因数(PF)定义为有功功率与视在功率之比(值)。对于线性系统的电抗性电路负载,输入电压和输入电流均为同频率的正弦波,但二者之间产生了一个相位角 φ 。在此情况下,功率因数(PF)等于 $\cos\varphi$ 。

随着电子信息技术的飞速发展,对各种办公自动化设备、电子计算机和家用电器等产品的需求逐年增加。在很多这类设备和电器内部,都需要一个将工频市电转换为直流的 AC-DC 电源变换电路。像荧光灯交流电子镇流器和变频调速器等离线系统,与开关型电源(SMPS)一样,同样有一个前端 AC/DC 变换器部分,并且这个前端 AC/DC 变换器部分通常采用全波桥式整流和大容量电容滤波电路。由于大容量滤波电容的存在,整流二极管仅在交流(AC)输入电压瞬时值超过电容上的电压时,才会因正向偏置而导通,而在 AC 线路电压瞬时幅度低于电容上的电压时,二极管则因反向偏置而截止。其结果是,AC 输入电压波形畸变可以忽略,仍然保持正弦波形状,但 AC 输入电流却发生严重失真,不再为正弦波,而是呈高幅值的窄尖峰脉冲。这样的非正弦电流波形,其基波成分很低,而谐波含量却很高。在此情况下,输入功率因数不再等于 $\cos\varphi$ 。事实上,PF 值不仅取决于输入电压与输入电流(基波)之间的相位角,而且在很大程度上取决于谐波电流及总谐波失真(THD)。AC 输入电流谐波被认为是一种“电力公害”,它不仅会使线路功率因数降低,影响交流电源的利用率,造成电能的浪费,而且会对电网造成污染,对系统本身和连接在同一交流电源系统的其他电气设备产生恶劣的影响,乃至引起故障,损坏设备。

对于谐波电流的危害,早在 20 世纪 80 年代初国际电工委员会(IEC)就引起了重视。IEC 于 1982 年制定的 IEC 555-2 国际标准,是涉及谐波电流限制的第一个规范。1992 年,IEC 对 IEC 555-2 进行了修订。在 IEC 555-2(修订版本)的基础上,IEC 于 1998 年制定了 IEC 1000-3-2《家用电器及类似电气设备发出的谐波电流限制》标准及 IEC 1000-3-4 等标准。与此同时,欧盟、美国、日本和中国等许多国家和地区也制定了相应的标准,使限制谐波电流成为全球性的强制性规定,并且更新的标准和规范被应用于仅消耗 75W 的电子产品和功率为 26W 的照明电器之中。

限制离线系统的输入电流谐波、提高线路功率因数的技术措施,被称作功率因数校正(PFC),也将其称为谐波滤波。PFC 分无源和有源两种类型,有人也将无源 PFC 和有源 PFC 称作被动式 PFC 和主动式 PFC。无源 PFC 电路仅使用电感器、电容器和二极管、电阻等无源元件,但其效果欠佳,难以达到低输入电流失真要求。基于功率因数控制器 IC 的有源 PFC 技术,在 20 世纪 80 年代中期发展起来,从 90 年代初期开始就得到广泛应用。有源 PFC 可以在离线系统的输入端产生与 AC 线路电压趋于同相位的正弦电流,使系统呈现纯电阻性负载,功率因数几乎等于 1(即单位功率因数)。

能源短缺和电力供应不足是目前很多国家面临的问题。解决电力不足的问题单靠大量兴建电厂并不是唯一途径,而提高电气设备的功率因数也是非常重要的环节。推广应用 PFC 技术,可以缓解电力紧张的矛盾,减少兴建电厂的数量,减少对电网的污染,保证电力系统

和用电设备的安全经济运行，具有显著的经济效益和社会效益，符合建立节约型社会和落实科学发展观的总体要求。

笔者在国内最早介绍了 PFC 技术。从 1990 年开始至今，笔者在国内 10 余种刊物上发表的 PFC 专题文章达 100 余篇。为进一步推动 PFC 技术在我国的应用，满足读者的要求，我们编写了本书。在本书编写过程中，力求做到系统性、实用性和通俗易懂，以使电力电子行业、电源行业及电光源行业从事研发和生产的工程技术人员及相关专业的大专院校师生从中受益。

在本书写作过程中，得到了同行的大力支持和帮助，在此表示感谢。由于作者水平有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编 者

