

改进型宽输出电压范围功率因数校正电路及控制方法

韩丽¹, 张霄², 孙圣豪³

(1. 国网河南省电力公司郑州供电公司, 郑州 450018; 2. 国网河南省电力公司安阳供电公司, 河南 安阳 455000; 3. 长春工业大学, 长春 130012)

摘要: 为了在高功率因数、低谐波畸变率要求下进一步拓宽功率因数校正电路的输出电压范围, 实现功率因数校正电路在更广泛领域的应用价值, 提出了一种改进型宽输出电压范围功率因数校正电路及控制方法。首先, 分析了所提出改进型宽输出电压范围功率因数校正电路的基本工作原理; 然后, 在传统双环控制基础上, 引入了自适应占空比补偿环节, 不仅提高了所提电路的功率因数, 还降低了所提电路的总谐波畸变率; 最后, 开发了一台 3 kW 改进型功率因数校正器样机, 对所提拓扑结构和控制方法进行了验证。试验结果表明, 采用本文所提改进型功率因数校正电路可在 50~500 V 输出电压范围内以高功率因数和低谐波畸变率状态运行。

关键词: 宽电压范围; 单相; 功率因数校正; 占空比补偿

Improved Power Factor Correction Circuit and Control Method with Wide Output Voltage Range

HAN Li¹, ZHANG Xiao², SUN Shenghao³

(1. State Grid Henan Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450018, China; 2. State Grid Henan Anyang Power Supply Company, Henan Anyang 455000, China; 3. Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: For broadening the output voltage range of the power factor correction circuit under the requirement of high power factor and low harmonic distortion rate and achieving the application of the power factor correction circuit in the wider filed, a kind of improved power factor correction circuit with wide output voltage range and its supporting control method are proposed. Firstly, the basic operating principle of the proposed improved power factor correction circuit with wide output voltage range is analyzed; Then, an adaptive duty cycle compensation stage is introduced on the basis of the conventional double-loop control, which not only improves the power factor of the proposed circuit, but also reduces the total harmonic distortion of the proposed circuit; Finally, a set of 3 kW improved power factor corrector prototype is developed to verify the proposed topology and control method. The test results show that the use of the improved power factor correction circuit proposed in this paper can operate at high power factor and low total harmonic distortion rate in the output voltage range of 50~500 V.

Keywords: wide voltage range; single-phase; power factor correction; duty ratio compensation

0 引言

功率因数校正变换器(power factor correction, PFC)是直流负载高功率因数接入电网的重要设备^[1-3]。随着用电负载种类的不断演化, PFC 的应用场景也在不断进化^[4-7], 传统方案需要针对特定应用场合进行单独设计, 以适应负载的供电电压范围, 导致重复设计问题, 而具有宽输出电压范围供电能

力的 PFC 是解决上述问题的有效方法^[8-9]。

国内外学者对宽输出供电电压范围 PFC 的研究较多, 大多研究主要从控制方法改进和电路拓扑改进两方面进行。控制方法改进一般通过提高 PFC 功率因数和降低总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)来间接改进 PFC 在宽输出电压范围内的工作特性, 或在保证功率因数和 THD 特性的前提下通过控制策略直接拓宽 PFC 的输出电压范围;

电路拓扑改进一般通过增加辅助元件或者构造新型电路结构拓宽 PFC 的输出电压范围^[10-18]。文献[19]通过占空比自适应补偿提高了 PFC 对输出电压的适应能力,但其控制方式相对复杂,需要输出电压和输出电流对负载状态进行在线计算;文献[20]提出的变占空比控制方法也可拓展 PFC 的供电电压范围,但该控制方法导致 PFC 电路的工作状态复杂化,动态特性有待提高;文献[21]利用变导通电流控制策略拓展了 PFC 的输出电压范围,同时还降低了输出电压纹波,但由于高输出电压区域电流纹波较大,导致峰值效率较低,约为 95.1%。

