

全桥高频链逆变电源的混合控制策略研究

The Study of Hybrid Control Strategy for Full Bridge High-Frequency Link Inverter

王丹 贺明智 游小杰

北京交通大学电气工程学院 (北京 100044)

Wang Dan, He Mingzhi, You Xiaojie

School of Electrical Engineering, Beijing Jiao Tong University, (Beijing 100044)

摘要: 对于全桥高频链逆变器的控制, 本文提出一种混合式正弦脉冲脉位调制控制策略, 高频变压器传递SPWM波, 根据对输出电压与电流进行过零比较与逻辑组合, 得到周波变换器高频和低频混合驱动脉冲。介绍了全桥高频链逆变器的工作原理, 并应用MATLAB仿真软件对电路进行控制算法的仿真, 同时制作了容量为200VA的实验样机, 仿真和实验结果验证了所提控制方案的可行性与正确性。

关键词: 全桥高频链逆变器 正弦脉冲脉位控制 仿真

Abstract: A novel control strategy called hybrid sinusoidal pulse width phase modulation is proposed in this paper according to the control of full bridge high-frequency link inverter. SPWM wave is transmitted by the high-frequency transformer while the driving logic of the cycloconverter switches is determined by the zero comparison and logical combination of the output voltage and output current. So the driving signals of the cycloconverter switches are combined with low frequency pluses and high frequency ones. The operation principle of the full bridge high-frequency link inverter is analyzed and it is verified by the simulation results of 200VA prototype. Both of the results prove that hybrid control strategy is correct.

Keywords: Full bridge high-frequency link inverter, Sinusoidal pulse width phase modulation, Simulation

[中图分类号] TM464

[文献标识码] A

文章编号: 1561-0349(2009)05-0033-04

1 引言

传统逆变电源是由逆变器、工频变压器和周波变换器组成。由于应用工频变压器, 使得整个逆变电源又大又笨重, 转换效率难以提高。为了克服传统逆变器的上述缺点, 满足人们对现代电源高功率密度、高效率、高可靠性、小型化的要求, 近几年来高频链逆变技术成为研究的热点。其中电流源型高频链逆变技术已经得到广泛研究^[1]。电流源型高频链逆变电源以全桥结构最具代表性, 其组成是以反激式DC/DC变换器结构为基础, 应用高频变压器替代工频变压器实现变压与电气隔离。此结构具有拓扑简单、使用器件少、控

制电路简单、可靠性高、体积小、转换效率高和能量可以双向流动等优点, 因此全桥高频链逆变电源被广泛应用于小功率场合。

目前研究较多的电流型高频链逆变器是由前级高频逆变和周波变换器组成, 电路结构基本没有变化, 因此控制策略的进一步优化显得格外重要, 优良的控制策略能够提高系统的跟踪性能与稳定性, 最终使系统得到良好的输出特性。目前高频链逆变器控制策略主要有以下三种方法: ①正弦脉冲脉位控制策略(SPWPM), 采用该方法, 前级高频逆变器采用移相SPWM控制, 直流侧逆变桥的开关管可以实现部分条

件下的软开关,周波变换器开关管始终工作在同步的高频开关状态^[2,3];②双极型移相SPWM控制策略,前级逆变器采用双极型PWM控制,高频变压器传递占空比为0.5的高频交流脉冲方波,周波变换器工作在高频开关状态,实现移相调压控制^[4];③前级高频逆变桥采用高频开关,而周波变换器采用低频开关策略,周波变换器驱动脉冲周期为输出交流电压周期,与前级高频逆变器驱动脉冲无关,周波变换器为低频开关,但是该控制策略只能实现能量的单向流,逆变器负载适应性差,并且周波变换器的开关管承受很大的电压应力。采用方法1和方法2高频链逆变器可以实现双向功率流,但是周波变换器开关管一直为高频开关,所以开关损耗比较大。因此寻找一种能够能量双向流、具有更高变换效率、较小电压应力且简单的周波变换器的驱动方法显得很有意义。

