

单相无桥功率因数校正器的分析与设计

与传统有桥单相有源功率因数校正器 (APFC) 相比, 单相无桥 APFC 节省了一只功率二极管的导通损耗, 由此提升了效率。在简要分析传统单相无桥 APFC 电路拓扑与工作原理的基础上, 基于高频倍流整流原理, 提出多种新型单相无桥 APFC 电路拓扑, 其中包括已有的 Ivo Barbi 型单相无桥 APFC, 对其中一种无环流型单相无桥 APFC 采用单周期控制 (OCC) 原理、网侧 LC 滤波器进行仿真分析和实验验证, 采用整半周轮流工作制, 无须电网电压检测, 克服了单相无桥 APFC 网压检测困难等不足之处。

渠 浩 冯瑞昀 杨喜军 唐厚君/上海交通大学电气工程系



渠 浩/硕士研究生

关键词/Keywords

功率因数校正 ·
无桥结构 ·
倍流整流 ·
整半周工作 ·
单周期控制 ·

在电路结构、控制原理和应用领域等方面, 单相有源功率因数校正器 (APFC) 得到了广泛和深入的研究。从电路结构上, 包括有桥 APFC^[1] 和无桥 APFC^[2-5] 等类型; 从控制原理上, 均采用传统双闭环控制结构, 电压外环常采用电压误差放大器和限波滤波器, 电流内环常采用 PI、PR 或单周期控制器 (OCC) 等。无桥 APFC 的主要特点是: ① 将有桥 APFC 的直流升压电感改为交流升压电感; ② 将有桥 APFC 的变换单元改为低端半控桥; ③ 两只可控功率器件在网压正、负半周交替工作, 一备一用, 可以采用同一驱动器。相比有桥 APFC, 无桥 APFC 相当于减少了一只快恢复二极管的导通损耗, 因此有利于改善传输效率。同时由于减少了一只快恢复二极管的压降, 因此有利于升压能力的调高。从电路结构上, 单相有桥 APFC 相当于 AC-DC 变换器和 DC-DC 变换器串联, 总体上为工频交流电压供电的单相 AC-DC 变换器。AC-DC 变换器还包括一种倍流整流电路^[6], 其特点是: 有足

够高频率交流电压输入, 且输出直流电压。倍流整流器利用的是电解电容通高频阻低频、电感同低频阻高频的特性。在供电电压正、负半周中, 均能实现不控整流, 属于全波整流电路。本文基于无桥 APFC 与倍流整流的电路结构和工作原理, 设计多种无桥 APFC 电路结构, 其中就包括已有的 Ivo Barbi 型单相无桥 APFC^[7], 并采用单周期控制原理^[8]、LCL 滤波电路^[9], 对其中一种无环流的无桥 APFC 进行仿真分析和实验研究。

单相 APFC 电路与单周期控制原理

1. 有桥 APFC 电路

单相有桥 APFC 电路如图 1 所示。图中, 常规二极管 $VD_1 \sim VD_4$ 构成单相不控整流桥; 升压电感 L_1 、逆导开关 S_1 和快恢复二极管 FRD_1 构成升压变换单元; L_1 为直流电感; 电解电容 E_1 用于稳压和储能; 电阻 R_1 用于获得标准正弦半波电压; 交流电容 C_1 用于旁路升压电感电流, 获得低纹波网侧电流。

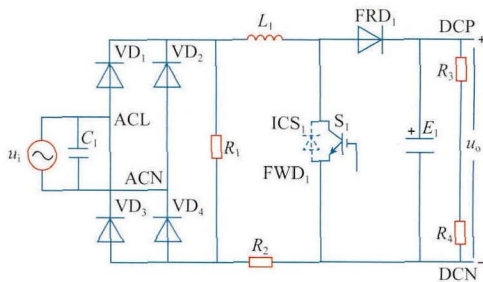


图1 单相有桥 APFC 电路

单相有桥 APFC 工作原理的实质是由于不控整流桥作用, 升压变换单元的工作不分网压正、负半周。为了稳定输出电压, 需要采用电压外环控制, 为此需

要采集输出直流电压信号。为了获得网侧单位功率因数,需要采用电流内环控制,为此需要采集升压电感电流信号和网压信号。双环控制的结果是获得一个类似到正弦波的控制函数,调制之后获得一路驱动脉冲序列。在每个开关周期中,当功率器件 ICS_1 导通时,通过不控整流桥和升压电感 L_1 将交流电源短接,使升压电感 L_1 储存能量。当功率器件 ICS_1 关断时,将全部储能或者部分储能释放到负载侧电解电容,在持续为后级电路供电情况下,获得稳定的直流电压和网侧单位功率因数。

