

提高篇

# 零起点

## 学开关电源设计

◆ 周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

# 零起点学开关电源设计

## (提高篇)

周志敏 纪爱华 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书为《零起点学开关电源设计》系列图书的“提高篇”。在内容的编写上，本书以开关电源功率因数校正电路、软开关控制技术为核心内容；在写作上，本书结合了国内外开关电源功率因数校正技术、软开关控制技术的应用和发展，全面系统地阐述了开关电源功率因数校正电路、软开关控制技术的最新应用技术。

全书共5章，重点讲述了开关电源功率因数校正电路、功率因数校正电路控制器、功率因数校正电路设计实例、软开关控制技术、开关电源软开关控制器及软开关变换器的设计等内容。本书题材新颖实用，内容丰富，深入浅出，文字通俗，具有很高的实用价值。

本书可供电信、信息、航天、军事及家电等领域从事开关电源开发、设计和应用的工程技术人员，以及高等院校和职业技术学院的相关专业的师生阅读参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目（CIP）数据

零起点学开关电源设计. 提高篇/周志敏, 纪爱华编著. —北京: 电子工业出版社, 2013. 1  
ISBN 978 - 7 - 121 - 19134 - 3

I. ①零… II. ①周… ②纪… III. ①开关电源 - 设计 IV. ①TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 286700 号

策划编辑: 富 军

责任编辑: 谭丽莎

印 刷: 北京天宇星印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 18.75 字数: 477 千字

印 次: 2013 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

---

随着电子技术的高速发展，电子系统的应用领域越来越广泛，电子设备的种类也越来越多，电子设备与人们的工作、生活的关系日益密切，而电子设备都离不开可靠的电源，其性能的优劣直接关系到整个系统的安全性和可靠性。目前，对电源的要求越来越灵活多样，如电子设备的小型化和低成本化使得电源以轻、薄、小和高效率为发展方向。

目前，我国通信、信息、家电、国防等领域的电子设备电源普遍采用了高频开关电源，它已成为具有发展前景的一项高新技术产品。高频开关电源具有高集成度、高性能比、低损耗、高效率、电路简洁、工作更加可靠、最佳的性能指标等特点，使其得以广泛应用。高频开关电源的开发、研制、生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。

在全球倡导节能环保、提高能效的背景下，开关电源的设计正面临着前所未有的挑战。开关电源功率因数校正（Power Factor Correction, PFC）技术和软开关控制技术已成为提高开关电源效率、减少电网污染的核心技术，为此，本书结合国内外开关电源的 PFC 技术和软开关控制技术的发展动向，系统地介绍了它们的最新应用技术。本书尽量做到有针对性和实用性，通俗易懂和结合实际，使得从事开关电源 PFC 技术和软开关控制技术开发、设计、应用的技术人员从中获益。读者可以此为“桥梁”，系统、全面地了解 and 掌握开关电源的设计和应用技术。

参加本书编写的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、刘淑芬、纪达安、纪和平等。本书在写作过程中，从资料的收集到技术信息交流都得到了国内外的专业学者和同行的大力支持，在此对他们表示衷心的感谢。

由于时间仓促，加上作者水平有限，书中难免存在错误之处，敬请广大读者批评指正。

编著者

# 目 录

---

<b>第 1 章 开关电源功率因数校正电路</b> .....	1
1.1 功率因数定义及校正技术 .....	1
1.1.1 功率因数的定义及谐波 .....	1
1.1.2 功率因数校正技术 .....	8
1.2 无源功率因数校正技术 .....	14
1.2.1 无源功率因数校正电路 .....	14
1.2.2 改进型无源功率因数校正电路 .....	17
1.2.3 单相无源功率因数校正整流电路拓扑 .....	21
1.3 有源功率因数校正 (APFC) 电路 .....	25
1.3.1 APFC 主电路结构 .....	25
1.3.2 单级 APFC 技术 .....	35
1.3.3 基于 Flyboost 模块的新型单级 APFC 电路 .....	42
1.3.4 恒功率控制的单级 APFC 电路 .....	47
1.4 三相 PFC 电路 .....	50
1.4.1 三相 PFC 的典型电路 .....	51
1.4.2 三相多开关 PFC 电路 .....	56
1.4.3 单相 PFC 组合构成三相 PFC 的电路拓扑 .....	65
1.4.4 多相交叉升压组合电路 .....	66
1.4.5 三相单开关 PFC 拓扑结构 .....	70
1.4.6 单开关三相高功率因数、低谐波整流器 .....	74
<b>第 2 章 功率因数校正电路控制器</b> .....	78
2.1 功率因数校正控制技术 .....	78
2.1.1 功率因数校正控制方法 .....	78
2.1.2 功率因数校正电路控制器 .....	90
2.1.3 主频同步控制 PFC 电路 .....	101
2.1.4 输入电流间接控制的 APFC 电路 .....	103
2.2 UC/UCC 系列 PFC 集成控制器 .....	106
2.2.1 UC3852 PFC 集成控制器 .....	106
2.2.2 UC3854 PFC 集成控制器 .....	108
2.2.3 UCCx850x PFC/PWM 组合控制器 .....	115

