

Research and Design of Heric Inverter Drive Circuit*

LI Dezheng^{1,2}, ZHANG Lanhong^{2*}, LU Guangping²

(1.School of Electronic Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 215600, China;
2.School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: The drive circuit used for each bridge arm of the traditional Heric inverter is same, which causes the repetition of the protection function. According to the conduction state of the upper and lower arms of the Heric inverter circuit, the functions of the upper and lower bridge arm drive circuits of the inverter are divided. The upper and lower bridge arm drive circuits are designed respectively to realize the function of complementary cooperation, and for the problem of output distortion of the driver circuit optocoupler isolation chip, a driving enhancement circuit is added to the optocoupler input side. The driving circuit is tested. Experimental results show that the drive circuit has higher reliability. The driving circuit can also reduce the distortion when the range of duty cycle is wide. The output voltage waveform of the inverter is good.

Key words: Heric circuit; split arm drive; optocoupler isolation drive

EEACC: 1290B

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2020.02.011

Heric 逆变器驱动电路研究与设计*

李德正^{1,2}, 张兰红^{2*}, 陆广平²

(1.江苏科技大学电子信息学院, 江苏 镇江 215600; 2.盐城工学院电气工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要: 传统 Heric 逆变器各个桥臂采用相同的驱动电路, 造成保护功能的重复, 文章针对 Heric 逆变电路上下桥臂的导通状态, 对逆变器上、下桥臂驱动电路的功能进行了划分, 分别设计了上、下桥臂驱动电路, 使其实现互补配合的保护功能, 并针对驱动电路中光耦隔离芯片输出失真的问题, 在光耦输入侧加入驱动增强电路。对驱动电路进行测试, 实验结果表明该驱动电路可靠性较高, 在占空比变化范围较宽时失真度小, 逆变器输出波形较好。

关键词: Heric 电路; 分桥臂驱动; 光耦隔离驱动

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2020)02-0297-07

分布式光伏发电技术具有清洁环保的优点, 成为可再生能源发电行业的研究热点, 逆变器是光伏发电系统的核心部件, 其性能关系到所发电能的质量^[1-2]。单相光伏并网逆变器按有无隔离变压器分为隔离型并网逆变器与非隔离型并网逆变器。光伏电池板由于自身带有对地寄生电容的原因, 容易与整个逆变器和电网构成回路, 产生共模电流, 严重影响并网电流质量, 甚至威胁人身安全。传统的光伏并网逆变器采用隔离变压器实现光伏电池与电网的电气隔离, 抑制了共模电流的产生, 但加入变压器会增加整个系统的体积, 成本, 同时增加额外的损耗^[3]。为解决上述问题, 非隔离型并网逆变器受到广泛关注, Sunways 公司提出高效高可靠性逆变器 Heric (High Efficient and Reliable Inverter Concept) 拓

扑^[4], 在全桥电路的基础上引入续流回路达到较好地消去共模漏电流的效果。

驱动电路作为连接逆变器与控制电路的接口, 其保护功能与驱动性能对于系统的工作可靠性与输出电能质量有着极大的影响^[5-6]。通过对比近年来国内外驱动电路所采用的方案可知, 广泛应用的驱动方式主要有高压隔离变压器驱动^[7-8], 直接驱动^[9-10]以及光耦隔离驱动^[11-12]。高压隔离变压器能隔离并驱动较高等级电压, 但成本较高, 难以集成保护功能, 而且隔离变压器体积较大^[13]。直接驱动方式设计简单, 功耗较低, 但主功率电路与控制电路没有电气隔离, 主电路故障时, 控制电路容易受到影响而损坏^[14]。光耦隔离驱动采用光耦芯片驱动, 具有较强的电气隔离, 抗干扰能力强, 但光耦芯片最高

项目来源: 江苏省政策引导类计划(产学研合作)——前瞻性联合研究目(BY2015057-20); 江苏省“六大人才高峰”第十二批次高层次人才选拔培养项目(XNY-017)

收稿日期: 2019-08-21 修改日期: 2019-10-31

工作电压只能达到几千伏,且在占空比变化范围较宽时驱动易产生失真现象^[7]。

在传统的 Heric 逆变器驱动电路中各个桥臂往往采用相同的驱动电路,这样不可避免的导致驱动电路保护功能的单一且重复,本文基于 Heric 的各桥臂导通状态,提出一种新型驱动电路设计方法,即对 Heric 逆变器的上、下桥臂进行划分,上、下桥臂分别采用两种不同的光耦芯片构成驱动电路,使其各自实现不同的功能,以结合两种驱动电路的优点,使上、下桥臂驱动电路保护功能互补,简化电路结构,以提高驱动电路的可靠性。