由单相有桥APFC电路可以构成多级交错有桥APFC电路,其中两级交错有桥APFC电路如图2所示。图中, L_1 、 S_1 和 FRD_1 构成第一级升压变换单元; L_2 、 S_2 和 FRD_2 构成第二级升压变换单元。

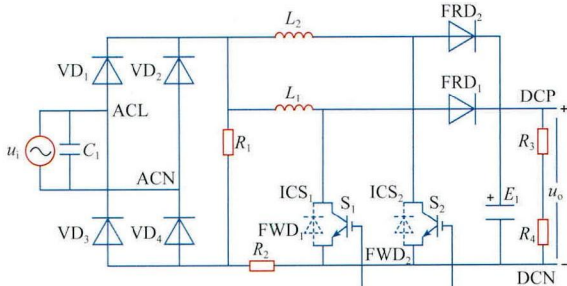
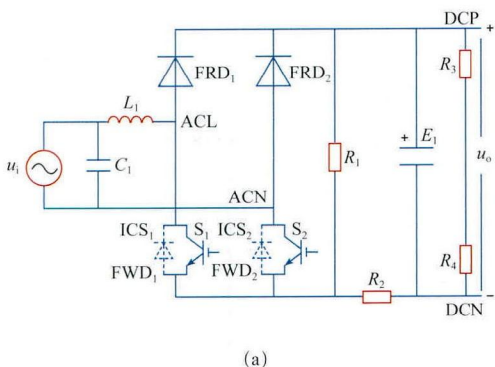


图2 单相有桥交错APFC电路

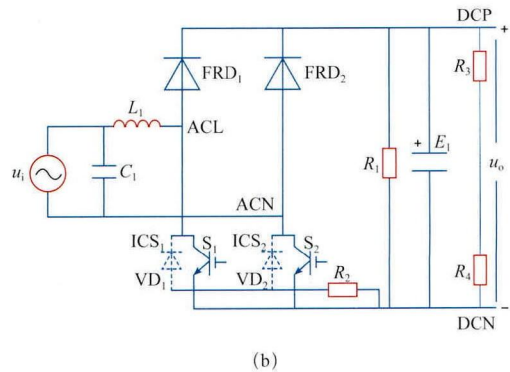
2. 无桥APFC电路

单相无桥APFC电路如图3所示。图3a中,快恢复二极管 FRD_1 与 FRD_2 、逆导器件 ICS_1 与 ICS_2 构成整流桥,被称为“无桥”的含义是没有采用完整的二极管整流桥; L_1 为交流升压电感。

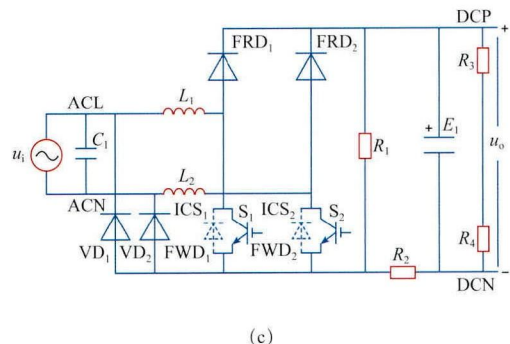
单相无桥APFC仍然沿用单相有桥APFC的工作原理,但是也有如下差别: L_1 、 FRD_1 、 S_1 和 FWD_2 构成正半周升压变换器单元, L_2 、 FRD_2 、 S_2



(a)



(b)



(c)