2007 年 8 月

目 录

Contents



前言

第1章 功率因数及功率因数校正	1
第一节 功率因数的含义	1
第二节 非正弦电流下的功率因数	3
第三节 功率因数与谐波电流之间的关系	4
第四节 输入电流谐波的危害及谐波电流限制标准	5
第五节 功率因数校正 (PFC)	8
第2章 功率因数校正的基本类型、控制技术及其工作原理	10
第一节 功率因数校正的实现方法分类	10
第二节 无源功率因数校正 (PPFC)	13
第三节 不连续传导模式 (DCM) 有源功率因数校正	19
第四节 临界模式 (CRM) 有源功率因数校正	20
第五节 连续传导模式 (CCM) 有源功率因数校正	23
第六节 功率因数校正的无源无损软开关技术	25
第七节 单级功率因数校正技术	28
第八节 功率因数校正的单周期控制 (OCC) 技术	32
第九节 功率因数校正的数字控制方法	34
第十节 产生非正弦波电流的功率因数校正	37
第十一节 三相功率因数校正	44
第3章 临界传导模式 (CRM) PFC 控制器	52
第一节 KA 系列 CRM—PFC 控制器	52
第二节 FAN 系列 CRM—PFC 控制器	59
第三节 MC 系列 CRM—PFC 控制器	72
第四节 L 系列集成 CRM—PFC 控制器	84
第五节 UC/UCC 系列集成 CRM—PFC 控制器	96
第六节 TDA 系列集成 CRM—PFC 控制器及 BoostSET 组合器件	105
第七节 FA5500A/FA5501A 集成 CRM—PFC 控制器及其应用设计	114
第八节 SG6561/A 及 IP 系列 CRM—PFC 控制器	118
第九节 其他 CRM—PFC 控制 IC	122
第4章 连续传导模式 (CCM) 平均电流控制 PFC 控制器	130
第一节 UC 系列固定频率平均电流模式 (ACM) 集成 PFC 控制器	130
第二节 UCC 系列 ACM—PFC 控制 IC	141

第三节	NCP 系列 CCM—PFC 控制器	154
第四节	LT 系列固定高频 PWM 平均电流模式 PFC 控制器	169
第五节	ML 系列平均电流控制 PFC 控制器	173
第六节	FA 系列平均电流模式 PFC 控制器	180
第七节	L4981A/B 平均电流模式 PFC 控制器	184
第八节	FAN4810 平均电流型 PFC 控制器	195
第九节	ICE1PCS01 CCM—PFC 控制器	203
第十节	UC2853A8 引脚平均电流模式 PWM 控制 PFC—IC	210
第十一节	MSC60028 CCM—PFC 控制器	213
第十二节	TDA4815/TDA4819 固定频率 CCM—PFC 控制器	217
第十三节	IPS101 带三输入乘法器的低成本高效率 PFC 控制器	220
第十四节	HA16174 CCM—PFC 控制器	223
第 5 章	单级 PFC 控制器	226
第一节	iW2202 数字单级 PFC 控制器	226
第二节	NCP1651 单级 PFC 控制器	231
第三节	HV9931 单级 PFC 高亮度 LED 灯驱动器	238
第四节	TDA 系列支持低功率待机和 PFC 的开关电源控制器	244
第五节	ICE1QS01 支持低功率待机和 PFC 的准谐振开关电源控制器	251
第 6 章	其他几种类型的 PFC 控制器	257
第一节	ML4812 固定频率峰值电流控制 PFC 控制器	257
第二节	ML4813 反激式 PFC 控制器	260
第三节	CS-3810 滞后电流模式控制 PFC 控制器	264
第四节	IR1150 单周期控制 CCM—PFC IC	269
第五节	NCP1601 创新型 DCM/CRM PFC 控制器	274
第六节	AS1730A/AS1731B PFC 电流分配 IC 与 PFC 监控 IC	280
第 7 章	PFC 与镇流器控制器组合 IC	286
第一节	TDA4814/TDA4816G PFC 与镇流器启动和保护 IC	286
第二节	KA7531/KA7531D PFC 与可调光镇流器控制器组合 IC	290
第三节	NE5565 PFC 与镇流器控制器组合 IC	295
第四节	ML4830 PFC 与调光镇流器控制器组合 IC	299
第五节	ML4832 PFC 与调光镇流器控制器组合 IC	304
第六节	ML4833 PFC 与调光镇流器控制器组合 IC	308
第七节	ML4835 PFC 与 CFL 调光镇流器控制器组合 IC	315
第八节	IR2166 PFC 与镇流器控制器组合 IC	323
第九节	IR2167 PFC 与镇流器控制器组合 IC	333
第十节	ICB1FL01G PFC 与智能镇流器控制器组合 IC	337
第 8 章	开关电源 PFC 与 PWM 控制器组合 IC	345
第一节	ML4819 PFC/PWM 组合控制器	345