为此,本文提出一种控制策略——正弦脉冲脉位调制混合控制策略。此种控制方法不再依赖现有的PWM模拟芯片而采用数字控制,通过对输出电压与电流进行过零比较与逻辑组合,得到周波变换器开关脉冲,方法简单,易于实现。混合控制就是周波变换器开关管的驱动脉冲为低频脉冲和高频脉冲的混合,逆变器能量可以双向流动。在保留现有控制策略的优点的基础上,可以极大地减小周波变换器的控制难度,并减少其开关损耗,提高逆变器的变换效率与稳定性。

2 全桥高频链逆变器工作原理

图1为全桥高频链逆变器的电路拓扑结构,直流输入经逆变电路、高频变压器和周波变换器输出交流到负载^[5]。高频变压器传递的是正弦脉冲脉位调制波,由于全桥电路的能量可以双向流动,因此整个能量传递可以分为两个过程,定义为:①能量正向传递阶段(从直流到交流);②能量回馈阶段(从交流到直流)。

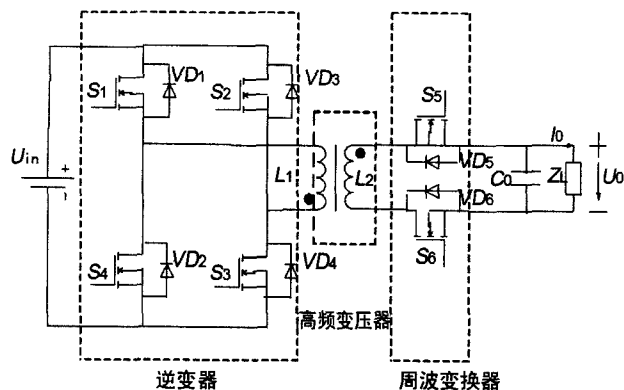


图1 全桥式高频链逆变器主电路

在能量正向传递阶段, S_1 、 S_2 和 S_3 、 S_4 分别进行高频斩波,而 S_5 、 S_6 的开关频率跟随负载为低频,且当输出电压 U_0

为正时,使 S_5 常通,当输出电压 U_0 为负时,使 S_6 常通,这样分别使 U_{in} 、 S_1 、 S_3 、 L_1 、 L_2 、 S_5 、 V_{d6} 、 C_0 和 Z_L 组成一组Flyback变换器,实现直流电源向负载传递能量,使负载得到交流正半周波形;使 U_{in} 、 S_2 、 S_4 、 L_1 、 L_2 、 S_6 、 V_{d5} 、 C_0 和 Z_L 组成另一组Flyback变换器,实现直流电源向负载传递能量,使负载得到交流负半周波形。当能量回馈时, U_{in} 、 L_1 、 L_2 、 S_5 、 S_6 、 V_{d1} 、 V_{d2} 、 V_{d3} 、 V_{d4} 、 C_0 和 Z_L 分别组成两组Flyback变换器。无论负载为感性还是容性, S_5 仍然在输出电压 C_0 为正时保持常通,此时当输出电流 I_0 与输出电压 U_0 反相时, S_6 高频斩波,实现能量回馈;而 S_6 仍然在输出电压 U_0 为负时保持常通,此时当输出电流 I_0 与输出电压 U_0 反相时, S_5 高频斩波,实现能量回馈。

可以看出全桥高频链逆变器在接感性与容性负载实现能量回馈的时候,周波变换器才和一次侧的高频逆变桥的驱动脉冲同步,为高频工作。因此周波变换器的驱动逻辑与输出电压与电流的极性有关^[6]。具体的控制波形如图2所示。