图3 单相无桥APFC电路

和 FWD_1 构成负半周升压变换器单元; S_1 与 S_2 可以采用同一驱动器。相比单相有桥APFC,在单相无桥APFC中不利于检测交流电压和电感电流。图3b给出了一种电路拓扑,采用分立器件,可以通过检测分流电阻电压获得电感电流信号。图3c也给出了一种电路拓扑,采用额外两只常规二极管构成续流路径。

3. 倍流整流电路

倍流整流电路如图4所示。图4a中,由于倍流整流电路的输入电压具有足够高的频率,鉴于 L_1 与 L_2 的感抗远大于 E_1 的容抗,因此电感 L_1 、电解电容 E_1 和快恢复二极管 FRD_2 构成第一级整流单元;电感 L_2 、电解电容 E_2 和快恢复二极管 FRD_1 构成第二级整流单元。图4a可以演化出图4b。当减少电感数量时,就必须采用相应的快恢复二极管代替,可以得到图4c和图4d。

4. 其他无桥APFC电路

根据单相无桥APFC电路和倍流整流电路的结构与工作原理,可以得到很多种单相无桥APFC电路,图5给出了以常规二极管共阳极接法的几种单相无桥APFC电路,其中图5b即为Ivo Barbi型

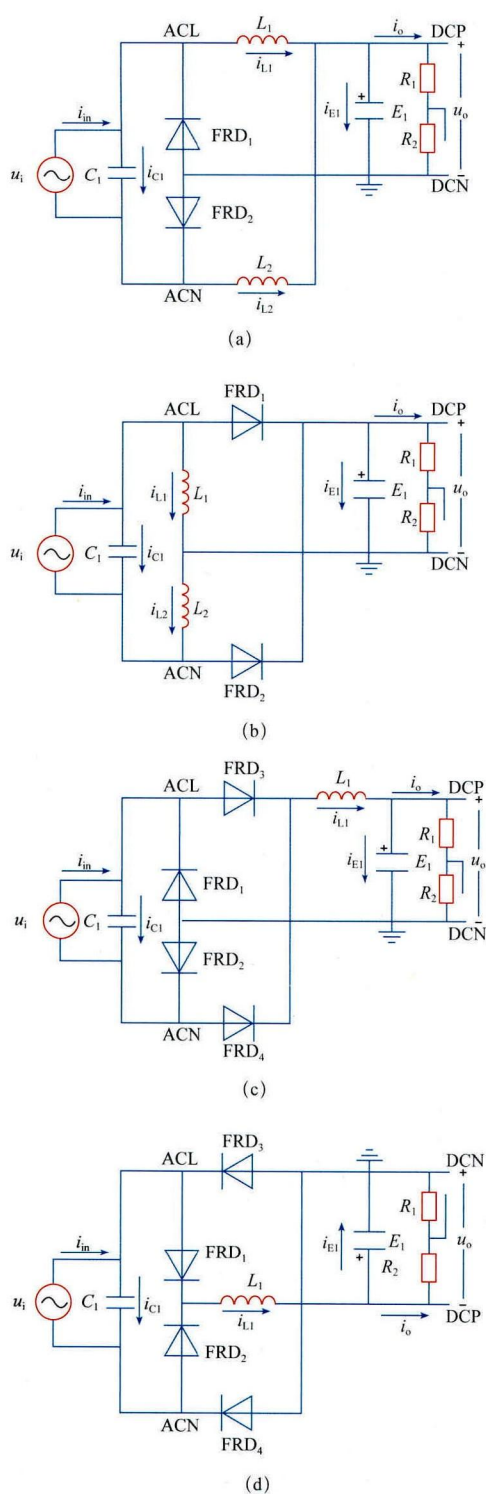


图4 倍流整流电路

单相无桥APFC。这些单相无桥APFC看似为交错APFC，但是工作原理即不一样。前者采用网压正半周交替工作原理；后者采用每个开周期中交错驱动工作原理。显然，交错APFC也可以采用无