1 Heric 电路原理及其驱动信号

Heric 电路如图 1 所示。其中 $S_1 \sim S_4$ 为 MOS 管, $S_5、S_6$ 为 IGBT 管, $D_1、D_2$ 为电网续流二极管, U_{bus} 为直流侧输入电压, C_{bus} 为稳压电容, L_1 为逆变器输出滤波电感, C_0 为输出滤波电容, C_{cm} 为寄生电容,设输出滤波电感上流过的电流为 i_L ,共模电流为 i_{cm} ,该拓扑在电网侧加入两个续流开关管 $S_5、S_6$,在工作周期续流阶段实现直流侧与交流侧的隔离,从而抑制共模漏电流。

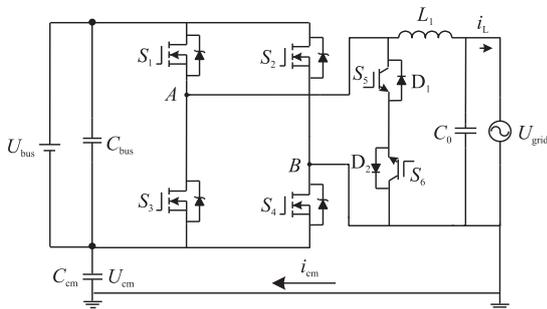


图 1 Heric 逆变器拓扑

Heric 各个桥臂驱动信号如图 2 所示, $S_1 \sim S_4$ 为高频信号, $S_5、S_6$ 为低频信号。工作模式如图 3 所示, Heric 逆变器有 4 个工作模式:

模式 1 电网电压大于零的半周期 $S_1、S_4$ 和续流管 S_6 导通,电感电流 i_L 回路为:直流输入电源 U_{bus} 正端 $\rightarrow S_1 \rightarrow L_1 \rightarrow$ 电网 $U_{grid} \rightarrow S_4 \rightarrow$ 直流输入电源 U_{bus} 负端。此时, $U_{AN} = U_{bus}, U_{BN} = 0$ 。

模式 2 电网电压大于零的续流阶段,开关管 S_1

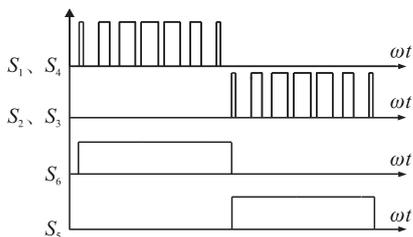
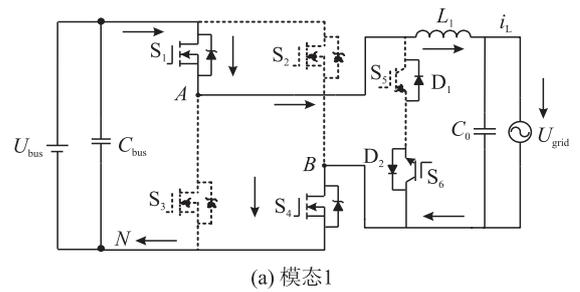
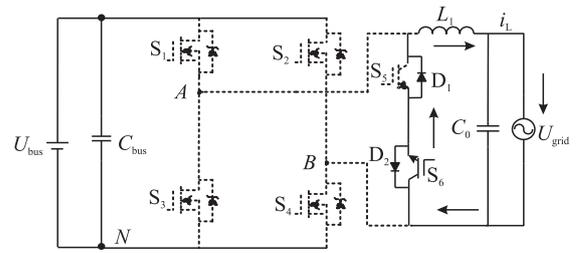