2.2.4	TDA16888 PFC 集成控制器	120
2.2.5	ML4824 复合 PFC/PWM 控制器	123
2.2.6	FA5331P(M)/FA5332P(M)PFC 集成控制器	126
2.2.7	NCPI650 PFC 集成控制器	129
2.2.8	HA16141 PFC/PWM 集成控制器	133
2.2.9	CM68/69xx PFC/PWM 集成控制器	136
<b>第 3 章</b>	<b>功率因数校正电路设计实例</b>	<b>142</b>
3.1	单级 PFC 变换器的设计实例	142
3.2	具有 PFC 的蓄电池充电器设计实例	148
3.3	200kHz/200W 高效环保开关电源的设计实例	151
3.4	80W/150W/500W 高效环保开关电源的设计实例	155
3.5	基于 NCPI650/1 的 PFC 电路设计实例	170
<b>第 4 章</b>	<b>软开关控制技术</b>	<b>187</b>
4.1	软开关技术	187
4.1.1	软开关及软开关电路分类	187
4.1.2	典型的软开关电路的工作原理	191
4.1.3	无源软开关技术	194
4.2	软开关变换器电路	195
4.2.1	无源软开关变换器	195
4.2.2	无损缓冲双管串联单正激电路	198
4.2.3	准谐振软开关反激变换器	201
4.2.4	半桥不对称 PWM 控制变换器	203
4.2.5	正激式 ZVT - PWM 功率变换器电路分析	206
4.2.6	零电流、零电压开关交错并联双管正激变换器	208
4.2.7	零转换 PWM 变换器	212
4.2.8	推挽工作模式软开关 DC/DC 变换器	216
4.2.9	ZVS - PWM 全桥 DC/DC 变换器	221
4.2.10	有限双极性控制 ZVZCS PWM 全桥变换器	227
4.2.11	单相 Boost 型软开关 PFC 电路	230
<b>第 5 章</b>	<b>开关电源软开关控制器及软开关变换器的设计</b>	<b>241</b>
5.1	高频开关电源软开关控制器	241
5.1.1	UC3875 软开关控制器	241
5.1.2	UCC289X 系列芯片的原理及应用	243
5.1.3	UCC3895 软开关控制器	245
5.2	高性能软开关 PFC 电路的设计	248
5.2.1	PFC 主电路的设计	248
5.2.2	PFC 控制电路的设计	253
5.2.3	UC3852 控制的 APFC 应用电路设计	257

5.2.4	两相 ZVT - PWMDC/DC 变换器的设计 .....	261
5.3	三电平软开关变换器 .....	266
5.3.1	三电平软开关技术 .....	266
5.3.2	改进型零电压开关 PWM 三电平直流变换器 .....	271
5.3.3	采用变压器次级辅助绕组的软开关 PWM 三电平变换器 .....	274
5.3.4	多谐振软开关三相高功率因数整流器 .....	277
5.3.5	三相降压式准谐振 PFC 电路 .....	282
<b>参考文献</b> .....		<b>287</b>

# 第1章 开关电源功率因数校正电路



## 1.1 功率因数定义及校正技术

### 1.1.1 功率因数的定义及谐波

电源设计一直是一个极富挑战性的工作，随着许多传统的难题得以解决，一些有关电源效率的规范和要求的标准将再次迎接新的挑战。电源效率的规范和标准的第一个阶段已经开始，即降低待机能耗（低负载状态）。下一个阶段的任务将更艰巨，就是提高工作状态下电源的效率。在美国国家环保局“能源之星”（Energy Star）计划及中国中标认证中心（CECP）的推动下，世界各地正在公布有关电源工作效率的新能效标准。这些更有挑战性的标准将需要电源厂商及其供应商（包括半导体供应商）的共同努力，以提供能符合这些新要求的解决方案。

在上述发展趋势中，IEC1000-3-2 标准对功率因数校正（PFC）或降低谐波电流提出了强制要求，为此，近年来在电源结构方面发生了较大的变化。随着所有设备的功率不断增大，以及降低谐波电流的标准不断普及，越来越多的电源设计已经开始采用 PFC 电路。设计人员因此面临这样一个难题，即既要在产品中采用合适的 PFC 电路，也要满足降低待机电能消耗、提高工作效率和 EMI 限制等高效指标的要求。

功率因数校正解决方案的选择范围包括无源电路及各种有源电路。因为应用的功率水平和其他参数不同，所以解决方案也会有所不同。近年来，随着分立半导体元件的发展和更低价格的控制 IC 上市，进一步拓宽了有源功率因数校正解决方案的适用范围。在评估功率因数校正解决方案时，重要的是要把整个系统的实施成本和性能结合起来进行综合评估。

