

● 功率因数 ●

校正技术与应用

■ 路秋生 编著

功率因数校正技术与应用

路秋生 编著



机械工业出版社

全书共分7章,主要包括功率因数的定义、改善电路功率因数的常用方法、电磁兼容、常用有源功率因数校正电路的工作原理与电路实现和常用有源功率因数校正电路的典型应用电路与制作等内容。

书中着重介绍了常用有源功率因数校正(APFC)电路的工作原理、电路分类和各种有关电路的特点与实现等有关内容,对一些较新的有源功率因数校正电路的计算机辅助设计技术和具体使用也做了较详细的介绍。本书具有理论联系实际、内容新颖、资料详实和实用的特点。

本书的读者对象为有关从事电力电子技术设计和生产的工程技术人员及有关电子技术的爱好者,也可以作为大专院校相关专业学生学习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

功率因数校正技术与应用/路秋生编著. —北京:机械工业出版社,
2006.2

ISBN 7-111-18381-9

I. 功... II. 路... III. 功率测量 IV. TM933.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第009800号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王 玫 责任编辑:王 玫 版式设计:冉晓华

责任校对:申春香 封面设计:马精明 责任印制:李 妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2006年3月第1版第1次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·21.5印张·530千字

0 001—4 000册

定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着社会经济的不断发展及人们生活水平的不断提高,各种电器和电气设备在人们的生活、工作中得到了越来越广泛的应用。由于开关电源具有体积小、功率密度大和工作效率高的一系列优点,因此得到了广泛的应用。但是作为 AC/DC 变换的高频开关电源或一些交流市电的非线性负载,由于会使交流输入市电的正弦输入电流波形发生畸变,产生大量的谐波电流成分,而交流输入市电电流中能做功的只是其中的基波电流成分,大量的谐波电流成分不但不做功,而且会对电网和其它相邻用电设备产生大量的谐波干扰,恶化电网的功率因数,对周围环境造成电磁污染,降低电网的供电效率。

节能和环境保护是 21 世纪科技发展的主题之一,针对电磁污染对人们生活环境和供电质量的影响,许多国家和相关国际组织制定了许多相关标准和颁布了许多相关法令,以限制电子设备的谐波污染和提高用电设备的功率因数。

随着开关电源类电子产品的应用普及,为了改善供电线路的供电质量、提高供电线路的功率因数、保护用电设备,世界上许多国家制定出了相应的技术标准,用以限制谐波电流的含量。例如 IEC 555-2、IEC 61000-3-2、EN 60555-2 等标准,它们规定了允许用电电器产生的最大谐波电流。我国于 1994 年颁布了 GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》标准,也对用电电器允许产生的最大谐波电流作出了规定。

欧共体的 89/336/EEC 指令规定从 1996 年 1 月 1 日起,所有进入欧共体市场的电器、电子产品均需符合 EEC 指令的要求,否则不允许进入欧共体市场。美国联邦通信委员会(FCC)颁布了有关 EMC 的法规,并进行这方面的管理。对任何要出口到美国的通信设备、音视频设备、计算机、医疗设备等必须取得美国联邦通信委员会(FCC)的认可,否则就被视为非法,在日本也有类似的规定。

目前,越来越多的国家已把电磁兼容(EMC)标准作为电子产品中必备的或产品性能的评价依据。随着电子电器设备的高速化、数字化,特别是欧共体根据 89/336/EEC 指令从 1996 年 1 月开始要强制执行 EMC 标准,在世界范围内掀起了对电子电器产品 EMC 的研究、学习热潮。

为了适应我国加入 WTO 后与世界接轨的需要,2002 年我国出台了 CCC 强制性认证制度,把电磁兼容性能作为衡量电子产品安全的重要技术指标之一,从此电子产品的电磁兼容设计问题成为了中国电子工程技术人员所关注的焦点。

目前世界各国对环境保护都非常重视,世界各国都对大气污染、水土流失和人眼看不见的电磁污染投入了极大的关注,并称它们为当今人类社会的三大污染源。电磁污染已成为威胁电子电器设备正常、安全和经济运行,威胁人类健康和社会生活的一个重要污染源。国际社会陆续制定了一些相关标准,并采取了一些相应的措施。国家质量技术监督局也制定了相应的标准,国家环保局制定了《电磁辐射环境保护管理办法》,该办法于 1997 年 3 月 25 日开始执行,其目的就是要为人们提供一个健康、安全和干净的生活和工作环境。

功率因数校正(PFC)技术是提高电子产品的功率因数、降低谐波干扰的有效方法之

一。功率因数校正按实现方法可以分为有源功率因数校正 (APFC) 和无源功率因数校正 (PPFC) 两大类, 为了便于读者区分这两种功率因数校正方法, 本书对有源功率因数校正统一采用 APFC 表示。由于有源功率因数校正技术在电路工作特性和电路工作稳定性等方面都较无源功率因数校正技术的相关技术指标要好, 得到了广泛的应用, 所以本书主要介绍有源功率因数校正技术的工作原理和应用。