第二节	ML4824 PFC/PWM 组合控制器	352
第三节	ML4826 与 ML4827 PFC/PWM 组合控制器	359
第四节	ML4803 8 引脚 PFC/PWM 组合控制器	363
第五节	ML 系列其他 PFC/PMW 组合控制器	368
第六节	LT1508/LT1509 PFC/PWM 组合控制器	372
第七节	TDA16888 PFC/PWM 组合控制器	376
第八节	TA1294 PFC/PWM 组合控制器	380
第九节	HA 系列 PFC/PWM 组合控制器	384
第十节	UCC 系列 PFC/PWM 组合控制器	391
第十一节	CM 系列 PFC/PWM 组合控制器	397
第十二节	NCP1603 PFC/PWM 组合控制器	403
第十三节	TLS1242/TLS1244 PFC/PWM 组合控制器	409
第十四节	SG6902/SG6931 PFC/PWM 组合控制器	413
第十五节	STR-E1555/STR-E1565 PFC/DC/DC 系统组合功率 IC	418
第 9 章	PFC 功率模块	425
第一节	带无源谐波电流衰减模块 MiniHAM 的 ENMods™ 系统	425
第二节	VUM24-05/VUM33-05 型 PFC 功率模块	428
第三节	SD11113 PFC 功率模块	431
第四节	7700 系列与 7720 系列 PFC 功率模块	435
第五节	飞兆 (Fairchild) 公司 PFC 智能功率模块 (SPM)	442
第六节	STK760-220 有源 PFC 功率 IC	451
第七节	三菱半导体公司 PM52AUB 系列有源滤波器智能功率 模块 (A/F—IPM)	452
第八节	三菱公司 PS51259-A/PS51277-A DIP—PFC IPM	457
参考文献		467



第一节 功率因数的含义

在交流发电机问世之后的较长一段时间内,工频市电电源主要为白炽灯泡和电炉这类纯电阻性负载供电,发电机输送的电能全部被用电器具所吸收和利用。

第二产业的兴起,使得像交流电动机这类设备得到广泛应用。进入 20 世纪 30 年代之后,荧光灯、电风扇、抽油烟机、洗衣机和电冰箱等电器进入到千家万户。这些电器和设备不再为纯电阻性负载,而是变为既有电阻又有电抗的阻抗负载。在这种情况下,发电机发出的交流电进入用电器具和设备时,交流电流往往滞后于交流电压,产生一个电流相位滞后角。这就意味着交流发电机发出的电能不能完全被用电器具和设备所利用,只有一部分电能变为有用功,而其他部分的电能以磁场能量形式同发电机之间往返交换而释放不出来,发电机发出的能量被打折了折扣,致使交流电源的利用率不能达到 100%。

一、无功功率、有功功率和视在功率

无功功率表示电抗性负载与电流之间进行能量交换的规模,通常用字母 Q 表示。为与有功功率相区别,无功功率的单位用乏 (var) 表示。“无功”的含义是“能量交换”而不是“消耗”,它是相对“有功”而言的,绝不可以理解为“无用”。

有功功率是负载实际消耗的功率,通常用字母 P 来表示,单位为 W。

电路中实际消耗的功率为一个交流电源周期内瞬时功率的积分,即

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt \quad (1-1)$$

式中 T ——供电电源周期, s;

$P(t)$ ——瞬时功率, W;

$u(t)$ ——瞬时电压, V;

$i(t)$ ——瞬时电流, A。

视在功率定义为均方根值 (rms) 输入电源电压和电流的乘积

$$S = U_{\text{rms}} I_{\text{rms}} \quad (1-2)$$

式中 U_{rms} ——均方根值电压, V;

I_{rms} ——均方根值电流, A;

S ——视在功率, VA (在数值上, 1VA=1W)。

二、功率因数

为了表征电路交流 (AC) 电源的利用率,在电工学中引入了“功率因数”这个术语。功率因数 (PF) 定义为有功功率与视在功率之比值,即

$$PF = \frac{P}{S} \quad (1-3)$$

对于线性系统的电抗性电路负载,同频率的输入电压和输入电流均为正弦波波形,但二

者之间产生了一个相位角 φ ，如图 1-1 所示。在此种情况下，瞬时电压和电流可表示为

$$\begin{cases} u(t) = U_m \sin \omega t \\ i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (1-4)$$

式中 U_m ——输入电压最大值，V；

I_m ——输入电流最大值，A；

ω ——角频率， $\omega = 2\pi/T$ ，rad/s。

将式 (1-4) 代入式 (1-1)，则有功率为

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin \omega t I_m \sin(\omega t + \varphi) dt \\ &= U_{rms} I_{rms} \cos \varphi \end{aligned}$$

因此，功率因数为

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{U_{rms} I_{rms} \cos \varphi}{U_{rms} I_{rms}} = \cos \varphi \quad (1-5)$$

从图 1-1 (a) 可知，功率 $p(t)$ 波形既有正值，也出现了负值，即图中阴影部分。阴影部分的面积代表从系统馈送回电网线路的能量。图 1-1 (b) 所示的电流频谱，只有交流电源工频频率 (50Hz 或 60Hz)，没有谐波成分。

