

组合软开关功率变换器的理论和应用

孔剑虹, 胡 磊, 邓 焰, 何湘宁

(浙江大学电气工程学院, 浙江杭州 310027)

摘 要: 在吸收技术和谐振式软开关技术的基础上提出了组合软开关功率变换器的理论, 并将此理论应用到各种变换器, 获得了四种组合软开关功率拓扑. 在此基础上具体讨论一实用的单相全桥组合软开关逆变电路. 该电路结构简单, 控制容易. 实验结果证明了理论分析的正确性.

关键词: 吸收技术; 谐振式软开关技术; 组合软开关技术; 逆变电路

中图分类号: TM 464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 11-1571-04

Theory and Applications of the Composite Soft Switching Power Converters

KONG Jiar hong, HU Lei, DENG Yan, HE Xiang-ning

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: Theory and applications of the composite soft switching technique are presented, based on the snubber and resonant soft switching techniques. Four configurations of the power converters are obtained by using composite soft switching topology. A practical composite soft switching topology for single phase full bridge inverter is observed, which employs fairly simplified circuit configuration and control pattern. Simulated and experimental results verify the effectiveness of the proposed soft switching technique.

Key words: snubber; resonant soft switching; composite soft switching; inverters

1 引言

随着电力电子技术的发展, 功率变换器的高频化成为趋势. 高频化不仅提高了变换器的功率密度, 而且极大地提高了瞬态响应性能, 抑制了电源所产生的音频噪声(18kHz 以下). 然而功率变换器的开关频率进一步提高受到了以下因素的制约: (1) 开通、关断过程中器件上的开关应力(电压尖刺或电流过冲)使器件工作在安全工作区之外; (2) 开关损耗(开关状态切换期间电压电流的重叠); (3) 由过高电流/电压变化率 di/dt 与 dv/dt 所产生的电磁干扰(EMI, Electro Magnetic Interference).

无损耗吸收技术^[1]和谐振式零电压技术、零电流技术^[2]受到了越来越深入的研究和广泛应用, 其根本目的就是在降低开关损耗及 EMI 的前提下使变换器在更高频状态下工作.

典型的无损耗吸收技术是以串电感并电容的无源(Passive)方式实现功率开关的零电流(ZCS)开通和/或零电压(ZVS)关断的, 而脉宽调制(PWM)并联支路换流式的软开关技术(如零电压转移 ZVT、零电流转移 ZCT)是以有源(Active)的方式来作用于特定开关过程, 实现零电压开通和/或零电流关断的. 有源的 PWM 软开关技术的优点在于有可能以简单的拓扑, 灵活的设计, 较强的针对性, 高性能地(如工作速度、负载依赖性, 不良副效应等指标)实现电路要求; 缺点则是检测控制复杂, 控制模式复杂化的可能以及可靠性相对较低. 无源

无损耗吸收技术的长处在于不改变原有工作模式, 有附加成本优势, 工作可靠, 效率高; 不足之处是附加网络拓扑往往比较复杂, 工作原理分析较烦琐, 适应性相对较差, 主功率器件必然承受附加应力. 目前, 无源无损耗吸收技术与有源零电压技术、零电流技术在单管电路应用中技术已较为成熟, 而且往往线路也并不复杂. 然而在桥式电路尤其是逆变器中, 软开关电路一般电路复杂, 设计困难, 而且不利于工程化. 采用组合软开关思想, 结合上述两种技术的优点, 为电源性能的提高提供了一种新的思路.

本文叙述了功率变换器中组合软开关技术的基本思想, 着重讨论了其在单相全桥逆变器中的应用. 给出了过程分析、参数设计、仿真结果和 3kW 220V AC 输出的实验波形, 并提出了单管、半桥、全桥以及三相桥的应用方案.