目前世界上许多大的集成电路制造公司纷纷推出了用于有源功率因数校正用集成电路控制芯片。例如美国的德州仪器 (TI) 公司、安美森 (Onsemi) 公司、Fairchild 公司、凌特 (Linear) 公司、国际整流器 (IR) 公司、意法 SGS-THOMSON (ST) 半导体公司和德国的英飞 (Infineon) 公司等纷纷推出了许多有源功率因数校正用控制集成电路。它们具有控制特性优良、使用方便的优点。同时有的公司, 如 Onsemi 公司、ST 公司和 Infineon 公司等为了方便用户使用它们所推出的有源功率因数校正用集成电路, 还推出了有关的计算机辅助设计软件, 这些计算机辅助设计软件有的是基于 Windows 的图形化操作界面 (如 ST 公司推出的有源功率因数校正电路的计算机辅助设计工具), 有的是基于 Microsoft 的 Excell 设计表格 (如 Onsemi 和 Infineon 公司推出的有源功率因数校正电路设计用计算机辅助设计工具), 它们的共同特点是使用方便和直观, 极大地方便了用户的有源功率因数校正电路的设计。

为了方便读者进行有关功率因数校正电路的设计制作, 尽量反映国内外有关有源功率因数校正的新技术, 本书分别对美国德州仪器 (TI) 公司、安美森 (Onsemi) 公司、Fairchild 公司、凌特 (Linear) 公司、德国英飞 (Infineon) 公司和意法 (ST) 半导体公司等的相关有源功率因数校正用控制集成电路的特点、工作原理和使用分别作了介绍和分析, 并对有关计算机辅助设计软件的特点和使用做了介绍和分析。

作者希望通过本书能对读者起到一个抛砖引玉的作用, 使读者能对有关功率因数校正的意义、工作原理和应用有所了解和帮助。但是由于作者水平有限, 书中难免存在各种各样的问题和不足之处, 敬请广大读者批评指正。同时由于本书篇幅的限制, 也不可能介绍得面面俱到, 敬请读者谅解。

在本书的编写过程中, 参考了美国德州仪器 (TI) 公司、安美森 (Onsemi) 公司、凌特 (Linear) 公司、Fairchild 公司、意法半导体 (ST) 公司和德国英飞 (Infineon) 等公司的有关技术资料和其它相关技术资料, 在此表示衷心的感谢。

为了方便读者在阅读完本书后能进一步进行相关的技术开发工作, 在书的附录中给出了世界上主要有源功率因数校正控制集成电路生产厂商的网址、有关英文术语与解释、IEC 的 No.77 技术委员会有关 EMC 的出版物和常用有源功率因数校正用控制集成电路与特点等有关信息。同时为了便于读者阅读相关英文技术资料 and 了解有关参考资料的来源, 在本书的参考文献中给出了有关参考资料的来源, 供读者参考。期望本书能对读者有所帮助。

在本书的编写过程中得到机械工业出版社电工电子分社有关人员的大力支持和帮助, 正是由于他们的大力支持和帮助, 才使本书得到顺利出版, 在此表示感谢。

作 者
2005 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 功率因数校正的工作原理	1
1.1 不良功率因数的来源与功率因数的改善	1
1.1.1 一般整流滤波电路存在的问题与谐波电流的主要来源	1
1.1.2 功率因数的定义与谐波电流对电网的危害	3
1.1.3 IEC 61000-3-2 关于电气设备的分类	6
1.2 功率因数校正实现方法	11
1.2.1 无源功率因数校正	11
1.2.2 有源功率因数校正	17
1.2.3 有源功率因数校正的实现	19
1.2.4 各种有源功率因数校正技术的比较	28
1.3 射频干扰(RFI)与电磁辐射干扰(EMI)的抑制	30
1.3.1 射频干扰(RFI)的抑制	30
1.3.2 电磁辐射干扰(EMI)的抑制	31
1.4 常用的几种 PWM 控制电路拓扑与特点	35
1.4.1 脉冲占空比 D 的定义	35
1.4.2 常用变换器电路与特点	36
第 2 章 Onsemi 公司常用有源功率因数校正应用电路	44
2.1 采用 MC33260 的有源功率因数校正电路	44
2.2 采用 NCP1650 的 150W 有源功率因数校正电路设计	54
2.2.1 NCP1650 的工作原理分析	54
2.2.2 采用 NCP1650 的 150W 有源功率因数校正电路设计举例	63
2.2.3 采用 NCP1650 的有源功率因数校正电路制作	68
2.3 采用 NCP1651 的 120W 单级反激变换有源功率因数校正电路	70
2.3.1 NCP1651 的主要技术特点、引脚功能和电性能参数	70
2.3.2 采用 NCP1651 的有源功率因数校正电路设计	73
2.4 采用 NCP1603 的有源功率因数校正电路制作	80
2.5 APFC 电路的计算机辅助设计	82
2.5.1 工作于临界导通工作模式 APFC 电路的工作频率特性分析	82
2.5.2 采用 NCP1650 的 APFC 电路计算机辅助设计	85
2.6 Onsemi 公司常用 APFC 控制集成电路的特点	103
2.6.1 Onsemi 公司常用 APFC/PWM 混合控制集成电路	103
2.6.2 Onsemi 公司常用 APFC 控制集成电路	103
第 3 章 ST 常用有源功率因数校正控制集成电路的工作原理与应用	106
3.1 ST 的 L6561/L6561D 型 APFC 用集成电路	106

