

# 单级功率因数校正(PFC)研究的新进展

李 意, 尹华杰

(华南理工大学电力学院雅达实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:**传统两级功率因数校正(PFC)电路复杂、器件多、功率密度低,效率不是很理想,且成本高,难以应用到小功率消费类电子设备中。而单级式 PFC 变换器则特别适用于小功率电子设备,但仍存在许多问题。针对这些问题,人们提出了很多新的改进拓扑。为此,对最近产生的单级 PFC 拓扑进行了分类总结,分析了他们的优缺点,并指出了单级 PFC 的发展方向。

**关键词:**两级功率因数校正;单级功率因数校正;单级并联功率因数校正;拓扑

## New Progress of Single-stage Power Factor Correction (PFC) Converter

LI Yi, YIN Hua-jie

**Abstract:** Because of its complex circuit, number of devices, low power density, relatively low efficiency and high cost, conventional two-stage PFC circuits cannot be used widely in low power consumer electronic equipments. While the single-stage PFC can satisfy that goal very well. However, single-stage PFCs still have a lot of shortcomings so that many new topologic improvement on single-stage PFC circuits are presented. The several new topologies for single-stage PFC circuits are introduced, also their advantages and disadvantages are pointed out. At last, a prediction about the development of the single-stage PFC is given.

**Keywords:** Two-stage PFC; Single-stage PFC; Single-stage parallel PFC; Topology

中图分类号:TN86 文献标识码:A 文章编号:0219-2713(2003)05-0211-04

## 1 引言

由二极管和滤波电容组成的整流电路,被大量用作电子设备的前端电源。由于电路的非线性,这类电源的输入电流并不是正弦的,包含大量谐波,而且功率因数较低。因此,有必要对这类电源的输入电流进行波形整定(Input Current Shaping, ICS),对其功率因数进行校正。

近几年来,PFC技术已得到大量研究,有了许多实现方案。其中较成熟的是两级式PFC变换器。两级式PFC对谐波的处理效果较好,可以达到较高的功率因数;具有独立的PFC级,可以对输入DC/DC级的直流电压进行预调节,输出电压比较精确;带载能力比较高,适合于功率较高的场合。但是,它所需的元器件较多,成本较高;功率密度低,损耗比较大;尤其对于中小功率的电子设备,很不经济。因此,将PFC功能与DC/DC功能融为一体的单级式PFC应运而

生,以弥补两级PFC的不足。

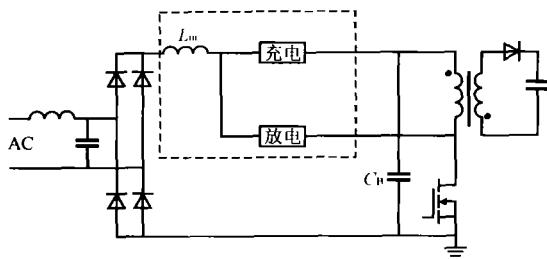
目前,单级式PFC已成为研究的重点和热点。许多新的电源技术被应用到单级式PFC拓扑中。本文对这些新的单级式PFC的拓扑结构特点作分类总结,分析了各自的优缺点,并提出了单级PFC的发展方向。

## 2 单级式PFC变换器的基本要求

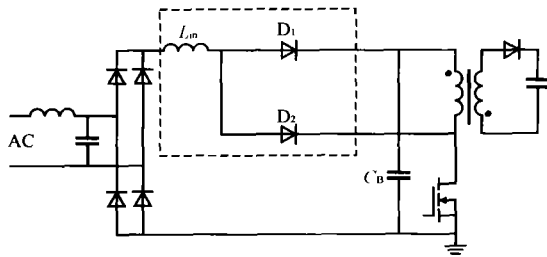
图1(a)为典型3端式单级PFC的电路框图,图1(b)则为相应的基本电路。

从图1(b)可以看到,典型的单级PFC变换器是由Boost变换器与基本的功率变换器合成的。两部分共用一个开关管,其中 $D_1$ 电路是充电电路, $D_2$ 是放电电路(同时防止开关管关断时电流倒流)。由于控制电路只是完成输出电压整定的任务,因此要求变换电路本身具有自然的PFC功能。而Boost变换器恰恰具有这种内在的功率因数校正能力。

从图1(a)可以看到,典型的PFC变换器是直接



(a) 三端式单级PFC电路框图



(b) 基本的单级PFC变换器电路

图1 单级PFC电路

与交流电路相连的，因此，瞬时输入功率是随时变化的，要得到稳定的功率输出，储能电容  $C_B$  是必需的功率平衡手段。但由于整流后的输入电压同负载大小无关，因此负载越轻，积累在  $C_B$  上的不平衡能量就越多。这导致  $C_B$  上的电压应力很大，对器件耐压的要求很高。