#### 1. 提高功率因数的意义



意义

提高功率因数是节能的要求；提高功率因数是提高电能质量，保证电力系统安全、稳定运行的要求；提高功率因数是各国限制电网谐波标准的要求。

##### 1) 提高功率因数是节能的要求

功率因数的大小意味着在视在功率相同的情况下，所能提供给负载有功功率的大小。若将功率因数从 0.65 提高到 0.90，容量为  $1000\text{kV}\cdot\text{A}$  的发电机可带负载功率便会由  $65\text{kV}\cdot\text{A}$  增加到  $90\text{kV}\cdot\text{A}$ 。由此可见，提高功率因数能更充分地利用发电机设备的容量。功率因数低，不仅浪费能源，而且会使供电线路上的电流增加，损耗增大，同时还存在火灾隐患。



2) 提高功率因数是提高电能质量, 保证电力系统安全、稳定运行的要求

近年来, 电流波形失真已经继相移因数成为第二个导致功率因数低的主要原因。大量高次谐波电流涌入各级电网, 会造成公用电网的电压波形产生失真、三相电压不对称及电压波动和闪变, 严重威胁电网和各种用电设备的安全、经济运行。

3) 提高功率因数是各国限制电网谐波标准的要求

我国及其他许多国家均制定、颁发了控制和限制电力系统谐波的标准, 其目的主要是为了控制电网中的电压和电流波形失真在允许范围内, 保护用电设备的安全运行, 减少电网污染对用电设备造成的干扰。

功率因数校正电路对离线电源的输入电流波形进行整形, 以使从电源吸取的有功功率最大化。在理想情况下, 负载应该表现为一个纯电阻负载, 此时负载吸收的反射功率为零。在这种情况下, 本质上不存在输入电流谐波。电流是输入电压 (通常是一个正弦波) 的完美复制品, 而且电压和电流。在这种情况下, 负载从电网电源吸收的电流最小, 并且可以减小与发电、配电及相关过程中的基本设备的损耗和成本。由于没有谐波, 所以也减小了与使用同一电源供电的其他负载之间的干扰。

目前, 众多电源采用功率因数校正的另一个原因, 便是为了符合规范要求。现在, 进入欧洲市场的电气设备必须符合欧洲规范 EN61000. 3. 2。这一要求适用于大多数输入功率为 75W 或以上的电器, 而且它规定了包括高达 39 次谐波在内的工频谐波的最大幅度。美国虽然还没有提出此类要求, 但却希望在全球销售产品的电源制造商设计符合这一要求的产品。

## 2. 功率因数的定义



定  
义

根据电工学的基本理论, 功率因数 (PF) 可简单地定义为有功功率 ( $P$ ) 与视在功率 ( $S$ ) 的比值, 用公式表示为

$$\text{PF} = \frac{P}{S} = \frac{U_1 I_1 \cos\varphi_1}{U_1 I_R} = \frac{I_1 \cos\varphi_1}{I_R} = \gamma \cos\varphi_1 \quad (1-1)$$

式中,  $I_1$  为输入电流基波的有效值;  $I_R$  为电网电流的有效值,  $I_R = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_N^2}$ , 其中  $I_1, I_2, \dots, I_N$  为各次谐波的有效值;  $U_1$  为输入电压基波的有效值;  $\gamma$  为输入电流畸变因数,  $\gamma = I_1 / I_R$ ;  $\cos\varphi_1$  为基波电压与基波电流之间的相移因数。

在式 (1-1) 中, 有功功率是一个周期内电流和电压瞬时值乘积的平均值, 而视在功率是电流的 RMS (Root Mean Square, 均方根值) 值与电压的 RMS 值的乘积。如果电流和电压是正弦波而且同相, 则功率因数是 1.0; 如果两者是正弦波但是不同相, 则功率因数是相位角的余弦。在电工基础课程中, 功率因数往往就是如此定义的, 但是它仅适用于特定情况, 即电流和电压都是纯正弦波。这种情况发生在负载由电阻、电容和电感元件组成, 而且均为线性 (不随电流和电压变化) 的条件下。

综上所述, 功率因数可以定义为输入电流失真系数 ( $\gamma$ ) 与相移因数 ( $\cos\varphi$ ) 的乘积。由此可见, 功率因数由输入电流畸变因数  $\gamma$  和基波电压、基波电流和相移因数  $\cos\varphi_1$  决定。

尽管电流波形有严重失真, 但电流和电压仍可以完全同相。应用“相位角余弦”的定义会得出电源的功率因数为 1.0 的错误结论。



$\cos\varphi_1$ 小,则设备的无功功率大,设备利用率低,导线、变压器绕组损耗大; $\gamma$ 小,则表示设备输入电流的谐波分量,将造成电流波形畸变,对电网造成污染,使功率因数降低,严重时,会造成电子设备损坏。通常采用无源电容滤波的二极管整流电路的输入端功率因数只能达到0.65左右。