2 组合软开关技术

组合软开关技术结合了无损耗吸收技术与谐振式零电压技术、零电流技术的优点. 其基本原理是通过辅助管实现部分主管的零电流关断或零电压开通, 主管的其余软开关则是由无损耗吸收网络来加以实现. 吸收能量恢复电路被 ZCT/ZVT 谐振电路所取代, 辅助管的软开关则是由无损耗吸收网络或管电压/电流自然过零来加以实现. 换言之, 即电路中既可以存在零电压开通, 也可以存在零电流关断, 同时既可以包含零电流开通, 也可以包含零电压关断, 是这四种状态的任意组

合, 变换器内各主功率开关及辅助开关的开关过程是在不同的软开关条件下完成的, 可以互不相同, 所以称之为组合软开关技术。

3 组合软开关单相逆变电路的分析

电路结构如图 1(a) 所示。为简化分析, 假定所有元器件均为理想, 并且在一个开关周期内输入电压、输出电流保持恒定。由于是对称结构, 故只分析电流流出节点 2 的工况。开关时序如图 1(b) 所示, 其中 SPWM 为正弦脉宽调制给定的信号, 其互补信号也相应给出。

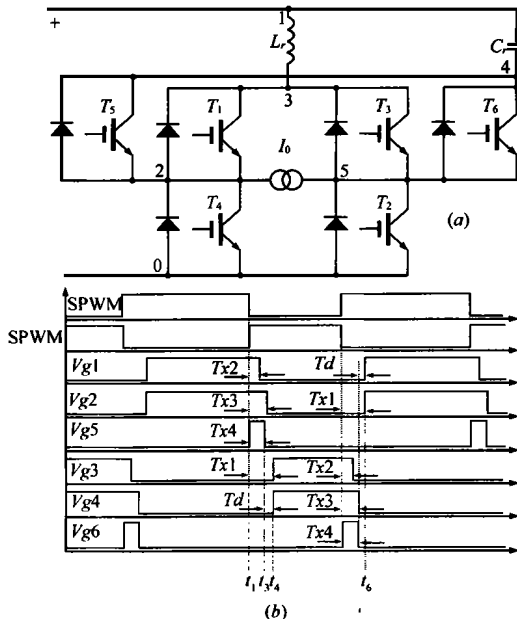


图 1 组合软开关单相全桥逆变电路示意。

(a) 主电路结构; (b) 开关时序

- (1) T_1 、 T_2 同时导通, T_3 、 T_4 同时导通;
- (2) T_2 比 T_1 延后关断 $\Delta t = T_{X3} - T_{X2}$ 同样 T_4 比 T_3 延后关断 Δt ;
- (3) T_5 的导通超前 T_1 关断的时间为 $TX_2 = 1/4 t_r$, 同样, T_6 导通超前 T_3 关断的时间为 T_{X2} ;
- (4) T_5 与 T_2 同时关断, T_6 与 T_4 同时关断, 并且 T_5 、 T_6 导通时间为 T_{X4} ;
- (5) 死区时间为 $T_d = T_{X1} - T_{X4}$;
- (6) 辅助管触发受负载电流方向控制。如图 1(a) 所示, 当电流从节点 2 流向节点 5 时 T_5 导通, T_6 关断; 反之则 T_6 导通, T_5 关断。

3.1 电流流出节点 2

电路工作分七个模式, 各元件电压、电流参考方向均取上正下负或由上进由下出为正, 初始 T_1 、 T_2 导通, 电容电压下正上负, 幅值为 U_{C0} , 电源电压幅值为 V_i , 负载电流幅值为 I_o , 电路谐振特征角频率和特征阻抗为 $\omega = 1/\sqrt{L_r C_r}$, $Z_n = \sqrt{L_r/C_r}$ 。

模式 1 ($t_0 \sim t_1$)

t_0 时刻 T_5 导通 L_r 、 C_r 谐振。

$$u_G = -U_{C0} \cos \omega(t - t_0) \quad (1)$$

$$i_{Lr} = I_o - (U_{C0}/Z_n) \sin \omega(t - t_0) \quad (2)$$

当 $t = t_{r1}$ 时刻 $i_{Lr} = 0$, 反并二极管 D_1 开始续流, 当 $t = t_1$ 时刻电感电流再次回零, $u_G(t_1) = U_{C1}$, 谐振期结束, 进入第二阶段。在 $(t_{r1} \sim t_1)$ 这一时间段内主管 T_1 关断, 实现 ZCS 关断。