图 1-2 所示为用矢量表示的功率三角形。从功率三角形可以直观地得到 $PF = \cos \varphi$ 这一众所周知的结论。

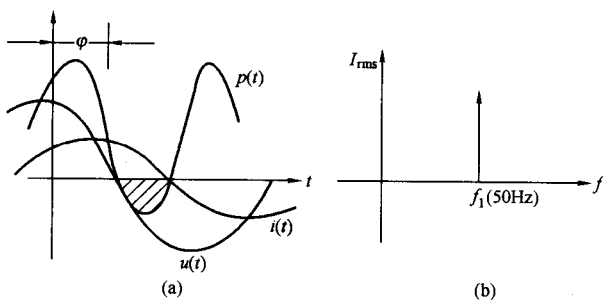


图 1-1 线性系统相关波形及电流频谱图
(a) 电压、电流和功率波形；(b) 电流频谱图

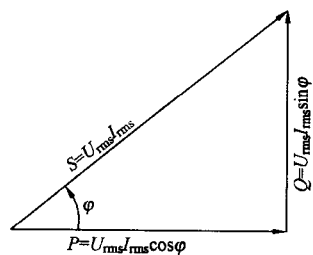


图 1-2 纯正弦信号功率三角形

电抗性负载往往是一个电路。在此情况下，功率因数是指电路或系统的输入功率因数。在国家标准 GB/T 15144—1994《管形荧光灯用交流电子镇流器的性能要求》中，将电子镇流器的功率因数称为“线路功率因数”，并用字母“ λ ”表示。

对于像白炽灯和电炉这类纯电阻性负载，输入电流与电源电压同相位，即 $\varphi = 0$ ，故功率因数等于 1。



第二节 非正弦电流下的功率因数

功率因数等于 $\cos\varphi$ 的传统概念，仅在电压和电流信号均为理想的正弦波形条件下才是有效的。事实上，影响功率因数高低的因素有两个：一个是系统 AC 线路输入电流与输入电压之间的相位偏移，另一个是波形的失真程度。在非正弦电流或电压下，功率因数并不等于 $\cos\varphi$ 。

一、电源电流波形失真的原因

随着电子技术的发展，对各种办公自动化设备、家用电器和电子计算机等产品的需求逐年增加。在这些设备的内部，都需要一个将工频市电转换为直流（DC）的电源部分。像荧光灯电子镇流器和变频调速器等离线系统，同样有一个由桥式整流器和滤波电容器组成的前端 AC/DC 转换器电路。

采用桥式整流和大容量电容滤波电路的开关型电源（SMPS）、电子镇流器和交流变频调速器，由于大容量滤波电容的存在，桥式整流器中的二极管仅在 AC 输入线路电压瞬时幅值超过滤波电容上的电压时，才会因正向偏置而导通。当 AC 线路电压瞬时幅度低于滤波电容上的电压时，整流二极管则因反向偏置而截止。因此，在 AC 线路电压的半周期内，仅在其峰值电压附近，AC 输入电流才会通过整流二极管，致使二极管的导通角非常小，往往不足 60° 。AC 输入电压在其峰值附近，出现微小的“下垂”，所引起的波形畸变可以忽略，仍然大体保持正弦波形。但是，AC 输入电流却呈高幅值的窄尖峰脉冲（宽度不足 3ms），出现严重失真，如图 1-3（b）所示。

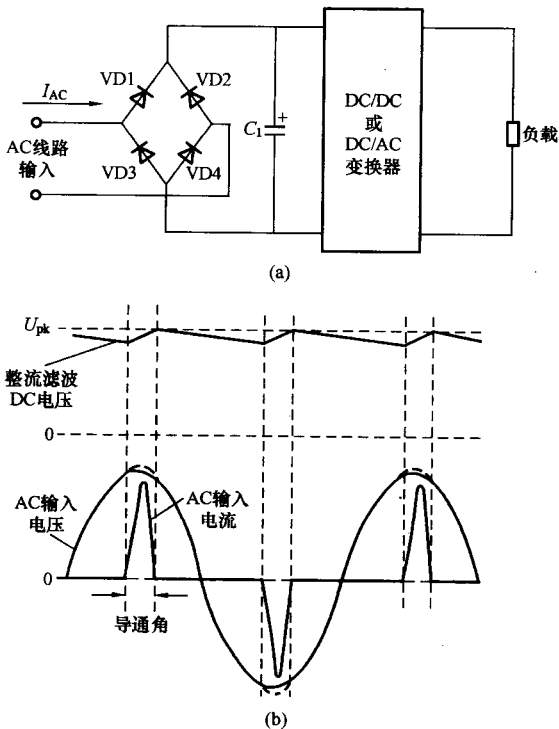


图 1-3 全波桥式整流滤波电路及相关波形

(a) 离线系统前端桥式整流滤波电路；(b) 相关波形

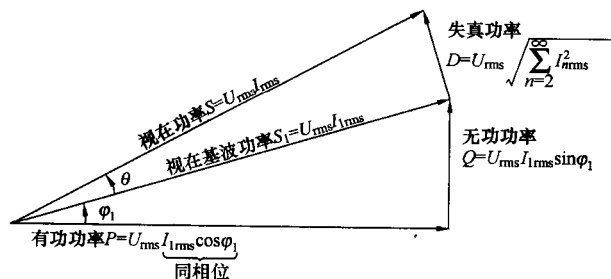


图 1-4 非正弦电流下的功率三角形

二、在输入电流波形失真情况下的线路功率因数

为方便起见，设 AC 供电电压没有发生波形失真，为理想的正弦波，即仅有电压基波，无谐波存在。在此情况下，均方根值电压 U_{rms} 即为基波电压 U_{1rms} 。由于桥式整流电容滤波电路的 AC 输入电流为非正弦信号，不但含有基波，而且包含丰富的谐波，