基于典型单级PFC的上述特点，在开发新结构的单级PFC电路时，应尽可能满足以下几个方面的要求：

- 1) 变换器电路要有较好的谐波处理能力，可以满足各种标准的要求；
- 2) 变换器要有较好的稳定输出电压能力；
- 3) 变换器的电路拓扑应具有降低电压应力、减少电路损耗的能力；
- 4) 开关管的控制方式应达到较好的校正、输出效果。

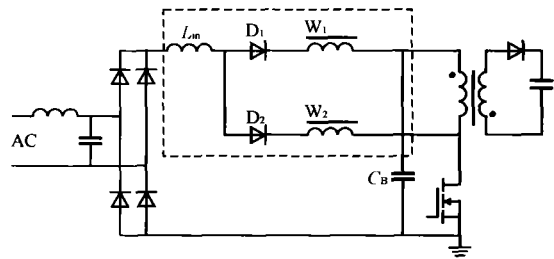
根据以上要求，下面对一些新的单级PFC拓扑电路进行了分类总结。

### 3 新型的单级PFC变换器拓扑结构

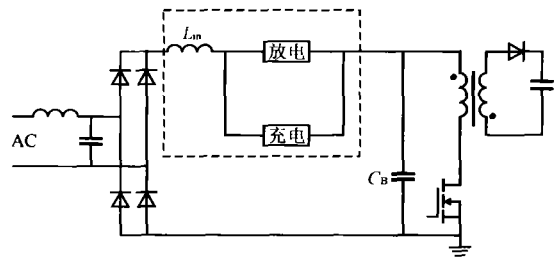
许多新型的单级PFC变换器拓扑结构，基本都是在典型单级PFC的基础上，围绕着减少器件的电压应力，降低电路的损耗而进行的改进。下面对这类改进措施及技术分类作一介绍。

#### 3.1 基本电路的改进

实际中常在图1(b)的  $D_1$ 、 $D_2$  两条二极管电路中加入电感线圈等元件，以减少电路的电压应力。这种改进很多，图2(a)是一个典型例子（类似改进见参考文献[2]等）。它是在图1(b)的  $D_1$ 、 $D_2$  两条电路中加入负反馈线圈  $W_1$ 、 $W_2$  而获得的。在电路开通或关断的时候，两线圈提供负反馈电压，减轻了储能电容  $C_B$  的电压应力，延缓了输入电流的变化。这种方法还有利于输入电感工作在CCM(Continuous Current Mode)模式，保持较低的谐波含量。



(a) 单级PFC变换器电路拓扑



(b) 双端式单级PFC电路框图

图2 改进的单级PFC变换电路

在实际应用中，还常用到如图2(b)所示的双端式单级PFC电路。它与三端式单级PFC电路类似，但充、放电电路的连接方法与三端式有差别。实际上，双端式单级PFC电路往往与三端式PFC有相对应的关系，两类电路的工作原理、以及所要实现的目标是基本一致的，两者间的相互转化关系见参考文献[2]。

#### 3.2 与其它变换器电路的结合

PFC技术发展至今已经逐渐融入到许多优秀的变换器电路中。这些新的拓扑结构可以很好地抑制电源输入谐波，整定输入电流波形，同时又具有极好的输出特性。充分发挥了PFC电路和功率变换电路的特点。

根据图1中单级PFC变换器的原理，我们可以将Boost电路与其它功率变换器结合在一起。图3将

Boost 电路与全桥变换器合成单级 PFC 电路。实际应用中可参照文献[2]的方法,对  $D_{v1}$ 、 $D_{v2}$  的充放电电路进行改进,可以得到更好的效果。该电路可以实现对输入电流波形的整定,同时又可以工作在较大功率场合,发挥了全桥电路的特点。同样,PFC 电路还可以与其它电路结合,能收到很好的效果。

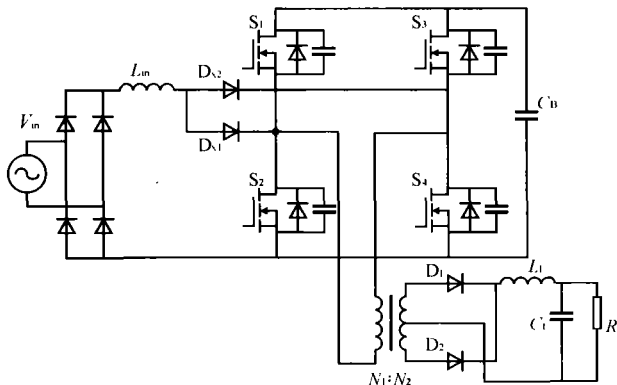


图3 单级全桥 PFC 变换器

### 3.3 有源钳位和软开关技术的应用

与普通 DC/DC 变换器相比,单级式 PFC 变换器具有电压应力大、损耗大的缺点。因此,人们又将钳位和软开关等技术应用到单级式 PFC 变换器当中,使主、辅开关在软开关条件下开关,减少损耗,或降低电路的电压应力,从而使单级式 PFC 变换器电路能够得到实际应用。

