

三相单开关ZVZCS变换器的应用研究

针对高效、高功率因数和中大功率开关电源的要求,结合单相PFC控制技术和软开关技术,提出了一种三相单开关ZVZCS变换器,分析了电流连续模式下的工作原理,采用了平均电流控制来控制其输出电压,利用电感和电容的缓冲电路来实现功率管的软开关。设计了1台6 kW的样机,实验结果表明该变换器具有电路结构简单、开关器件少、变换效率高且控制简单等优点,非常适用于中大功率场合。

王 锐 尹 强 任晓丹 于 越/许继集团许继电源有限公司

0 引言

随着电力电子器件的广泛应用,开关电源也得到了飞速发展,在中大功率场合,一般使用三相电网作为输入。相对于无源不可控整流的电流谐波含量高、功率因数较低等问题,以及三相多开关PFC变换器成本高、控制复杂等缺点^[1-2],三相单开关Boost PFC变换器可简化硬件电路,且控制灵活、成本较低^[2-3]。

目前文献中研究的三相单开关Boost PFC变换器,在三相进线端必须分别加入电感,工作模式通常为电感电流断续模式(DCM)^[1-4]。同时在小功率电源中,一般采用单相有源功率因数校正(APFC)电路,其在电路拓扑和控制技术方面发展都比较成熟,已经出现了各种商业化的专用控制芯片^[1-4]。此外,无源元件构成的无源无损缓冲电路可以改善器件的开关环境,能够实现功率管的无损开通与关断,以提高变换器的变换效率^[5-6]。

本文提出了一种三相单开关ZVZCS变换器,其只需采用一个电感,工作在电流连续模式(CCM)下,采用平均电

流控制来控制其输出电压, 利用缓冲电路中电感和电容的谐振来实现功率管的软开关。设计了1台6 kW的样机, 实验结果表明该变换器具有电路结构简单、开关器件少、变换效率高及控制简单等优点, 非常适用于中大功率场合。

1 工作原理

图1为三相单开关ZVZCS变换器的电路原理框图^[4-7]。

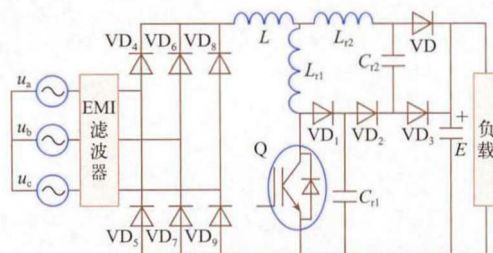


图1 三相单开关ZVZCS变换器的电路原理框图

1) 当Q导通瞬间, VD支路的电流开始准备向功率管Q转移, 由于 L_{r1} 的存在, 使得流过Q的电流不能突变, 只能从零开始上升, 从而实现了功率管的零电流开通, 即ZCS过程。接着 i_{Lr1} 开始线性下降, 其下降斜率由 L_{r2} 决定, i_Q 开始线性上升, 其上升斜率由 L_{r1} 决定。

2) 当 i_{L_n} 的电流为零后, VD关断, 同时由于 L_{r2} 的存在, VD的反向恢复电流受到控制, 反向恢复损耗降低; 接着 C_{r1} 开始通过VD₂、 C_{r2} 、 L_{r1} 、 L_{r2} 和Q回路, 将能量转移到 C_{r2} 中; 此过程中, $u_{C_{r2}}$ 开始从零上升, i_{L_n} 开始从零反向增大。

3) 当 C_{H} 的能量为零时, 则为功率管Q的零电压关断创造了条件, 同时 $i_{L_{\text{r}}}$ 将接近其反向最大值; 接着 VD_1 开始导通, L_{r} 和



王 锐/助理工程师

关键词/Keywords

三相单开关·

ZVZCS •

电流连续模式 ·

平均电流 ·

无源无损 ·

L_{r2} 通过 VD_1 、 VD_2 和 C_{r2} 回路,将能量转移到 C_{r2} 中;此过程中, $u_{C_{r1}}$ 继续上升,直到其达到最大值。