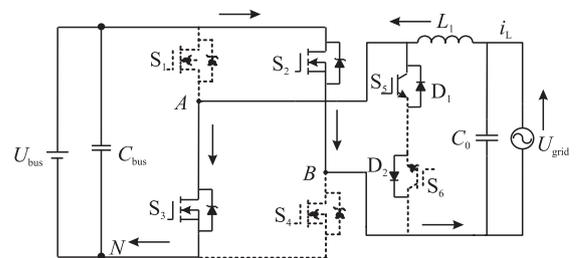
图 2 Heric 逆变器各桥臂驱动信号



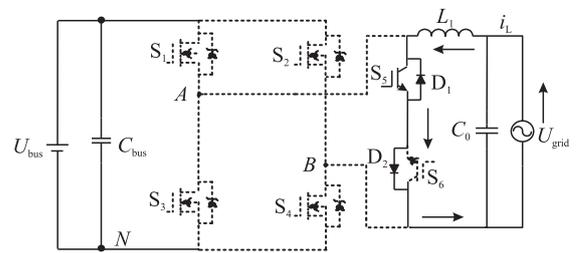
(a) 模式 1



(b) 模式 2



(c) 模式 3



(d) 模式 4

图 3 Heric 逆变器工作模式

和 S_4 关断时,为维持电感电流连续, S_5 的反并联二极管 D_1 导通续流,电感电流 i_L 减小,经过的回路为: $S_6 \rightarrow D_1 \rightarrow L_1 \rightarrow$ 电网 $U_{grid} \rightarrow S_6$ 。此时, $U_{AN} = U_{BN} = U_{bus}/2$ 。

模式 3 电网电压小于零的半周期, $S_2、S_3$ 和续流管 S_5 导通,电感电流 i_L 增加且流经回路为直流输入电源 U_{bus} 正端 $\rightarrow S_2 \rightarrow$ 电网 $U_{grid} \rightarrow L_1 \rightarrow S_3 \rightarrow$ 直流输入电源 U_{bus} 负端。此时, $U_{AN} = 0, U_{BN} = U_{bus}$ 。

模式 4 当开关管 S_2 和 S_3 关断时,为维持电感电流的连续, S_6 的反并联二极管 D_2 导通续流,电感电流减小并且流经回路 $S_5 \rightarrow D_2 \rightarrow$ 电网 $U_{grid} \rightarrow L_1 \rightarrow S_5$ 。此时, $U_{AN} = U_{BN} = U_{bus}/2$ 。

由上述模式分析可以得到,模式 1 和 3 中共模电压 $U_{cm} = 0.5(U_{AN} + U_{BN})$,模式 2 和 4 中 $U_{cm} = 0.5U_{bus}$,结合各模式时 U_{AN} 与 U_{BN} 的值,得到寄生电

容 C_{cm} 的电压 U_{cm} 始终为 $0.5U_{bus}$, 所以共模电流 i_{cm} 基本为零, 故 Heric 逆变器能抑制共模电流。

2 驱动电路设计

2.1 设计方案

传统 Heric 驱动电路对于开关管 $S_1 \sim S_4$ 采用相同的设计, 因此当驱动电路设置一种保护功能时, $S_1 \sim S_4$ 的驱动都具有了该保护功能, 造成了保护功能的重复, 成本增加, 而且如果设置过多保护功能, 电路变得十分复杂, 稳定性反而降低。由第 1 节逆变器工作模式 1~4 可以看出 Heric 电路在运行时 S_1 与 S_4 、 S_2 与 S_3 开关管始终在同时导通或关断状态, 即电路工作时 S_1 与 S_4 、 S_2 与 S_3 始终在同一回路中, 因此工作时只要上桥臂 S_1 、 S_2 或下桥臂 S_3 、 S_4 关断的情况下, 不论另一个桥臂是否关断, 整个逆变器都会不工作。基于此特性本文提出上下桥臂采用不同的驱动电路, 以实现不同的保护功能, 达到两种驱动电路保护功能互补的目的, 增加驱动电路的可靠性。分桥驱动电路结构框图如图 4 所示。

分桥驱动旨在上桥、下桥以及续流管的驱动信号分别进入不同的驱动电路中, 以实现不同的保护功能, DSP 输出的上桥驱动信号进入上桥的驱动电路, 驱动 S_1 与 S_2 , 上桥驱动电路实现过流保护与低