桥APFC的工作原理。

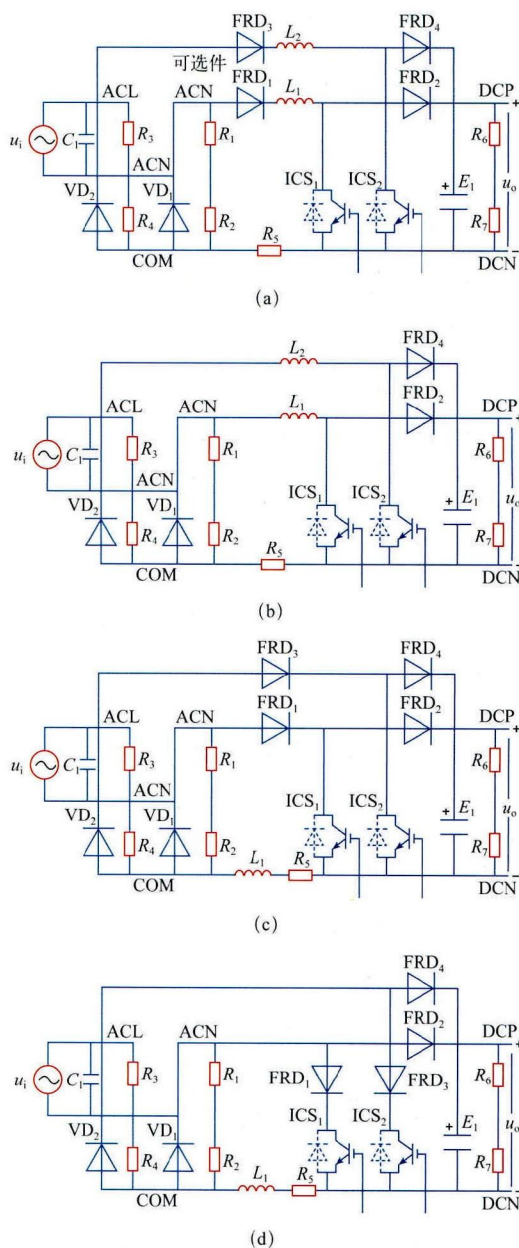


图5 单相无桥APFC电路

5. 单周期控制原理

单相APFC单周期控制的真正目的是使网侧等效阻抗为纯阻性。假设网侧等效电阻为 R_e ，网侧瞬时电压为 u_s ，电感瞬时电流为 i_{L1} ，则

$$u_i = i_l R_e \quad (1)$$

单相APFC的电压、输出电压 U_o 与占空比 d 之间的关系为

$$u_i = U_0(1 - d) \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),得

$$i_L R_e = U_o(1-d) \quad (3)$$

在式(3)中,引入电流检测电阻 R_s ,经过变换可得

$$i_L R_s = \frac{U_o R_s}{R_e}(1-d) \quad (4)$$

在式(4)中,令 $U_r = \frac{U_o R_s}{R_e}$,得

$$i_L R_s = U_r(1-d) \quad (5)$$

$$U_r d = U_r - i_L R_s \quad (6)$$

式(6)为单相APFC的单周期控制数学模型。 U_r 与 U_o 成正比,即 U_r 为输出电压采样。令

$$\begin{cases} U_1 = U_r - i_L R_s \\ U_2 = U_r d \end{cases} \quad (7)$$

根据式(7)构造方程组

$$\begin{cases} U_1 = U_r - i_{L1} R_s \\ U_2 = \frac{1}{T_s} \int_0^{dT_s} U_r dt \end{cases} \quad (8)$$

当占空比 d 满足式(8)时,可保证单相APFC获得网侧单位功率因数。

图6给出了单相无桥APFC的控制结构。

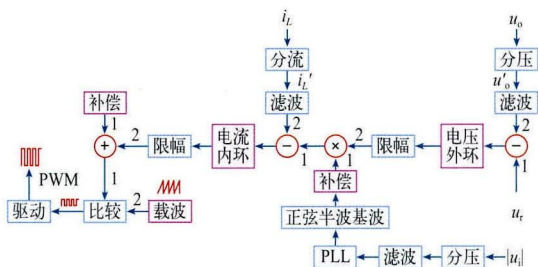


图6 单相无桥APFC控制结构

仿真分析与实验结果

1. 仿真分析

针对图5a、b采用单周期控制原理,利用Matlab/Simulink建立图7所示的仿真电路。图中主要参数有:单相交流电源AC 220 V/50 Hz;期望输出直流电压DC 385 V;负载功率2.5 kW;升压电感 L_1 与 L_2 均为1.0 mH;滤波电容 E_1 为 $4 \times 680 \mu\text{F}$;负载电阻59 Ω ;交流滤波电感0.1 mH;交流滤波电容 C_1 为2.2 μF ;考虑快速IGBT可以支持较高开关频率,设置开关频率50 kHz。开关频率高时, L_1 、 L_2 及 C_1 的取值均可以减少。