文献[22]提出的三路交错 PFC 技术通过降低单路 PFC 的功率处理能力可提高 PFC 对负载电压适应能力,但其硬件成本比传统单相 PFC 高,且硬件实现也更为复杂;文献[23]提出一种基于辅助元件的无桥宽电压范围 PFC,器输出电压范围可在 208 V 到 480 V 之间变化,但其需要增加三路不共地全控型器件,难以避免成本高和驱动复杂的问题,且需要对直流母线电容进行均压控制;文献[24]提出了一种电流连续模式(continuous conduction mode, CCM)无桥隔离型 PFC 电路结构,可有效提高负载的供电效率,但受限于 CCM 下电流的变换能力,输出电压范围无法大幅度变换;文献[25]提出了一种单级改进型宽输出电压 PFC 电路结构,其输出电压可从 65 V 到 120 V 动态调节,但其效率和功率因数较低,分别为 93.32% 和 97%;文献[26]利用改进型 buck-boost PFC 将负载电压拓展到 92~322 V,且其峰值效率可达 97% 左右。综上所述,通过控制改进和电路改进均可拓展 PFC 的输出电压范围,但控制改进通常会引入次生缺点,如动态性能降低、控制方式复杂和变换效率降低等;电路改进通常面临结构复杂和成本增加等。

基于上述研究背景,为了在高功率因数、低谐波畸变率要求下进一步拓宽功率因数校正电路的输出电压范围,实现功率因数校正电路在更广泛领域的应用价值,本文提出了一种改进型宽输出电压范围的功率因数校正电路。同时,为了避免传统双环控制方式下功率因数校正电路容易在交流电压过零点出现电感电流断续的情况,提出了一种自适应占空比补偿方法。

1 拓扑结构

改进型 PFC 电路与波形见图 1。图 1(a)为提出的改进型宽输出电压范围功率因数校正电路拓扑结构,图中: u_{ac} 为交流电网电压; U_o 为输出直流电压; L_{in} 为输入侧电感; C_a 为辅助电容; L_a 为辅助电感;

C_o 为输出侧滤波电容; R_o 为输出侧等效负载电阻; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 和 Q_4 为无桥整流开关器件; Q_5 和 Q_6 为辅助开关器件^[27]。

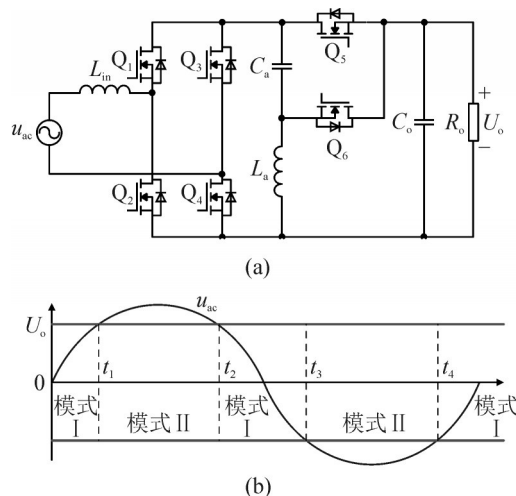


图1 改进型 PFC 电路与波形

Fig. 1 Improved PFC circuit and waveform

图 1(a)所示电路具有两种工作模式,分别为模式 I 和模式 II。假设输入电压 u_{ac} 表示为

$$u_{ac}(t) = \sqrt{2} U_{ac} \sin(2\pi f_g t) \quad (1)$$

式中: U_{ac} 为 u_{ac} 的有效值; f_g 为电网电压频率。从图 1(b)可以看出,当 $|u_{ac}| \leq U_o$ 时,电路工作在模式 I,其功能是将网侧的交流电压 u_{ac} 变换为直流电压 U_o ,同时兼顾升压功能,将数值为 $|u_{ac}|$ 的电压升高至 U_o ;当 $|u_{ac}| > U_o$ 时,电路工作在模式 II,其功能是将交流电压变换为直流电压,同时将数值为 $|u_{ac}|$ 的电压降低至 U_o ^[28]。

