

一种新型单相逆变电源的仿真研究

苏丹柳¹ 谢少军²

¹⁾ 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016 ²⁾ 南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016

¹⁾ Email: summersdl@sina.com ²⁾ Email: eeac@nuaa.edu.cn

摘要 本文研究了一种新型单相逆变电源方案, 这种逆变电源采用级联型逆变器, 级联逆变器所需要的独立直流电源采用直流变压器, 级联逆变器采用多环控制方案来实现输出电压的稳压。给出了这种单相逆变电源的参数设计原则, 并对其进行了仿真研究, 得出这种单相逆变电源能够输出稳定优良的波形, 同时具有良好的外特性、短路限流能力和动态特性。

关键词 单相逆变电源; 级联逆变器; 直流变压器; 多环控制方案

1. 引言

为实现单相逆变器的模板化和高效率, 文献[1]提出了一种级联型单相逆变器方案, 图 1 所示为三相 115V/400Hz 输入, 单相 115V/400Hz 输出模板化逆变器的原理框图。该逆变器采用四单元级联方案。级联逆变器将多个逆变桥的两个输出端首尾顺次连接输出功率, 无须输出低频变压器, 直接串联输出功率, 每个桥的直流电源相互电气隔离, 前级独立的直流变换器为对应的逆变桥提供功率。输出相同的交流电压, 级联的逆变桥所要求的直流输入电压是传统单个逆变桥的 $1/N$ (N 为级联的逆变桥的个数), 对应的功率管的电压应力会大幅减低^[3]。

逆变器的每个桥的直流电源完全相等, 目的是各个桥以及前级的直流电源所承担的功率完全一致, 各个桥的连接次序和控制信号可以互换, 而且可以采用规格一致的电路板实现逆变器的模板化。

由于级联逆变器采用低压功率场效应管和低开关频率, 具有很高的效率, 因此该单相逆变器的效率主要取决于直流变换环节^[2]。为了一步提高效率, 简化结构, 本文提出了一种新的单相逆变电源方案, 后级仍采用级联型逆变器, 但是级联逆变器所需要的独立直流电源采用直流变压器, 直流变压器具有电路结构和控制简单的特点, 同时容易实现软开关^[5]。本文还对逆变器的闭环控制方案进行了改进, 采取两个电压环和一个电流环相结合的多环控制方法来实现输出电压的稳压, 以兼顾稳态和动态性能。

2. 新型单相逆变电源的系统构成

新型单相逆变电源的总体系统构成与图 1 相同, 只是其中的 DC/DC 变换环节采用直流变压器。当输入为 $270V \pm 10\%$ 时, 直流变压器可以采用半桥电路。

2.1 半桥软开关直流变压器

2.1.1 工作原理分析

半桥软开关直流变压器电路拓扑如图 2 所示, 副边采用的是双半波整流方式, 输出只用电容滤波。 S_1 和 S_2 为开关管, C_1 和 C_2 为管子的寄生电容, 开关管 S_1 和 S_2 以接近 50% 的占空比互补开关。 L_r 为谐振电感, 一般利用变压器的漏感作为谐振电感, C_b 为隔直电容。该变换器在一个周期中有 4 个工作模态, 电路的主要波形如图 3 所示。从工作波形上可以看出, 功率管 S_1 和 S_2 可以实现零电压开关。

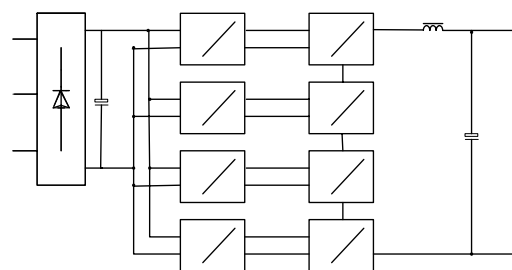


图1模板化逆变器原理框图

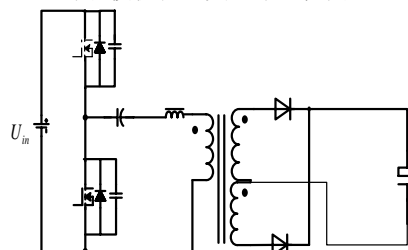


图2半桥软开关直流变压器

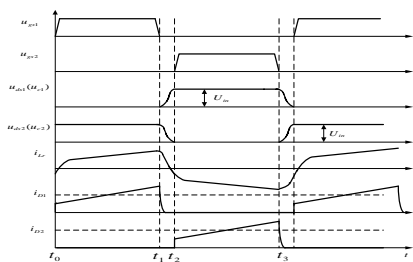


图3 变换器主要波形图

2.1.2 软开关实现的条件

1) 能量要求

电路要实现软开关, 需要靠变压器中漏感(或串联电感)存储的能量对开关管中寄生电容进行充放电, 以使当开关管开通时, 其电容电压已下降至零。实际上, 还应考虑输出整流二极管寄生电容的影响, 因为当原边发生谐振时, 传递到副边的能量也给整流二极管的寄生电容进行了充放电, 因此:

