

开关电源功率因素校正（PFC）及其工作原理

1 引言

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。但传统的开关电源存在一个致命的弱点，功率因数低，一般为 0.45~0.75，而且其无功分量基本上为高次谐波，其中 3 次谐波幅度约为基波幅度的 95%，5 次谐波幅度约为基波幅度的 70%，7 次谐波幅度约为基波幅度的 45%，9 次谐波幅度约为基波幅度的 25%。

大量高次谐波电流倒灌回电网，对电网造成严重的污染。为此，IEC(国际电工委员会)制定了限制高次谐波的国际标准，最新标准为 IEC1000-3-2D 类。美国、日本、欧洲等发达国家已制定了相应标准，并强制执行，对于不满足谐波标准的开关电源不允许上电网。我国也制定了相应标准。因此，随着减小谐波标准的广泛应用，更多的电源设计需要结合功率因数校正(PFC)功能。

2 高次谐波和功率因数校正的关系

一般开关电源输入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。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：

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

式(1)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为总谐波畸变THD(Total Harmonic Distortion)。

$$\text{THD} = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2) / I_1^2} \quad (2)$$

它用来衡量电网的污染程度。脉冲状电流使正弦电压波形发生畸变，它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，引起电话网噪音，引起照明设备的障碍，造成变电站的电容、扼流圈的过热、烧损等。

功率因数定义PFC=有功功率/视在功率，是指被有效利用功率的百分比。没有被利用的无效功率则在电网与电源设备之间往返流动，不仅增加线路损耗，而且成为污染源。

设电容输入型电路的输入电压为：

$$e(t) = E_m \cdot \sin(\omega_0 t) \quad (3)$$

输入电流为：

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_{mk} \cdot \sin(k\omega_0 t) \quad (4)$$

则有效功率 P_{ac} 为：

$$P_{ac} = \frac{1}{T} \int_0^T e(t) \cdot i(t) dt = \frac{E_m \cdot I_{m1}}{2} = E \cdot I_1 \quad (5)$$

则有效功率 P_{ap} 为：

$$P_{ap} = EI \quad (6)$$
$$P_F = \frac{P_{ac}}{P_{ap}} = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}} \quad (7)$$

从式(2)、(5)可见，抑制谐波分量即可达到减小THD、提高功率因数的目的。

3 功率因数校正的实现方法

从不同的角度看，功率因数校正技术有不同分类方法。从电网供电方式可分为单相 PFC 电路和三相 PFC 电路；从采用的校正机理可分为无源功率因数校正 (PPFC) 和有源功率因数校正 (Active Power Factor Correction, 简称 APFC) 两种。

无源功率因数校正技术出现最早，通常由大容量的电感、电容组成。它只是针对电源的整体负载特性表现，在开关整流器的交流输入端加入电感量很大的低

频电感，以减小滤波电容充电电流尖峰。由于加入的电感体积大，增加了开关整流器的体积，此方法虽然简单，但效果不很理想，适于应用到重量体积不受限制的小型设备。

有源功率因数校正是一个转换器串入整流滤波电路与 DC/DC 转换器之间（基本原理如图 1 所示），通过特殊的控制强迫输入电流跟随输入电压，反馈输出电压使之稳定，从而使 DC/DC 转换器的输入实现预稳。这种方法的特点是控制复杂，但体积大大减小，设计也易优化，从而进一步提高了性能。由于这个方案中应用了有源器件，故称为有源功率因数校正。

从原理图来看，APFC 基本电路就是一种开关电源，但它与传统开关电源的区别在于：DC/DC 变换之前没有滤波电容，电压是全波整流器输出的半波正弦脉动电压，这个正弦半波脉动直流电压和整流器的输出电流与输出的负载电压都受到实时的检测与监控，其控制的结果是达到全波整流器输入功率因数近似为 1。



4 功率因数校正技术的分类

目前市场上使用较多的是单相高频开关电源，针对这种情况，我们对单相有源功率因数校正 (APFC) 作一简单分类。

一般主要有两种基本的 APFC：一种是变换器工作在不连续导电模式的“电压跟随器”型；另一种是变换器工作在连续导电模式的“乘法器”型。另外，还有三电平 PFC 技术、单周期控制的 PFC 技术和不连续电容电压模式 PFC 技术等。还可以从采用的软开关技术的角度进一步对上述两种模式的 APFC 加以分类。