即除基频之外,还有 2 倍频、3 倍频等一系列谐波成分。设输入电压与同相位基波电流之间的相位角为 φ_1 ,与谐波电流相联系的失真角为 θ ,可以得到用矢量表示的功率三角形,如图 1-4 所示。

均方根值基波电流有一个同相位成分 $I_{1\text{rmsP}}$ 和一个正交成分 $I_{1\text{rmsQ}}$ 。 $I_{1\text{rmsP}}$ 可表示为

$$I_{1\text{rmsP}} = I_{1\text{rms}} \cos \varphi_1 \quad (1-6)$$

有功功率为

$$P = U_{\text{rms}} I_{1\text{rmsP}} = U_{\text{rms}} I_{1\text{rms}} \cos \varphi_1 \quad (1-7)$$

视在功率为均方根值输入电压 U_{rms} 与均方根值输入总电流 I_{rms} 之乘积,即

$$S = U_{\text{rms}} I_{\text{rms}}$$

因此,线路功率因数为

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{U_{\text{rms}} I_{1\text{rms}} \cos \varphi_1}{U_{\text{rms}} I_{\text{rms}}} = \frac{I_{1\text{rms}}}{I_{\text{rms}}} \cos \varphi_1 \quad (1-8)$$

在式 (1-8) 中,令 $K = I_{1\text{rms}}/I_{\text{rms}}$,则有 $K = \cos \theta$ 。因此,式 (1-8) 变为

$$PF = \cos \theta \cos \varphi_1 \quad (1-9)$$

从式 (1-9) 可知,若使电压和基波电流之间的相位角 φ_1 趋于 0, $\cos \varphi_1$ 则趋于 1;若使谐波电流趋于 0, θ 则趋于 0, $\cos \theta$ 即趋于 1。当 $\cos \varphi_1$ 和 $\cos \theta$ 均接近于 1 时, PF 则趋于 1。



第三节 功率因数与谐波电流之间的关系

功率因数不仅跟输入电压与输入电流或输入电流基波之间的相位角有关,而且还与谐波电流及总谐波失真(率) THD 密切相关。而谐波量值取决于电流或电压的波形。

一、波形与谐波之间的关系

一个信号的谐波含量与信号波形的平滑程度有关。可以通过计算或测量得到:脉冲方波的三次谐波之振幅是基波的 $1/3$,五次谐波之振幅是基波的 $1/5$, $\dots$, n 次谐波之振幅是基波的 $1/n$;一个等腰三角波的 3 次谐波之振幅是基波的 $1/3^2$ (即 $1/9$),5 次谐波之振幅是基波的 $1/5^2$ (即 $1/25$), $\dots$, n 次谐波之振幅是基波的 $1/n^2$ 。正是由于等腰三角波两腰与底边的斜率较小,显得比方波“平滑”,所以其各次谐波及总谐波含量比脉冲方波要小得多。

对于前端采用全波整流电容滤波电路的非线性系统,由于输入电流不再呈正弦波形,而是呈高幅值的不连续的尖峰脉冲,其波形简直无“平滑”可言,故谐波含量非常高。对没有采取功率因数校正的一个 16W 荧光灯电子镇流器(滤波电容为 $4.7\mu\text{F}$) 进行测试得到:当电流基波为 100% 时,3 次谐波达 70% 以上,5 次谐波达 50%,第 39 次谐波也达 3%, THD 达 117%。

二、功率因数与输入电流谐波之间的关系

对于产生波形畸变的非正弦输入电流,根据傅里叶变换原理,瞬时电流 $i(t)$ 可以表示为

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(n\omega t) \quad (1-10)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (1-11)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (1-12)$$

式中 n ——电流谐波次数。

每一个谐波电流，通常有一个正弦（或余弦）周期。也就是说，任何一个非正弦周期信号都是由不同频率的正弦信号组成的。这些不同频率的每一个正弦成分，被称为一个谐波分量。 n 次电流谐波的均方根值 $I_{n\text{rms}}$ ，可以利用式（1-13）计算

$$I_{n\text{rms}} = \frac{1}{2} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (1-13)$$

n 次谐波电流均方根值与基波电流均方根值之比率（ $I_{n\text{rms}}/I_{1\text{rms}}$ ），即为 n 次谐波含有率，即人们通常所说的 n 次谐波含量。