电路在正半周期内模式 I 的工作状态见图 2。

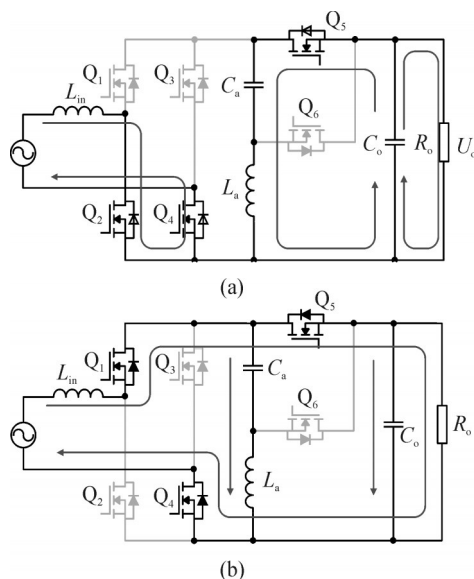


图2 模式 I 下电路的工作状态图

Fig. 2 Working state diagram of the circuit in mode I

假设 Q_1 的占空比为 d_{Q1} , Q_2 的占空比为 $(1-d_{Q1})$, 且开关器件 Q_1-Q_4 的开关频率为 f_s , 即开关时间为 $t_s=1/f_s$ 。当 Q_2-Q_4 和 Q_5 同时导通时, Q_6 为关断状态, 交流电压给电感 L_{in} 充电, 电容 C_o 放电并向负载 R_o 提供能量, 同时电容 C_o 通过 Q_5 的反并联二极管向 C_a 和 L_a 充电, 如图 2(a) 所示; 当第一桥臂由 Q_2 切换到 Q_1 后, Q_5 保持开通, Q_6 保持关断, 电感 L_{in} 向 C_o 、 C_a 和 L_a 充电, 同时向负载 R_o 提供能量, 如图 2(b) 所示。通过在图 2(a) 和图 2(b) 所示的两种状态下反复切换, 可实现升压功能^[29]。

图 3 展示了模式 II 下半个电网周期内电路的工作状态。当 Q_1 、 Q_4 和 Q_5 同时导通且 Q_6 关断时, 由于电网电压 $|u_{ac}|$ 高于输出电压 U_o , u_{ac} 向 L_{in} 、 C_a 、 L_a 和 C_o 充电, 同时向 R_o 提供电能, 见图 3(a); 当 Q_1 和 Q_4 保持开通, Q_5 关断且 Q_6 开通时, L_{in} 、 C_a 和 L_a 向 C_o 和 R_o 放电, 维持 C_o 具有稳定电压, 如图 3(b) 所示。通过在图 3(a) 和图 3(b) 两种状态的反复切换可实现所提电路的降压功能^[30]。

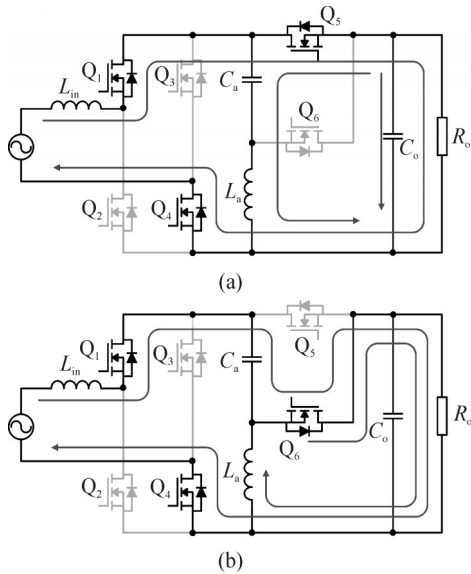


图 3 模式 II 下电路的工作状态图
Fig. 3 Working state diagram of the circuit in mode II

2 控制方法

针对图 1 所示的无桥宽输出电压范围 PFC 提出了图 4 所示的控制方法。为了保证所提电路在高功率因数状态下实现宽电压输出能力, 采用双环控制方式, 包括电压外环和电流内环^[31-32]。考虑到轻载状态下, 传统双环控制方式容易导致电感电压在电网电压过零点处出现断续现象, 在传统双环控制中引入自适应占空比补偿。图 4(a) 为引入占空比补偿的双环控制原理图, 其中, $U_{o,ref}$ 为输出电压

参考信号, $i_{L_{in},ref}$ 为电感 L_{in} 电流 $i_{L_{in}}$ 的参考信号。 q 为电网电压相位, S 为开关信号。 a_1 和 a_2 分别为静态补偿系数和动态补偿系数, 且 $a_1+a_2=1$ 。 a_1 的计算方式为

$$a_1 = \frac{P_{act}}{P_o} = \frac{U_o I_{Ro}}{P_o} \quad (2)$$

式中: P_{act} 为实际输出功率; I_{Ro} 为负载平均电流; P_o 为额定功率。

图 4(b) 展示了传统双闭环控制方法在 100% 负载下交流电流 i_{ac} 的仿真波形, 可以看出, 传统控制方式下 i_{ac} 在过零点附近发生了明显畸变。图 4(c) 展示了两种控制方式下 i_{ac} 的谐波分布情况, 两种控制方式的基波分量几乎相等, 但 3、5、9 和 11 次谐波差别较大, 其中, 3 次和 5 次谐波的差别尤为突出。总体而言, 占空比补偿方式下 i_{ac} 的各次谐波均小于传统方法。

