

▶ 开关电源 ◀

功率因数校正电路

设计与应用实例

▶ 周志敏 纪爱华 编 ◀



化学工业出版社

▶ 开关电源 ◀

功率因数校正电路

设计 与 应用实例

▶ 周志敏 纪爱华 编 ◀



化学工业出版社

· 北 京 ·

前 言

电源是各种电子设备必不可少的组成部分，其性能的优劣直接关系到整个系统的安全性和可靠性。开关电源是目前电子设备中应用最为广泛的一种电源装置，具有损耗低、效率高、电路简洁等显著优点，主要应用在计算机、电子设备、仪器仪表、通信设备和家用电器中。

随着电子信息产业的高速发展，人们对开关电源的需求与日俱增，开关电源功率因数校正技术已成为提高开关电源效率、减少电网污染的核心技术，开关电源的开发、研制和生产已成为发展前景十分诱人的朝阳产业。随着开关电源的广泛应用，开关电源功率因数校正技术显示出了强大的生命力。为此，本书结合国内外开关电源功率因数校正技术的发展方向，系统地介绍了开关电源功率因数校正技术的原理及典型功率因数校正集成控制器，重点介绍了开关电源功率因数校正电路设计与应用实例。

本书从开关电源功率因数校正技术的发展与创新以及新技术在工程设计中的应用等方面，多角度地介绍了开关电源功率因数校正技术的发展和應用。在写作上尽量做到有针对性和实用性，力求做到通俗易懂和结合实际，使得从事开关电源开发、设计、应用和维护的技术人员从中获益。读者可以此为“桥梁”，系统、全面地了解和掌握开关电源功率因数校正电路的设计和最新应用技术。

本书由周志敏、纪爱华编写，周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、纪达安、纪和平、刘淑芬等同志为本书编写提供了帮助，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，水平有限，难免有不当之處，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 概述 / 1

1.1 功率因数定义及校正技术	1
1.1.1 功率因数定义及谐波	1
1.1.2 功率因数校正技术	8
1.2 功率因数校正控制技术	13
1.2.1 功率因数校正控制方法	13
1.2.2 功率因数校正电路控制器	18
1.2.3 功率因数校正技术发展动态	22

第 2 章 功率因数校正电路 / 27

2.1 无源 PFC 校正技术	27
2.1.1 无源 PFC 电路	27
2.1.2 改进型无源 PFC 电路	30
2.1.3 单相无源 PFC 整流器的电路拓扑	33
2.2 有源功率因数校正 (APFC) 电路	38
2.2.1 APFC 电路工作原理及分类	38
2.2.2 APFC 变换器中电流型控制技术	40
2.2.3 主频同步控制 PFC 电路	47
2.2.4 输入电流间接控制的 APFC 电路	49
2.2.5 临界导电模式 APFC 电路	50
2.2.6 DCVM 模式工作的 Cuk 变换器的 APFC	53
2.3 复合型单开关 PFC 预调节器及基于 SEPIC 的 PFC 电路	58
2.3.1 复合型单开关 PFC 预调节器	58
2.3.2 基于 SEPIC 的 PFC 电路	61
2.4 软开关 PFC 电路	67
2.4.1 单相三电平无源无损软开关 PFC 电路	67

2.4.2	单相 Boost 型软开关 PFC 电路	71
2.5	单级隔离式 PFC	80
2.5.1	单级 PFC 技术	80
2.5.2	单级 PFC 变换器的功率因数校正效果分析	88
2.5.3	单级 PFC 电路的直流母线电压	90
2.5.4	单级 PFC 变换器的设计	94
2.5.5	基于 Flyboost 模块的新型单级 PFC 电路	100
2.5.6	恒功率控制的单级 PFC 电路	105