总均方根值电流的计算公式为

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I_{1\text{rms}}^2 + I_{2\text{rms}}^2 + \cdots + I_{n\text{rms}}^2} \quad (1-14)$$

总谐波失真(率) THD 为

$$THD = \frac{I_{\text{rms}}}{I_{1\text{rms}}} = \frac{\sqrt{I_{1\text{rms}}^2 + I_{2\text{rms}}^2 + \cdots + I_{n\text{rms}}^2}}{I_{1\text{rms}}} \quad (1-15)$$

根据式（1-14）、式（1-15）和式（1-8），经简单运算，可以得到关于 PF 与 THD 之间的关系

$$PF = \frac{\cos\varphi_1}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (1-16)$$

由于全波桥式整流电容滤波电路 AC 输入电流 THD 通常不低于 120%，即使 $\cos\varphi_1 = 1$ （即 $\varphi_1 = 0$ ），根据式（1-16）计算， PF 不会超过 0.64。

三、关于功率因数的测试

对于线路电压和电流均为标准正弦波波形时，线路功率因数利用普通工频功率因数表来测量。而对于离线电子镇流器和开关电源前端采用桥式整流电容滤波电路的情况，由于输入电流波形出现严重失真，不可以使用功率因数表测量线路功率因数。

在线路输入电源电流波形失真情况下，功率因数应按公式 $PF = P/(UI)$ 进行测量。为得到准确的测试结果，不能使用普通工频电压表、电流表和功率表来分别测量电压、电流和功率。尤其是输入电流的测试，如果使用仅适用于正弦波测量的普通电流表，会产生非常大的测量误差。为此，必须使用专门的真均方根值数字化测试仪器仪表。对于谐波电流的测试，必须使用以计算机为基础的谐波分析系统。



第四节 输入电流谐波的危害及谐波电流限制标准

对于前端采用桥式整流和大容量电容滤波电路的离线式系统，AC 输入电流波形将发生严重畸变，不再为正弦波，而是呈高幅度的尖峰脉冲。这样的电流波形基波成分很低，而谐波含量却很高。

一、输入电流谐波的危害

AC 输入电流谐波被认为是一种“电力公害”，其危害主要表现在以下几个方面：

（1）对电网造成污染。在线路阻抗上产生的谐波压降会使电网电压波形发生失真，影响

电网质量。

(2) 引起故障, 损坏设备。例如谐波电流会使发电机、电动机、变压器和输电线路产生附加的损耗和过热, 使无功补偿电容器组发生 LC 谐振, 导致电力电容器因过电压或过负荷而损坏等。

(3) 谐波电流导致线路功率因数过低, 影响交流电源的利用率, 造成电能的浪费。

(4) 对系统本身和连接在同一电源系统的其他电子设备产生恶劣的影响, 如对继电器、自动控制装置、保护装置和电子计算机等产生误动作或干扰, 导致计量和检测仪器出现较大误差, 影响计量和检测精度, 对电话网产生噪声, 使照明电器发生故障等。

(5) 谐波电流会使三相四线制供电系统中线电流增加, 致使中线超负荷, 有可能引起火灾, 损坏电气设备, 造成重大经济损失。

无论是从保证电力系统的安全经济运行, 还是从保护用户设备和人身安全来看, 都必须限制谐波电流, 以避免或减小其造成的危害。

二、谐波电流限制标准

对于电流谐波的危害, 早在 20 世纪 80 年代初就引起业内人士的关注和重视。国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 于 1982 年制定的 IEC555-2, 是涉及谐波电流限制的第一个规范。该标准的颁布, 推动了 PFC 技术及其控制 IC 的迅速发展。

在 20 世纪 80 年代, 电子镇流器蓬勃发展, 于 80 年代末 90 年代初产生了 IEC 928、GB 115143《管形荧光灯用交流电子镇流器一般要求和性能要求》及 IEC 929 (1990)、GB/T 15144—1994《管形荧光灯用交流电子镇流器的性能要求》等国际和国家标准。在国家 (推荐性) 标准 GB/T 15144—1994 中, 对带 “L” 标志 (即低失真型) 电子镇流器的 AC 电源输入电流的谐波含量限制值, 都作出了明确规定, 如表 1-1 所示。

表 1-1 带 “L” 标志镇流器电源电流中谐波含量限值

谐波分量	最大值 (用镇流器基波电流的百分比表示) (%)	谐波分量	最大值 (用镇流器基波电流的百分比表示) (%)
2 次	5	7 次	4
3 次	$30\lambda^{\text{①}}$	9 次	3
5 次	7	11 次 $\leq n \leq 39$ 次	2