3.1.1 L6561/L6561D 集成电路的特点和工作框图	106
3.1.2 L6561/L6561D 的电性能参数	107
3.1.3 L6561/L6561D 的控制功能	111
3.2 采用 L6561 的单级反激变换 APFC 电路	115
3.2.1 L6561 的特点	115
3.2.2 采用 L5991A 和 L6561 构成的 80W 开关电源	124
3.3 L4981A/B 功率因数校正控制集成电路与应用	133
3.3.1 L4981A/B 的特点、控制功能和电性能参数	133
3.3.2 由 L4981A/B 组成的有源功率因数校正电路	141
第 4 章 ST 有源功率因数校正电路的计算机辅助设计	145
4.1 关于(ST)APFC 的计算机辅助设计软件简介	145
4.2 关于(ST)APFC 计算机辅助设计软件的使用	146
第 5 章 英飞(Infinion)公司常用有源功率因数校正控制集成电路的工作原理与应用	173
5.1 TDA4817 高功率因数控制集成电路与应用	173
5.1.1 TDA4817 的特点	173
5.1.2 TDA4817 的用途	173
5.1.3 TDA4817 的控制功能简介	174
5.2 TDA4863 的特点、用途和控制功能简介	175
5.2.1 TDA4863 的特点	175
5.2.2 TDA4863 的工作原理	175
5.2.3 TDA4863 的主要单元电路工作原理分析	178
5.2.4 TDA4863 的典型应用电路与测试结果	180
5.3 TDA4862/ TDA 4862G 功率因数校正集成电路与应用	182
5.3.1 TDA4862/ TDA 4862G 的特点	182
5.3.2 TDA4862/ TDA 4862G 的引脚功能	182
5.3.3 TDA4862/ TDA 4862G 的控制单元电路	183
5.3.4 TDA4862/ TDA 4862G 的典型应用电路	185
5.3.5 TDA4862/ TDA 4862G 的电性能参数	186
5.4 TDA4863-2/ TDA 4863-2G 功率因数校正集成电路与应用	189
5.4.1 TDA4863-2/ TDA 4863-2G 的特点、引脚功能和工作原理	189
5.4.2 TDA4863-2 的典型应用电路	197
5.4.3 有关 THD 测试结果	198
5.5 采用 TDA4863-2 的 160W/ APFC 评估电路板	199
5.5.1 评估电路板的结构、技术指标与控制功能	200
5.5.2 电路工作原理	202
5.5.3 评估电路印制电路板	202
5.5.4 有关电感元件的绕制	206
第 6 章 凌特(Linear)公司常用 APFC 集成电路的工作原理与应用	208
6.1 由 LT1509 组成的 APFC 电路与应用	208

6.1.1	LT1509 的电路特点与应用	208
6.1.2	LT1509 的控制功能、电性能指标与应用	212
6.2	LT1508 功率因数校正电路的典型应用电路	222
6.2.1	LT1508 的特点	222
6.2.2	LT1508 的典型应用电路	222
6.3	LT1249 APFC 控制集成电路的工作原理与应用	224
6.3.1	LT1249 的特点、主要应用场合和功能简介	224
6.3.2	LT1249 的最大额定值和有关电性能指标	225
6.3.3	LT1249 的引脚功能	227
6.3.4	LT1249 的有关内部电路和典型应用电路	229
6.4	LT1248 有源功率因数校正应用电路	234
6.4.1	LT1248 的特点和控制功能	234
6.4.2	LT1248 的有关工作特性和典型应用电路	239
第 7 章	TI 公司常用有源功率因数校正控制集成电路的工作原理与应用	243
7.1	UC3854 高功率因数控制集成电路与应用	243
7.1.1	UC3854 的特点和最大工作额定值参数	243
7.1.2	UC3854 的电性能技术指标	245
7.1.3	UC3854 的引脚功能	247
7.1.4	UC3854 的有关功能电路	249
7.1.5	UC3854 的典型应用电路原理	252
7.2	采用 UCC28050 的 100W APFC 应用电路	253
7.2.1	UCC28050 的电路技术指标与特点	253
7.2.2	由 UCC28050 组成的 APFC 电路的启动特性	256
7.3	UCC3817A 功率因数校正控制集成电路与应用	259
7.3.1	UCC3817A/UCC3818A 的特点与功能简介	259
7.3.2	UCC3817A/UCC3818A 的引脚功能	264
7.3.3	UCC3817A/UCC3818A 的应用电路	266
7.4	UCC2851X 高级 APFC/PWM 控制集成电路	272
7.4.1	UCC2851X 的技术特点与控制电路部分工作特性	272
7.4.2	UCC2851X 系列集成电路的电性能指标	279
7.4.3	UCC2851X 系列集成电路的有关应用	283
7.5	TI 的 APFC 集成电路特点与应用范围	292
附录		294
附录 A	常用英文术语中文解释	294
附录 B	电源有关术语与解释	316
附录 C	IEC 的 No. 77 技术委员会的有关 EMC 出版物	323
附录 D	常用 APFC 控制集成电路与特点	328
附录 E	分贝的代号及其含义	331
附录 F	世界上主要 APFC 集成电路生产厂商网址	332
参考文献		333

第 1 章 功率因数校正的工作原理

1.1 不良功率因数的来源与功率因数的改善

1.1.1 一般整流滤波电路存在的问题与谐波电流的主要来源

1.1.1.1 一般整流滤波电路存在的问题

由整流二极管和滤波电容组成的整流滤波电路应用十分普遍，价格低廉、可靠性高是它的突出优点，但是它对电网的谐波电流污染却十分严重，由整流二极管和滤波电容组成的整流滤波电路主要存在如下的问题。

(1) 启动时产生很大的冲击电流，约为正常工作电流的十几倍至数十倍。

(2) 正常工作时，由于整流二极管的导通角很小，形成一个幅度很高的窄脉冲，电流波峰因数 (CF) 高、电流总谐波畸变率 (THD) 通常超过 100%，同时引起电网电压波形的畸变。