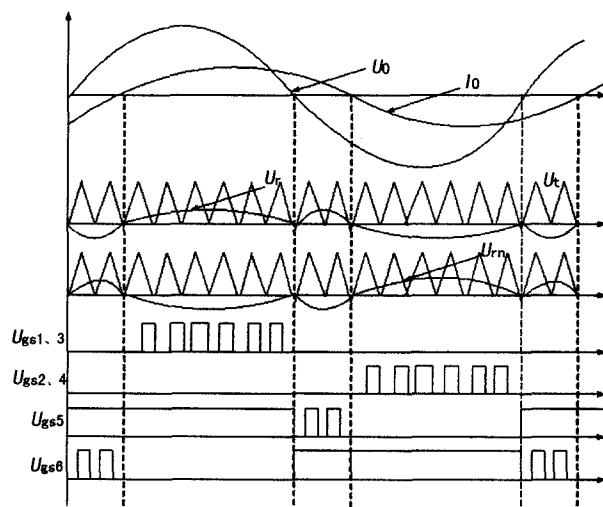


图2 主电路控制波形

3 控制回路设计

全桥电流源高频链逆变电路采用电压瞬时反馈的SPWM控制方案,控制方案如图3所示。其中电压给定值为 U_{ref} ,电压调节器的输出为 U_r ,电压调节器的反向值为 U_{rn} ,它们分别与同一个载波 U_c 进行比较,产生 U_{GS1} 、 U_{GS3} 和 U_{GS2} 、 U_{GS4} 来分别驱动高频逆变桥的开关管 S_1 、 S_3 和 S_2 、 S_4 ^[7]。而 U_{GS5} 与 U_{GS6} 为产生的高频同步信号, S_p 为输出电压 U_0 经过过零比较后得到的逻辑信号, S_F 为能量回馈逻辑信号。根据对输出电压与电流进行过零比较来判断得到的逻辑信号 S_p 与 S_F ,与高频同步信号 U_{GS5} 、 U_{GS6} 进行逻辑组合后,就可以得

到周波变换器的具有双向能量流动特性的驱动信号。其逻辑组合式如1式所示。

$$\begin{cases} (S_F + S_P) \cdot D_{GS5} + S_P = U_{GS5} \\ (S_F + \bar{S}_P) \cdot D_{GS6} + \bar{S}_P = U_{GS6} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\begin{cases} S_P \\ S_F = U_0 \oplus I_0 \end{cases}$

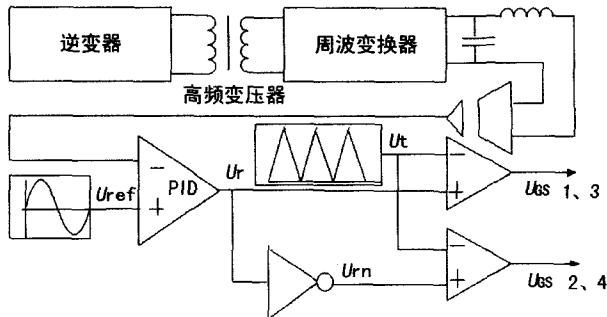


图3 高频链逆变器控制框图

系统控制核心为TMS320F2407型DSP,采用电压瞬时反馈控制,只用一个事件管理器可以实现驱动信号的产生,定时器的的工作模式为增减计数,即载波 U_t 为对称三角波,载波频率和高频链逆变器的开关频率一致,通过正确设置相关寄存器,即可以产生高频SPWM信号来驱动高频变压器前端逆变电路^[8]。而周波变换器的驱动信号是由高频SPWM信号和输出电压与电流的过零比较输出信号进行逻辑组合得到。图4为周波变换器驱动信号逻辑组合产生原理。其中输出电压经过过零比较得到 S_P ,与输出电流进行逻辑组合得到 S_F 。再经过一系列逻辑运算得到周波变换器最终的驱动波形。