① λ 为线路功率因数。

表 1-2 中所列的为带 “H” 标志的电子镇流器 AC 电源电流中谐波含量限值。与表 1-1 相比较, 表 1-2 中所列的电流谐波分量限制值有所放宽。

表 1-2 带 “H” 标志镇流器电源电流中谐波含量限值

谐波分量	最大值 (用镇流器基波电流的百分比表示) (%)	谐波分量	最大值 (用镇流器基波电流的百分比表示) (%)
2 次	5	≥ 5 次	不作限制
3 次	37λ		

1992 年, IEC 对 IEC555-2 进行了修订。此时, 德国和欧盟等也推出了相应标准。这些标准对谐波电流限制要求见表 1-3。

表 1-3 IEC555-2（修订版本）等标准对电子镇流器和开关电源谐波电流限制要求

谐波次	电子镇流器容许谐波电流值（%）		开关电源最大容许谐波电流值（ $50W \leq P_i \leq 600W$ ）	
	VDEO 712-2	IEC 555-2（修订版本） EN 60555-2	相对值（mA/W） ^①	最大值（A）
2	5	2	—	—
3	$25 \times \frac{\lambda}{0.9}$	30λ	3.4	2.30
5	7	10	1.9	1.14
7	4	7	1.0	0.77
9	3	5	0.5	0.40
11	2	3	0.35	0.33
13	1	3	0.29	0.21
$15 \leq n \leq 39$	1	3	$3.85/n^2$	$0.15 \times 15/n^2$

① 作为输入功率的函数。
② n 为谐波次数。

IEC 于 1998 年在 IEC 555-2（修订版本）基础上，制定了 IEC 1000-3-2《家用电器及类似电气设备发出的谐波电流限制》标准和 IEC 1000-3-4、IEC 61000-3-2、IEC 61000-3-3 等标准。其中，IEC 1000-3-2 适用于额定输入电流小于或等于 $16A_{rms}$ 的单相或三相 220V/380V、230V/380V 和 240V/415V 供电线路，IEC 1000-3-4 则适用于额定输入电流大于 16A 的单相或三相供电电源线路。

在 IEC 1000-3-2 标准中，将电子设备和装置分成 A、B、C 和 D 四个类别，如图 1-5 所示。电子镇流器被列为 C 类（目前更新的标准规定输入功率下限为 26W），开关电源则属于 D 类（输入功率 $P_i = 75 \sim 600W$ ）。

不同类别的设备和装置，谐波电流限制标准并不相同。对 C 类照明装置（如电子镇流器）谐波电流的限制，要比 D 类设备（如开关电源）更加严格。表 1-4 所列为 IEC 61000-3-2 对 A 类设备电网谐波电流的规定限值。

表 1-4 IEC 61000-3-2 标准对 A 类设备谐波电流的限制要求

电流谐波次数 n	最大允许谐波电流值（A）
奇次	3 2.30
	5 1.14
	7 0.77
	9 0.40
	11 0.33
	13 0.21
	$15 \sim 39$ $0.15 \times 15/n$
偶次	2 1.08
	4 0.43
	6 0.30
	$8 \sim 40$ $0.23 \times 8/n$

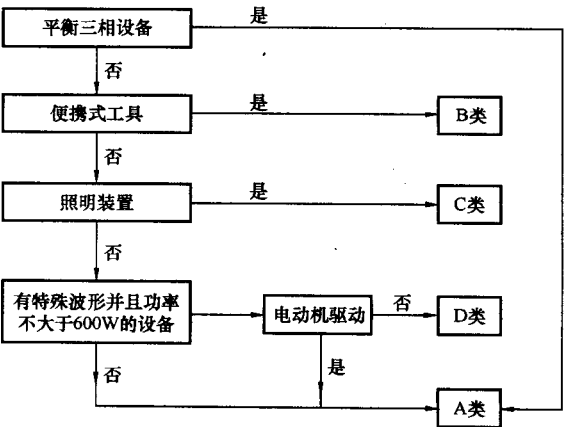


图 1-5 谐波限制标准设备分类流程图

限制谐波电流不仅引起国际上的重视,而且也引起了许多地区和国家的高度关注。根据 IEC 1000-3-2 和 IEC 61000-3-2 等标准,EN 61000-3-2 和 EN 61000-3-3 等相应标准相继颁布。我国早在 1993 年就颁布了国家标准 GB/T 14549—1993《电能质量公用电网谐波》,并且还实行了强制性认证(CCC)。美国环保署(EPA)的能源之星(Energy Star)计划及日本的 JIC-C-61000-3-2 标准等都表明,限制电流谐波含量已成为全球性的强制性规定。

在谐波限制标准中,像 EN 60555-2 和 EN 60555-3 在 1996 年就正式在本地设备中生效,CE 标志强制要求执行这些标准。从 2001 年 1 月开始,EN 61000-3-2 和 EN 61000-3-3 在所有设备中被正式实施。从相关标准执行情况看,欧盟走在了世界的前列。