第 3 章 功率因数校正电路集成控制器 / 111

3.1	UC/UCC 系列 PFC 集成控制器	111
3.1.1	UC3852PFC 集成控制器	111
3.1.2	UC3854PFC 集成控制器	114
3.1.3	UC3854A/B PFC 集成控制器	119
3.1.4	UCC3858 PFC 集成控制器	125
3.1.5	UCCx850x0 PFC/PWM 组合控制器	129
3.2	TDA 系列 PFC 集成控制器	133
3.2.1	TDA16888 PFC 集成控制器	133
3.2.2	TDA4862 PFC 集成控制器	137
3.2.3	TDA16846 PFC 集成控制器	139
3.3	其他系列 PFC 集成控制器	140
3.3.1	ML4841 PFC 集成控制器	140
3.3.2	ML4824 复合 PFC/PWM 控制器	141
3.3.3	FA5331P (M)/FA5332P (M) PFC 集成控制器	143
3.3.4	L4981 PFC 集成控制器	147
3.3.5	NCP1650 PFC 集成控制器	148
3.3.6	HA16141 PFC/PWM 集成控制器	152
3.3.7	MC34262 PFC 集成控制器	154
3.3.8	FAN4803 PFC 集成控制器	157
3.3.9	CM68/69xx PFC/PWM 集成控制器	159

第 4 章 功率因数校正电路设计实例 / 165

实例 1	基于 UC3852 的 PFC 电路设计实例	165
实例 2	基于 UC3845 的 PFC 电路设计实例	175
实例 3	基于 UC3854A/B 的 PFC 电路设计实例	178
实例 4	基于 UCC28510 的 PFC 电路设计实例	183
实例 5	基于 UCC3858 的 PFC 电路设计实例	188
实例 6	基于 TOPSwitch 的 PFC 电路设计实例	194

实例 7	基于 ML4824 的 PFC 电路设计实例	197
实例 8	基于 TDA16888 的 PFC 电路设计实例	200
实例 9	基于 MC33260 的 PFC 电路设计实例	205
实例 10	基于 NCP1650 /1 的 PFC 电路设计实例	220

参考文献 / 236

第 1 章

概 述

► 1.1 功率因数定义及校正技术

1.1.1 功率因数定义及谐波

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展现新的挑战。规范标准的第一个阶段其实已经开始，针对降低待机能耗（低负载状态）方面。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”计划以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）共同努力，提供能符合这些新要求的解决方案。

在这些趋势中，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，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采用 PFC 电路。设计人员因此面临这样一个难题，既要在产品中采用合适的 PFC 电路，也要满足降低待机能耗、提高工作效率和 EMI 限制等高效指标。

功率因数校正解决方案的选择范围包括无源电路到各种有源电路，因应用的功率水平和其他参数的不同，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 PFC 解决方案的适用范围。在评估 PFC 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

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，则容量为 $1000\text{kV} \cdot \text{A}$ 的发电机可带动功率为 $10\text{kV} \cdot$

A 的电动机的台数从 65 台增加到 90 台。可见, 提高因数能更充分地利用发电设备的容量。功率因数小, 不仅浪费能源, 而且使线路上的电流增加, 损耗增大, 同时还存在火灾隐患。

② 提高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, 引起公用电网的电压波形发生失真、三相电压不对称及电压的波动和闪变, 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

我国及国外许多国家均制定、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, 减少电网污染对通信系统造成的干扰。

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, 电器应该表现为一个纯电阻负载, 此时电器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, 而且与其同相。在这种情况下, 对于进行所需工作所要求的有功功率而言, 从电网电源吸收的电流最小, 而且还减小了与配电发电以及相关过程中的基本设备有关的损耗和成本。由于没有谐波, 也减小了与使用相同电源供电的其他器件之间的干扰。当今众多电源采用 PFC 的另一个原因, 是为了符合规范要求。

现在, 欧洲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。虽然美国还没有提出此类要求, 但是希望在全球销售产品的电源制造商正在设计符合这一要求的产品。

(2) 功率因数的定义

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:

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

式中, I_1 为输入电流基波有效值; I_R 为电网电流有效值, $I_R = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_N^2}$, 其中 $I_1, I_2, \dots, I_N$ 为各次谐波有效值; U_1 为输入电压基波有效值; γ 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 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, 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。

所以功率因数可以定义为输入电流失真系数 (γ) 与相移因数 ($\cos \varphi$) 的乘积。可见, 功率因数由输入电流畸变因数 γ 和基波电压、基波电流和位移因数 $\cos \varphi_1$ 决定。

尽管电流波形有严重失真, 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。

$\cos\varphi_1$ 低, 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; γ 低, 表示设备输入电流谐波分量大, 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。通常的无源电容滤波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 γ , 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功率因数校正电路(实际上有所区别)。

因为输入电路的原因, 开关模式电源对于电网电源表现为非线性阻抗。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, 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。

前级从 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° , 从而产生大量谐波电流成分, 而谐波电流不做功, 只有基波电流做功, 功率因数很低。全桥整流器电压和电流波形如图 1-1 所示。

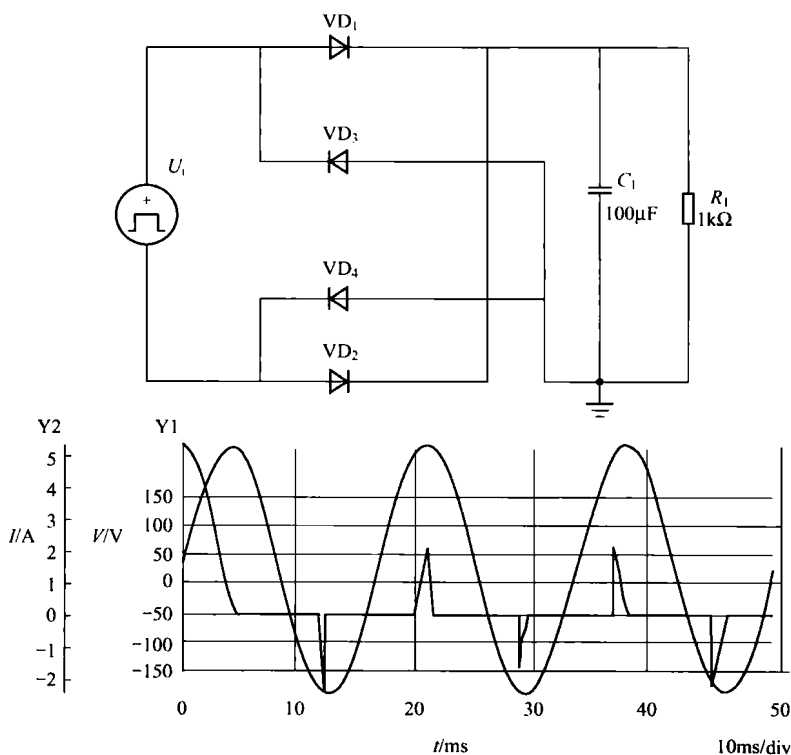


图 1-1 全桥整流器电压和电流波形

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。如信息产业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,但体积大,重量大,在产品设计中其应用将越来越少;逆变器有源滤波,对各次

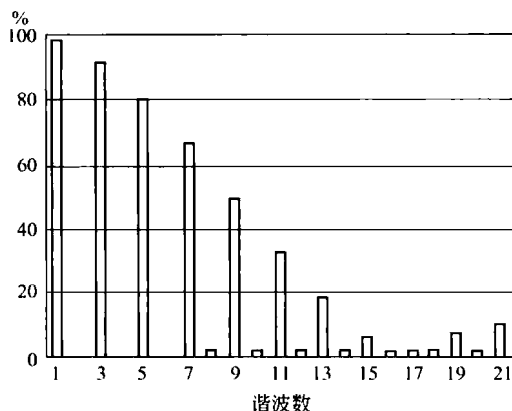


图 1-2 电流波形中的谐波成分

谐波响应快,但设备造价昂贵;三相高功率因数整流器,效率高、性能好,近年来其控制策略和拓扑结构处于不断发展中。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越来越广泛的应用。