模式 2 ($t_1 \sim t_2$)

t_1 时刻后, T_2 、 T_5 导通, 电容进入线性充电阶段。

$$u_G = U_{C1} + \frac{L_o}{C_r}(t - t_1) \quad (3)$$

当 $t = t_2$ 时刻, $u_G = V_i$, 电流瞬间转移到 T_2 的反并二极管 D_4 , D_4 续流。

模式 3 ($t_2 \sim t_3$)

在这一阶段 D_4 、 T_2 导通, 电容电压为 $u_G = V_i$ 。

模式 4 ($t_3 \sim t_4$)

t_3 时刻 T_2 、 T_5 关断, T_6 反并二极管 D_6 导通, 进入电容线性放电阶段。

$$u_G = V_i - \frac{I_o}{C_r}(t - t_3) \quad (4)$$

由于 t_3 时刻电容电压为 $u_G = V_i$, 故 T_2 两端电压从零以一定斜率上升, 实现零电压关断, T_5 电压及电流均为零, 故实现 ZCS/ZVS 关断; t_4 时刻, 死区时间 T_d 结束, T_3 、 T_4 导通, 进入下一阶段, 此时,

$$u_{Cr}(t_4) = U_{C2} = V_i - \frac{I_o T_d}{C_r} = u_{C2} \quad (5)$$

模式 5 ($t_4 \sim t_5$)

t_4 时刻 T_3 、 T_4 导通, 电感、电容谐振

$$\begin{aligned} u_{Cr} &= -I_o Z_n \sin \omega(t - t_4) + U_{C2} \cos \omega(t - t_4) \\ &= U_{C0} \sin[\omega(t - t_4) + \varphi] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} i_{Lr} &= -I_o + I_o \cos \omega(t - t_4) + \frac{U_{C2}}{Z_n} \sin \omega(t - t_4) \\ &= -I_o - \frac{U_{C0}}{Z_n} \cos[\omega(t - t_4) + \varphi] \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$\varphi = \pi - \arctg\left(\frac{U_{C2}}{I_o Z_n}\right) \quad (8)$$

$$U_{C0} = \sqrt{(I_o Z_n)^2 + U_{C2}^2} \quad (9)$$

由于二极管的单向导电性, 当 $i_{Lr} = -I_o$ 时, 谐振结束, 进入下一阶段, $u_G(t_5) = U_{C0}$ 。

模式 6 ($t_5 \sim t_6$)

t_5 时刻 D_6 截止, D_4 、 D_3 续流, 电路进入稳态。电容电压为 $U_G = -U_{C0}$, 电感电流为 $i_{Lr} = -I_o$ 。

模式 7 ($t_6 \sim t_7$)

t_6 时刻 T_1 、 T_2 导通, T_1 、 T_2 与 D_4 、 D_3 间换流, 电感电流为:

$$i_{Lr} = -I_o + \frac{V_i}{L_r}(t - t_6) \quad (10)$$

$$i_{T1} = i_{T2} = \frac{V_i}{2L_r}(t - t_6) \quad (11)$$

$$i_{D4} = i_{D3} = I_o - \frac{V_i}{2L_r}(t - t_6) \quad (12)$$

主管开通过程, 有电感串入主回路, 实现 ZCT 开通, 至 $t = t_7$ 时刻, 换流结束。

3.2 电流流出节点 5

电流流出节点 5 电路工作原理与电流流出节点 2 工况相同, 分析从略。

4 电路参数设计

假定逆变器直流输入电压为 400V, 输出功率为 3kW, 输出峰值电流 I_p 为 22A, 开关频率为 20kHz。

4.1 功率电路设计

由上述分析可知, 该方案无任何电流附加应力, 但存在额外的电压应力, 理论上开关管要承受 $V_i + U_{Co}$ 的电压值。由式(5)和式(9), 谐振电容 C_r 初始电压 U_{Co} 为:

$$U_{Co} = \sqrt{I_o^2 Z_n^2 + \left(V_i - \frac{I_o T_d}{C_r} \right)^2} \quad (13)$$