实施谐波限制标准,减少电力公害,是实现电子产品“绿色化”的重大技术举措。所谓“绿色照明”和“绿色电源”,其核心就是“高效、节能、洁净无污染”。为满足 IEC 1000-3-2 等标准要求,就必须在电子设备和装置中,采用谐波滤波和功率因数校正技术。

第五节 功率因数校正(PFC)

能源短缺和电力供应紧张是目前很多国家面临的问题。解决电力不足的问题单靠大量兴建电厂并不是唯一途径,而提高电气设备的功率因数即提高有效利用功率的百分比,也是非常重要的环节。

一、提高线路功率因数的意义

提高离线系统的线路功率因数具有重要意义,具体表现在以下几个方面:

(1) 可以增加发电设备和变电设备发送的有功功率,减少无功功率,使电力供电设备得到充分利用。

(2) 能减小电力输送线上的电流,节约铜材或铝材,降低输送线路上的电压降落和功率损耗,节约电能。

(3) 在一定的供电线路导线线径和变压器容量下,可以增加用电设备的负载。例如,一个 115V 的墙上 AC 电源插座,可以提供 15A 的输出电流。在线路功率因数为 0.6 时,仅可以为 2 台计算机供电(每台计算机功率为 70W)。若功率因数达到 0.99,则可以为 4 台计算机供电,负载功率增加到 280W。

(4) 提高功率因数可相应减小线路电流波形的畸变,抑制谐波电流对电网造成的污染。

因此,提高用电设备和家用电器的功率因数,可以缓解电力紧张的矛盾,减少兴建电厂的数量,减小对电网和环境的污染,保证电力系统和用电设备的安全经济运行,具有比较显著的经济效益和社会效益,符合建立节约型社会和落实科学发展观的总体要求。

二、功率因数校正技术及其发展

为提高电子镇流器和办公自动化设备、计算机和家用电器中离线开关电源的功率因数,必须实施功率因数校正(Power Factor Correction, PFC)。采用 PFC 技术的目的不只是为了提高功率因数,更重要的是为了校正或补偿发生畸变的输入电流波形,在系统的输入端产生正弦波波形的电流,而且与 AC 输入电压尽可能保持同相位,使系统呈现为纯电阻性负载。

传统的功率因数概念是基于线性负载条件的,它要求交流设备中的电压与电流为相同频率的正弦波。对于负载呈电感性的大多数电气设备,功率因数都比较低。为提高负载的功率因数,通常可以在负载两端并联移相电容,这种方法被称作功率因数并联补偿。对于电流波

形发生严重失真的情况,传统的 PFC 方法不再适用和有效,迫使人们探求新的解决方案。

新式 PFC 技术始于 20 世纪 80 年代初。荧光灯电子镇流器的问世和开关型电源的发展,为 PFC 技术的发展提供了机遇。

在早期的开关电源中,人们在桥式整流器输入端设置“L”型 LC 网络,利用“电感上的电流不能突变”的特性,来增加整流二极管的导通角,使输入电流波形畸变得得到一定程度的控制,这种方法被称为无源功率因数校正 (PPFC)。该方法的缺点是 PFC 效果不是很明显,而且体积庞大、笨重,成本较高,在尺寸有限的电子镇流器中难以被采用。这种 PPFC 电路后来被由二极管、电容和小电感等无源元件组成的 PPFC 电路拓扑所取代。

为提高 PFC 效果,使谐波电流含量达到低失真要求,基于晶体管等有源元件的有源功率因数校正 (APFC) 技术迅速发展起来。在 20 世纪 80 年代初期,飞利浦公司开发的 BHF132-12 和 BHF232-12 型 32W 单灯管和 32W 双灯管电子镇流器,就采用了由分立元器件组成的 APFC 电路,线路功率因数达到 0.96 以上,电流谐波含量达到 L 级低失真要求。这种电子镇流器使用了 110 多个元器件,尺寸为 428mm×40mm×32mm。由分立元器件组成的 APPF 电路过于复杂,导致成本增加,同时也增加了产品的体积和质量,使其应用受到了限制。

微电子技术日新月异的飞速发展,使基于专用集成电路 (ASIC) 的 APFC 技术于 20 世纪 80 年代中期应运而生。西门子等公司生产的 TDA4812、TDA4813、TDA4814、TDA4815、TDA4816、TDA4817、TDA4818 和 TDA4819 等 PFC 控制器 IC,陆续投放市场。进入 20 世纪 90 年代之后,世界所有半导体巨商,都瞄准了 APFC 技术的巨大商机,争先恐后地研发和生产 APFC 控制芯片,使其系列化。APFC 控制 IC 的批量化生产,使其价格逐年降低,有些 IC 目前的单价已不足 0.5 美元,从而为 APFC 技术的广泛应用创造了条件。

为大力推进 APFC 技术在我国境内的广泛应用,在后面的章节中将对 PFC 控制器代表性产品逐一进行介绍,对每一种 IC 介绍的内容包括基本结构、性能与特点及工作原理和应用设计等。