4) 当 $u_{C_{r1}}$ 达到最大值后,无源无损缓冲电路不再参与电路工作过程,此时为正常PWM工作方式;此过程中, C_{r1} 的能量全部转移到了 C_{r2} 中, $u_{C_{r1}}$ 为零, $u_{C_{r2}}$ 为最大值。

5) 当Q关断瞬间,由于 C_{r1} 的存在,且 $u_{C_{r1}}$ 为零,使得Q两端的电压不能突变,只能从零开始上升,从而实现了功率管的零电压关断,即ZVS过程;接着Q的漏源极电压随 $u_{C_{r1}}$ 一起上升,直到达到输出电压;此外,由于 VD_1 、 VD_2 和 VD_3 的存在,保证了Q的关断电压不超过输出电压;同时, C_{r2} 的能量回馈到输出负载端,其回路为输入电源、 L 、 L_{r2} 、 C_{r2} 、 VD_3 和输出端负载,此过程中, $u_{C_{r1}}$ 开始减小, $i_{L_{r2}}$ 开始正上升。

6) 当能量回馈结束, $u_{C_{r1}}$ 为零, $u_{C_{r2}}$ 等于输出电压,二极管VD开始导通,无源无损缓冲电路不再参与电路工作过程,此时为正常PWM工作方式。

在该电路中, VD_1 、 VD_2 、 VD_3 、 L_{r1} 、 C_{r1} 、 L_{r2} 、 C_{r2} 与Boost基本电路中的 L 、 Q 、 VD 共同作用实现ZVZCS功能。该电路控制原则为:三相整流桥后的电压为每周期6个波头,通过控制使通过电感 L 的电流也是每周期6个波头。该电路所校正的对象为整流桥之后的输入电压 u_{in} 、输入电流 i_{in} ,即校正的目的是令输入电流 i_{in} 跟随输入电压 u_{in} 波形。这样,输入电源每相的电流波形虽然不能逼近正弦波,但是功率因数可以得到很大的提高,谐波含量减小。

假设三相交流输入电压为

$$\begin{cases} u_a = \sqrt{2}U \sin(\omega t) \\ u_b = \sqrt{2}U \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u_c = \sqrt{2}U \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

同时假设经校正后的 i_{in} 完全跟随 u_{in} ,则有 $u_{in} = i_{in}R_{in}$ 。

则可以得到理想情况下三相单开关主电路能达到的最高功率因数为^[4]

$$\lambda_a = \frac{(U^2/R_{in})[3\sqrt{3}/(2\pi)+1]}{(U^2/R_{in})\sqrt{2+3\sqrt{3}/\pi}} = 0.956 \quad (2)$$

2 控制策略

图2为三相单开关ZVZCS变换器的控制框图,其工作在CCM模式下,采用平均电流控制方式。其由电流环、电压环、非线性增益、斜率发生器和PWM逻辑驱动器组成。

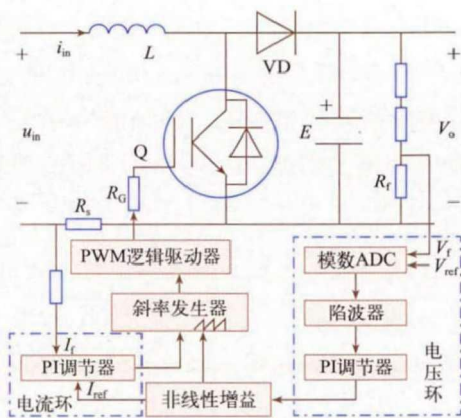


图2 三相单开关ZVZCS变换器的控制框图

三相单开关ZVZCS变换器的输出电压 V_o 经采样网络分压后得到的 V_f 进入电压环,具体为 V_f 和参考电压 V_{ref} (2.5 V)经过模数ADC转换后送入陷波器,陷波器能够消除 V_f 中的纹波,再进入电压PI调节器,得到电流环控制的模拟电压,作为电流内环的给定;变换器的电流经采样网络得到的电感电流值 I_f 进入电流环,电压环输出的模拟电压通过非线性增益环节获得 I_{ref} ,其能控制调节电感电流的幅值,两者输出得到比例于电感电流的电压值;电流环输出得到的平均电感电流波形与内部斜率发生器产生的斜坡进行比较,其输出信号通过PWM逻辑驱动器驱动功率管Q的开通与关断,通过调节占空比的大小,使 i_{in} 跟随 u_{in} 波形,从而达到PFC的目的。其中,电压外环强调准确性和快速性,电流内环强调跟随性。