从式(1-1)可见,抑制谐波分量即可达到减小 $\gamma$ ,提高功率因数的目的。因此,可以定性的说,谐波的抑制电路即为功率因数校正电路(实际上有所区别)。

开关模式电源对于电网电源表现为非线性阻抗,这是因为开关模式电源的输入电路通常由半波或全波整流器及其后面的储能电容器组成,该电容器能够将电压维持在接近于输入正弦波峰值电压值处,直至下一个峰值到来时对电容再进行充电。在这种情况下,只在输入波形的各峰值处从输入端吸收电流,而且电流脉冲必须包含足够的能量,以便在下一个峰值到来之前能维持负载电压。这一过程通过在短时间内将大量电荷注入电容器,然后由电容器缓慢地向负载放电来实现,之后再重复这一周期。电流脉冲为电源周期的10%~20%是十分常见的,这意味着脉冲电流应为平均电流的5~10倍。

从220V交流电网整流提供直流是在电力电子技术及电子设备中应用极为广泛的一种基本变流方案,但整流器+电容滤波电路是一种非线性器件和储能元件的组合,因此虽然输入交流电压是正弦波,但输入电流波形却严重畸变,呈脉冲状,含有大量的谐波,使输入电路的功率因数达不到0.7。

由于常规整流装置使用晶闸管或二极管,整流器件的导通角远小于 $180^\circ$ ,从而产生了大量谐波电流成分,而谐波电流不做功,只有基波电流做功,因此功率因数很低。全桥整流器电路及电压、电流波形图如图1-1所示。

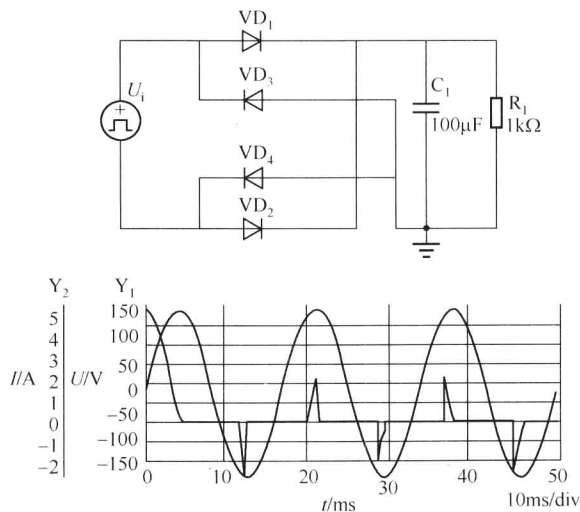


图1-1 全桥整流器电路及电压、电流波形

因此,必须采取适当的措施来减小输入电流波形的畸变,提高输入功率因数,以减小电网污染。例如,工业和信息化部在通信电源的入网检测中就要求1500W以上的电源设备,其功率因数必须高于0.92;1500W以下的电源设备,其功率因数必须高于0.85。

目前,主要用来提高功率因数的方法有:电感无源滤波,这种方法对抑制高次谐波有效,但设备体积大,质量大,在产品设计中其应用将越来越少;逆变器有源滤波,这种方

法对各次谐波的响应快，但设备造价昂贵；三相高功率因数整流器，其效率高、性能好，而且近年来其控制策略和拓扑结构处于不断发展之中。单相有源功率因数校正（APFC）通常采用 Boost 电路，CCM 工作模式，因其良好的校正效果，目前在产品设计中得到了越来越广泛的应用。

### 3. 谐波



定义  
产生原因

从严格的意义来讲，谐波是指电流中所含有的频率为基波的整数倍的电量，且一般是指对周期性的非正弦电量进行傅里叶级数分解，其余大于基波频率的电流产生的电量。从广义上讲，由于交流电网的有效分量为工频单一频率，所以任何与工频频率不同的成分都可以称为谐波，这时“谐波”这个词的意义已经变得与原意有些不符了。正是因为广义的谐波概念，才有了“分数谐波”、“间谐波”、“次谐波”等说法。

谐波产生的原因：由于正弦电压加于非线性负载上，从而导致基波电流发生畸变，进而产生谐波。主要的非线性负载有 UPS、开关电源、整流器、变频器、逆变器等。

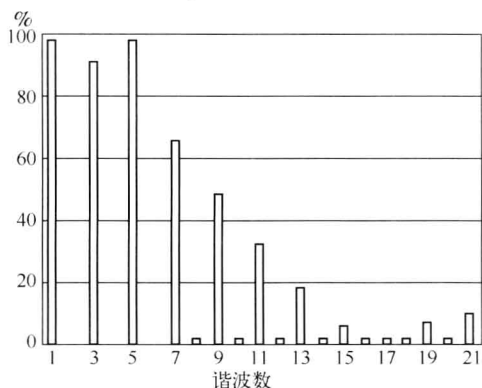


图 1-2 电流波形中的谐波成分

图 1-2 显示了电流波形中的谐波成分，基波（在本例中为 60Hz）以 100% 的参考幅度显示，而高次谐波的幅度则显示为基波幅度的百分比。注意到图中几乎没有偶次谐波，这是波形对称的结果。如果波形包含无限窄和无限高的脉冲（数学上称为  $\delta$  函数），则频谱会变平坦，这意味着所有谐波的幅度均相同。