图4中,有源钳位电路由  $S_2$ 、 $C_r$  构成。主开关  $S_1$  关断后,  $C_r$  充电,当  $V_{cr}$  被充电到  $C_r$  的电压  $V_c$  时,辅助开关  $S_2$  导通,则  $S_1$  的电压被钳位在  $V_c$ ,降低了  $S_1$  的电压应力。

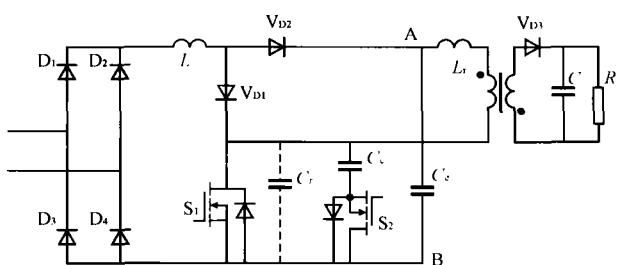


图4 带有源钳位和软开关的 Boost 单级隔离式 PFC 变换器

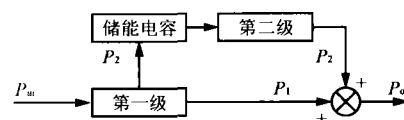
软开关过程则由谐振电感  $L_r$ 、寄生电容  $C_r$  的谐振来实现。为了实现零电压开关,必须适当选择  $L_r$ ,且要求  $L_r$  远小于励磁电感  $L_m$ 。  $L_r$  越大,越容易满足主开关的 ZVS(Zero Voltage Switching) 条件,但  $L_r$  的增大会增加开关管  $S_1$ 、 $S_2$  的电压应力,带来更多的占空比丢失;而  $L_r$  越小,输出二极管  $V_{D3}$  的电流下降率

$di_{D3}/dt$  就会越大,带来严重的反向恢复问题。

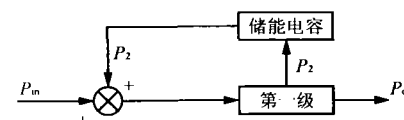
### 3.4 单级并联 PFC 电路

针对传统两级式 PFC 电路的缺点,单级 PFC 变换器把 PFC 级与 DC/DC 功率转换级整合在一起,达到了减少器件数量、简化控制电路、提高功率密度的目的,并力图使整个变换器电路具有较高的效率、较好的输出稳定性。但在单级电路中,由于单个开关管须同时实现 PFC 功能和输出电压整定功能,因此,其效率、输出等性能都逊色于两级式 PFC 变换器。针对这一问题,又产生了新的并联式 PFC 电路。与两级式电路及普通单级电路相比,这种电路的效率较高,输出特性也比较好。

图5(a)是基本的并联式 PFC 变换器原理图。在一个周期中,PFC 级无需处理所有的传输功率,这是并联式 PFC 的基本特征。



(a) 基本的并联式 PFC 变换器

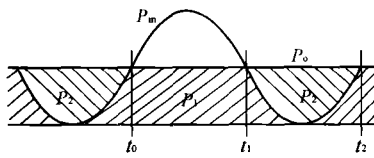


(b) 单级并联式 PFC 变换器

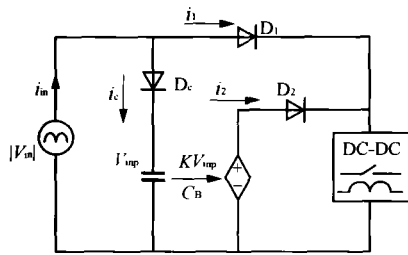
图5 并联式 PFC 变换器

对于图5(a)的并联 PFC 变换器,其输入输出的功率关系如图6(a)所示。在  $t_0 - t_1$  时刻,  $P_m > P_o$ , 功率  $P_1$  经主电路传输到输出侧,无需经过 PFC 级,多输入的功率  $P_m - P_o$  积累在储能电容中。在  $t_1 - t_2$  时刻,  $P_m < P_o$ , 输出功率的一部分由电源主电路和 PFC 级提供,差额部分  $P_o - P_m$  由储能电容经 PFC 级提供。阴影部分  $P_1$  占平均输入功率的 68% 左右,为直接经由主电路传输到输出侧的功率;阴影部分  $P_2$  占 32% 左右,为储能电容提供给输出侧的功率。