3 实验

为验证三相单开关ZVZCS变换器的有效性,设计了一台6 kW样机。变换器参数:三相交流输入AC 380 V-15%~20%, 50/60 Hz;功率开关管Q为IKW40N120H3,功率二极管为APT30DQ100KG;升压电感为900 μ H;输出电解电容为560 μ F;固

定开关频率为45 kHz。测试仪器：数字示波器为DPO3014，功率测试仪为WT1800，数字万用表为Agilent34401A，万用表为FLUKE15B，柔性电流探头CWT6B/4/200M/2。

图3为最大输出功率时各参数的波形，其中，CH3为整流桥输出电压 u_{in} ；CH4为变换器输出电压 V_o ；CH1为电感电流 i_{in} 。由图3可知，变换器输出电压 V_o 稳定在DC 750 V左右，电感电流 i_{in} 能很好地跟踪整流桥输出电压 u_{in} ，同时都为6个波头，减小了输入侧电流谐波，从而提高了输入端的功率因数。

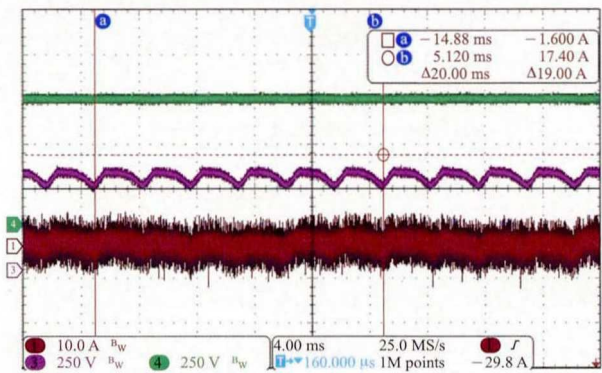
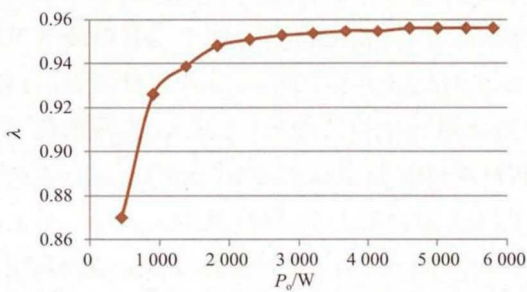


图3 整流桥输出电压、变换器输出电压和电感电流的波形

输出功率与功率因数对应的关系图如图4所示。从图4a中可以看出30%负载以上的功率因



(a) 对应关系曲线图

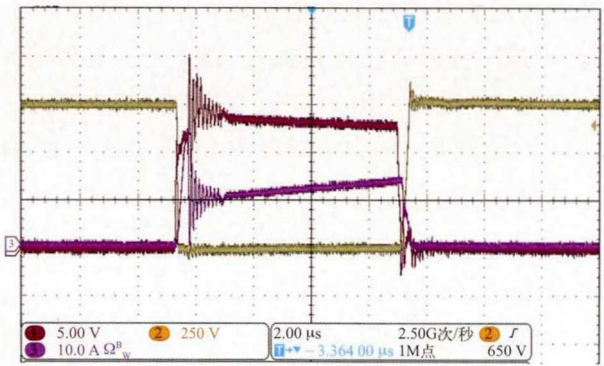
	Element 4	Element 5	Element 6	Σ A (3P4W)
U_{rms} [V]	196.38	199.37	198.55	198.10
I_{rms} [A]	9.252	9.260	9.276	9.262
P [W]	1.735 k	1.765 k	1.760 k	5.260 k
λ []	0.955 0	0.956 0	0.955 5	0.955 5
S [V·A]	1.817 k	1.846 k	1.842 k	5.505 k