(3) 谐波

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 δ 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:

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

$$K_d = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD(\%) }{100} \right)^2}}$$

式中, K_d 为失真系数; K_φ 为输入电流的基波分量和输入电压的相角系数。

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

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

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相位差 φ 为 0,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相位差 φ 不为 0,则电路的功率因数是它们相位差 φ 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。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。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,对每个谐波设定限制可以更好地完成控制输入电流“污染”的目标。虽然这个对输入电流进行整形的过程通常被称作功率因数校正,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 间关系

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

因此, 如何消除和抑制谐波对公共电网的污染, 提高功率因数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

由 $PF = \gamma \cos \varphi_1$ 可知, PF 值由以下两个因素决定: 一是输入基波电压与输入基波电流的相位差 φ_1 , 二是输入电流的波形畸变因数 γ 。

① 相控整流电路

对于常见相控整流电路, 其基波电压和基波电流的位移因数如表 1-2 所示。

表 1-2 常见相控整流电路基波电压和基波电流的位移因数

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位移因数	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位移因数 $\cos \varphi_1$, 即受可控硅控制角 α 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, 一般是在负载端并联一个性质相反的电抗元件。若电网呈感性, 通常采用电容补偿的方法。

② 开关整流电路

对开关整流电路而言, 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 (图 1-5), 致使功率因数降低, 为 0.6~0.7。所以,

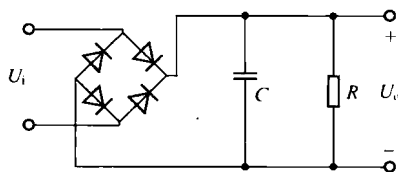


图 1-3 AC/DC 前端电路图

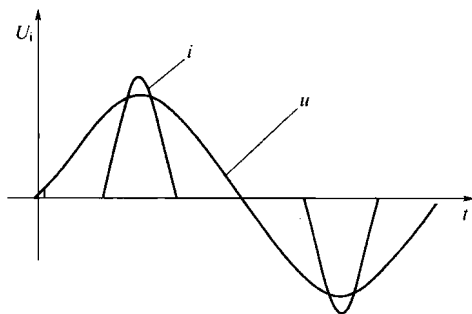


图 1-4 输入电压与整流二极管波形图

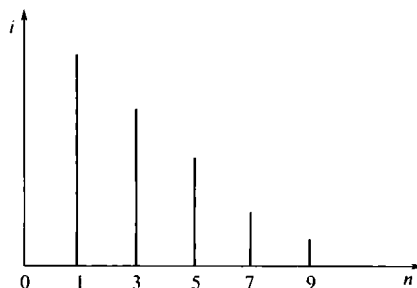


图 1-5 输出谐波分量图

对开关整流电路而言, 不良功率因数主要源于电流波形的畸变。

(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, 同时在 AC/DC 整流输入端需加滤波电路, 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，或者高次谐波电流流过电网的高压电容，使之过流、过热导致电容器损坏。
- 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，中线又无保护装置，使中性线因过流而导致中性线过热而引起火灾并损坏电器设备。
- ④ 谐波电流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；引起电话网噪声；引起照明设备故障，如荧光灯闪灭；造成变电站的电容，扼流圈的过热、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%。

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/T 14549—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见表 1-3。传统整流器因谐波远远超标而面临前所未有的挑战。

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	$0.23 \times 8/n$

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研发工作的重点，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，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，而整流电路后面不加滤波电路，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。