(3) 功率因数 (PF) 低，一般约为 0.5~0.6。

开关电源的输入端通常采用如图 1-1a 所示的由整流二极管和滤波电容组成的整流滤波电路，输入 220V 交流市电整流后直接接滤波电容，以得到波形较为平滑的直流电压。但是由整流二极管和滤波电容组成的整流滤波电路是一种非线性元件和储能元件的组合，虽然交流输入市电电压 V_i 的波形是正弦的，但是整流器件的导通角不足 180° ，只有很小的导通角，导致输入交流电流波形严重畸变，输入交流电流波形呈图 1-1b 所示的脉冲状。

脉冲状的输入电流含有大量的谐波成分，但是交流输入电流中只有基波电流才做功，其余各次谐波成分不做功，即各次谐波成分的平均功率为零（这点可由数学推导和作图证明），但是大量的谐波电流成分会使电路的谐波噪声增加，需在整流电路的输入端增加滤波器，既贵，体积和重量又大。同时大量谐波电流成分倒流入电网，会造成电网的谐波“污染”。一则产生“二次效应”，即谐波电流流过线路阻抗造成谐波电压降，谐波电压降反过来又会使电网电压波形（原来是正弦波）发生畸变，二则会造成输入电流有效值加大，使线路和

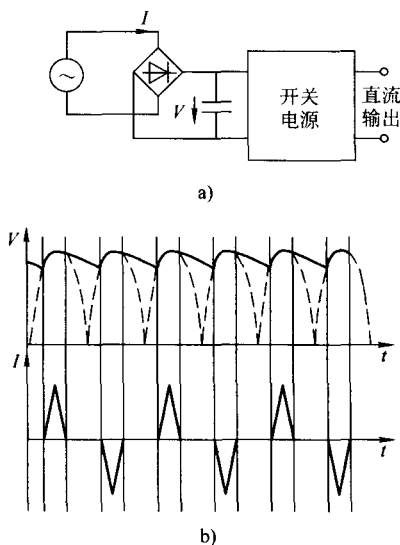


图 1-1 桥式整流电容滤波电路及输入整流电压与通过整流二极管的电流波形
a) 电路 b) 波形

变压器过热，同时谐波电流还会引起电网 LC 谐振，或高次谐波电流流过电网的高压电容，使之过电流而发生爆炸。对三相交流供电，由于大量的谐波电流成分还会使中线电位偏移，中线电流因过电流而发生故障等。

在由整流二极管和滤波电容组成的整流滤波电路中，只有当线路输入峰值电压超过滤波电容器两端上的电压时，整流二极管中才会有电流通过（见图 1-2）。

由于大容量电解电容的存在，二极管的导通角 φ 很小，一般只有 60° 左右，因而导致交流输入电流 I_{AC} 的波形出现严重畸变，不再是正弦波，而是一串窄脉冲串，不仅使输入交流电压、电流产生附加相移 φ ，产生大量高次谐波（见图 1-3），而且会致使供电线路功率因数 (PF) 严重降低。

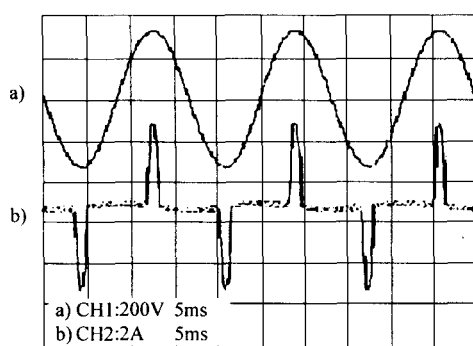


图 1-2 二极管整流和电容滤波电路的典型电压、电流波形
a) 电压波形 b) 电流波形

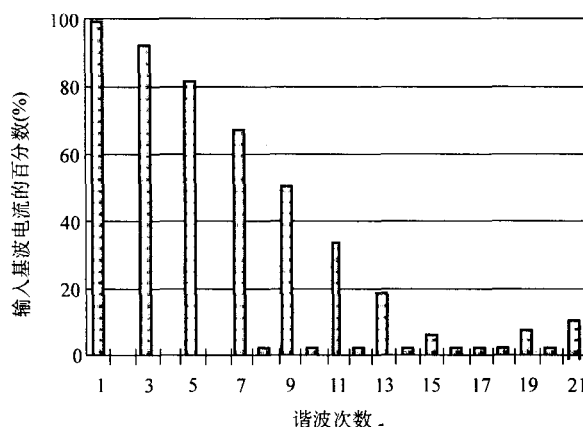


图 1-3 采用傅里叶级数分析得到的图 1-2 所示输入电流波形的谐波成分

感性负载或容性负载都会使交流输入电压、电流产生附加相移，使线路功率因数和电能利用率降低；非电阻性负载还会产生严重的谐波畸变，对电网造成干扰。

由于在由整流二极管和滤波电容组成的整流滤波电路中电流的升降速度比输入电压的升降速度快和输入电流的不连续性，所以产生了一系列如图 1-3 所示的奇次谐波，导致供电线路功率因数降低至 $0.6 \sim 0.7$ ，线路不良功率因数主要来源于输入电流波形的畸变。