(b) WT1800显示最高功率因数时数据

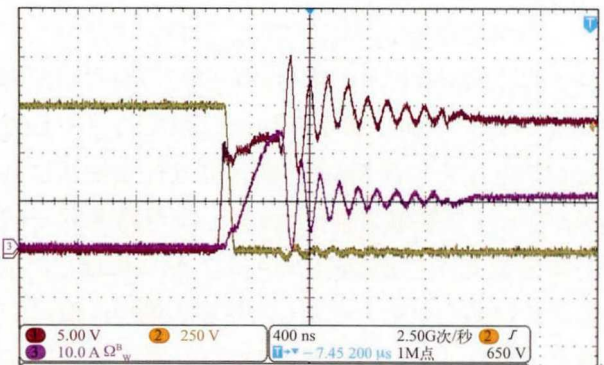
图4 输出功率与功率因数对应关系图

数达到0.94，图4b中显示最高功率因数可以达到0.956。

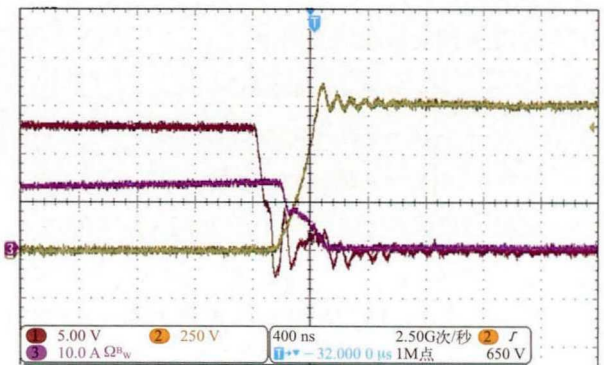
图5为功率管Q的 V_{GS} 、 V_{DS} 和 i_D 的波形。其中，CH1为驱动 V_{GS} ；CH2为漏源极电压 V_{DS} ；CH3为漏极电流 i_D 。由波形图可知，开通时， i_D 从零开始上升，从而实现了功率管的ZCS零电流开通，如图5b所示；关断时， V_{DS} 从零开始上升，从而实现了功率管的ZVS零电压关断，如图5c所示。



(a) 功率管Q的波形



(b) 开通波形



(c) 关断波形

图5 功率管Q的 V_{GS} 、 V_{DS} 和 i_D 的波形

输出功率与变换效率对应的关系图如图6所示。从图6中可以看到在50%~60%负载之间,系统变换效率达到最大且为98.45%,20%负载及以上的系统效率都在97%以上。

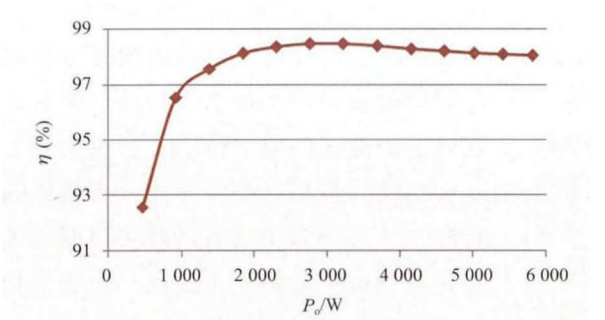
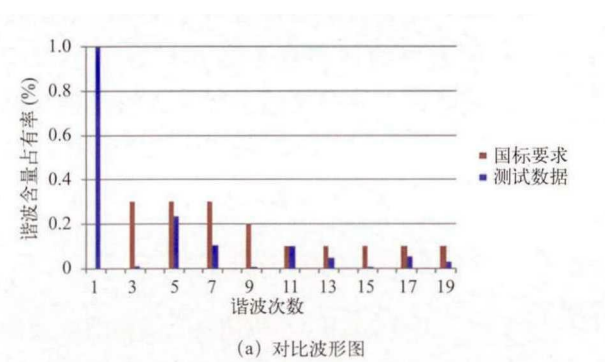