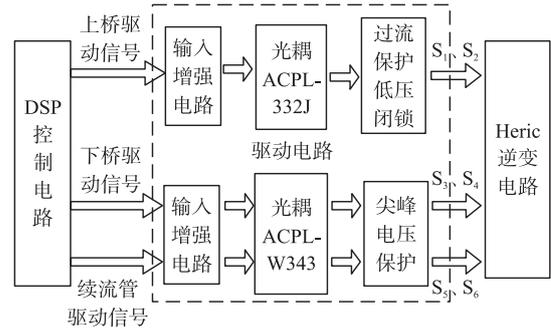
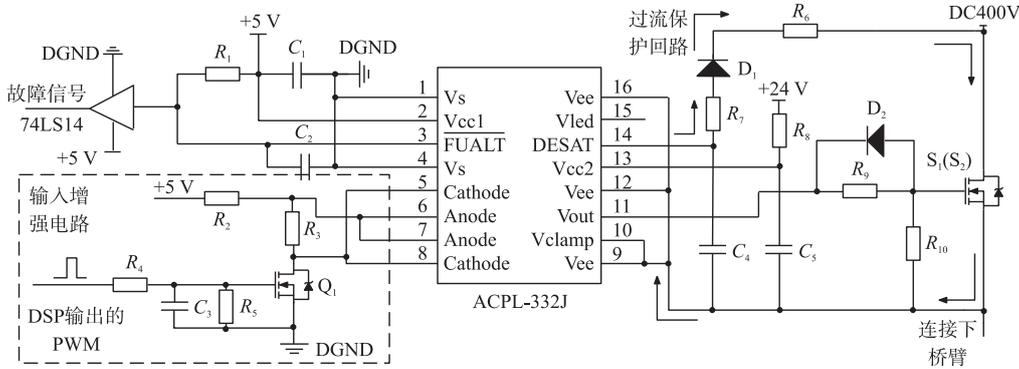


图 4 驱动电路结构框图

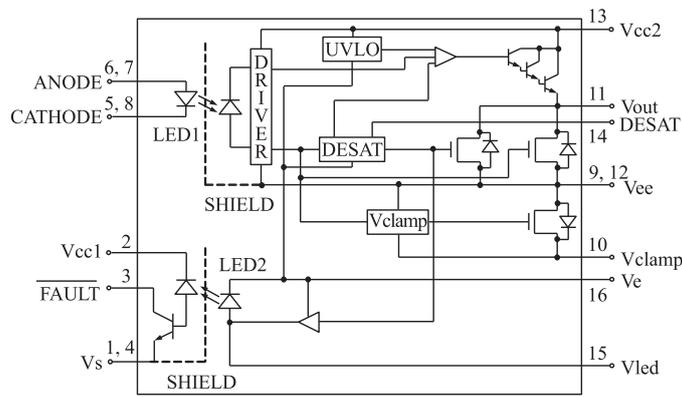
压闭锁的功能, 下桥臂的驱动信号进入下桥驱动电路, 驱动 S_3 与 S_4 , 下桥驱动电路实现尖峰电压闭锁功能。两种驱动电路各自工作, 互不干扰, 共同作用保护电路, 达到结合两者优点, 提高电路可靠性的目的。并在驱动电路输入侧加入 PWM 增强电路, 减少占空比失真。续流管 S_5 、 S_6 反向相连, 不会出现上下短路的情况, 因此不必设置过流保护, 采用与下桥相同的驱动电路。

2.2 上桥臂驱动电路设计

上桥臂 S_1 、 S_2 驱动电路如图 5 所示, 由智能光耦隔离芯片 ACPL-332J 及其外围电路构成, ACPL-332J 的输出能直接驱动 1 200 V, 100 A 以下的开关管, 导通延迟时间 180 ns。外围电路主要实现驱动增强功能, 过流保护功能以及低压闭锁功能。



(a) 上桥臂驱动电路



(b) ACPL-332J 内部电路图

图 5 S_1 、 S_2 驱动电路及芯片内部结构图

2.2.1 过流保护以及低压闭锁保护

ACPL-332J 本身设置有过流保护电路与低压闭锁保护,当上桥臂 $S_1(S_2)$ 出现短路或过流状况时,其漏级电压 U_{ds} 迅速升高,当超过设定的保护电压时,即 DESAT 端对地电压大于 6.5 V 时,FAULT 端置低并将错误信号反馈给控制电路,光耦芯片内部 RESET 复位端接收错误信号,逐渐减小输出驱动信号,上桥臂关断,直到故障解除后复原。过流保护电路由 D_1 、 R_6 、 R_7 和 C_4 构成, D_1 与直流母线侧直接相连,采用耐高压超快恢复二极管,避免 $S_1(S_2)$ 续流二极管反向恢复时产生的尖峰电压使 DESAT 误触发。电源电压封锁功能旨在驱动电压低于 13 V 时,驱动被强行封锁,防止 MOSFET 工作在放大区,当芯片供电电压超过 UVLO 的正向导通阈值 13 V 时,输出被释放。