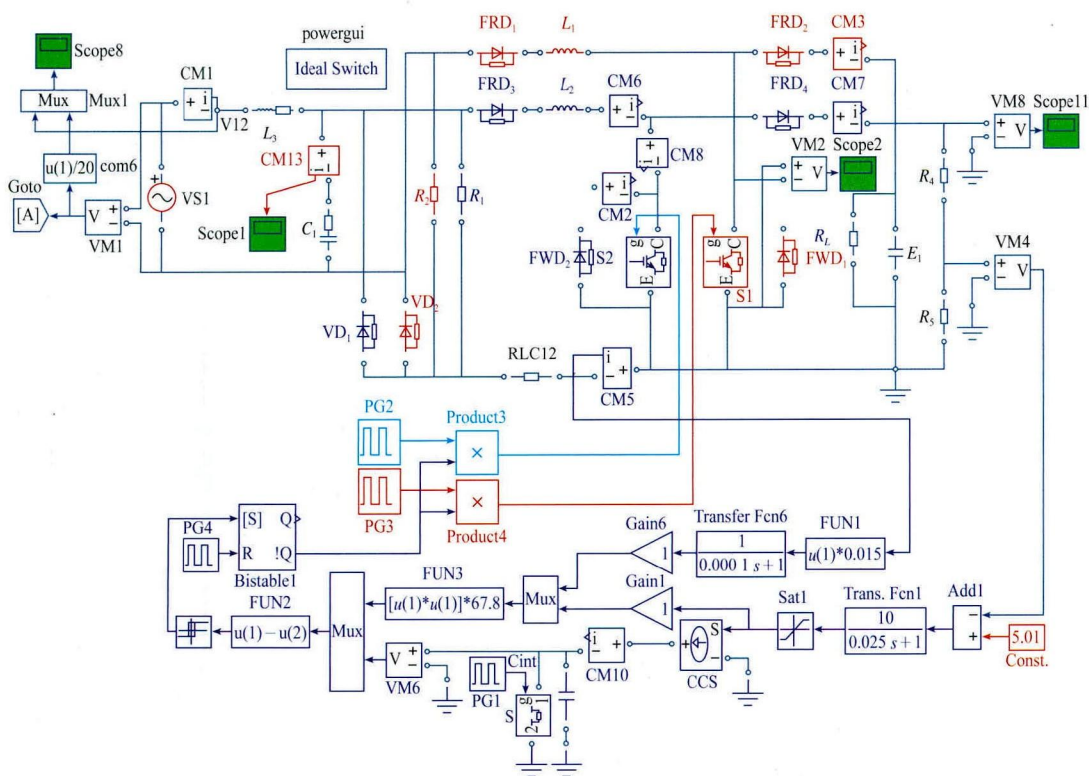
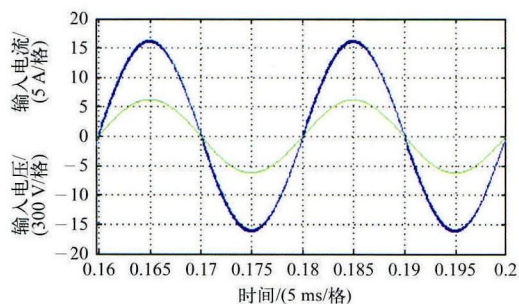


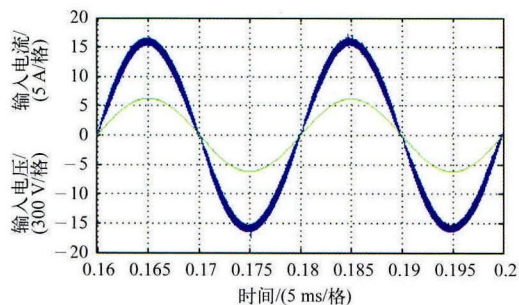
图7 单相无桥APFC仿真电路

仿真时采用Continuous仿真类型和理想开关,通过调节公式FUN3中所乘的常数和负载电阻取值,改变期望输出电压值和输出功率。仿真时,可以发现图5a的升压能力低于图5b。