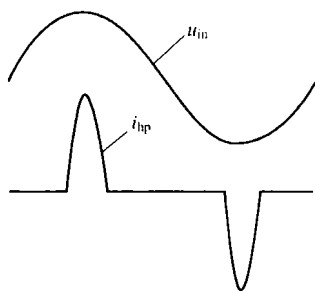


图 1-6 常规开关电源输入电压与输入电流波形

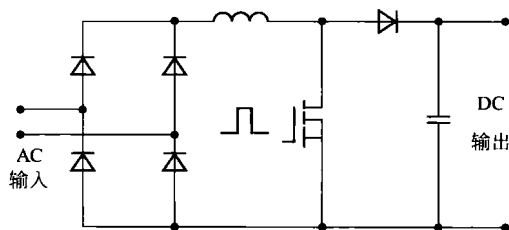


图 1-7 基本隔离型 PFC 电路

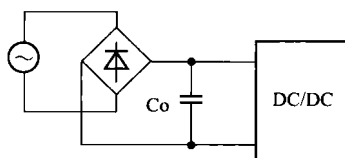


图 1-8 电容输入的电路



图 1-9 电容输入型电路的输入电流 (5A/DIV)

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，还含有大量的谐波，其有效值 I 为：

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

式中， $I_1, I_2, \dots, I_n$ ，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的比称之为总谐波畸变 (Total Harmonic Distortion, THD),其表达式为:

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

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,对每个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 $PF = \cos\varphi \times \gamma = 1$ 可知,要提高功率因数,有两个途径:

① 使输入电压、输入电流同相位。此时 $\cos\varphi = 1$, 所以 $PF = \gamma$ 。

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

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,所以有的地方又把功率因数校正电路叫做电阻仿真器。

功率因数校正电路,基本上是一个 AC/DC 变换器。一个标准的变换器利用脉冲波宽度调变 (Pulse Width Modulation, PWM) 来调整输入功率的大小,以供应适当的负载所需的功率,脉冲波宽度调变器控制切换开关 (通常利用功率 MOSFET 来达成) 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,利用这个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,以使输出电压回复至正常输出值。

PFC 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调变是由整流后的 AC 电压和输出电压的变化来控制,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 PFC 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) PFC 技术分类

功率因数校正电路分为有源和无源两类,无源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 PFC 电路的结构也较为简单,实际上是采用矽钢片制成的工频电感,它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。无源 PFC 结构笨重,工作时常带有低频振动并引发低频噪声,相对于有源 PFC 电路,无源 PFC 电路的功率因数要低得多,一般只有 70% 左右。无源 PFC 电路固有的不可克服的缺点如下。

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 电源重量和体积增加。

③ 如电源内部结构固定的不正确,电感容易产生振动噪声。

④ 当电源功率超过 300W 以上, 无源 PFC 在材料成本及产品性能表现上将突出其不可克服的多种的缺陷。

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, 它是在桥式整流器与输出电容滤波器之间加入一个功率变换电路, 使功率因数接近 1。有源 PFC 电路具有体积小、重量轻的特点, 通过专用 IC 去调整电流的波形, 对电流电压间的相位差进行补偿。

有源 PFC 可以达到较高的功率因数, 通常可达 98% 以上, 具有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 PFC 还可用作辅助电源, 因此在使用有源 PFC 电路中, 往往不需要待机变压器, 而且有源 PFC 输出直流电压的纹波很小, 这种电源不必采用很大容量的滤波电容。与无源 PFC 电路类似, 有源 PFC 工作时也会产生噪声, 只不过是高频噪声。相对于无源 PFC 电路, 有源 PFC 电路复杂, 成本较无源 PFC 要高得多, 有源 PFC 电路工作于高频开关状态, 体积小、重量轻, 比无源功率因数校正电路效率高。主要应用于中高端电源产品。相对于无源 PFC, 有源 PFC 具有的优点如下。

- ① 校正效果远优于欧洲的 EN 谐波规范, 即便未来规格更趋严格也都能符合规定。
- ② 随着 IC 器件需求增加, 成本将随之降低。
- ③ 能以较低成本带来全域电压的高附加价值。
- 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 随着未来 CPU 的发展趋势, 输出瓦数 (电力) 要求将越来越高, 有源 PFC 因成本不随输出瓦数增加而上升, 故拥有较好竞争力。