2.2.2 输入增强与滤波电路

输入增强与滤波电路如图 5(a) 中虚线所示,电阻 R_4 减少 Q_1 的寄生电容,消除开关噪声, C_3 与 R_5 构成 RC 滤波电路,改善 PWM 驱动信号波形。一般 DSP 输出驱动电流小于 10 mA,而光耦的原边电流设置为 10 mA,电压为 5 V。当 DSP 输出占空比较小或驱动电流不足时,用 DSP 直接接在光耦的输入侧易造成发光二极管内部电流不足而导致输出失真的问题。因此在光耦输入侧加入了 2N7002 功率增强型 MOS 管 Q_1 间接驱动,MOS 管为电压驱动型,DSP 输入的 PWM 为高电平时,即便栅极电流很小,只要电压足够,依然能可靠导通。而驱动光耦发光二极管的电流由供电电路 +5 V 与驱动电阻 R_2 提供,从而起到提高导通可靠性和增强信号的作用。

驱动增强电路的加入带有一定的延迟,主要来

源于 MOS 管 2N7002 的导通延迟,2N7002 的导通特性如图 6 所示。

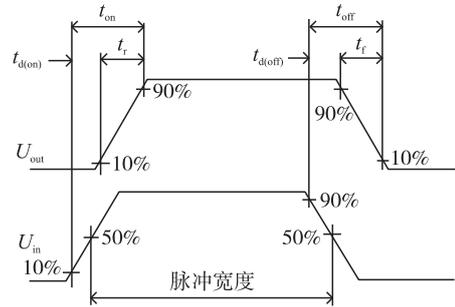


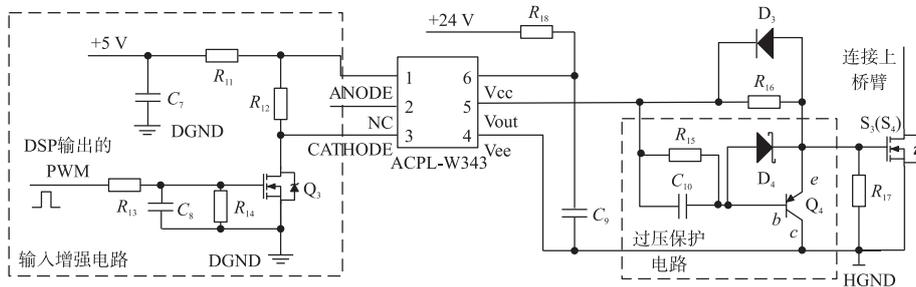
图 6 光耦输入脉冲延迟

PWM 脉冲宽度相同,导通时间 $T = 1/f = 1/16\ 000 = 6.25 \times 10^4$ ns,DSP 输出 PWM 上升沿时间 t_r 与下降沿时间 t_f 大约为 5 ns,2N7002 上升沿触发延迟 $t_{on} = 10$ ns,下降沿触发延迟 $t_{off} = 15$ ns,得到上升沿触发误差 $t_{d(on)} = 10 - 5 = 5$ ns,下降沿关断误差 $t_{d(off)} = 15 - 5 = 10$ ns。总开关延迟误差不超过 0.1%。

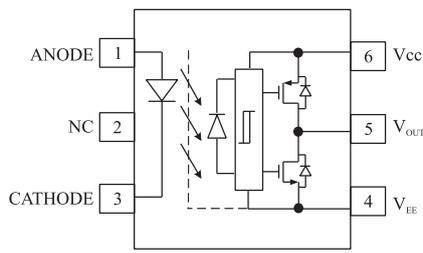
2.3 下桥臂及续流管驱动电路设计

采用上、下桥臂分桥驱动的方式使下桥臂不需要再设置过流保护、低压闭锁的功能,可以选取普通光耦芯片。而光耦隔离芯片在驱动电路时由于其本身的特性,会对驱动信号造成一定的延迟,分桥驱动时,如果两个驱动电路延迟相差较大,会产生死区时间,导致两个桥臂不同时导通,影响输出波形,因此下桥臂需选用与上桥芯片延迟时间相近的光耦芯片,ACPL-W343 导通延迟时间 200 ns,能直接驱动额定值达到 1 200 V/200 A 的 MOSFET 与 IGBT,符合要求。