$$L_r \geq \frac{2C_d U_o^2 + 2n^2 C_s U_{in}^2}{n^2 I_o^2} \quad (1)$$

由(1)式可以看出, 软开关的实现与负载有关, 若要求实现软开关的负载范围宽, 则 L_r 的值应取较大值。但 L_r 的增大会使变压器外特性变软而且电感本身的体积会增大, 因此实际应折衷考虑, 选取合适的 L_r 值保证某一负载范围内实现软开关^[5]。

2) 死区时间要求

电容的充放电需要一定的时间, 死区时间一般可取定为最大负载时电容电压刚好下降为零所需时间。

2.2 级联逆变器的控制

2.2.1 载波移相 SPWM 控制技术

四个逆变桥都采用相同的正弦脉宽调制 (SPWM) 控制方案(如图4), 四个桥的载波三角波相互之间相移一定的角度 α 。然后将得到的四个相移 SPWM 波形通过直接串联输出、滤波。

每个桥均采用倍频 SPWM 调制方式, 即用两个频率、幅值相同、相位相反的正弦波和三角波交截产生 SPWM 控制信号, 分别加在每个桥的上桥臂, 使得两个桥臂输出电压为一个三阶 SPWM 脉冲波形, 且脉冲频率为三角波频率的两倍。级联逆变器的输出 SPWM 波的脉动频率为三角波频率的 $2N$ 倍, 输出的波形谐波含量大大降低。

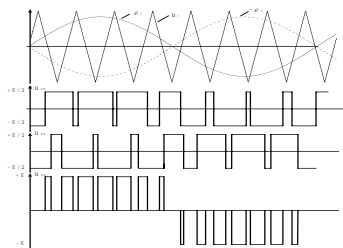


图4 倍频 SPWM 调制示意图

2.2.2 级联逆变器的闭环控制策略

单相级联逆变器的控制采用电压有效值反馈、电压瞬时值反馈和电感电流瞬时值反馈的三环控制技术。系统的控制框图如图5所示, 输出电压经整流滤波, 得到与输出电压有效值成正比的反馈信号, 电压有效值反馈与电压给定相比较, 得到的误差信号经过调节与基准正弦信号相乘, 作为电压瞬时值反馈的给定信号, 比较后产生的误差信号再经过 PI 调节和限幅后作为电流给定信号, 电流给定和电感电流反馈比较的误差信号经电流调节器放大后和多路载波三角波比较产生多路 SPWM 开关信号。其中电压有效值反馈可以消除静差, 电压瞬时值反馈提高系统的动态响应, 电流控制内环可以使系统稳定性大大提高, 且由于电感电流内环作用, 使系统具有自然限流保护的功能。

3. 参数设计原则

单相逆变电源的参数设计主要分为两个部分: 前级直流变压器的参数设计和级联逆变器的闭环控制参数的设计。

3.1 直流变压器参数设计

逆变器对前级直流环节是一个脉动负载, 直流变压器的输出是在一定范围内波动的 DC 输出, 要保证在重载和低输入时逆变器不进入过调制, 因此存在一个直流变压器变比的优化问题。变比过大, 输出电压过小, 会导致重载时逆变器进入过调制, 波形产生畸变; 变比过小, 输出电压过大, 会使直流电压利用率降低, 同时会使逆变器功率管耐压增加, 不利于器件选取。因此应该折衷考虑, 在满足重载和低输入时逆变器不进入过调制的前提下将直流变压器变比尽量取大。同时适当地增加滤波电容的容值也可以降低输出电压的脉动分量, 从而可以进一步提高变比, 提高直流电压利用率。

