

# 一种改良的单相功率因数校正器

张厚升

(山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

**摘要:** 分析了常规单周期控制的单相功率因数校正器的工作原理, 提出了一种改良方案, 该方案在控制回路中仅增加了一个电阻补偿网络和一个加法器, 在主电路中将电感改为带中心抽头的三点式电感, 其他基本参数和常规单周期控制电路相同, 消除了由于电感电流纹波造成的畸变, 在一定程度上减小了由于电流断续模式(DCM)引入的畸变, 解决了由于二极管的反向恢复而引入的电流冲击和尖刺纹波问题, 并提高了功率因数校正主电路的可靠性。最后, 给出了改良后的功率因数校正器的仿真与试验结果, 试验结果表明, 改良后的单周期控制的单相功率因数校正器结构简单实用、可靠性高。

**关键词:** 单周期控制; 功率因数校正; 谐波畸变率; 校正器

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)05-0101-04

## 0 引言

传统功率因数校正电路技术复杂、设计步骤繁琐、所需元件多、体积大而且成本高, 因此设计时需在性能和成本之间进行折衷。近年来单级功率因数校正(PFC)的研究集中于如何简化传统的PFC控制电路结构, 避免对输入电压采样和使用复杂的模拟乘法器。

文献[1]中提出的单周期控制 OCC(One-Cycle Control)技术很好地解决了这个问题。OCC 技术是一种不需要乘法器的新颖控制方法, 它同时具有调制和控制的双重性, 该技术的突出特点是: 无论是稳态还是暂态, 它都能保持受控量的平均值恰好等于或正比于控制参考信号, 具有动态响应快、开关频率恒定、鲁棒性强、易于实现等优点<sup>[1-2]</sup>。

这种控制技术可广泛应用于非线性系统的场合。OCC 技术最初应用于 DC-DC 变换器<sup>[3]</sup>的控制中, 现已逐步应用于开关功率放大器<sup>[4]</sup>、有源电力滤

波器<sup>[5-7]</sup>、动态电压恢复器<sup>[8]</sup>、交错运行并联开关变换器<sup>[9]</sup>、矩阵式交流稳压电源<sup>[10]</sup>以及单相功率因数校正器<sup>[11-12]</sup>等领域。

从研究常规单周控制的单相 Boost 功率因数校正器出发, 提出了一种改良方案, 设计了一个电阻补偿网络, 修正了功率因数校正器的主电路电感, 从而消除了由于电感电流纹波造成的畸变, 提高了系统的可靠性, 同时还给出了改良电路的仿真与试验波形, 并得出了结论。

## 1 单周期控制的单相功率因数校正器

图 1 给出了常规单周控制的单相 Boost 功率因数校正电路, 为了分析稳态特性, 简化推导过程, 特作如下假设:

- a. 忽略电感电流的纹波, 电路工作于电流连续模式 CCM(Continuous Current Mode);
- b. 忽略开关器件的导通压降和开关损耗, 忽略分布参数的影响;
- c. 开关频率远大于电源频率, 输入电压、输入电

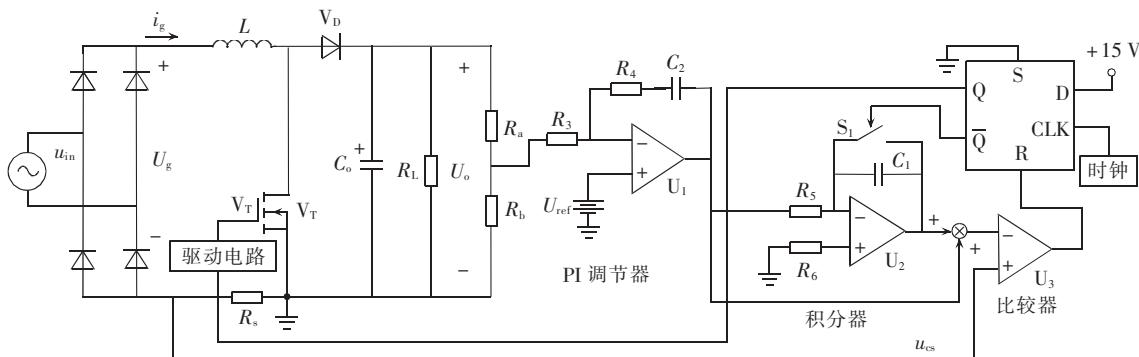


图 1 常规单周控制功率因数校正器

Fig.1 Conventional single-phase PFC with one cycle control

流在几个连续的开关周期内为恒定值, 电路工作于准稳态。

单周期控制的单相 Boost 电路的 PFC 控制目标就是控制合适的变量, 使输入电流与电压都为全波整流波形且相位相同, 输入阻抗为一个纯电阻<sup>[2,11]</sup>, 可以表示为