从前面的描述可以清楚地看到，高功率因数和低谐波是一致的。但是它们之间没有直接的关系，总谐波失真和功率因数的关系体现在下列等式中：

$$PF = K_d \times K_\varphi \quad (1-2)$$

式中， $K_d$  为失真系数， $K_d = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD(\%)^2}{100}\right)}}$ ； $K_\varphi$  为输入电流的基波分量和输入电压的

相角系数。

当输入电流的基波分量和输入电压同相时， $K_\varphi = 1$ ，且有

$$PF = K_d \times K_\varphi = K_d \quad (1-3)$$

即使是完美的正弦电流，只要它的相位和电压不一致，也会得出欠佳的功率因数。对纯正弦波电压和电流而言，由于它的总谐波成分为零，所以波形失真系数为 1，并且正弦波电压和电流之间的相位差  $\varphi$  为 0，这样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  $\varphi$  不为 0，则电路的功率因数是相位差  $\varphi$  的余弦值。

当  $\varphi = 0$  时（为计算方便），功率因数与 THD 间存在如表 1-1 所示的关系。由此可见，当  $THD \leq 5\%$  时，功率因数可控制在 0.999 左右。由此得出 10% 的 THD 对应大约等于 0.995 的功

率因数。虽然这个对输入电流进行整形的过程通常被称为功率因数校正，但在国际规范中，通常以谐波含量来衡量整形是否成功。

表 1-1 功率因数与 THD 间的关系

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

综上所述，如何消除和抑制谐波对公共电网的污染，提高功率因数已成为当今国内外电源界研究的重要课题。PFC 技术应用到新型开关电源中，已成为新一代开关电源的主要标志之一。

#### 4. 不良功率因数的成因



决定 PF 的因素

由  $PF = \gamma \times \cos\varphi_1$  可知，PF 值由以下两个因素决定：

- ① 输入基波电压与输入基波电流的相位差  $\varphi_1$ ；
- ② 输入电流的波形畸变因数  $\gamma$ 。

##### 1) 相控整流电路

对于常见相控整流电路而言，其基波电压和基波电流的功率因数如表 1-2 所示。

表 1-2 常见相控整流电路的基波电压和基波电流的功率因数

电路形式	单相电路	三相电路	12 相电路
基波电压和基波电流的功率因数	0.911	0.949	0.986

功率因数低的主要原因是基波电压和基波电流的位移因数受晶闸管控制角  $\alpha$  的影响，使电流滞后于电压，即  $\cos\varphi_1 < 1$ 。改善功率因数的措施通常是在负载端并联一个性质相反的电抗元件。若电网呈感性，则通常采用电容补偿的方法。

##### 2) 开关整流电路

对于开关整流电路而言，AC/DC 前端通常由桥式整流器和大容量滤波器组成，如图 1-3 所示。在这种电路中，只有当线路的峰值电压大于滤波电容两端的电压时，整流元件中才有电流流过，如图 1-4 所示。输入电流  $i$  呈尖脉冲形式 ( $u$  为输入电压)，且产生一系列奇次谐波 (如图 1-5 所示)，致使功率因数降低到 0.6 ~ 0.7。因此，对于开关整流电路而言，不良功率因数主要源于电流波形的畸变。

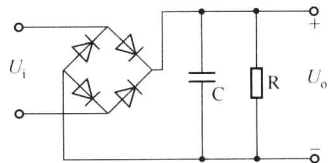


图 1-3 AC/DC 前端电路图

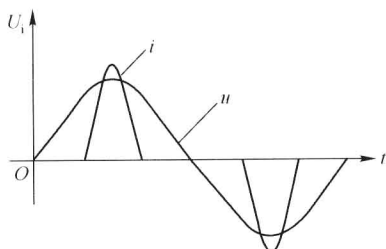


图 1-4 输入电压与整流二极管的波形图

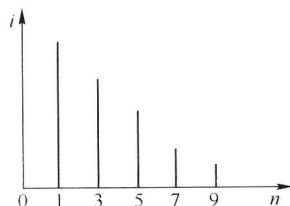


图 1-5 输出谐波分量图

## 5. 谐波电流对电网的危害

脉冲状的输入电流含有大量谐波，这样在 AC/DC 整流输入端便需加滤波电路，从而增加了体积和成本。谐波电流对电网的危害主要表现在以下几个方面。



① 谐波电流的“二次效应”，即电流流过线路阻抗造成谐波压降，反过来使电网电压波形（原来是正弦波）也发生畸变。

② 由谐波电流引起电路故障，损坏设备，如使线路和配电设备过热。谐波电流还会引起电网 LC 谐振，或者当高次谐波电流流过电网的高压电容器时，使之过流、过热进而损坏。