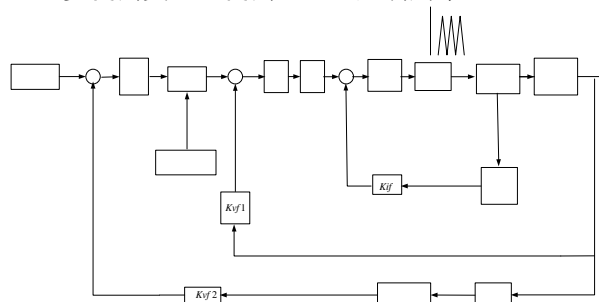


图5 系统闭环控制框图

3.2 逆变器闭环控制参数设计

影响逆变器性能的主要参数有电压有效值反馈电路的滤波参数、电压有效值环的 PI 参数、电压瞬时值环的 PI 参数、电流内环的反馈系数和前向通道上的比例系数。

由于闭环控制器的参数较多，在设计参数时为了尽量避免相互影响，应从内向外设计，先确定电流内环的参数，然后设计电压瞬时值环的参数，最后确定电压有效值环的参数。

电流内环设计的目的是使被控制量 i_L 能很好的跟随电流给定信号 i_G ，并对电流内环限流，使逆变器在输出短路时限制最大输出电流^[4]。电流环采用一个比例环节即可，比例系数的确定以满足内环动态性能最优为目的。

电压瞬时值反馈环的调节器采用PI调节器，适度增加P参数可以使系统更快地进入稳态。电压有效值采用PI调节器时，输出存在2倍输出频率的脉动分量，使得电压瞬时值环的给定信号畸变，从而使得输出电压波形畸变。虽然可以在检测回路加入带阻滤波器，滤除检测回路的脉动分量，但将引入较大的延时，影响系统动态特性，因此电压有效值反馈环的调节器不采用PI调节，而采用I调节。主要靠积分调节器得到平滑的有效值，消除系统静差。为提高系统动态响应，检测回路时间常数应取较小值。

4. 仿真研究

采用MATLAB软件对前面提出的单相逆变电源方案进行了仿真研究。

前级半桥直流变压器主要仿真参数设置如下：输入电压 $U_{in} = 240 \sim 300V$ ； $P_o = 1.5kW$ ；开关频率 $f = 100kHz$ ；变压器变比为 2:1；谐振电感 $L_r = 3\mu H$ ；开关管寄生电容 $C_s = 1200pF$ ；隔直电容 $C_b = 2.4\mu F$ ；死区时间为 $0.4\mu s$ 。

级联逆变器的主要仿真参数为：三角载波频率为 6kHz。控制电路部分经过仿真得到一组较为合适的参数：滤波环节取 $\frac{1}{0.001s+1}$ ，电压有效值环的积分调节时间常数为 0.03s，电压瞬时值环的比例放大系数为 8，积分调节时间常数为 0.1s，电感电流瞬时值环反馈系数为 0.02，电流调节器放大系数为 2.3。图 6 (a-h) 为采用上述参数的 6kVA 逆变器的仿真波形和半桥直流变压器的输出波形。表 1 是 240V 输入时的仿真数据，其中 U_{dc} 为直流变压器输出电压平均值， U_{dcmax} 为直流变压器输出电压最大值， U_{dcmin} 为直流变压器输出电压最小值。 U_{ac} 为逆变器输出电压有效值。

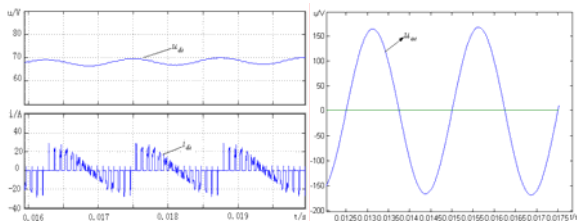


图 a 空载时工作波形

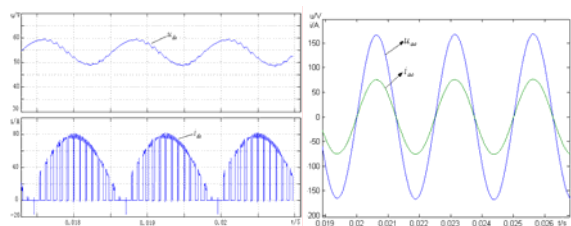


图 b 阻性满载时工作波形

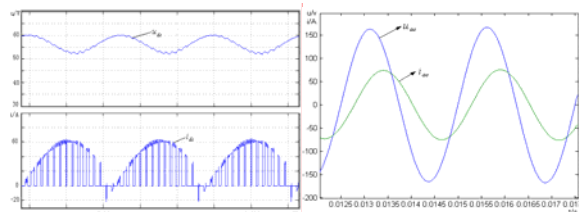


图 c 感性负载工作波形 (6VA, cos φ = 0.75)

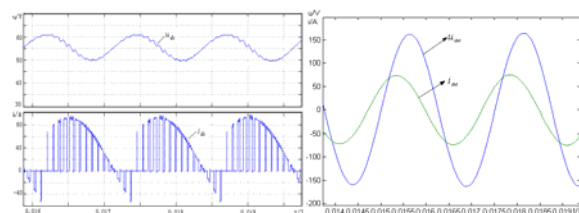


图 d 容性负载时工作波形 (6VA, cos φ = 0.75)