$$I_g = U_g / R_e \quad (1)$$

式中  $I_g$  为输入电感电流的平均值;  $U_g$  为输入电压;  $R_e$  为等效输入阻抗。

准稳态状态时, 输出电压  $U_o$  与输入电压  $U_g$  的关系满足:

$$U_g = U_o / M(d) \quad (2)$$

式中  $M(d)$  为占空比  $d$  的函数。

将式(2)代入式(1), 并将等式两边同乘以表示等效电流检测电阻的常数  $R_s$ , 并且令  $U_m = U_o R_s / R_e$ , 则有

$$R_s I_g = U_m / M(d) \quad (3)$$

对于 Boost 变换器而言,  $M(d)=1/(1-d)$ ,  $d$  为 Boost 变换器的占空比, 则实现 PFC 的关键方程变为

$$R_s I_g = U_m (1-d) \quad (4)$$

式(4)表明控制 Boost 变换器的占空比, 如果能使电流  $I_g$  的线性组合满足式(4), 就可实现单相 PFC 功能, 使功率因数近似为 1。

式(4)可以通过图 1 所示的带复位功能的积分器(由运放  $U_2$ 、电容  $C_1$  和实时开关  $S_1$  组成)和几个逻辑器件实现。

图 2 所示为采用上升沿调制、检测电流为电感电流  $i_L$  时的电路工作波形, 图(a)为时钟信号 CLK, 图(b)为传感信号  $i_L$ , 图(c)为积分器输出信号  $u_{int}$ , 图(d)为触发器信号  $\bar{Q}$ 。假定输入电压为直流量  $U_g$ , 输出电压为直流量  $U_o$ , 调制电压为直流量  $U_m$ 。则此时的控制方程为

$$R_s i_L = U_m t / \tau \quad (5)$$

式中  $\tau$  为积分器时间常数<sup>[13]</sup>, 取  $\tau = T_s$  ( $T_s$  为开关周期)。

周期开始时, D 触发器 Q 端被置为高电平,  $\bar{Q}$  端被置为低电平, 开关管关断, 电感  $L$  处于放电状态,

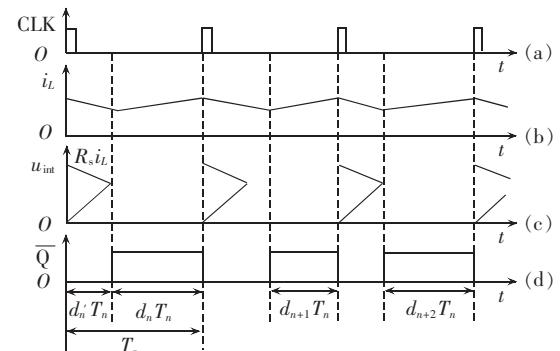


图 2 上升沿调制的 Boost 功率因数校正电路的工作波形

Fig.2 Waveforms of leading-edge modulation Boost PFC

两端电压为  $U_g - U_o$ , 电感电流线性下降; 当积分器输出  $u_{int}$  等于检测电流信号  $u_{cs}=R_s i_L$  时, 比较器输出高电平使 D 触发器复位,  $\bar{Q}$  端为高电平, 开通开关管, 同时复位积分器, 电感  $L$  处于充电状态, 两端电压为  $U_g$ , 电感电流  $i_L$  线性上升, 直到下一周期时钟脉冲的上升沿到来开始重复上一周期的工作。

## 2 改良后的单周控制的功率因数校正器

改良后的电路如图 3 所示, 与常规的单周期控制电路相比, 该电路增加了一个电阻补偿网络和一个加法器, 主电路电感改为带中心抽头的三点式电感。其他基本参数和常规单周期控制电路相同<sup>[2]</sup>。