从软开关特性来划分，APFC 电路可分为两类，一类是零电流开关 (ZCS) PFC 技术，另一类是零电压开关 (ZVS) PFC 技术。按软开关的具体实现方法还可进一步划分为：并联谐振型、串联谐振型、串并联谐振型以及准谐振型等软开关谐振 APFC 技术[5]。

从控制方法来分，APFC 电路可以采用脉宽调制 (PWM)、频率调制 (FM)、数字控制、单环电压反馈控制、双环电流模式控制等多种控制方法。

单相有源功率因数校正按拓扑结构可分为两级模式和单级模式。

4.1 两级有源功率因数校正

目前研究的两级 PFC 电路是由两级转换器组成：第一级是 PFC 转换器，目的在于提高输入的功率因数并抑制输入电流的高次谐波；第二级为 DC/DC 转换器，目的在于调节输出以便与负载匹配。具体实现方式很多，在通信用大功率开关整流器中，主要采用的方法是在主电路输入整流和功率转换电路之间串入一个校正的环节(Boost PFC 电路)。典型的两级转换器的结构如图 2 所示。

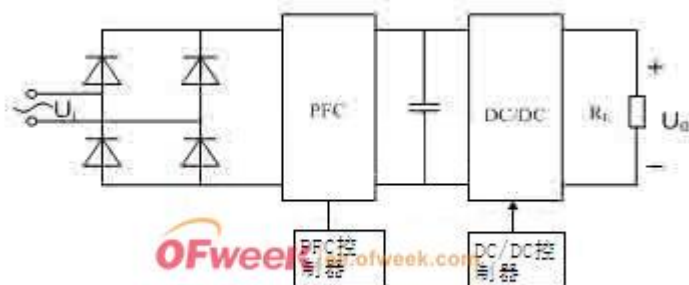


图2 典型的两级PFC转换器电路图

由于两级分别有自己的控制环节，所以电路有良好的性能。它具有功率因数高、输入电流谐波含量低，以及可对 DC/DC 转换器进行优化设计等优点。但两级 PFC 电路也有两个主要缺点：一是由于有两套装置，增加了器件的数目和成本；二是能量经两次转换，电源的效率也会有所降低。因此，两级 PFC 电路一般应用于功率较大的电路中。对于小功率的场合，由于成本及体积的限制，一般采用单级功率因数校正电路。

4.2 单级有源功率因数校正

单级 PFC 技术的基本思想，是将有源 PFC 转换器和 DC/DC 转换器合二为一。两个转换器共用一套开关管和控制电路(电路如图 3 所示)，因此单级 PFC 技术降低了成本，提高了效率，减小了电路的重量和体积。

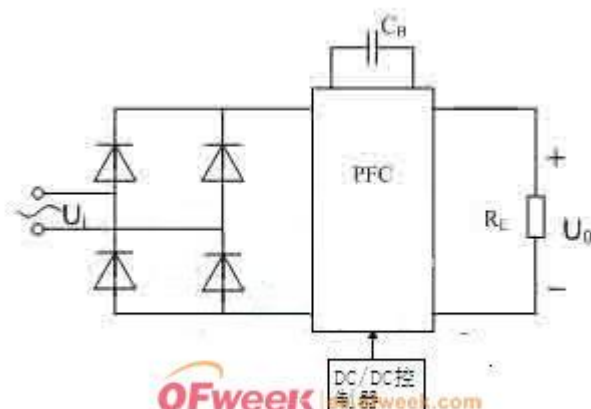


图3 典型的单级PFC转换器电路图

单级 PFC 电路具有许多优点：PFC 级和 DC/DC 级共用 1 个开关管，共用 1 套控制电路，这就使得电路设计大为简捷，降低了硬件成本；变换中能提供任何

选定的电压和电流比；由于功率实现的是一次性变换，所以能获得较高的效率和可靠性。单级 PFC 电路正因为具有这些优良的性能而越来越得到广泛的研究和应用。

但是，与传统的两级式 DC/DC 转换器相比，单级 PFC 转换器要承受更高的电压应力，有更多的功率损耗。这个问题在开关频率较高时显得尤为突出。而且，由于开关工作频率不断提高所带来的电磁干扰问题也日益严重，显著影响了转换器工作的可靠性和频率的提高。单级方案中还存在储能电容电压过高的情况，而且储能电容电压随着输入电压及负载的变化而升高，这将会导致电路的稳态特性受到一定的影响，同时某些元器件的体积成本会有所提高，这都是期待解决的问题。通过比较可知，在输出功率相同的情况下，单级功率因数校正电路在功率因数校正能力和电源的转换效率等方面，相对于两级功率因数校正电路而言，相对要差一些。近些年，专家学者先后提出了许多零电压及零电流软开关技术，特别是将软开关技术与单级隔离型 PFC 技术结合在一起的方法，另外，怎样降低储能电容上的电压也是现在单级功率因数校正研究的热点。