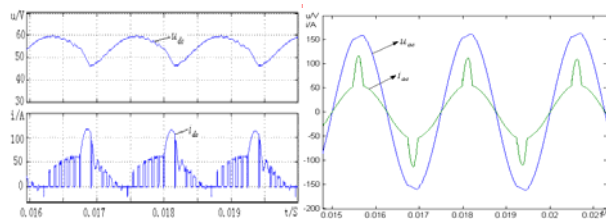


图 e 4. 5kVA 阻性+1.5kVA 整流负载时工作波形

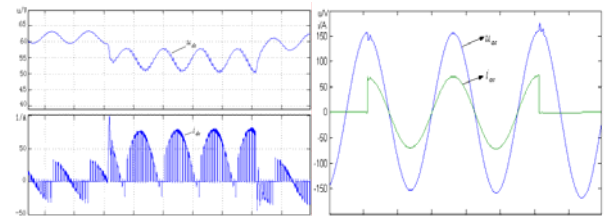


图 f 突加突卸阻性满载时工作波形

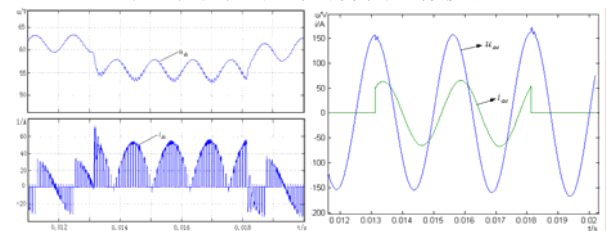


图 g 突加突卸感性负载时工作波形 (6VA, cos φ = 0.75)

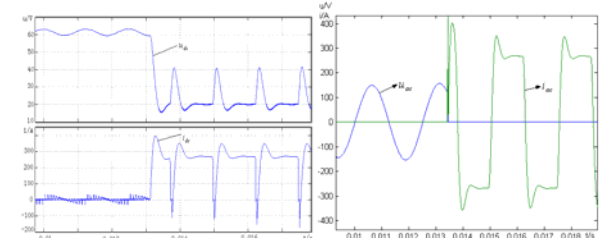


图 h 负载短路时工作波形

表 1 各种负载下直流变压器和逆变器输出电压数据 (直流输入 240V)

负载	$\overline{U_{dc}}$ (V)	$U_{dc \max}$ (V)	$U_{dc \min}$ (V)	U_{ac} (V)	THD
空载	68.46	69.8	67.1	116.48	0.45%
R (6kW)	54.26	59.2	48.6	115.96	0.26%
RL (6kVA, $\cos \varphi = 0.75$)	56.32	60.0	51.9	116.15	0.33%
RC (6kVA, $\cos \varphi = 0.75$)	55.44	60.9	49.5	116.06	0.28%
4.5kVA 阻性 + 1.5kVA 整流负载	54.52	59.8	46.2	115.84	1.30%

从以上仿真波形和数据可以看出整个逆变器闭环系统在各种负载下均能稳定输出优良正弦波,外特性良好,谐波含量很小。同时可以看出直流变压器的输出电压在一定范围内波动。进一步提高输出滤波电容,可以减小这种波动。

仿真说明这种前级采用直流变压器供电,后级级联逆变器采用电压有效值和瞬时值双环控制、电感电流瞬时值控制的单相逆变电源具有良好的稳态特性、动态特性、短路限流能力及很好的非线性负载能力。

5. 结论

本文研究了一种新型单相逆变电源方案,主功率电路采用级联型逆变器,级联逆变器所需要的独立直流电源采用直流变压器,并且采用两个电压环和一个电流环相结合的多环控制方法来实现输出电压的稳压。对这种逆变电源进行了参数设计和仿真研究,研究表明这种新型逆变电源输出稳定,波形质量优良,具有良好的稳态特性、动态特性、短路限流能力及非线性负载能力。

参考文献

- [1] 谢少军, 陈万, 李飞, 一种新型航空静止变流器的研究, 航空学报, 2003, 24(6):546~550.
- [2] 李飞, 谢少军, 级联型航空静止变流器直流环节电路拓扑研究, 南京航空航天大学学报, 2004, 36(5):584~588.
- [3] 单庆晓, 李永东, 潘孟春, 级联型逆变器的新进展, 电工技术学报, 2004, 19(2):1~9.
- [4] 贺蓓, 单相级联逆变器的控制技术研究, 南京航空航天大学学位论文, 2006. 3.
- [5] 杨海英, 软开关半桥直流变压器研究, 电力电子技术, 2006, 40(2):48~50.