### 2.1 纹波补偿

和图 1 相比, 图 3 所示改良后的单周期控制的 PFC 电路中增加了由  $R_1$  和  $R_2$  组成的电阻补偿网络和一个加法器。增加了电阻补偿网络后, 系统的控制方程修改为

$$U_m - R_s i_L = (U_m - k U_g) d \quad (6)$$

式中  $k=R_2/(R_1+R_2)$ ;  $d$  为占空比。

和前面的推导过程相似, 可以得到电感电流平均值为

$$I_g = \frac{U_m U_g}{R_s U_o} + \left( \frac{k}{R_s} - \frac{T_s}{2L} \right) U_g d \quad (7)$$

令  $k=R_s T / (2L)$ , 则电感电流平均值为

$$I_g = U_m U_g / R_s U_o \quad (8)$$

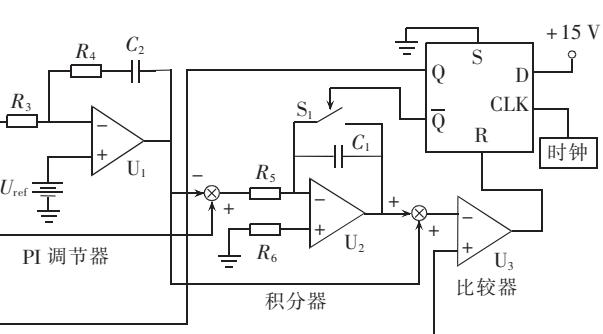
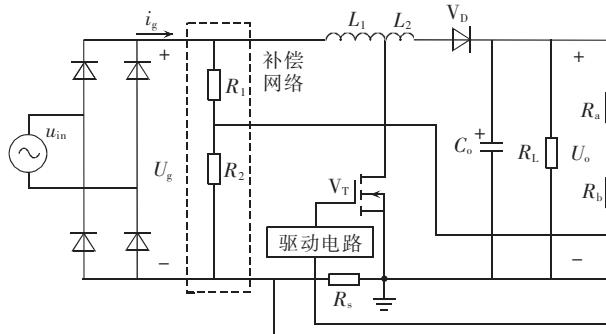


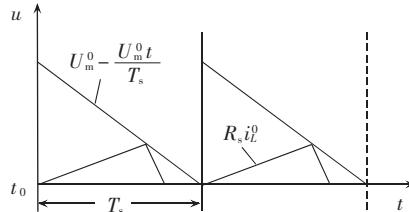
图 3 改良后的功率因数校正器

Fig.3 Improved Boost PFC with one cycle control

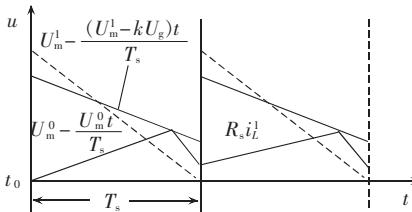
从式(8)中可以看出,平均电感电流和输入电压成比例,这样就消除了由于电感电流纹波造成的畸变。

## 2.2 DCM 区间的抑制

运用该电阻补偿网络可以使功率因数校正器运行于电流断续模式 DCM(Discontinuous Current Mode)的区间减小,如图 4 所示。



(a) 原功率因数校正器的控制原理



(b) 改良后的功率因数校正器控制原理

图 4 原功率因数校正器和改良后的功率因数校正器控制原理比较示意图

Fig.4 Comparison of control principle between original and improved PFCs

图中, $U_m^1$  和  $U_m^0$  分别代表改良后功率因数校正器和原功率因数校正器的电压误差放大器的输出,同样  $i_L^1$  和  $i_L^0$  分别为 2 个变换器的电感电流(注:上标“1”代表改良后的功率因数校正器,上标“0”代表原功率因数校正器)。

假定 2 个变换器工作于相同的状态条件下(如相同的输入电压和负载等),而且当  $t < t_0$  时,假定 2 个功率因数校正器均工作于 DCM 模式。通常情况下,关系式  $(U_m^1 - kU_g)/T_s < (U_m^0/T_s)$  成立,因而改良后的功率因数校正器的电压环补偿的斜率要小于原功率因数校正器,如图 4(b)所示。从图中可以看出,改良后的功率因数校正器要比原功率因数校正器较早的从 DCM 模式转入 CCM 模式,也即改良后的功率因数校正器具有较小的 DCM 导通角  $\theta$ ,因而校正器可以运行于较小的 DCM 区间。因而改良后的功率因数校正器在一定程度上减小了因变换器工作于 DCM 模式而引入的畸变。