③ 在三相四线制电路中，三次谐波与中线中的电流同相位，合成中线电流很大，可能超过相电流，加上中线无保护装置，从而会使中性线因过流而导致过热，进而引起火灾并损坏电器设备。

④ 谐波电流会对自身及同一系统的其他电子设备产生恶劣的影响，如引起电子设备的误操作，如空调停止工作等；产生电话网噪声；引起照明设备故障，如荧光灯闪灭；造成变电站的电容、扼流圈过热、烧损。

## 6. 开关电源的功率因数

开关电源以其效率高、功率密度高而在电源领域中占主导地位。开关电源多数是通过整流器与电力网相连接的，经典的整流器是由二极管或晶闸管组成的一个非线性电路，在电网中会产生大量的电流谐波和无功功率，进而污染电网，成为电力公害。传统的开关电源存在一个致命的弱点，即功率因数较低，一般仅为 0.45 ~ 0.75，而且其无功分量基本上为高次谐波，其中三次谐波的幅度约为基波幅度的 95%，五次谐波的幅度约为基波幅度的 70%，七次谐波的幅度约为基波幅度的 45%，九次谐波的幅度约为基波幅度的 25%。

目前，开关电源已成为电网最主要的谐波源之一。针对高次谐波的危害，从 1992 年起，国际上开始以立法的形式限制高次谐波，传统的开关电源在此限制之列。我国国家技术监督局在 1993 年颁布了国家标准 GB/T14549-93《电能质量公用电网谐波》。国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC) 于 1998 年对谐波标准 IEC5552 进行了修正，另外还制定了 IEC61000-3-2 标准，其 A 类标准对电网谐波的要求如表 1-3 所示。

表 1-3 IEC61000-3-2A 类标准对电网谐波的要求

	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	$0.23 \times 8/n$



方法

抑制开关电源产生谐波的方法主要有两种：一是被动法，即采用无源滤波或有源滤波电路来旁路或滤除谐波；二是主动法，即设计新一代高性能整流器，它具有输入电流为正弦波、谐波含量低、功率因数高等特点，即具有功率因数校正功能。

国外改善开关电源功率因数的工作重点，主要是在功率因数校正电路的拓扑结构和功率因数校正控制 IC（如 UC3842 ~ UC3855A 系列，KA7524，TDA4814 等）的开发等领域展开研发工作。国内一些厂家也做了类似的工作，如采用功率因数校正电路的开关电源，其功率因数可达到 0.95 ~ 0.99，近似于 1。近年来，功率因数校正电路得到了很大的发展，成为电力电子学研究的重要方向之一。

常规开关电源的功率因数低的根源是整流电路后的滤波电容虽使输出电压平滑，但却使输入电流变为尖脉冲，如图 1-6 所示。若在整流电路后面不加滤波电路，负载仅为电阻性负载时，输入电流即为正弦波，并且与电源电压同相位，功率因数为 1。于是，功率因数校正电路的基本思想是将整流器与滤波电容隔开，使整流电路由电容性负载变为电阻性负载。在功率因数校正电路中，其隔离型电路如图 1-7 所示，但这种电路结构不能实现输入与输出的电隔离。

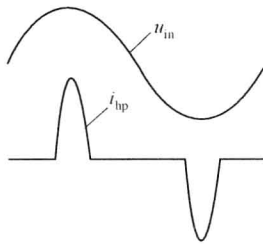


图 1-6 常规开关电源的输入电压与输入电流波形

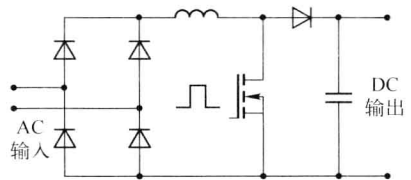


图 1-7 基本隔离型 PFC 电路

新型低污染、高效率、低应力、低输出纹波开关电源主要包括 EMI 及浪涌吸收滤波电路、前级有源软开关功率因数校正电路、相移谐振软开关 DC/DC 变换电路及输出纹波抑制电路等。

一般开关电源的输入整流电路如图 1-8 所示，市电经整流后对电容充电，其输入电流波形为不连续的脉冲，如图 1-9 所示。这种电流除了基波分量外，还包含大量谐波，其有效值  $I$  为

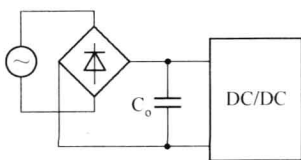


图 1-8 电容输入型电路

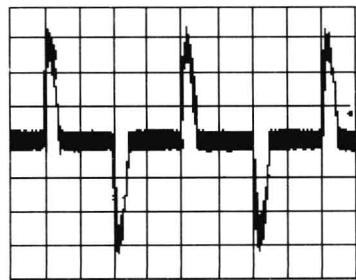


图 1-9 电容输入型电路的输入电流 (5A/DIV)

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \cdots + I_n^2} \quad (1-4)$$