有、无交流滤波电感时,输入电压与输入电流波形如图8所示。有、无串联快恢复二极管FRD₁和FRD₃时,电感 L_2 电流仿真波形如图9所示。有、

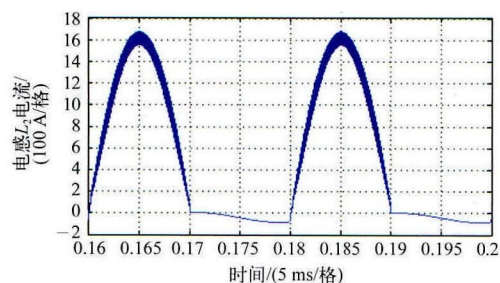


(a) 具有交流滤波电感

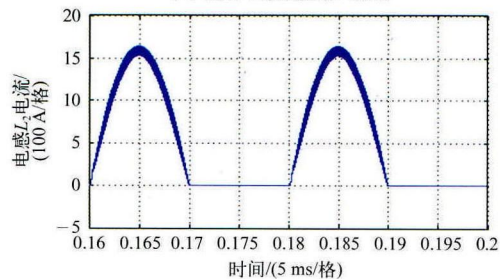


(b) 没有交流滤波电感

图8 输入电压与输入电流仿真波形



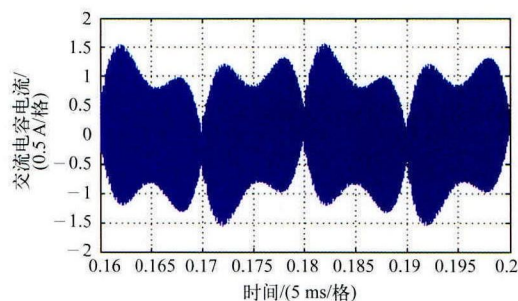
(a) 具有串联快恢复二极管



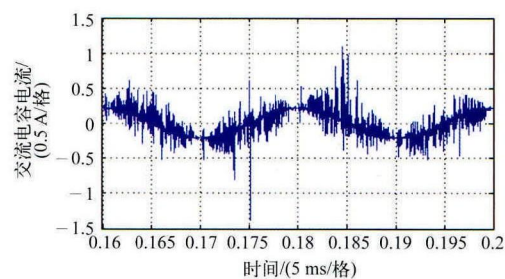
(b) 没有串联快恢复二极管

图9 电感 L_2 电流仿真波形

无交流滤波电感时,交流电容 C_1 电流仿真波形如图10所示。输出直流电压波形如图11所示。载波与控制信号仿真波形如图12所示。



(a) 具有交流滤波电感



(b) 没有交流滤波电感

图10 交流滤波电容 C_1 电流仿真波形

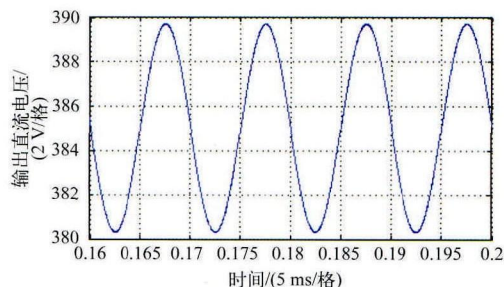


图11 输出电压仿真波形

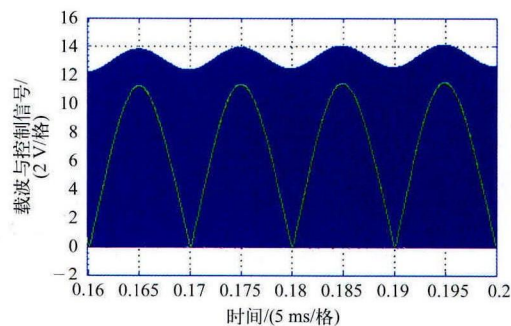


图12 载波与控制信号仿真波形

可见,采用单周期控制时单相无桥APFC功率因数校正效果良好,达到设计的目的。采用交流滤波电感时,网侧电流更加光滑。

2. 实验结果

经过改造现有单相两级交错APFC功率模块整流器部分接线以及控制程序,很容易实现如图5b所示的单相无桥APFC实验平台。当进行实验时,负载为一组由断路器切换的功率电阻,控制算法仍然采用误差放大器电压外环、PI调节器电流内环。控制器为 μ PDF1213,开关频率为35 kHz,额定电流下电感值为350 μ H,其他实验条件与仿真条件相同。斩波IGTB为快速RJH60F7ADPK: 50 A/100 $^{\circ}$ C/600 V;反向快恢复二极管FRD采用CSD20060D: 20 A/150 $^{\circ}$ C/600 V;单相二极管整流桥选用扁桥D50XB80: 50 A/100 $^{\circ}$ C/600 V,没有采用交流滤波电感。当输出功率为1.5 kW时,网侧电压与网侧电流实测波形如图13所示。可见,功率因数校正效果良好,输出直流电压纹波峰峰值较低。

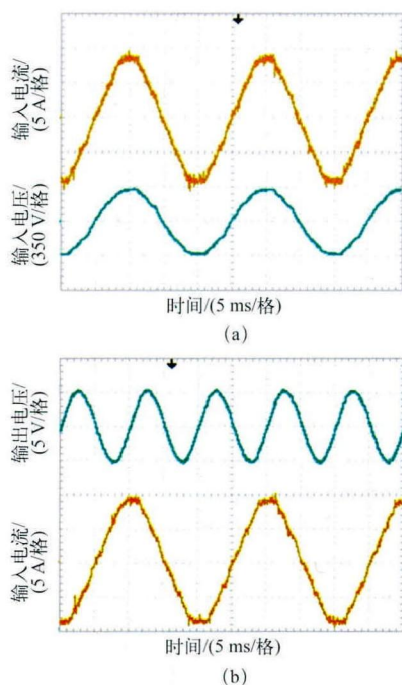


图13 网侧电压、网侧电流与直流电压实测波形

结束语

单相无桥APFC是一类单相APFC,文中基于传统单相无桥APFC拓扑与倍流整流器设计了多种单相无桥APFC拓扑,并采用单周期控制原理对其

中一种有环流和无环流类型进行了仿真分析,反映了这种单相无桥APFC的可行性。仿真还发现,采用输入交流滤波电容可以进一步降低网侧电流纹波,相当于增加了电网感性阻抗,与后级滤波电容和升压电感构成LCL滤波器。