## 2.3 主电路拓扑结构的修正

改良后的单周控制的单相功率因数校正主电路修正为带中心抽头的三点式电感 Boost 主电路。与传统单相有源功率因数校正主电路(见图 1)相比,该主电路拓扑结构没有很大的变化,只是在电感磁环上增加了几匝线圈,引出了一个中心抽头。带中心抽头的三点式电感主电路能够抑制二极管反向恢复引入的尖刺纹波噪声。这是因为开关管  $V_T$  导通

时,二极管  $V_D$  处在反向恢复状态,直流侧的高压通过接近“短路”状态的二极管  $V_D$  加在电感  $L$  的右半部和开关管  $V_T$  的两端,由于电感上电流不能突变,所以开关管  $V_T$  在开启瞬间不会产生很大的峰值电流,则二极管  $V_D$  的结温不会增加,反向恢复时间也不会增加,这样就不会进入恶性循环,二极管  $V_D$  和开关管  $V_T$  就不至于损坏,从而提高了功率因数校正主电路的可靠性<sup>[14-16]</sup>。

## 3 仿真与试验验证

应用 PSPICE 8.0 建立了改良的单周控制的单相 Boost PFC 电路的仿真模型<sup>[17-18]</sup>并进行仿真,图 5(a)给出了单相功率因数校正器的主要控制波形,从上至下依次为积分器输出后的调理信号  $(U_m - U_m t / \tau)$ 、电流检测信号  $R_s i_L$ 、使用 555 定时器产生的时钟信号 CLK 及占空比信号  $d$ 。图 5(b)给出了单相 Boost 功率因数校正器的输入电压  $u_{in}$  与输入电流  $i_{in}$  的仿真波形,对该波形进行傅里叶分析,可得输入电流的总谐波畸变率  $\varepsilon_{THD}=3.8\%$ ,功率因数  $\lambda$  可达 0.998。

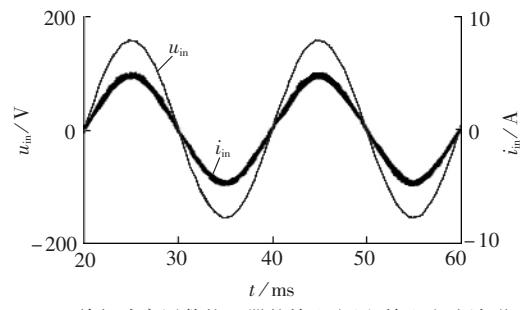
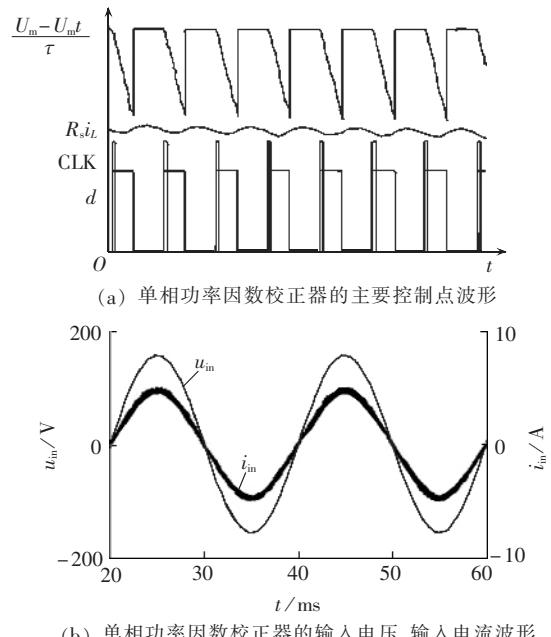


图 5 改良后的单周期控制的单相 Boost 功率因数校正器的仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms of improved single-phase Boost PFC with one cycle control

改良后的单周控制的单相 Boost 功率因数校正电路的栅极驱动和积分器输出的试验波形如图 6(a)所示( $u_{grid}$  为栅极驱动电压, $u_{int}$  为积分器输出电压),输入电压  $u_{in}$  与输入电流  $i_{in}$  的试验波形如图 6(b)所示。由图可见,改良后的试验电路的输入电流能够很好地跟踪输入电压而呈现正弦波,对输入电流的前 50 次谐波进行分析可得,输入电流总谐波畸变率  $\varepsilon_{THD}=5.341\%$ ,功率因数  $\lambda$  可以达到 0.996,因此可以认为该高功率因数整流器实现了单位功率因数校正和低电流畸变。