可以证明当 $I_o = I_{om}$ 时, U_{Co} 为其最小值 U_{Comin} 。其中

$$I_{om} = \frac{C_r T_d V_i}{Z_n^2 C_r^2 + T_d^2} \quad (14)$$

$$U_{comin} = \frac{Z_n C_r V_i}{\sqrt{Z_n^2 C_r^2 + T_d^2}} \quad (15)$$

令 $I_{om} = 1/2 I_p$, 于是 U_{Co} 在 $I_o = I_p$ 时为最大值 U_{Comax} , 并且,

$$I_p = \frac{2 C_r T_d V_i}{Z_n^2 C_r^2 + T_d^2} \quad (16)$$

$$U_{CoMAX} = V_i \quad (17)$$

也就是说式(16)满足的情况下额外的电压应力被限制在 V_i 之内。考虑到电路的输入、输出条件, 及电路的实际工作条件以及系统装置过载要求, 主管采用两个 1200V 50A IGBT 模块 (BSM50GB120DN2), 辅助管采用 1200V 30A IGBT 单管 (BUP307), 辅助管的反并二极管选用 1200V 30A (DSEI30-12A)。

4.2 吸收元件参数设计

4.2.1 吸收电容设计 吸收电容数值大小决定了关断时开关管上的 d_v/d_t , 如式(18)所示:

$$d_v/d_t = i_o/C_r \quad (18)$$

并且 C_r 值的大小直接影响逆变器的关断损耗, 但是 C_r 也受到了开关频率的限制。综合考虑上述三个因素的影响, 实际电路中 C_r 取值为 75nF。

4.2.2 吸收电感设计 吸收电感数值大小决定了开通时开关管上的 d_i/d_t , 如式(19)所示:

$$d_i/d_t = V_i/2L_r \quad (19)$$

并且 L_r 值的大小直接影响逆变器的开通损耗; 同时 L_r 也与开关管上的电压应力有关。设计时将电压应力限制在两倍输入电压以内, 即必须满足式(16)。综合考虑上述因素, 实际电路中 L_r 取值 8μH。

5 仿真波形及实验结果

管实现了零电流开通, 零电流关断; 下管实现了零电压开通, 零电压关断, 仿真波形与分析一致。图 3 是实验波形, 与分析、仿真结果完全一致, 实验结果进一步验证了电路的原理分析。实验中实测同样硬件条件下硬开关逆变在 1kW 输出时变换效率为 86%, 作为对比, 软开关电路在同样输出功率等级下效率为 91%, 在 3kW 输出时更高达 93.5%。

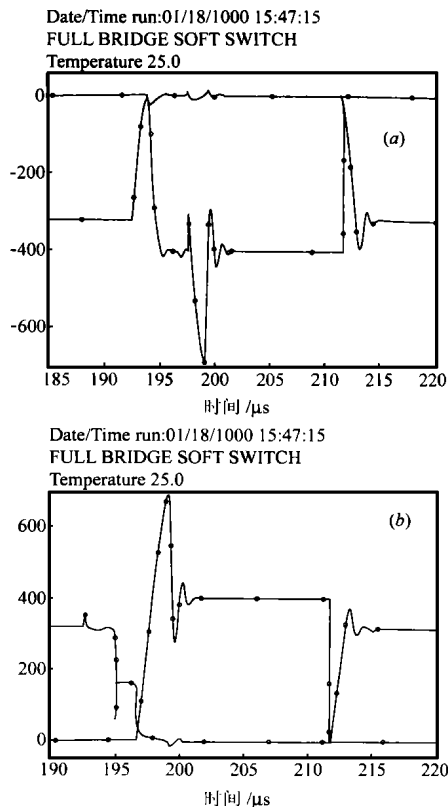


图 2 仿真波形 (a) 上管电压、电流; (b) 下管电压、电流

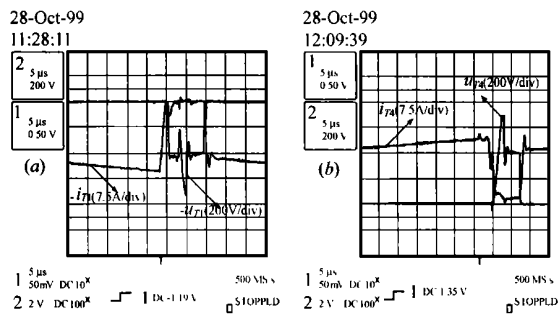


图 3 实验波形. (a) 上管电压、电流波形; (b) 下管电压、电流波形

6 组合软开关技术在其它开关功率变换拓扑中的应用

6.1 DC/DC 变换器

在单管 DG/DC 变换器中, 开通、关断的软开关可以通过增加一个辅助管来实现。图 4(a) [3] 是一个采用软开关技术实用的 Boost 电路。该电路主管工作在零电压开通、零电压关断状态; 辅助管工作在零电流开通、零电流关断状态。可见该电