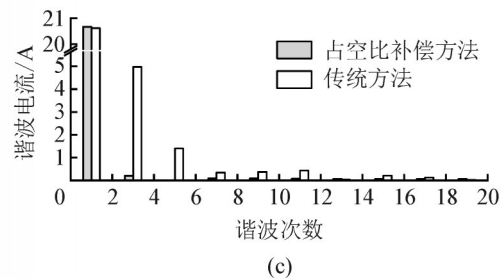
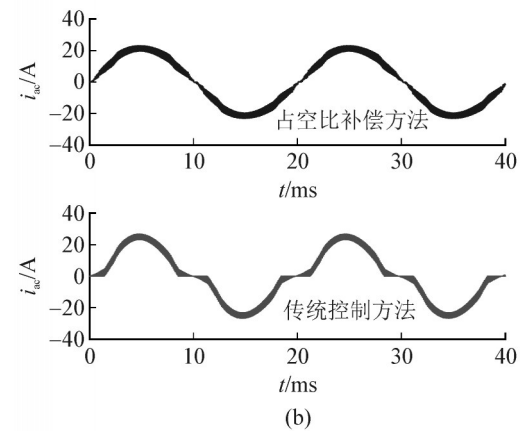
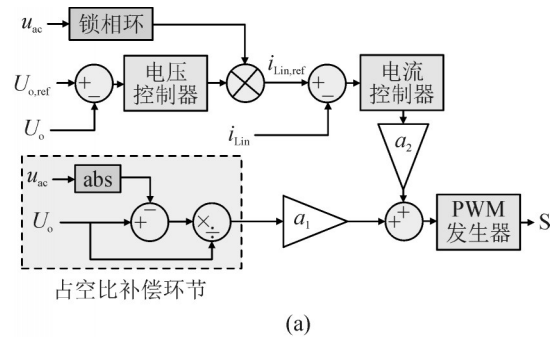


图 4 改进双闭环控制方法及其仿真波形
Fig. 4 Improved double closed loop control method and simulation waveform

3 实验验证

为了验证所提出 PFC 电路拓扑和控制方法的正确性和可行性,开发了一台无桥 PFC 样机,样机测试平台见图 5。



图5 改进无桥PFC样机测试平台
Fig. 5 Improved bridgeless PFC prototype test platform

样机参数见表 1,输入电压 220 V,电网频率 50 Hz,开关频率 80 kHz,额定功率 3 kW,输入侧电感 400 mH,辅助电容 40 mF,辅助电感 350 mF,输出电容 1 640 mF。

表1 样机参数
Table 1 Prototype parameters

参数	数值	参数	数值
U_{ac}/V	220	L_m/mH	400
U_o/V	50~500	C_a/mF	40
P_o/kW	3	L_a/mH	350
f_s/kHz	80	C_o/mF	1 640

样机测试波形见图 6,图 6 展示了 U_o 从 50 V 上升到 400 V 过程中的 i_{ac} 、 u_{ac} 和 U_o 的波形。为了较为全面的评估样机在不同输出功率下的动态特性,对电压和功率进行了匹配设置。当 $U_o < 100$ V 时, P_o 设置为 600 W;当 $U_o < 200$ V 时, P_o 设置为 1 200 W;当 $U_o < 300$ V 时, P_o 设置为 1 800 W;当 $U_o < 400$ V 时, P_o 设置为 2 400 W;当 $U_o < 500$ V 时, P_o 设置为 3 000 W。从图 6 中可以看出,在 U_o 从 50 V 上升到 500 V 的过程中, U_o 具有良好的动态响应速度和效果,具体表现在 U_o 的调节时间和超调量上,整个过程中, U_o 的调节时间低于 6 ms,超调量低于 8%。

图 7 展示了 P_o 和 U_o 同时发生变化时样机的实测波形 i_{ac} 、 u_{ac} 和 U_o 。图 7(a)展示了当 U_o 从 100 V 突变到 150 V 且 P_o 从 600 W 突变到 1 200 W 时的测试波形,可以看出,在动态切换前后,电网电流均保持为正弦波,且与电网电压相位一致,整个动态调节过程持续约 2 个电网周期。