参考文献

- [1] Wanfeng Zhang, Guang Feng, Yan-fei Liu, et al. A digital power factor correction (PFC) control strategy optimized for DSP [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (6): 1474-1485.
- [2] 王晗. 大功率单相数字APFC的研究与实现 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [3] Daniel M Mitchell. AC-DC converter having an improved power factor: U.S., 4, 412, 277 [P]. Rockwell Corp, 1983.
- [4] Lu B, Brown R, Soldano M. Bridgeless PFC implementation using one cycle control technique [C]. IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC), 2005: 812-817.
- [5] Srinivasan R, Oruganti R. A unity power factor converter using half-bridge boost topology [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13 (3): 487-500.
- [6] 刘殿勋, 吴正国, 李玉梅, 等. 采用倍流整流移相全桥的ZVZCS直流变换器研究 [J]. 通信电源技术, 2010, 27 (5): 1-5.
- [7] Alexandre Ferrari de Souza, Ivo Barbi. A new ZVS semi-resonant high power factor rectifier with reduced conduction losses [C]. IEEE PESC', 1996: 203-209.
- [8] Smedley K, Slobodan Cuk. Dynamics of one-cycle controlled Cuk converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10 (6): 634-639.
- [9] 林壮, 李宾, 姚文熙, 等. 基于LCL滤波的Vienna整流器占空比前馈控制 [J]. 电力电子技术, 2013 (7): 67-69.

(收稿日期: 2014-04-21) **EA**