(3) 有源 PFC 技术分类

从不同的角度看, 有源功率因数校正技术有多种分类方法。从电网供电方式可分为单相 PFC 电路和三相 PFC 电路。

从软开关特性来划分, 有源 PFC 电路可分为两类: 零电流开关 PFC 技术。零电压开关 PFC 技术。按实现软开关的具体方法还可以进一步划分: 并联谐振型、串联谐振型以及准谐振型。

从控制方法来分, 有源功率因数校正可以采用脉宽调制 (PWM)、频率调制 (FM)、单环电压反馈控制、双环电流模式控制、数字控制、滑模控制以及单周期控制以及其他各种控制方法。

从拓扑结构上划分, 有源功率因数校正电路可分为预调整器型 PFC 电路以及单级组合 PFC 变换器两种形式, 后者被认为是较理想的有源功率因数校正电路结构。

一般认为有两种基本的有源 PFC 技术, 一种是变换器工作在连续导电模式的“乘法器”型; 另一种是变换器工作在不连续导电模式的“电压跟随器”型。实际上还有磁放大 PFC 技术、三电平 PFC 技术和不连续电容电压模式 (DCVM) PFC 技术等。

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。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 波形跟踪交流输入正弦电压波形, 使电网输入端的电流波形逼近正弦波, 并与输入的电网电压同相位。主要优点是: 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、重量小, 输出电压也可保持恒定。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。有源功率因数校正技术已广泛应用 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

a. 降压式。因噪声大, 滤波困难, 功率开关管上电压应力大, 控制驱动电平浮动, 很少被采用。

b. 升/降压式。须用两个功率开关管, 有一个功率开关管的驱动控制信号浮动, 电路复杂, 较少采用。

c. 反激式。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。

d. 升压式 (Boost)。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。适用于 75~2000W 功率范围的应用场合, 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, 由于升压型 APFC 的预调整作用在输出电容器 C 上保持高电压, 所以电容器 C 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 EMI 滤波, 升压电感 L 能阻止快速的电压、电流瞬变, 提高了电路工作可靠性。

② 按输入电流的控制原理分类

a. 平均电流型。工作频率固定, 输入电流连续 (CCM), 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。

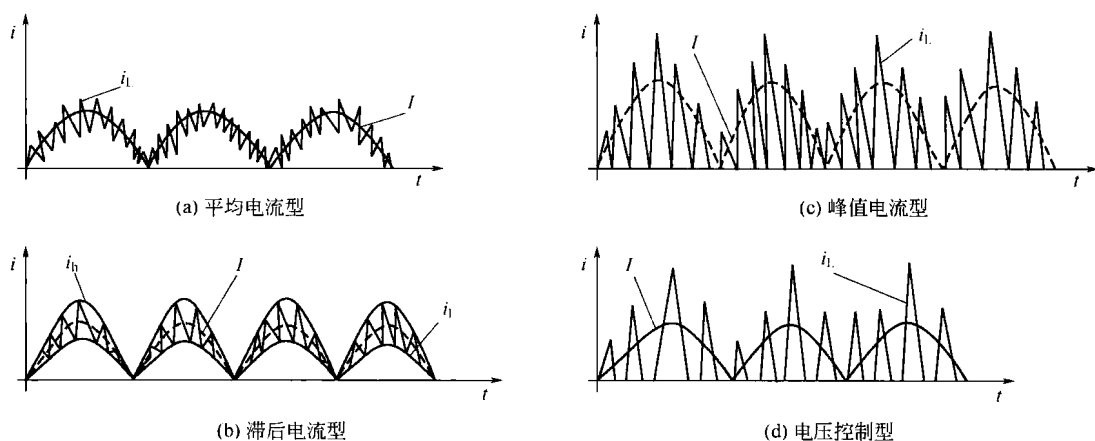


图 1-10 波形图

这种控制方式的优点是: 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。

主要缺点是: 控制电路复杂, 须用乘法器和除法器, 需检测电感电流, 需电流控制环路。

b. 滞后电流型。工作频率可变, 电流达到滞后带内发生功率开关通与断操作, 使输入电流上升、下降。电流波形平均值取决于电感输入电流, 波形图如图 1-10 (b) 所示。

c. 峰值电流型。工作频率变化, 电流不连续 (DCM), 工作波形图如图 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:

- 功率因数和输入电压 U_{in} 与输出电压 U_o 的比值 U_{in}/U_o 有关, 即当 U_{in} 变化时,

功率因数 PF 值也将发生变化,同时输入电流波形随 U_{in}/U_o 的加大而 THD 变大。

- 开关管的峰值电流大 (在相同容量情况下, DCM 中通过开关器件的峰值电流为 CCM 的两倍), 从而导致开关管损耗增加。所以在大功率 APFC 电路中, 常采用 CCM 方式。

d. 电压控制型。工作频率固定, 电流不连续, 采用固定占空比的方法, 电流自动跟随电压。这种控制方法一般用在输出功率比较小的场合, 另外在单级功率因数校正中多采用这种方法, 工作波形图如图 1-10(d) 所示。

③ 其他控制方法

a. 非线性载波控制技术。非线性载波控制 (NLC) 不需要采样电压, 内部电路作为乘法器, 即载波发生器为电流控制环产生时变参考信号。这种控制方法工作在 CCM 模式, 可用于 Flyback、Cuk、Boost 等拓扑中, 其调制方式有脉冲前沿调制和脉冲后沿调制。

b. 单周期控制技术。单周期控制是一种非线性控制技术。该控制方法的突出特点是无论是稳态还是暂态, 它都能保持受控量 (通常为斩波波形) 的平均值恰好等于或正比于给定值, 即能在一个开关周期内, 有效地抑制电源侧的扰动, 既没有稳态误差, 也没有暂态误差, 这种控制技术可广泛应用于非线性系统的场合, 不必考虑电流模式控制中的人为补偿。

c. 电荷泵控制技术。利用电流互感器检测开关管的开通电流, 并给检测电容充电, 当充电电压达到控制电压时关闭开关管, 并同时放掉检测电容上的电压, 直到下一个时钟脉冲到来使开关管再次开通, 控制电压与电网输入电压同相位, 并按正弦规律变化。由于控制信号实际为开关电流在一个周期内的总电荷, 因此称为电荷控制方式。

(4) 功率因数校正电路的结构形式

功率因数校正电路 (PFC) 分为有源和无源两种。无源校正电路通常由大容量的电感、电容和工作于工频电源的整流器组成。有源校正电路往往工作于高频开关状态, 它们的体积小、重量轻, 比无源校正电路效率高。图 1-11 是功率因数校正电路的三种不同结构形式。不同的结构形式各有其特点, 见表 1-4。

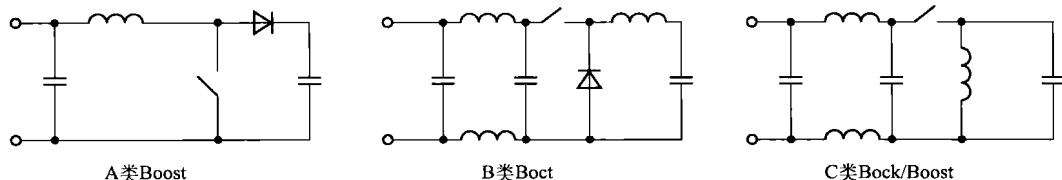


图 1-11 功率因数校正电路的不同形式

表 1-4 三种功率因数校正电路的特点

结构形式	A 类	B 类	C 类
功率因数	高	低	高
U_o 与 U_i 的关系	$U_o \geq U_i$	$U_o \leq U_i$	U_o 为任意值
滤波电路体积	小	大	大
短路保护	无	有	有
开关电压	等于 U_o	等于 U_i	等于 $U_i + U_o$
门极驱动信号	接地	浮地	浮地