式中,  $I_1, I_2, \cdots, I_n$  分别表示输入电流的基波分量与各次谐波分量。

谐波电流使电力系统的电压波形发生畸变, 将各次谐波有效值与基波有效值之比称为总谐波畸变 (Total Harmonic Distortion, THD), 其表达式为

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + \cdots + I_n^2}{I_1^2}} \quad (1-5)$$

显然, 无论是从电流的最小化还是减小对其他设备的干扰角度来看, 对每次谐波设定限制可以更好地完成控制输入电流“污染”的任务。

## 1.1.2 功率因数校正技术

### 1. 功率因数校正的基本原理

由功率因数  $\text{PF} = \cos\varphi \times \gamma = 1$  可知, 要想提高功率因数, 有以下两个途径。

途  
径

(1) 使输入电压、输入电流同相位。此时  $\cos\varphi = 1$ , 则有  $\text{PF} = \gamma$ 。

(2) 使输入电流正弦化, 即  $I_{\text{rms}} = I_1$  (谐波为零), 有  $I_1/I_{\text{rms}} = 1$ 。

利用功率因数校正技术可以使交流输入电流波形完全跟踪交流输入电压波形, 使输入电流波形呈纯正弦波, 并且和输入电压同相位, 此时整流器的负载可等效为纯电阻。因此, 有的地方又把功率因数校正电路称为电阻仿真器。

功率因数校正电路 (Power Factor Corrector) 基本上是一个 AC/DC 变换器, 即采用 PWM 控制器调整标准变换器的输入功率, 以供应适当的负载所需功率。它首先利用 PWM 控制器控制切换开关 (通常利用功率 MOSFET 来完成) 将 DC 输入电压切成一串电压脉冲波, 随后利用变压器和快速二极管将其转换成平滑的 DC 电压输出, 这个输出电压随即与一个参考电压 (这个电压是电源供应器应该输出的标准电压值) 做比较, 所产生的电压差回馈至 PWM 控制器, 再利用该误差电压信号来改变脉冲波宽度的大小, 如果输出电压过高, 脉冲波宽度会减小, 进而使输出电压降低, 以使输出电压恢复至正常输出值。

功率因数校正电路增加了一个更先进的器件, 使得来自 AC 电源的电流是一个正弦波并且与 AC 电压同相位, 此时误差电压信号的变化是由整流后的 AC 电压和输出电压的变化来控制的, 最后误差电压信号回馈至 PWM 控制器。也就是说, 当 AC 电压较高时, 功率因数校正电路就从 AC 电源吸取较多的功率; 反之, 若 AC 电压较低, 则吸取较少的功率, 如此可以减少 AC 电流的谐波产生。

### 2. 功率因数校正技术分类

功率因数校正电路分为有源和无源两类, 其中无源功率因数校正电路通常由大容量的电感、电容组成。虽然无源功率因数校正电路得到的功率因数不如源功率因数校正电路高, 但仍然可以使功率因数提高到 0.7 ~ 0.8, 因而在中小功率电源中被广泛采用。无源功率因数校正电路的结构也较为简单, 它实际上是采用矽钢片制成的工频电感, 利用电感线

圈内部电流不能突变的原理调节电路中的电压及电流的相位差,使电流趋向于正弦化以提高功率因数的。无源功率因数校正电路固有的不可克服的缺点如下。



无源缺点

- (1) 当欧洲的谐波规范越来越严格时,电感量产的质量需提升,而生产难度将提高。
- (2) 电源的质量和体积增加。
- (3) 如果电源内部结构固定得不正确,电感容易产生震动噪声。
- (4) 当电源功率超过 300W 以上,无源功率因数校正电路在材料成本及产品性能表现上将更突出其不可克服的多种缺陷。

有源功率因数校正电路自 20 世纪 90 年代以来得到了迅速推广,它在桥式整流器与输出电容滤波器之间加入了一个功率变换电路,使功率因数接近 1。有源功率因数校正电路具有体积小,质量轻,通过专用 IC 去调整电流的波形,对电流与电压间的相位差进行补偿的特点。

有源功率因数校正电路具有功率因数较高(通常可达 98% 以上),输入电压范围宽等优越的电气性能,但成本也相对较高。此外,有源功率因数校正电路还可用做辅助电源,因此在使用有源功率因数校正电路时,往往不需要待机变压器,而且有源功率因数校正电路输出的直流电压的纹波很小,这种具有有源 PFC 的电源不必采用很大容量的滤波电容。与无源功率因数校正电路类似,有源功率因数校正电路工作时也会产生噪声,只不过是高频噪声。与无源功率因数校正电路相比,有源功率因数校正电路复杂,成本较无源功率因数校正电路要高得多,而且有源功率因数校正电路工作于高频开关状态,主要应用于中高端电源产品。具体来说,与无源功率因数校正电路相比,有源功率因数校正电路具有的优点如下。