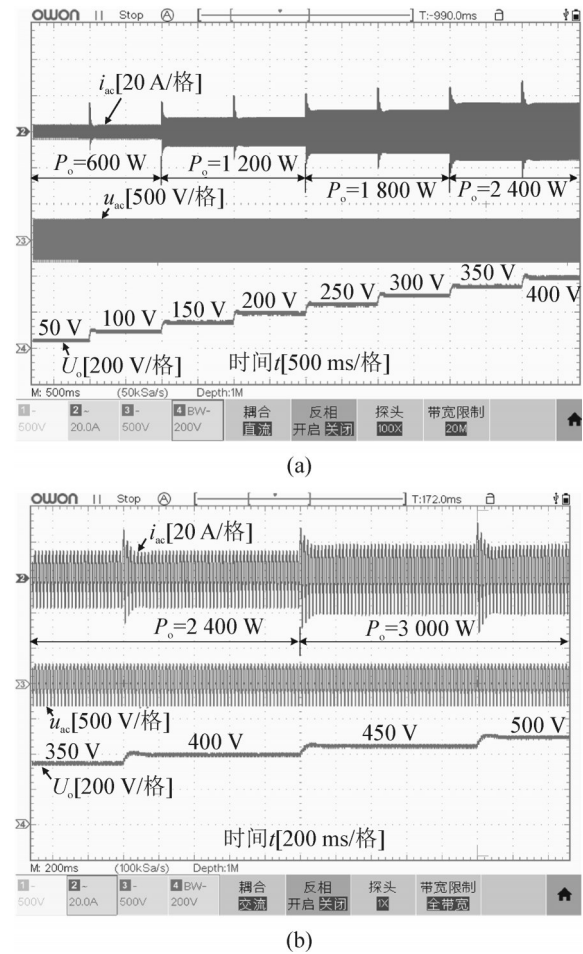


图6 样机动态测试波形
Fig. 6 Dynamic test waveform of prototype

图 7(b)展示了当 U_o 从 200 V 突变到 250 V 且 P_o 从 1 200 W 突变到 1 800 W 时的测试波形,在动态切换变换前后, i_{ac} 为正弦波,且与 u_{ac} 相位一致,动态调节过程持续低于 2 个电网周期;图 7(c)展示了当 U_o 从 300 V 突变到 350 V 且 P_o 从 1 800 W 突变到 2 400 W 时的测试波形,在动态切换变换前后, i_{ac} 为正弦波,且与 u_{ac} 相位一致,动态调节过程持续低于 3 个电网周期;图 7(d)展示了当 U_o 从 400 V 突变到 450 V 且 P_o 从 2 400 W 突变到 3 000 W 时的测试波形,在动态切换变换前后, i_{ac} 为正弦波,且与 u_{ac} 相位一致,动态调节过程持续约为 3 个电网周期。

以 $U_o = 400$ V 为例,图 8 给出了额定负载和 20% 额定负载工况下电流的谐波分布情况。满载工况下总谐波畸变率约为 1.98%,其中三次谐波分量最高,约为 0.2 A。20%负载工况下总谐波畸变率约为 2.28%,其中三次谐波分量最高,约为 0.09 A。样机在满载工况下的功率因数约为 0.999,在 20% 负载工况下的功率因数约为 0.976。