图6 输出功率与变换效率对应图形

谐波含量占有率的图形如图7所示。同时,以国标GB 17625.1—2012和GB/Z 17625.6—2003的规定,或者也可以按照各次谐波电流含有率不大于30%的规定,作为标准参考数据;将本变换器



(a) 对比波形图

& change items		Order	U _i [V]	h _{if} [%]	Order	I _i [A]	h _{if} [%]
f _{PLL1:14}		Total	197.63	0.000	Total	7.935	0.000
50.005 Hz		dc	0.00	0.000	dc	-0.039	-0.515
U _{rms4}		1	197.49	100.000	1	7.615	100.000
I _{rms4}		2	0.08	0.043	2	0.003	0.039
P ₄		3	0.89	0.453	3	0.073	0.964
S ₄		4	0.07	0.036	4	0.003	0.044
Q ₄		5	3.70	1.874	5	1.805	23.699
λ ₄		6	0.06	0.033	6	0.005	0.061
φ ₄		7	2.75	1.393	7	0.802	10.528
U _{thd4}		8	0.02	0.011	8	0.006	0.082
I _{thd4}		9	0.66	0.334	9	0.056	0.736
P _{thd4}		10	0.05	0.028	10	0.006	0.077
I _{thf4}		11	3.59	1.820	11	0.749	9.842
U _{thf4}		12	0.06	0.028	12	0.007	0.087
I _{thf4}		13	1.44	0.729	13	0.355	4.657
U _{thf4}		14	0.03	0.016	14	0.005	0.067
I _{thf4}		15	0.51	0.259	15	0.047	0.614
U _{thf4}		16	0.04	0.019	16	0.004	0.059
I _{thf4}		17	3.86	1.953	17	0.417	5.479
U _{thf4}		18	0.06	0.028	18	0.013	0.170
I _{thf4}		19	1.28	0.650	19	0.245	3.218
U _{thf4}		20	0.03	0.015	20	0.007	0.098

(b) WT1800显示的数据

图7 谐波含量占有率图形

的测试数据如图7b所示与标准参考数据比较,得到对应的对比波形图如图7a所示。从图7a中可以看到,测试数据均低于国标要求。

4 结束语

提出一种三相单开关ZVZCS变换器,该变换器采用平均电流方式控制,工作在CCM下,利用无源无损缓冲实现了功率管的软开关。设计了1台6 kW的样机,实验结果表明该变换器可以实现电感电流跟踪整流桥的输出电压波形,从而提高输入端的功率因数,同时变换器的输出电压能稳定在DC 750 V左右,功率因数可以达到0.956,变换效率较高可以达到98.45%,且输入电流各次谐波含有率均低于国家标准要求,同时还具有电路结构简单、开关器件少及控制简单等优点,非常适用于中大功率场合。

参考文献

[1] 于相旭, 候振程, 叶一麟, 等. 三相单开关Boost型功率因数校正器的简化大信号模型 [J]. 电工技术学报, 2001, 16 (2): 61-64.

[2] 姚凯, 阮新波, 邹池, 等. 高功率因数三相单管Boost PFC变换器 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (6): 97-105.

[3] 武志贤, 蔡丽娟, 汤西元. 三相高功率因数整流器的研究现状及展望 [J]. 电气传动, 2005, 35 (2): 3-6.

[4] 孙强, 赵子龙, 陈桂涛, 等. 基于CCM的Boost PFC变换器的研究 [J]. 电力电子技术, 2014, 48 (4): 55-57.

[5] 张厚升, 赵艳雷. 新型无源无损单周期控制的高功率因数整流器 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41 (6): 2246-2251.

[6] 伍瑶, 张兴, 周小义, 等. 适用于PWM DC/DC变换器的无源无损缓冲电路 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2006, 29 (12): 1601-1604.

[7] 房绪鹏, 许伟. 一种基于准Z源的DC-DC变换器 [J]. 电气工程学报, 2016, 11 (12): 1-7.

(收稿日期: 2016-07-20) EA