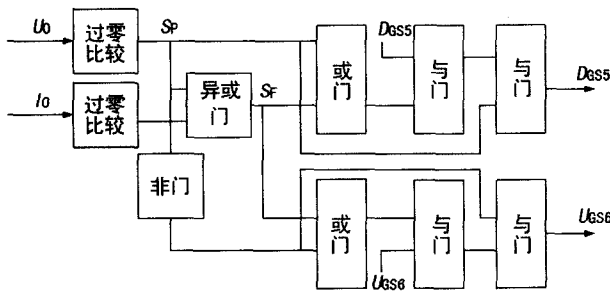


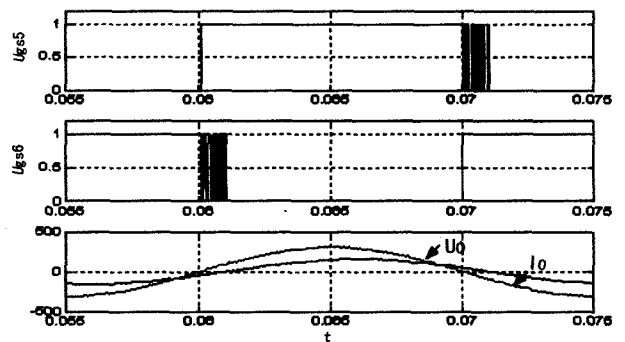
图4 周波变换器驱动信号逻辑组合

4 仿真与实验结果

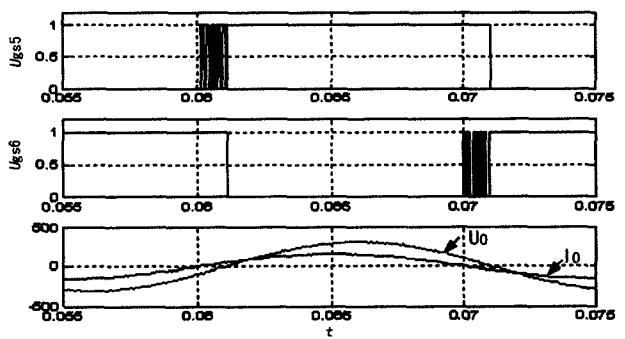
在上述理论分析研究基础上,应用MATLAB仿真软件对上述所做的理论分析及控制策略的研究进行了仿真。同时,为了验证混合控制策略对全桥高频链逆变电路的可行性及效果,制作了一个原理样机,主要参数如下:输入直流电压为

40V~60V,输出电压为220Vac的正弦交流电,输出额定容量为200VA。 $S_1 \sim S_4$ 采用MOSFET,型号为IXTQ60N20T, S_5 、 S_6 采用MOSFET,型号为IXFX24N120Q2。高频变压器的磁芯为ETD49,材质为PC40,初级绕组为8匝,由两股线径为0.8mm的漆包线并绕,次级为90匝,由线径为0.5mm的漆包线绕制。输出电容选择4 μ F的CBB电容。

图5为周波变换器开关管的驱动波形,由仿真结果可知,当输出电压 U_0 和电流 I_0 极性相同时,开关管 S_5 、 S_6 均处于工频开关状态。如果负载为感性负载,输出电流滞后于输出电压 U_0 ,且其中输出电压 U_0 为正,输出电流 I_0 为负时, S_5 常通, S_6 高频斩波,实现能量回馈;当输出电压 U_0 为负,输出电流 I_0 为正时, S_6 常通, S_5 高频斩波,实现能量回馈。当负载为容性负载时,输出电流 I_0 超前于输出电压 U_0 ,且其中输出电压 U_0 为负,输出电流 I_0 为正时, S_6 常通, S_5 高频斩波,实现能量回馈;输出电压 U_0 为正,输出电流 I_0 为负时, S_5 常通, S_6 高频斩波,实现能量回馈。证明周波变换器通过逻辑混合控制可以实现其开关管的驱动脉冲为低频和高频脉冲的混合,逆变器能量可以双向流动。



(a) 感性负载



(b) 容性负载

图5 周波变换器开关管驱动波形仿真图

在0.15S时逆变器输出所带负载突然发生变化,此情况下输出电压 U_0 与输出电流 I_0 的变化情况如图6所示。由图6可以看出系统负载突然发生变化时,输出电压基本不发生变