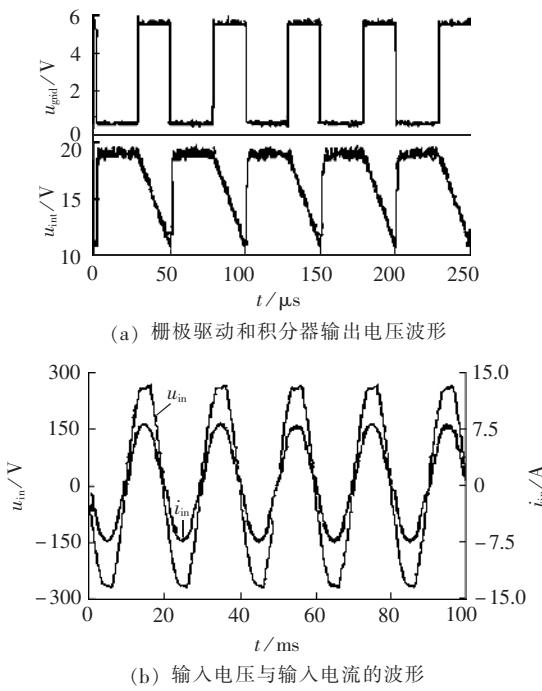


图6 改良后的单周期控制的单相Boost功率因数校正器的试验波形

Fig.6 Experimental waveforms of improved single - phase Boost PFC with one cycle control

## 4 结论

在分析了常规单周控制的单相 Boost 功率因数校正器工作原理的基础上,提出了一种改良方案,该方案增加了一个电阻补偿网络和一个加法器,主电路电感修改为带中心抽头的三点式电感,其他基本参数和常规的单周期控制电路相同,从而消除了由于电感电流纹波造成的畸变,同时在一定程度上减小了由于电流断续模式引入的畸变,解决了由于二极管的反向恢复引入的电流冲击和尖刺纹波问题。

样机的仿真与试验结果也说明,改良后的功率因数校正器拓扑结构简单实用、可靠性高、整体性能良好,实现了单位功率因数校正,而且不需要乘法器,也不需要检测输入电压,使系统更易实现、降低了经济成本,具有较高的应用价值。