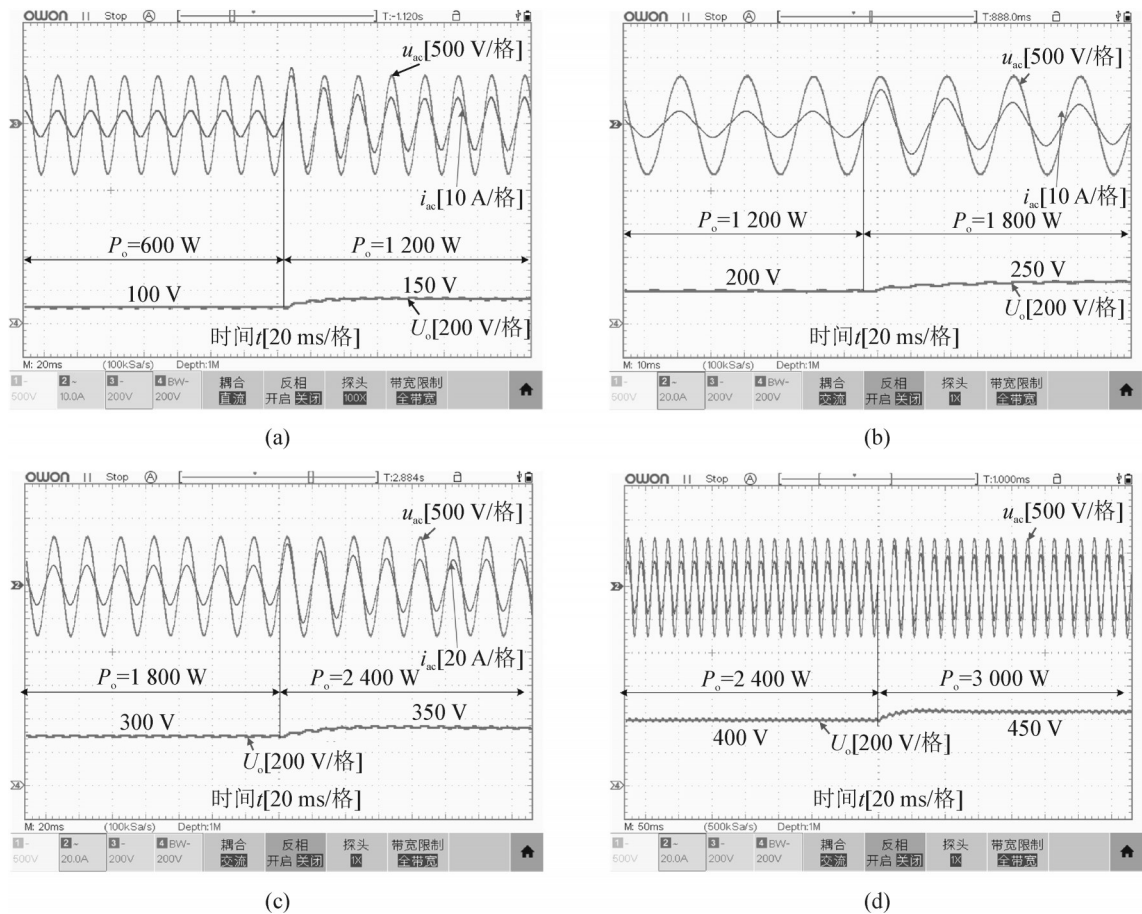


图7 详细动态测试波形
Fig. 7 Detailed dynamic test waveform

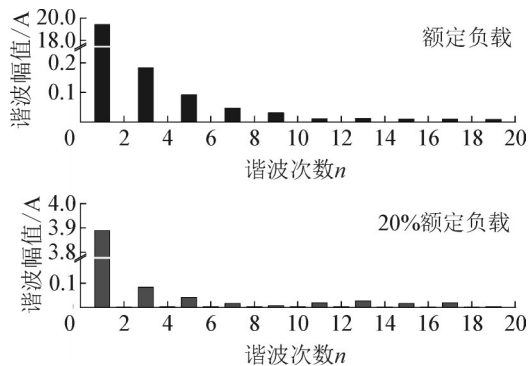


图8 电流谐波分布
Fig. 8 Harmonic distribution of current

4 结语

为了高功率因数、低谐波畸变率要求下进一步拓宽功率因数校正电路的输出电压范围,实现功率因数校正电路在更广泛领域的应用价值,本文提出了一种改进型宽输出电压范围的功率因数校正电路和自适应占空比补偿方法,通过理论分析和实验论证,可得出如下结论:

1)所提电路在 220 V 交流电压下可使直流侧输出 50~500 V 的直流电压,不仅能在升压功能区实

现功率因数校正,还能在降压功能区实现功率因数校正;

2)所提出自适应占空比补偿方法可在电网电压过零点处实现电感电流的连续输出,有利于提供功率因数校正电路的功率因数、降低功率因数校正电路的总谐波畸变率。

参考文献

[1] 周玉婷,吴羽,任小永,等. 基于改进恒导通时间控制的临界连续导通模式 Boost 功率因数校正变换器[J]. 电工技术学报,2021,36(20):4329-4338.
ZHOU Yuting, WU Yu, REN Xiaoyong, et al. Improved constant on-time control of boundary conduction mode Boost power factor correction converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(20): 4329-4338.
[2] OUALID A, SAMIR M, HICHAM T, et al. Experimental validation of the boost power factor corrector converter based on smart intuitive control law[J]. Electric Power Components and Systems, 2022, 50(4): 46-57.
[3] WANG Suhua, YU Fei. Parameter design and control of a novel three - phase single - switch power factor correction (PFC) circuit[J]. Energy Reports, 2022, 8(12): 106-115.
[4] 邹军,吴红飞,刘越,等. 基于低高度平面电感的 GaN-Si