开关电源对交流输入供电电源呈现为非线性负载，从图 1-2 可以看出，虽然输入的电压波形为正弦波，但是输入的电流波形为非正弦波，呈现脉冲状，其电流脉冲的持续时间只有交流输入电流周期的 $10\% \sim 20\%$ 。从图 1-3 表示的采用傅里叶级数分析得到的谐波电流成分可以看出，偶次谐波电流成分的幅度很小，这是由于正弦波的正负半波对称，偶次谐波电流成分几乎被抵消了，只剩下了奇次谐波电流成分的原因。在图 1-3 中，假定基波电流成分的幅度为 100% ，其它谐波电流成分的幅度被表示成了它占基波电流成分的百分比数。实际上，图 1-2 所示电压、电流波形如果考虑了谐波电流成分后，电路的功率因数只有 0.6 左右。

1.1.1.2 谐波电流的主要来源

通过分析发现产生谐波电流的主要来源有以下几种：

- (1) 开关电源;
- (2) 调光装置;
- (3) 电流调节装置;
- (4) 频率变换器;
- (5) 脉冲宽度调制的电源变换器;
- (6) 低功率灯;
- (7) 电弧炉;
- (8) 电焊机;
- (9) 由于磁心饱和而导致不规则磁化电流的异步电动机;
- (10) 由于开关装置与/或具有非线性 V/I 特性的负载。

目前在欧盟和美国已对电气设备的功率因数这个技术指标提出了严格要求, 规定在欧盟销售的功率大于 75W 的电气设备, 要求它们的功率因数技术指标应满足欧洲技术标准 EN61000-3-2 (IEC61000-3-2) 的要求, 否则不能进入欧洲市场, 同样在美国也做出了类似的技术要求。在 EN61000-3-2 (IEC61000-3-2) 中, 对用电设备的供电输入高至 39 次的谐波电流幅度做出了限制要求, 所以今后的电气产品如不能满足有关的功率因数技术指标要求, 则不能进入国际市场。

1.1.2 功率因数的定义与谐波电流对电网的危害

1.1.2.1 功率因数的定义

功率因数 (PF) 是指交流输入有功功率 (P) 与输入视在功率 (S) 的比值, 即功率因数

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_1 I_1 \cos \varphi}{V_1 I_{\text{rms}}} = \frac{I_1}{I_{\text{rms}}} \cos \varphi = \gamma \cos \varphi \quad (1-1)$$

式中, I_1 表示交流输入市电的基波电流有效值; I_{rms} 表示交流输入市电电流的有效值; $\gamma = I_1 / I_{\text{rms}}$ 表示交流输入市电电流的波形畸变因数; $\cos \varphi$ 表示交流输入市电的基波电压和基波电流的相位移因数。

所以功率因数 (PF) 可以定义为交流输入市电电流的波形畸变因数 γ 与相位移因数 $\cos \varphi$ 的乘积。即功率因数 PF 主要由两个因素决定; 一是交流输入市电的基波电流与基波电压的相位差 φ ; 另一个是交流输入市电电流的波形畸变因数 γ 。而传统的功率因数概念是在电阻性线性负载、并假定输入电流无谐波电流 (即 $I_1 = I_{\text{rms}}$ 或交流输入市电电流的波形畸变因数 ($\gamma = 1$) 的条件下得到的, 这样功率因数 (PF) 的定义就变成了 $PF = \cos \varphi$, 当交流输入市电电流的波形畸变因数 γ 为 1 时, 交流输入市电电流和电压之间的相位移为 φ 时的电流、电压波形如图 1-4 所示。

交流输入市电的 $\cos \varphi$ 低, 则表示用电电气设备的无功功率大, 供电设备的利用率低, 供电设备的导线、变压器绕组损耗大。电流波形畸变

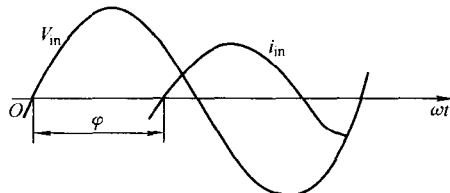


图 1-4 交流输入市电电流和电压之间的相位移为 φ 时的波形

因数 γ 值低,则表示输入电流的谐波分量大而基波电流的幅度小,将造成输入电流的波形畸变,对电网造成污染,严重时还会造成用电电气设备的损坏。

相位移因数 $\cos\varphi$ 减少了供电线路的有效能量传送,致使无功功率在供电线路上传送,降低了供电线路的使用效率。由于常规整流装置使用非线性器件(例如整流二极管或晶闸管),整流器件的导通角小于 180° ,从而产生大量的谐波电流成分,而谐波电流成分不做功,只有基波电流成分做功。所以相位移因数 $\cos\varphi$ 和电流波形畸变因数 γ 相比,输入电流波形畸变因数 γ 对供电线路的功率因数(PF)影响更大。

随着开关电源类电子产品的应用普及,为了改善供电线路的供电质量、提高供电线路的功率因数、保护用电设备,世界上许多国家制定出了相应的技术标准,用以限制谐波电流的含量。例如 IEC 555-2、IEC 61000-3-2、EN 60555-2 等标准,它们规定了允许用电电气设备产生的最大谐波电流。我国于 1994 年颁布了 GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》标准,也对用电电器允许产生的最大谐波电流作出了规定。

1.1.2.2 谐波电流对电网的危害

脉冲状的交流输入电流波形中含有大量的谐波电流成分,大量的谐波电流倒流入电网(称为谐波辐射: Harmonic Emission)会对电网造成“污染”,供电电网中的谐波电流会对电网产生以下不利影响。