5 有源功率因数校正的控制方式

根据电感电流是否连续，APFC 有下面几种工作模式：不连续导通模式 DCM(Discontinuous Conduction Mode)和连续导通模式 CCM(Continuous Conduction Mode)。一般认为，采用电流连续导通方式，可利于实现输入 EMI 滤波电路小型化，并可使电流应力减小，实现高效率[6]- [7]。

DCM 控制又称电压跟踪方法(Voltage Follower)，它是 PFC 中简单而实用的一种控制方式。这类转换器工作在不连续导电模式，开关管由输出电压误差信号控制，开关周期为常数。由于峰值电感电流基本上正比于输入电压，因此，输入电流波形跟随输入电压波形变化。

DCM 控制方式的优点是：(1)电路简单，不需要乘法器；(2)功率管实现零电流开通(ZCS)且不承担二极管的反向恢复电流；(3)输入电流自动跟踪电压且保持较小的电流畸变率。

但是 DCM 方式存在着以下两个主要问题：(1)由于电感电流不连续，造成电流纹波较大，对滤波电路要求高；(2)开关管电流应力高，在同等容量情况下，DCM 中开关器件通过的峰值电流是 CCM 的两倍，由此导致通态损耗增加，因此只适用于小功率的场合。

中大功率电路通常采用 CCM 工作方式，而 CCM 根据是否直接选取瞬态电感电流作为反馈量，又可分为直接电流控制和间接电流控制。直接电流控制检测整流器的输入电流作为反馈和被控量，具有系统动态响应快、限流容易、电流控制精度高等优点。直接电流控制有峰值电流控制(PCMC)，滞环电流控制(HCC)，平均电流控制(ACMC)，预测瞬态电流控制(PICC)，线性峰值电流控制(LPCM)，非线性载波控制(NLC)等方式。CCM 控制方式的优点为：(1)输入和输出电流纹波小，THD 和 EMI 小；(2)器件导通损耗小；(3)适用于大功率场合。

APFC 的控制电路方式很多,为使控制部分简单化、小型化,已有 IC 厂家生产出各种不同性能和用途的专用集成电路,一般控制方式有两类:利用乘法器控制法及电压跟随器方法。乘法器控制法包括:电流峰值控制、电流滞环控制以及平均电流控制,电压跟随器方法包括:零电流连续控制模式和电流断续控制模式。

6 功率因数校正技术的发展方向

开关电源的模拟控制技术发展了很多年,各方面都比较成熟,但却无法克服其固有的缺点:控制电路复杂,元器件比较多,不利于小型化的发展;控制电路一旦成型,很难修改,调试不方便;控制不灵活,复杂的控制方法用模拟的方法很难实现。

与传统的模拟控制器相比,数字控制器具有更高的可靠性。数字控制器使用非常少的模拟元器件,可以增加系统的平均无故障工作时间(MTBF),还可以通过增加监视、保护和预警等功能提高系统的工作可靠性。

数字控制器较传统的模拟控制器,在设计上具有更高的灵活性。传统的模拟控制器是通过调节和改变具体元件的参数值来实现不同的控制规律。这样不可避免地会造成许多资源上的浪费,而且设计周期比较长。而数字控制器只需通过软件编程就可以修改控制规律,还可以及时通过仿真验证,使得对设计工作变得相当灵活。当电源具体的性能要求改变时,为了修改控制规律,对于模拟控制器来说,需要重新设计电路、刻板或布线;而对于数字控制器,则可通过编程来增加、删除和修改任何控制参数,从而极大地缩短了设计周期。

数字控制器易于实现与其它数字设备之间的接口,从而具有较好的兼容性。在诸多产品中,便携数字设备(如 PDA、无线电话、笔记本电脑、数码相机等)对开关电源的要求日益提高,如多级输出、节约功耗、运行模式、电磁兼容等问题。

鉴于数字控制器的上述卓越优点,数字控制器在电力电子应用领域中大有取代模拟控制器的趋势。用于开关电源的数字控制器已经在电力电子领域中引起了越来越多的关注。