图5(a)的并联 PFC 变换器,其主电路、辅助 PFC 电路各需要一个变压器,结构比较复杂,体积、重量较大,成本也比较高,因此常用于较大功率的场合。在中、小功率场合,常用图5(b)的单级并联 PFC 变换器。该电路中,主电路、辅助电路被整合在一起,输入功率  $P_m$  和 32% 的功率差额都由同一功率级进行处理。图6(b)是单级并联 PFC 电路的概念图。



(a) 基本并联式输入输出功率关系



(b) 单级并联输入输出功率概念图

图6 并联PFC变换器输入输出功率关系

图7则是一个实际的反激式单级并联PFC变换器电路。图中输入电感 $L_{in}$ 、变压器激磁电感 $L_m$ 、附加线圈 $N_2$ 完成图6(b)中受控电压源的功能。实验证明：该电路输入电流平均值与负载电流反馈有关，随负载电流变化，这种自身具有的负载电流反馈的性质，可以使电路在轻载时不需要减少占空比就可以降低输入功率；另外，这种电路不会增加开关管的电流应力，并可以减少储能电容的电压应力以及其它有源器件的电路应力。

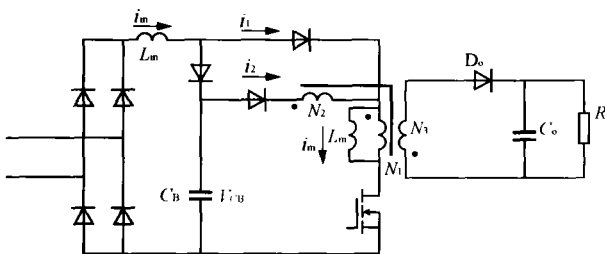


图7 单级反激式并联PFC电路

#### 4 结语

近些年来，对单级式PFC变换器电路的大量研究，基本上都是围绕着本文所述的四个目标进行的。由于单级式PFC变换器电路有着先天的缺点，减少其电压应力、降低损耗就有着格外重要的意义，本文提到的三类拓扑方面的改进，都是针对这一目标来进行的。当然，对一个变换器而言控制也有着格外重要的作用，最近，许多与数字控制技术相结合的单级PFC变换器已成为研究的热点。一个优秀的PFC变换器必然是好的拓扑和好的控制技术的结合。今后，围

绕着本文中的几个目标，新的单级PFC拓扑及控制策略将不断地被提出。所有这些研究必将推动单级式PFC变换器的应用。

#### 参考文献

- [1] Qun Zhao, Lee F. C., Jinrong Qian. Single-switch Parallel Power Factor Correction AC/DC Converters with Inherent Load Current Feedback[C]. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE*, 2002, (1): 270 - 276.
- [2] Garcia O., Cobos J. A., Prieto R., Alou P., Uceda J. Power Factor Correction: a Survey[C]. *Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC. 2001 IEEE 32nd Annual*, 2001 (1)8 - 13.
- [3] 李云秀, 邹伟杨, 赵清林. 带有源钳位和软开关的单级隔离式PFC变换器[J]. *电力电子技术*, 2001, 35(3).
- [4] Chongming Qiao, Smedley K. M.. A Topology Survey of Single-stage Power Factor Corrector with a Boost Type Input-Current-Shaper[C]. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE*, 2000(1): 460 - 467.
- [5] Yimin Jiang, Lee F. C.. Single-stage Single-phase Parallel Power Factor Correction Scheme[C]. *Power Electronics Specialists Conference, PESC'1994 Record. 25th Annual IEEE*, 1994, (2): 1145 - 1151.
- [6] Mei Qiu, Moschopoulos G., Pinheiro H., Jain P.. Analysis and Design of a Single Stage Power Factor Corrected Full-bridge Converter[C]. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999. APEC'1999. Fourteenth Annual*, 1999, (1): 119 - 125.

#### 作者简介

李意(1978-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术。

尹华杰(1966-),男,访美副教授,主要研究方向为智能型电源。

#### 致歉声明

由于本刊编辑部编审人员的失误，2003年第3期95页将作者姓名沈泊秀，秦海鸿，龚春英错登为沈泊秀，秦海鸿，龚春英。为此，本刊编辑部谨向作者沈伯秀老师表示诚挚的歉意！并以此为警示，加强审校和管理工作，杜绝此类情况的再次发生。