(1) 谐波电流的“二次效应”,即谐波电流流过线路阻抗而造成的谐波电压降反过来会使电网电压波形(原来是正弦波)发生畸变。

(2) 过大的谐波电流会引起供电线路故障,从而损坏用电设备。例如过大的谐波电流会使线路和配电设备过热,谐波电流还会引起电网 LC 谐振,或高次谐波电流流过电网的高压电容,使之过电流、过热而导致电容器损坏。

(3) 在三相四线制电路中,3 次谐波在中线中的电流同相位,导致合成中线电流很大,有可能超过相线电流,中线又无保护装置,使中线因过电流而导致中线过热而引起火灾,并损坏电气设备。

(4) 谐波电流对自身及同一系统中的其它电子设备会产生恶劣的影响,例如会引起电子设备的误动作和电子设备的故障等。

由于目前许多家用电器,如彩色电视机、录像机、微型计算机、VCD 机、DVD 等都普遍采用开关电源,由此而产生的输入电流高次谐波成分的问题不容忽视,因此功率因数校正技术的应用也显得十分迫切。

1.1.2.3 功率因数(PF)与总谐波畸变因数(THD)的关系

1. 总谐波畸变因数(THD) 电路总谐波畸变因数(THD)可以利用式(1-2)来计算。

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \cdots I_n^2}{I_1^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (1-2)$$

方波电压的各次谐波电压的叠加分解图(高至 9 次谐波)如图 1-5 所示。

方波电压可以用函数表达式(1-3)来表示。

$$f(t) = \frac{4U}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \cdots \right) \quad (1-3)$$

图 1-6 给出了周期为 T 、宽度为 τ 、幅度为 A 的脉冲信号和它在频域的傅里叶展开图。由图 1-6 可见：周期脉冲信号的频谱为间断的、频带为无限宽，随着谐波次数的增加，它的幅度下降。脉冲宽度越小，则谐波幅度越大。图 1-7 为冲激函数 $\delta(t)$ 的傅里叶展开图，由图 1-7 可以看出，脉冲宽度越小，则相应各次谐波的幅度也加大，以致在冲激函数 $\delta(t)$ 中的各次谐波的幅度一样大了。

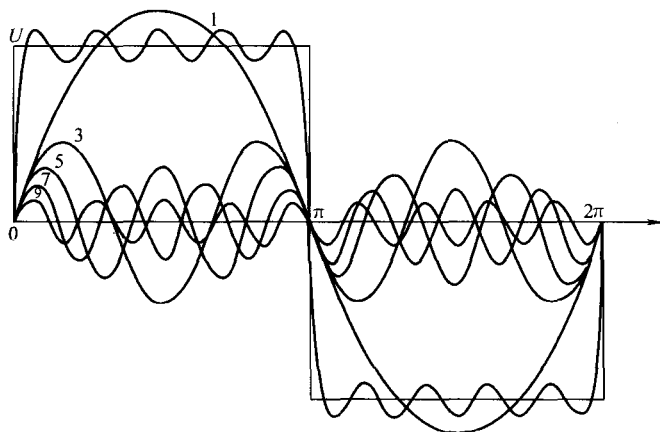


图 1-5 方波电压的各次谐波电压的叠加分解图（高至 9 次谐波）

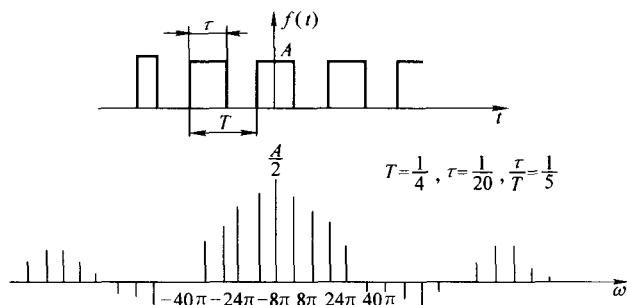


图 1-6 脉冲波与它的频谱

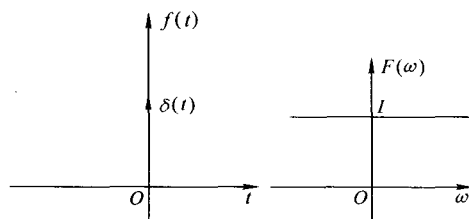


图 1-7 冲激函数 $\delta(t)$ 与它的频谱

2. 功率因数 (PF) 的表达式 由功率因数 (PF) 的定义：

$$\text{PF} = \frac{V_1 I_1}{V_1 I_{\text{rms}}} \cos \varphi = \frac{I_1}{I_{\text{rms}}} \cos \varphi = \frac{I_1 \cos \varphi}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}$$

及式 (1-2) $\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 / I_1}$ ，有式 (1-4) 成立。

$$\frac{I_1}{I_{\text{rms}}} = \gamma = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{THD})^2}} \quad (1-4)$$

即

$$\text{PF} = \frac{I_1}{I_{\text{rms}}} \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{THD})^2}} \cos \varphi = \gamma \cos \varphi \quad (1-5)$$

从上面的讨论可以看出，功率因数是和交流输入市电电流的谐波成分有关的，利用总谐波畸变率 (THD) 和电流波形畸变因数 γ 之间的关系式 (1-4) 可以得到式 (1-6)。

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} - 1} \times 100\% \tag{1-6}$$

当交流输入市电的电压、电流同频和同相位时，有 $\cos\varphi=1$ ，相应式 (1-7) 成立。

$$\text{PF} = \gamma\cos\varphi = \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 + (\text{THD})^2}} \tag{1-7}$$