有源优点

- (1) 校正效果远优于欧洲的 EN 谐波规范,即使未来规格更趋严格也能符合规定。
- (2) 随着 IC 器件需求的增加,成本将随之降低。
- (3) 能以较低成本带来全域电压的高附加值。
- (4) 功率因数接近完美的 100%,使电力利用率极佳化,对环保有益。
- (5) 可得到较高的功率因数,总谐波畸变 THD 小,可在较宽输入电压范围和宽带下工作,体积、质量小,输出电压也可保持恒定。

(6) 未来 CPU 的发展趋势是要求电源功率越来越高,有源功率因数校正电路因成本不随输出瓦数增加上升而拥有较强的竞争力。

### 3. 有源功率因数校正技术分类

有源功率因数校正(Active Power Factor Correction, APFC)技术是直接采用有源开关或 AC/DC 变换技术,使输入电流成为和电网电压同相位的正弦波的技术。具体来说,就是在整流器和负载之间接入一个 DC/DC 开关变换器,应用电流反馈技术,使输入端电流  $i_i$  的波形跟踪交流输入正弦电压波形,使其逼近正弦波,并与输入正弦电压同相位。有源功率因数校正技术的主要缺点是电路复杂,MTBF(平均无故障时间)下降,成本较高,效率会有所降低等。目前,有源功率因数校正技术已广泛应用于 AC/DC 开关电源、交流不间断电源



(UPS) 等领域。

### 1) 按有源功率因数校正拓扑分类



按拓  
扑分  
类

(1) 降压式。因噪声大，滤波困难，功率开关管上的电压应力大，控制驱动电平浮动，所以该类型很少被采用。

(2) 升/降压式。该类型必须使用两个功率开关管，而且其中一个功率开关管的驱动控制信号浮动，电路复杂，较少采用。

(3) 反激式。该类型的输出与输入隔离，输出电压可以任意选择，采用简单电压型控制，适用于 150W 以下功率的应用场合。

(4) 升压式 (Boost)。该类型采用了简单电流型控制，PF 值高，总谐波失真 (THD) 小，效率高，但是输出电压高于输入电压。

升压式 (Boost) 适用于 75 ~ 2000W 功率范围的应用场合，其应用最为广泛。它具有以下优点：电路中的电感 L 适用于电流型控制；由于其预调整作用使得在输出电容器 C 上保持高电压，所以电容器 C 的体积小、储能大，在整个交流输入电压变化范围内能保持很高的功率因数；当输入电流连续时，易于进行 EMI 滤波，而升压电感 L 能阻止快速的电压、电流瞬变，提高电路的工作可靠性。

### 2) 按输入电流的控制原理分类



按控  
制分  
类

(1) 平均电流型。该类型的工作频率固定，输入电流连续 (CCM)，其波形图如图 1-10 (a) 所示。TI 公司的 UC3854 就工作在平均电流控制方式。平均电流型的优点是：恒频控制，工作在电感电流连续状态，开关管电流有效值小、EMI 滤波器体积小；能抑制开关噪声；输入电流波形失真小。其主要缺点是：控制电路复杂，必须使用乘法器和除法器；需检测电感电流，需电流控制环路。

(2) 滞后电流型。该类型的工作频率可变，而且当电流到达滞后带内后，会产生功率开关的通与断操作，使输入电流上升、下降；电流波形的平均值取决于电感的输入电流，其波形图如图 1-10 (b) 所示。

(3) 峰值电流型。该类型的工作频率变化，电流不连续 (DCM)，其波形图如图 1-10 (c) 所示。DCM 采用跟随器方法，具有电路简单、易于实现的优点，但存在以下缺点。

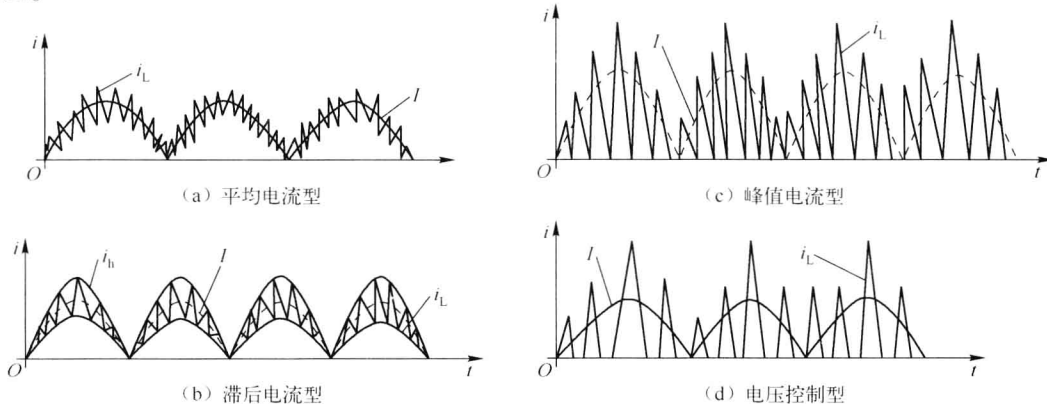


图 1-10 波形图