路中主管、辅助管的软开通分别通过有源与无源的方式加以实现,但软关断则是同样以无源的方式加以实现,其具体属性各自相异。

6.2 半桥逆变电路

图 4(b)^[4] 是一个组合软开关单相半桥逆变电路。该电路中主管 T_1 和 T_2 组成一个桥臂, T_3 是辅助管, L_r 、 C_r 是公共的无源吸收元件。

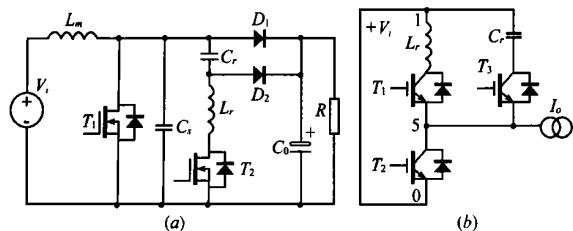


图 4 组合软开关技术在 (a) 单端变换器以及 (b) 半桥逆变电路中的应用

分析表明该方案 T_1 、 T_3 关断工作在零电流状态, 开通由电感缓冲; T_2 的开通、关断都是通过吸收元件来实现的。所以, 组合软开关的真正含义是: 功率变换器中所有有源器件的开通、关断可以工作在不同的软开关状态。

6.3 三相逆变电路

前面提到的单相全桥组合软开关可以推广到三相的桥式逆变中。该方案使用三个辅助管, 一个公共吸收电感和三个吸收电容, 三个辅助管和三个上管关断工作在 ZCS 状态, 开通具有电感缓冲; 三个下管开通、关断都是通过吸收元件加以实现。其电路结构形式以及工作原理与单相全桥情况基本一致, 由于篇幅限制, 不再赘述。

7 结论

本文在现有的吸收技术和谐振式软开关技术的基础上提出了组合软开关功率变换器的理论, 并将此理论应用到各种变换器, 获得了各种组合软开关功率拓扑。其基本思想是变换器内各主功率开关及辅助开关的开关过程是在不同的软开关

条件下完成的, 可以互不相同。在此基础上具体讨论一实用的单相全桥组合软开关逆变电路。该电路与现有软开关电路比较, 结构简单, 控制容易。实验结果证明了理论分析的正确性, 同时实测系统效率有显著提升。

参考文献:

- [1] Ching Jung Tseng, Cherr Lin Chen. A passive lossless snubber cell for nonisolated PWM DC/DC converters [J]. IEEE. Trans. on IE, August 1998, 45(4): 593-601.
- [2] Guichao Hua, Ching Than Leu, Fred C Lee. Novel zero voltage transition PWM converters [A]. IEEE APEC'92 [C]: 55-61.
- [3] C-J Tseng, C-L Chen. Novel ZVT PWM converters with active snubbers [J]. IEEE. Trans. on PE, Sept. 1998, 13(5): 861-869.
- [4] Xiangning He, Barry W Williams, Kuang Sheng, Stephen J Finney, Zhaoming Qian. A composite soft switching circuit for power inverters [A]. IEEE APEC'99 [C]: 1272-1278.

作者简介:



孔剑虹 男, 1974 年 6 月出生于浙江湖州。浙江大学电力电子与电力传动在读博士研究生。主要研究兴趣包括软开关技术, 逆变器控制, 电压控制模块 (VRM) 以及磁元件的特性与设计。



胡 磊 男, 1976 年 4 月出生于湖南湘潭。浙江大学电力电子与电力传动在读硕士研究生。主要研究方向为功率变换器的数字控制技术。