下桥臂 S_3 、 S_4 及续流管 S_5 、 S_6 驱动电路如图 7 所示。为满足上、下桥臂驱动电路延迟误差相同,减



(a) 下桥臂及续流管驱动电路



(b) ACPL-W343 芯片内部结构

图 7 $S_3 \sim S_6$ 驱动电路及芯片内部结构图

少占空比失真, 下桥臂输入侧同样接入一个输入增强电路, 在原有输出的驱动基础上, 增加尖峰电压闭锁保护功能, 如图 7(a) 虚线所示。

尖峰电压闭锁电路主要由稳压二极管 D_4 , N 沟道三极管 Q_4 , 以及滤波 RC 回路组成。当下桥臂 S_3 (S_4) 的 U_{ds} 出现尖峰时, 会导致 U_{gs} 电压持续上升, 直至高过稳压二极管 D_4 的稳压值, 稳压二极管击穿使三极管 U_{eb} 电压稳定在高压导通状态, 从而使三极管 ec 级导通, 加在 S_3 (S_4) 上的驱动信号直接置低, 关断开关管达到保护的作用。当电压恢复后, 稳压二极管两端电压下降, 三极管不再导通, 驱动信号恢复正常驱动。稳压二极管的设置决定了保护的电压值, 考虑光耦输出最大电压为 30 V, 留一定裕度取 40 V。

Heric 后级 S_5 、 S_6 采用与下桥臂相同的驱动电路, 其工作原理不再赘述。

3 实验验证

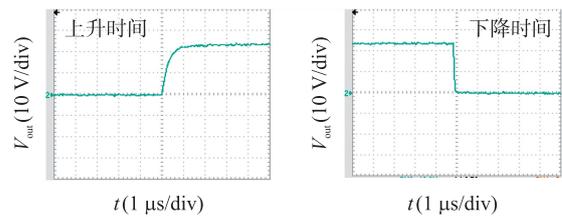
为了验证 Heric 逆变器分桥驱动电路的有效性, 本文基于 DSP 芯片 TMS320F28335 控制核心, 设计一款单相单极性调制 Heric 逆变器, 输入直流电压 320 V, 由前级 DCDC 升压电路得到, 输出交流电压 220 V, 输出功率 3 kW, 相关参数见表 1。

测试高频 16 kHz 时得到上、下桥臂驱动电路输出的驱动信号上升下降沿延迟时间如图 8 所示, 可以看出两种驱动电路对于上升沿与下降沿的延时几乎同步, 不会产生死区问题, 没有出现振荡现象。由图 5(a) 可知, 在开关管开通时, 电源向电阻 R_g 与栅

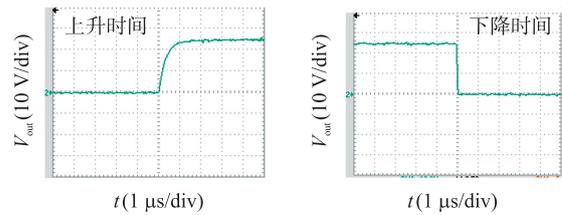
极电容 C_{gs} 充电过程较慢, 而关断时电容通过二极管 D_2 放电很快, 因此上升时间大于下降时间, 导通时间为 1 μs , 关断时间为 0.2 μs 。

表 1 实验样机电路参数

$S_1 \sim S_4$ 开关频率/kHz	16
S_5, S_6 开关频率/Hz	50
$S_1 \sim S_4$ 开关管	SPW47N60C
S_5, S_6 开关管	IHW40T60
滤波电感/mH	1.6
滤波电容/ μF	4.7



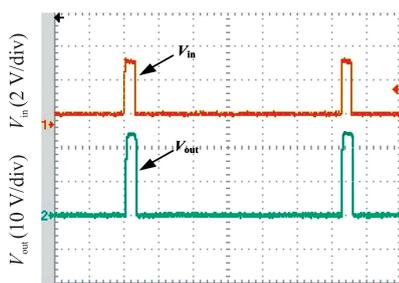
(a) 上桥臂 S_1 、 S_2 高频时上升下降沿



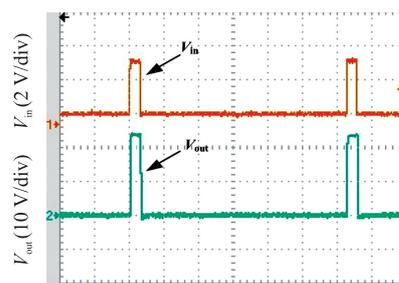
(b) 下桥臂 S_3 、 S_4 高频时上升下降沿

图 8 上、下桥分别在高频时上升下降延迟波形

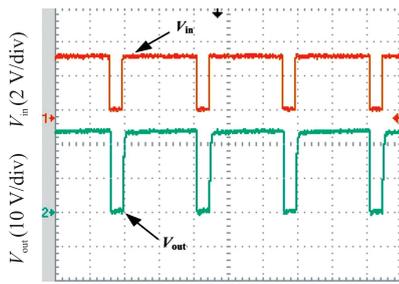
测试在高频 16 kHz 下不同的占空比时得到的驱动波形如图 9 所示, V_{in} 为 DSP 输出的 PWM, V_{out} 为光耦隔离输出至功率管的驱动电压。可以看出上