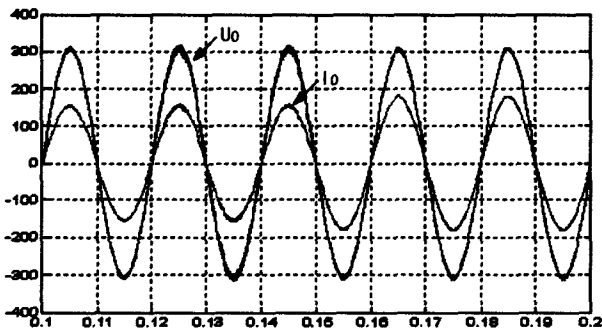


图6 加突变信号时,系统输出电压与电流波形

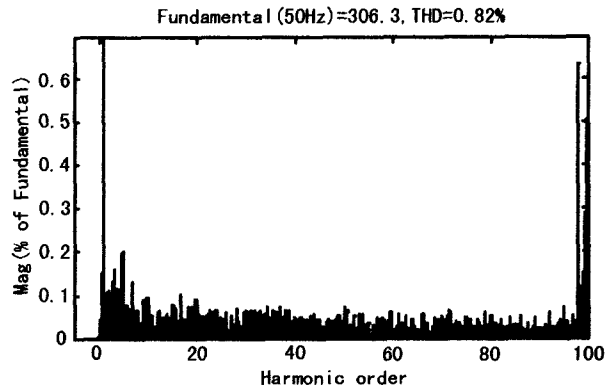


图8 输出电压频谱分析图

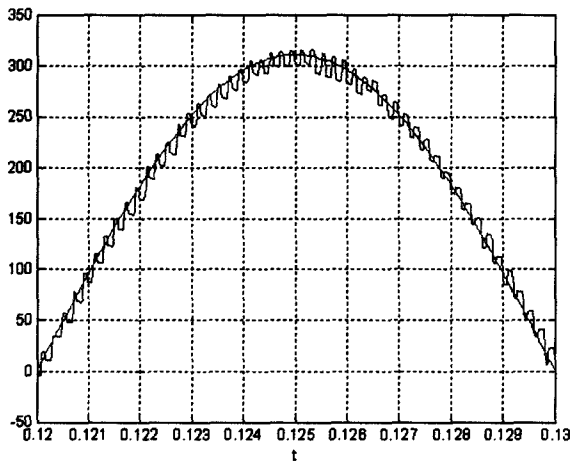
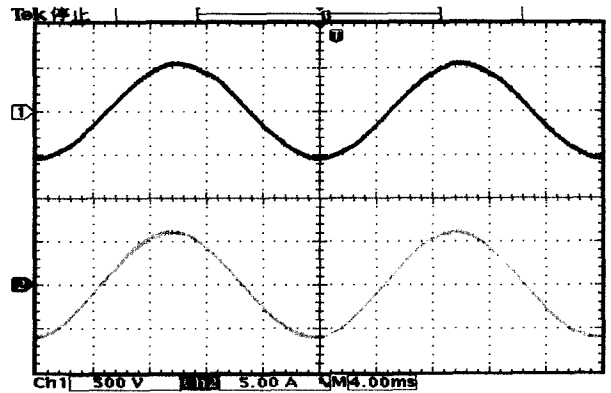
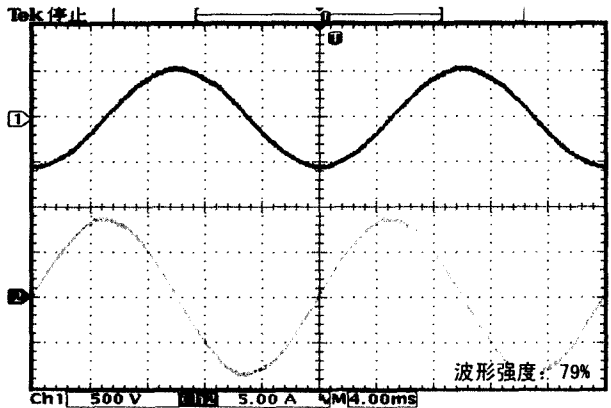


图7 实际输出电压与给定电压图形



(a) 阻性负载



(b) 容性负载

图9 输出电压与电流的实验波形

化,实时跟踪给定电压。图7为给定电压与实际输出电压的正半周比较图。由图7可以看出实际输出电压始终跟踪给定电压上下波动,且波动范围较小。图6和图7说明采用电压瞬时反馈的控制算法,可以使系统具有较快的响应特性与较好的稳定性。由图8可以看出输出电压THD为0.82%,谐波含量较少。图9为接阻性与容性负载时,系统输出电压与电流实验波形图。

5 结论

本文针对全桥高频链逆变电源提出了混合控制策略,根据负载输出的电压与电流进行过零比较与逻辑组合,得到周波变换器开关管高频与低频驱动脉冲的组合。在输出电压和电流极性相同的区域内,周波变换器开关管脉冲均为低频;而在输出电压与电流极性不同的区域内,周波变换器开关管脉冲为高频,且与高频变压器前级高频逆变电路的驱动脉冲同步。采用混合控制策略,使高频链逆变器的能量可以双向流动,同时使系统具有较快的响应速度、较好的跟随特性与具有良好的稳定性,输出波形THD小于1%。仿真和实验结