- 混合型图腾柱无桥功率因数校正器[J]. 电工技术学报, 2021, 36(20): 4265-4273.
- ZOU Jun, WU Hongfei, LIU Yue, et al. Hybrid totem-pole bridgeless power factor corrector converter with GaN HEMT and Si diode based on low profile planar inductor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(20): 4265-4273.
- [5] 阎铁生, 李明洪, 周国华, 等. 一种一次侧控制的 Buck-flyback 单级功率因数校正变换器 LED 驱动电路[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3355-3365.
- YAN Tiesheng, LI Minghong, ZHOU Guohua, et al. A Buck-flyback single-stage power factor correction converter for LED driving circuit with primary-side control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3355-3365.
- [6] 曹勇, 杨飞, 李春晖, 等. 不同耦合系数下的交错并联电流连续模式 Boost 功率因数校正变换器的传导电磁干扰[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2176-2186.
- CAO Yong, YANG Fei, LI Chunhui, et al. Conducted electromagnetic interference of interleaved continuous current mode Boost power factor correction converter with different coupling coefficients[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2176-2186.
- [7] 陈文博, 程红, 王聪. 三相无桥功率因数校正器开路故障的快速诊断与定位策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3873-3883.
- CHEN Wenbo, CHENG Hong, WANG Cong. A fast open circuit fault diagnosis and location strategy for three-phase bridgeless power factor corrector[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3873-3883.
- [8] 章治国, 李世锋, 李鑫, 等. 一种可工作于 CCM 模态的高效图腾柱无桥 PFC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1957-1967.
- ZHANG Zhiguo, LI Shifeng, LI Xin, et al. A high efficiency totem-pole bridgeless PFC converter in CCM mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1957-1967.
- [9] 梁国壮, 田涵雷, 王子园, 等. 一种单级无桥式高功率因数无电解电容 AC-DC LED 驱动器[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3396-3407.
- LIANG Guozhuang, TIAN Hanlei, WANG Ziyuan, et al. A single-stage bridgeless, electrolytic capacitor-free AC-DC LED driver with high power factor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3396-3407.
- [10] WANG Laili, HU Zhiyuan, LIU Yanfei, et al. A horizontal-winding multipermeability LTCC inductor for a low-profile hybrid DC/DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(9): 4365-4375.
- [11] 杨洋, 徐献清, 史贵凤. 储能变流器谐波畸变率测试问题探讨[J]. 电器与能效管理技术, 2021(7): 51-55.
- YANG Yang, XU Xianqing, SHI Guifeng. Discussion on measurement of harmonic distortion rate of power conversion system[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(7): 51-55.
- [12] 刘新天, 李强, 郑昕昕, 等. 基于多目标优化的燃料电池汽车能量管理策略[J]. 电子测量技术, 2021, 44(6): 81-89.
- LIU Xintian, LI Qiang, ZHENG Xinxin, et al. Energy management strategy of fuel cell vehicle based on multi-objective optimization[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(6): 81-89.
- [13] 龚仁喜, 彭维玉, 李思强. 一种电流模式 Buck-Boost 变换器的混沌与反混沌混合控制方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 158-164.
- GONG Renxi, PENG Weiyu, LI Siqiang. A hybrid chaos and anti-chaos control method for Buck-Boost converter in current mode[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 158-164.
- [14] 徐鑫雨, 吴红飞, 贾益行, 等. 基于三端口无桥 PFC 的两级式隔离型双输出 AC-DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7431-7439.
- XU Xinyu, WU Hongfei, JIA Yiheng, et al. A two-stage isolated dual-output AC-DC converter based on three-port bridgeless PFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7431-7439.
- [15] 郑宏, 郭其金, 沈建杨. 无桥 DBPFC 变换器的虚拟超局部优化控制策略[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 20-25.
- ZHENG Hong, GUO Qijin, SHEN Jianyang. Virtual super-local optimization control strategy for bridgeless DBPFC converters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8): 20-25.
- [16] 孙雨晴, 陈卓, 梁耀贤, 等. 基于功率补偿的 DC-DC 变换器电流应力控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(7): 44-54.
- SUN Yuqing, CHEN Zhuo, LIANG Yaoxian, et al. A current stress control method of the DC-DC converter based on power compensation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7): 44-54.
- [17] 王晨光, 皇金锋. R-L 分数阶 CISM SIDO Buck 变换器的建模与交叉影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(5): 30-37.
- WANG Chenguang, HUANG Jinfeng. Modeling and cross-regulation analysis of the CISM SIDO Buck converter based on R-L fractional definition[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 30-37.
- [18] 李臻, 蒋程, 田博文. 三电平 NPC 变换器谐波与电磁干扰噪声优化调制[J]. 西安工程大学学报, 2021, 35(5): 74-79.
- LI Zhen, JIANG Cheng, TIAN Bowen. Optimal modulation