对纯正弦波电压、电流而言，由于它的总谐波成分为零，所以波形畸变因数 γ 为 1，并且正弦波电压和电流之间相位差 φ 为零，从而电源输入侧的功率因数就为 1，如果正弦波电压和电流之间的相位差 φ 不为零，则电路的功率因数是它们相位差 φ 的 $\cos\varphi$ 。

当 $\varphi=0$ 和当 $\text{THD}=10\%$ 时，利用式 (1-7) 可以计算出对应的 PF 值为 0.995。所以控制交流市电输入电流的谐波电流有助于改善电路的功率因数和减小对电网的谐波污染。

目前，通常采用有源功率因数校正 (APFC) 技术来改善开关整流电路的功率因数，经过有源功率因数校正 (APFC) 后，整流滤波电路的功率因数 (PF) 值可接近 1 (大于 0.99)，波形畸变因数 γ 小于 3%， $\text{THD}<10\%$ 。

当 $\varphi=0$ 时 (为计算方便)，功率因数 (PF) 与 THD 间存在表 1-1 所示的关系。

表 1-1 $\varphi=0$ 时，已知 PF 值计算 THD 的结果

PF 值	0.5812	0.9903	0.995	0.99875	0.99955
THD (计算值)(%)	140	14	10	5	3

可见，当 $\text{THD}\leq 5\%$ 时，功率因数 (PF) 可控制在 0.999 左右。

1.1.3 IEC 61000-3-2 关于电气设备的分类

1.1.3.1 电气设备的分类

IEC 61000-3-2/2000 (A14) 关于电气设备作了如下的分类。

1. A 类 指除 B 类、C 类和 D 类以外的设备。

- (1) 平衡三相负载设备；
- (2) 除 D 类所定义的设备外的家电电器；
- (3) 除台式电动工具以外的电动工具；
- (4) 白炽灯的调光装置；
- (5) 音频设备。

2. B 类 台式工具。

3. C 类 含调光装置的照明装置。

4. D 类：输入电流波形为“特殊波形”并且有功功率为 (50) 75~600W 的设备。

D 类设备的输入电流波形包络定义如图 1-8 所示。

注：如果设备输入电流波形在半周期内 95% 以上都包含在如图 1-8 所示的电流波形内，则设备被定义为 D 类设备。

设备类别的判定流程如图 1-9 所示。

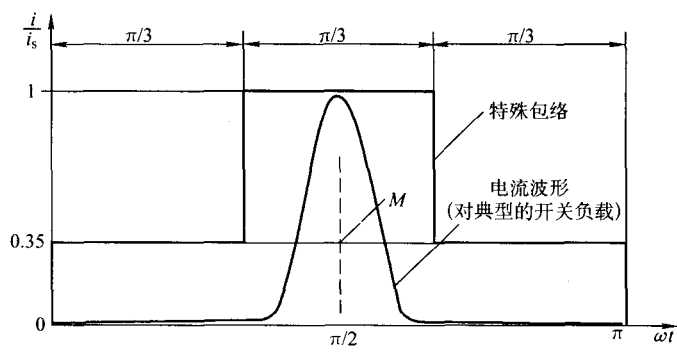


图 1-8 D类设备的输入电流波形包络定义

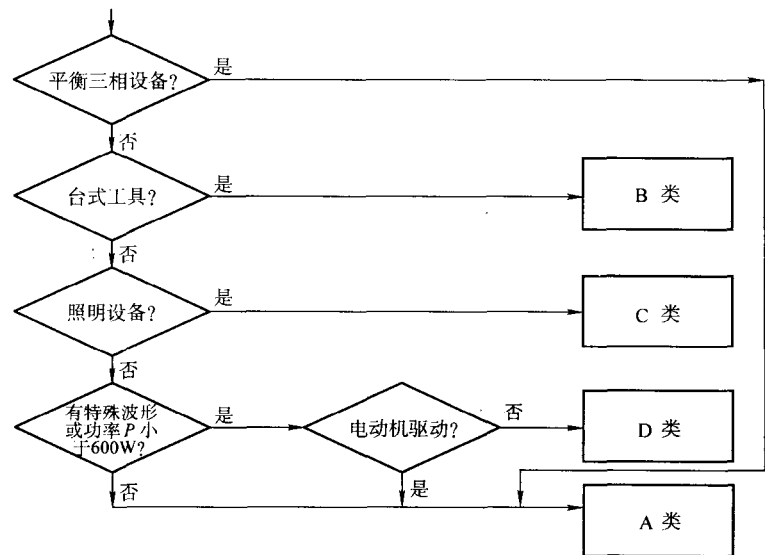


图 1-9 设备类别的判定流程

1.1.3.2 IEC 61000-3-2 对有关设备的谐波电流成分限制

IEC 61000-3-2 对 A 类用电设备的谐波电流成分限制见表 1-2。

表 1-2 IEC 61000-3-2 对 A 类用电设备的谐波电流成分限制

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
	15~39	$0.15 \times 15/n$
偶 次	2	1.08
	4	0.43
	6	0.30
	8~40	$0.23 \times 8/n$

IEC 61000-3-2 对 C 类用电设备谐波电流成分限制的要求见表 1-3。

表 1-3 IEC 61000-3-2 对 C 类用电设备的谐波电流成分限制

谐波次数	谐波电流与基波电流的百分比 (%)	谐波次数	谐波电流与基波电流的百分比 (%)
2	2	7	7
3	$30\lambda^{\text{①}}$	9	5
5	10	$11\leq n\leq 39$	3