果证实所提的混合控制策略是正确有效的。

参考文献

[1] HQANGM, LIN W, YINGJ. Novel current mode bi-directional high-frequency link DC/AC converter for

(下转第32页)

- CN 03153622, 2004-3-24
- [27] Ratnakumar B. V, Smart M. C., Ewell R.C., et al. Lithium-Ion Rechargeable Batteries on Mars Rovers [R]. Rhode Island, USA: 2nd International Energy Conversion Engineering Conference, AIAA 2004-5739, 2004.
- [28] Park C., Jaura A.K., Dynamic Thermal Model of Li-Ion Battery for Predictive Behavior in Hybrid and Fuel Cell Vehicles. SAE Transactions, SAE2003-01-2286: 1835-1842
- [29] 孙文鹏,陈实,杨凯.混合电动车用MH/Ni电池组热效应仿真及应用研究[J].北京工商大学学报(自然科学版), 2007, 25(5): 7-11
- [30] Listerud E., Lord E. Cooling Modules for Lithium-Ion Batteries Subjected to High Discharge Rates[A]. AIAA 2007-4791: 1-10
- [31] Al-Hallaj S., Kizilel R., Lateef A., et al. Passive thermal management using phase change material (PCM) for EV and HEV Li-ion batteries[A]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, 2005: 376-380
- [32] Sabbah, R., Kizilel,., Selman J. R., et at. Active (air-cooled) vs. passive(phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution[J]. Journal of Power Sources, 2008, 182: 630-638
- [33] Khateeb, S.A., Farid M.M., Selman J.R. et al. Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter[J]. Journal of Power Sources, 2004, 128: 292-307

作者简介

于广锋(1983—), 男, 硕士研究生, 河北人, 研究方向: 电子设备热设计. E-mail: yugfbhu@yahoo.com.cn
杨春信(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 多相流传热、飞机环境控制与安全救生、人机与环境工程等

(上接第36页)

- UPS.IEEE PESC'98, 32(6):1867-1871.
- [2] Ikuo Yamato, Norikazu Tokunaga, Yasuo Matsuda. New conversion system for UPS using high frequency link. IEEE PESC 1988: 658~663
- [3] Ikuo Yamato, Norikazu Tokunaga, Yasuo Matsuda, et al. High frequency link DC-AC converter for UPS with a new voltage clamper. IEEE PESC 1990: 749~756
- [4] Mikihiko Matsui, Masaki Nagai, Masayuki Mochizuki, et al. High -frequency link DC/AC converter with suppressed voltage clamp circuits-naturally commutated phase angle control with self turn-off devices. IEEE Trans on IA. 1996. 32(2): 293~300
- [5] 黄敏超,徐德鸿,林渭勋.全桥双向电流源高频链逆变器[J]. 电力电子技术, 1999, 33(1): 55~58.
(Huang Min-chao, Xu De-hong, Lin Wei-xun. Full-bridge Bi-directional Current Mode High-frequency Link Inverter [J]. Industrial Electronics, 1999, 33(1): 55~58.)
- [6] 沙德尚,孔力.高频链逆变器的全数字化混合SPWPM控制策略研究[J].电工技术学报,2005,20(7):57~62.
(Sa Din-shang, Ku Le. Study of Full Digitalized Hybrid SPWPM Control Strategy for High-Frequency Link Inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(7): 57~62.)
- [7] Yamato I, Tokunaga N, Matsuda Y, et al . New conversion system for UPS using high frequency link A . PESC'88 Record C. 19th Annual IEEE, Kyoto, 1988. 658~663. Vol.2.
- [8] Sha Deshang, Kong Li. DSP based digitally controlled high-frequency inverter by phase-shifted SPWM technique. ICEMS 2002, Beijing, 2002:971~974

作者简介

王丹(1983—), 女, 辽宁人, 北京交通大学, 硕士在读, 主要研究方向: 电力电子与电力传动。
游小杰, 男, 福建人, 北京交通大学教授, 博士后, 博士生导师, 主要研究方向: 电力电子与开关电源技术。