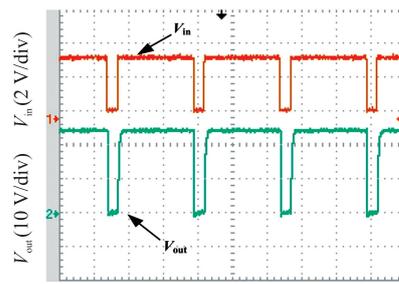
(a) 上桥臂 5% 占空比



(b) 下桥臂 5% 占空比



(c) 上桥臂 95% 占空比



(d) 下桥臂 95% 占空比

图 9 上下桥臂高频时占空比变化驱动波形

下桥驱动电路无论在高占空比 95% 还是低占空比 5% 时都能得到良好的驱动电压波形, 不存在失真现象, 同步性较高, 能实现较好的驱动效果。

低压闭锁保护、过流保护与过压保护瞬态波形如图 10 所示。 V_{cc} 为 ACPL-332J 芯片输出端供电电压, V_{out} 为芯片输出电压。图 10(a) 为上桥臂输出的驱动电压与芯片供电电压, 可以看出驱动电路输出电压跟随供电电压变化, 直至低于 10 V 时彻底关断。图 10(b) 所示为上桥臂驱动电路输出的驱动电

压, 当流过开关管电流过大时, 驱动电路能实现对 PWM 的软关断, 防止一瞬间关断电流过大, 损坏开关管。图 10(c) 为下桥臂输出电压出现尖峰时的关断波形, 当电压峰值达到 45 V 时, 保护电路工作, 快速关断 PWM 驱动。

Heric 电路中 $S_1 \sim S_4$ 的驱动波形如图 11(a) 所示, S_5 与 S_6 的驱动波形如图 11(b) 所示。输出经 LC 滤波后输出电压为平滑正弦波, 如图 11(c) 所示。