- of harmonic and electromagnetic interference noise in three level NPC converter[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2021, 35(5): 74-79.
- [19] 孙大伟, 田蓓, 刘刚, 等. 单相 Boost APFC 的自适应占空比补偿控制方法[J]. 电力电子技术, 2022, 56(10): 137-140.
- SUN Dawei, TIAN Bei, LIU Gang, et al. Self-adaptive duty cycle compensation control method for single-phase Boost APFC[J]. Power Electronics, 2022, 56(10): 137-140.
- [20] 吕广强, 赵仲祥, 姜川, 等. 变占空比三态 Boost 功率因数校正电路研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(5): 74-81.
- LYU Guangqiang, ZHAO Zhongxiang, JIANG Chuan, et al. Study of power factor correction circuit of tristate Boost with variable duty cycle[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2022, 43(5): 74-81.
- [21] WU Qunfang, WANG Qin, XU Jialin, et al. A real-time variable turn-off current strategy for a PFC converter with voltage spike limitation and efficiency improvement[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(12): 8031-8036.
- [22] 侯辉, 李洋, 谭锋. 单相三路交错式功率因数校正技术[J]. 电力电子技术, 2022, 56(5): 109-112.
- HOU Hui, LI Yang, TAN Feng. Single-phase three-way interleaving power factor correction technology[J]. Power Electronics, 2022, 56(5): 109-112.
- [23] VALIPOUR H, MAHDAVI M, ORDONEZ M, et al. Extended range bridgeless PFC converter with high-voltage DC bus and small inductor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 157-173.
- [24] 张宇鑫, 刘雪山, 史旭. 连续模式无桥隔离型 LED 驱动电源[J]. 电力电子技术, 2022, 56(12): 120-125.
- ZHANG Yuxin, LIU Xueshan, SHI Xu. Continuous mode bridgeless isolated LED driver power[J]. Power Electronics, 2022, 56(12): 120-125.
- [25] LIU Yonglu, SUN Yao, SU Mei, et al. A single-phase PFC rectifier with wide output voltage and low-frequency ripple power decoupling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 5076-5086.
- [26] BANG T, PARK J W. Development of a ZVT-PWM buck cascaded buck - boost PFC converter of 2 kW with the widest range of input voltage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 2090-2099.
- [27] ZHAO Chenkai, WU Xinke. Accurate operating analysis of boundary mode totem-pole boost PFC converter considering the reverse recovery of mosfet [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10038-10043.
- [28] 蔡逢煌, 王群兴, 苗中磊, 等. 基于磁集成的双 Boost 无桥 PFC 变换器研究[J]. 电源学报, 2020, 18(5): 95-100.
- CAI Fenghuang, WANG Qunxing, MIAO Zhonglei, et al. Research on bridgeless dual Boost PFC converter based on integrated magnetics[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(5): 95-100.
- [29] 吴红飞, 张炎锋, 杨帆. 宽输出电压范围集成 Buck 型无桥 PFC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6655-6661.
- WU Hongfei, ZHANG Yanfeng, YANG Fan. Bridgeless power factor correction converter with integrated Buck converter for wide output voltage range applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6655-6661.
- [30] 孙凯, 袁洪奇, 孟涛, 等. 一种具有宽输出调压范围与低电压应力的单级无桥隔离型 PFC 变换器[J]. 电工技术学报, 2022, 37(8): 1991-2005.
- SUN Kai, BEN Hongqi, MENG Tao, et al. A single-stage bridgeless isolated PFC converter with wide output voltage range and low voltage stress[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(8): 1991-2005.
- [31] HUANG Long, CHEN Fayi, YAO Wenxi, et al. Flexible mode bridgeless boost PFC rectifier with high efficiency over a wide range of input voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3513-3524.
- [32] CHEN Zhengge, XU Jianping, LIU Xueshan, et al. High power factor bridgeless integrated buck-type PFC converter with wide output voltage range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 12577-12590.

作者简介:

韩丽(1978—),女,高级工程师,通信作者,主要从事智能配电网技术、输配电及用电工程工作。E-mail: 2352691742@qq.com。

张霄(1986—),男,高级工程师,主要从事智能配电网技术、变电站交直流系统工作。

孙圣豪(2004—),男,本科生,主要从事电气工程及其自动化工作。