## 参考文献:

- [1] SMEDLEY K M, CUK S. One-cycle control of switching converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10 (6): 625 - 633.
- [2] 张厚升. 基于单周期控制的高功率因数整流器的研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- ZHANG Hou - sheng. Research on high power factor rectifiers based on one cycle control [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [3] 林维明, 黄是鹏, 张冠生, 等. 具有快速负载动态响应的DC/DC开关变换器开环控制新策略[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 78 - 81.
- LIN Wei - ming, HUANG Shi - peng, ZHANG Guan - sheng, et al. A new open - loop control strategy for a DC / DC switching converter with fast load transient response[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 78 - 81.
- [4] LAI Z, SMEDLEY K M. A new extension of one cycle control and its application to switching power amplifiers [J]. IEEE Trans on Power Elect, 1995, 11(1): 99 - 106.
- [5] ZHOU Luo - wei, SMEDLEY K M. Unified constant-frequency integration control of active power filters [C]//APEC. New Orleans, USA: [s.n.], 2000: 406 - 412.
- [6] 余凤兵, 梁冠安. 单极调制单周控制有源电力滤波器[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(2): 43 - 46.
- YU Feng - bing, LIANG Guan - an. Unipolar modulation active power filter with one - cycle control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(2): 43 - 46.
- [7] 邹荣盛, 刘会金, 陈允平, 等. 一种新型有源滤波器控制方法——单周控制[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 75 - 77, 88.
- ZOU Rong - sheng, LIU Hui - jin, CHEN Yun - ping, et al. One cycle control — a new control method of APF[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7): 75 - 77, 88.
- [8] 李承, 邹云屏, 范婕. 动态电压恢复器单周控制策略的建模与仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 7 - 10.
- LI Cheng, ZOU Yun - ping, FAN Jie. Modeling and simulation of single - phase DVR based on one - cycle control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 7 - 10.
- [9] 陈少屏, 梁冠安. 基于单周期控制均流技术的交错运行变换器[J]. 电力电子技术, 2002, 36(5): 32 - 34.
- CHEN Shao - ping, LIANG Guan - an. Interleaving converters based on one cycle control current sharing technique[J]. Power Electronics, 2002, 36(5): 32 - 34.
- [10] 闫耀民, 范瑜, 王跃. 单周期控制在矩阵式交流稳压电源中的应用研究[J]. 电工技术杂志, 2003(5): 65 - 67.
- YAN Yao - min, FAN Yu, WANG Yue. Research of one - cycle control used in matrix fast AC stabilizer[J]. Electrotechnical Journal, 2003(5): 65 - 67.
- [11] 张纯江, 张秀红, 赵清林, 等. 单周期控制单相功率因数校正器的分析与设计[J]. 电力电子技术, 2002, 36(5): 35 - 37.
- ZHANG Chun - jiang, ZHANG Xiu - hong, ZHAO Qing - lin, et al. Analysis and design of a single phase PFC with one - cycle control[J]. Power Electronics, 2002, 36(5): 35 - 37.
- [12] 胡宗波, 张波, 胡少甫, 等. Boost 功率因数校正变换器单周期控制适用性的理论分析和实验验证[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 19 - 23.
- HU Zong - bo, ZHANG Bo, HU Shao - fu, et al. Theoretical analysis and experimental verification of one cycle control feasibility for boost PFC converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (21): 19 - 23.
- [13] 杜雄, 周维维, 罗全明, 等. 单周控制三相 PFC 中积分时间常数的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 120 - 125.
- DU Xiong, ZHOU Luo - wei, LUO Quan - ming, et al. The effect of integration time constant of one cycle controlled three - phase power factor correction[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 120 - 125.
- [14] 张厚升, 张晓斌, 吴小华. 单相 Boost 功率因数校正器的优化设计[J]. 电力电子技术, 2005, 39(3): 36 - 37, 51.
- ZHANG Hou - sheng, ZHANG Xiao - bin, WU Xiao - hua. Optimizing design on single - phase Boost rectifier with power factor correction [J]. Power Electronics, 2005, 39(3): 36 - 37, 51.
- [15] 吴小华, 吕焱峰, 弓振宇, 等. 新颖单相高功率因数校正器的研究[J]. 电力电子技术, 2005, 39(6): 53 - 54.
- WU Xiao - hua, LÜ Yan - feng, GONG Zhen - yu, et al. Research on a novel signal - phase high power factor correction [J]. Power Electronics, 2005, 39(6): 53 - 54.
- [16] 王玉峰, 肖永江. 单相 Boost 功率因数校正主电路模型的建立[J]. 电气传动自动化, 2002, 24(1): 34 - 36.
- WANG Yu - feng, XIAO Yong - jiang. Modeling of Boost converter using for single phase PFC [J]. Electric Drive Automation, 2002, 24(1): 34 - 36.
- [17] 雷涛, 林辉, 张晓斌. 一种新型高功率因数整流器环路设计研究[J]. 电力电子技术, 2006, 40(2): 11 - 14.
- LEI Tao, LIN Hui, ZHANG Xiao - bin. Study and design of control loop for a new high power factor rectifier[J]. Power Electronics, 2006, 40(2): 11 - 14.

(责任编辑: 柏英武)

## 作者简介:

张厚升(1976-),男,山东临沂人,讲师,硕士,研究方向为电气自动化、电力电子与电力传动(E-mail: zhseda@163.com)。

## **Improved single - phase power factor corrector**

ZHANG Hou - sheng

(Shandong University of Technology ,Zibo 255049 ,China)

**Abstract:** The principle of conventional single - phase PFC (Power Factor Corrector) with one cycle control is analyzed and an improved scheme is proposed, which only adds a resistance compensating network and an adder in the control circuit, and changes the main circuit inductance into a center - tapped inductance, with other basic parameters unchanged. It eliminates the distortion caused by the inductance current ripple, reduces the distortion introduced by discontinuous current mode to a certain degree, mitigates the current impact and spine ripple introduced by the reverse restoration of diode, and improves the reliability of PFC main circuit. Simulative and experimental results show that the improved corrector is simple and reliable.

**Key words:** one cycle control; power factor correction; total harmonic distortion; corrector