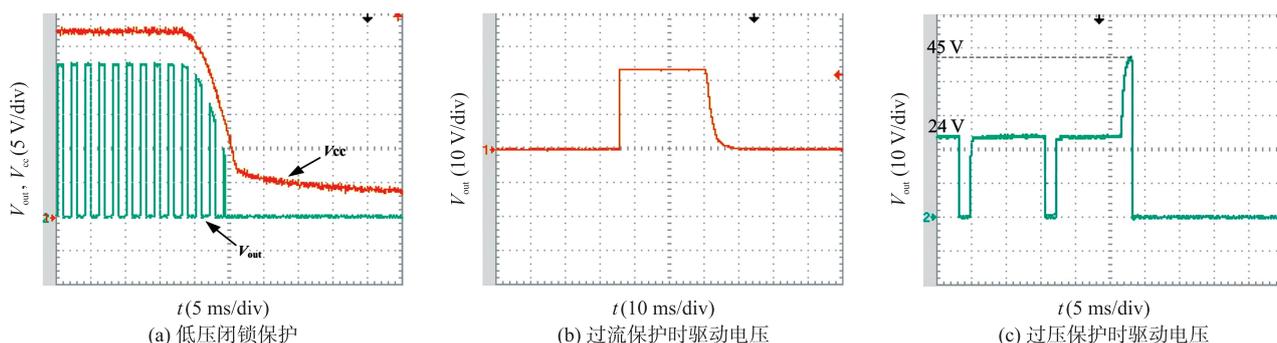


图 10 保护功能暂态波形

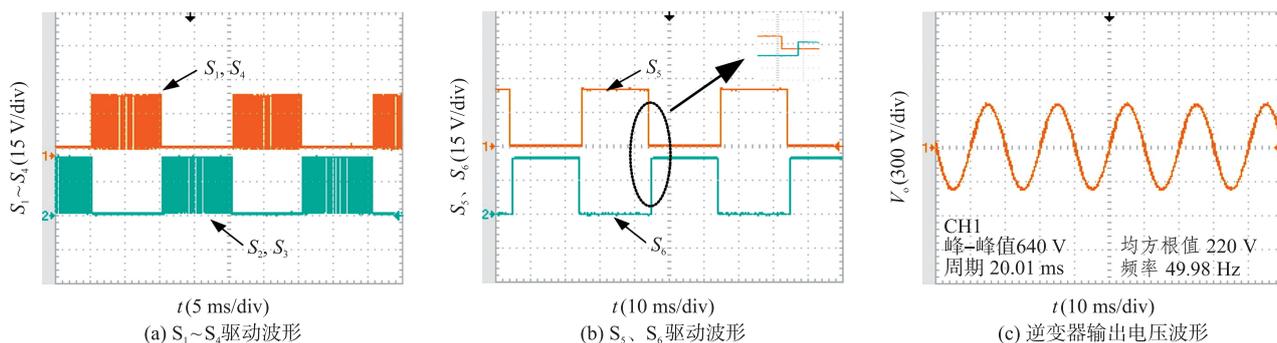


图 11 逆变器工况波形

4 结论

通过对 Heric 逆变器各个模态与桥臂导通特性分析, 提出上、下桥臂采用不同的驱动电路驱动的方法, 通过在上桥臂设置过流保护与低压闭锁保护, 下桥臂设置尖峰电压闭锁功能, 达到两个桥臂保护功能结合的效果, 与传统的驱动方式相比, 在节约制作成本与提高驱动电路安全性方面具有明显优势。在光耦芯片输入侧加入输入增强电路, 减少了输出占空比失真, 实验设计了一台 3 kW 光伏逆变器, 结果表明驱动效果较好, 得出较为理想的电压波形。

参考文献:

[1] 胡雪峰, 张玉勃, 高本宝, 等. 一种无变压器无漏电流的集成升压光伏逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3344-3351.
[2] 李英春, 南艳子, 张博, 等. 基于电流无差拍控制的单相光伏并

网逆变器研究[J]. 电子器件, 2018, 41(1): 152-157.
[3] 郭小强, 贾晓瑜. 非隔离型级联 H5 光伏逆变器共模漏电流特性分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 361-369.
[4] Schmidt H, Siedle C, Ketterer J. Inverter for Transforming a DC Voltage into an AC Current or an AC Voltage; Germany, EP1369985 (A2) [P]. 2003-12-10.
[5] 胡亮灯, 肖明恺, 楼徐杰. 中高压大功率 IGBT 数字有源门极开环级驱动技术[J]. 电工技术学报, 2018, 33(10): 2365-2375.
[6] Rodríguez M A, Vázquez A, Hernández L. Study of a Novel Electronics Circuit for Detecting Faults in the IGBT[J]. IEEE Latin America Transactions, 2014, 12(3): 402-409.
[7] 范霖康, 齐铂金, 徐俊强, 等. 载波调制型 MOSFET 驱动电路的设计与实现[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3164-3172.
[8] 赵凌霄. 基于 DSP 的车载充电机的研究与实现[J]. 电源学报, 2018, 16(3): 158-162.
[9] 郭石垒, 秦会斌. 一种新型单相全桥 SPWM 逆变器设计方法[J]. 电子器件, 2016, 39(5): 1261-1264.
[10] 袁义生, 邱志卓, 钟青峰. 逆变器开关管驱动电流技术研究[J]. 电源学报, 2019, 17(3): 133-139.

- [11] 赵敏,张东来,李铁才,等. 功率 MOSFET 隔离驱动电路设计分析[J]. 电力电子技术,2016,50(2):81-83.
- [12] 赵阳,刘平,黄守道,等. 碳化硅 MOSFET 栅极驱动的优化设计[J]. 电力电子技术,2019,53(7):137-140.
- [13] 王翰祥,蒋栋. 基于分立器件的 SiC MOSFET 功率模块门极驱动电路设计[J]. 电工电能新技术,2018,37(10):51-57.
- [14] 蔡骏,向程,刘泽远,等. 低压电动车开关磁阻电机隔离驱动技术[J]. 电机与控制应用,2019,46(2):109-113.



李德正(1995-),男,汉族,湖南湘潭人,硕士研究生,主要研究方向为光伏并网逆变器,664938570@qq.com;



张兰红(1968-),女,汉族,江苏盐城人,博士,教授,研究生导师,主要研究方向为新能源发电技术、电力电子与电力传动,zlhycit@126.com。