① λ 表示线路功率因数。

IEC 61000-3-2 对 D 类设备谐波电流的限制值见表 1-4。

表 1-4 IEC 61000-3-2 对 D 类设备谐波电流的限制值

谐波次数	<300W 设备的相对值/(mA/W)	$\geq 300\text{W}$ 设备的绝对值/A
3	3.6	1.08
5	2.0	0.6
7	0.45	
9	1.0	0.3
11~39	$0.6\lambda^{\text{①}} (11/n)$	$0.18 (11/n)$
2	1.0	0.3
4	0.5	0.15

① 表中的 λ 表示电路的功率因数。

原来规定，在欧洲对 $\geq 300\text{W}$ 的设备 1992 年实行，对 $< 300\text{W}$ 的设备于 1994 年实行。在功率因数校正（PFC）的具体实施过程中，小功率电源的实现要比大功率电源实现容易些，这是由于小功率电源中谐波成分绝对值要比大功率电源谐波成分绝对值小的原因。

在 IEC 61000-3-4（1998-10）的电磁兼容标准中，对在低压电源系统中，对额定电流大于 16A 设备的谐波电流的有关设备的谐波电流作出了如表 1-5 和表 1-6 所示的要求。

表 1-5 对于简单连接设备的谐波电流值要求 ($S_{\text{equ}} \leq S_{\text{SC}}/33$)

谐波电流次数 n	允许的谐波电流 $\left(\frac{I_n}{I_1}\right)(\%)$	谐波电流次数 n	允许的谐波电流 $\left(\frac{I_n}{I_1}\right)(\%)$
3	21.6	21	≤ 0.6
5	10.7	23	0.9
7	7.2	25	0.8
9	3.8	27	≤ 0.6
11	3.1	29	0.7
13	2	31	0.7
15	0.7	≥ 33	≤ 0.6
17	1.2		
19	1.1	偶次	$\leq 8/n$ 或 ≤ 0.6

注：表中 I_1 = 额定基波电流； I_n - 谐波电流成分。

假定网络设备和数据处理设备的短路比 $R_{\text{SCF}} > 33$ ，设备的谐波电流高于表 1-5 所要求的值，并且允许高于表 1-5 所要求的值，则可以参照表 1-6 的要求。

表 1-6 对于单相设备、相间和不平衡三相设备的谐波电流值要求

最小 R_{sc}	允许的谐波电流畸变因数 (%)		允许的各次谐波电流 $\frac{I_n}{I_1}$ (%)					
			I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

注：1. 偶次谐波的相对值不应超过 $(16/n) \times \%$ 。

2. 对连续的 R_{sc} 值的线性叠加是允许的。

3. 对不平衡三相负载的应用场合，这些值是针对单相的值，表 1-5、表 1-6 中 I_1 表示基波电流； I_n 表示 n 次谐波电流成分。

4. 关于表 1-5 和表 1-6 中有关符号的解释： S_{sc} (three-phase short-circuit power, 三相短路功率)：三相短路功率值可利用在公共耦合点 (PCC) 的阻抗值 Z 和系统的正常工作电压 $U_{正常}$ 来计算，计算公式为 $S_{sc} = U_{正常}^2 / Z$ ； S_{equ} (rated apparent power of the equipment, 设备的额定视在功率)：设备的额定视在功率可以利用设备的交流输入市电电流 I_{equ} 的额定有效值 (rms) 和额定电压 U_P (单相) / U_i (相间) 来计算。

对单相设备可利用公式 $U_P I_{equ}$ 计算。

对相间设备可利用公式 $U_i I_{equ}$ 计算。

对平衡三相设备，可利用公式 $S_{equ} = \sqrt{3} U_i I_{equ}$ 计算。

对不平衡三相设备，可利用公式 $S_{equ} = 3 U_P I_{equ(max)}$ 计算，式中 $I_{equ(max)}$ 表示流进不平衡三相设备中最大的一相电流的有效值 (rms)。

PWHD (partial weighted harmonic distortion, 部分加权谐波畸变因数)：部分加权谐波畸变因数是选择一组较高阶次谐波 (这里取 14 次以上的谐波) 的有效值电流与基波电流有效值的比值，并且这个比值被谐波次数 n 加权，部分加权谐波畸变因数 (PWHD) 可以利用公式 $PWHD = \sqrt{\sum_{n=14}^{40} n (I_n / I_1)^2}$ 计算，PWHD 的使用是为了确保较高次谐波电流的幅值已变得明显小，并且不考虑每一次谐波电流对总谐波失真的影响的应用场合。

1.1.3.3 实施功率因数校正的意义

20 世纪 80 年代初，开关电源类产品的普及促进了功率因数校正技术的发展，功率因数校正问题随供电系统进入了办公室和家庭。开关电源的谐波干扰引起了人们的重视，有关部门做出了相应的规定，以限制其危害程度，并制定出相应的技术标准 (如 IEC 61000-3-2 和 IEC 555-2 等)，作为产品规范，有关规定主要有几个作用。

(1) 防干扰：核心是限制电网谐波电流成分，欧洲制定的 EN 60555-2 标准，一部分条文对特殊输入电流波形用电设备的谐波电流提出了严格的限制。同时还规定，不符合此标准的产品不准进入欧洲市场。

(2) 可以减少输入电流的谐波成分，从而降低对其它设备的干扰。

(3) 可以提高电网设备的利用率。

(4) 可以提高电网设备的安全性。电网功率因数的提高，减小了高频谐波电流成分，从