



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115561560 B

(45) 授权公告日 2023. 09. 22

(21) 申请号 202211295894.2

(22) 申请日 2022.10.21

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 115561560 A

(43) 申请公布日 2023.01.03

(73) 专利权人 南京信息工程大学
地址 224002 江苏省盐城市盐南高新区新
河街道文港南路105号

(72) 发明人 余彬 余莉 丁新平 陈亮 苏芮

(74) 专利代理机构 南京纵横知识产权代理有限
公司 32224
专利代理师 钱玲玲

(51) Int. Cl.

G01R 31/00 (2006.01)

G01R 31/52 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 102420413 A, 2012.04.18

CN 103280962 A, 2013.09.04

CN 103916112 A, 2014.07.09

CN 110460012 A, 2019.11.15

CN 110719670 A, 2020.01.21

CN 111435834 A, 2020.07.21

CN 111722078 A, 2020.09.29

CN 114295953 A, 2022.04.08

DE 19617054 A1, 1997.11.06

JP 2005027380 A, 2005.01.27

JP 2011019372 A, 2011.01.27

审查员 王晓萍

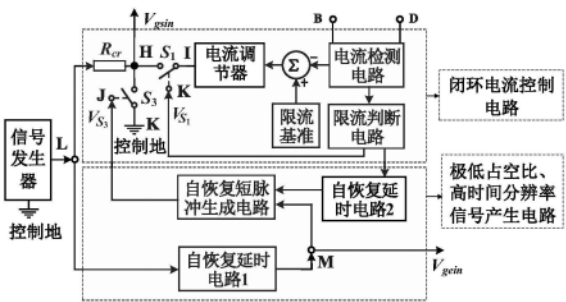
权利要求书4页 说明书13页 附图2页

(54) 发明名称

一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制
电路及控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路及控制方法,包括信号发生器,信号发生器连接闭环电流信号控制电路和信号产生电路,闭环电流控制电路用于监测被测功率器件的负载电流,在负载发生短路后,控制负载的电流处于恒定值,控制被测功率器件进入短路限流状态;信号产生电路接收信号发生器发出的方波信号进行延迟后传送至被测功率器件的负载,控制负载在额定状态和短路之间切换。本发明利用简单的硬件电路和信号发生器产生功率器件重复短路限流测试用控制信号,具有高可靠、低成本、设计方法简单、实施门槛低等优势。



1. 一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路,其特征在于:

包括信号发生器,用于产生周期性方波电压信号,所述信号发生器连接有闭环电流信号控制电路和信号产生电路;

所述信号发生器与闭环控制电路之间设置有第一电阻 R_{cr} ,所述第一电阻 R_{cr} 的输出端连接被测功率器件的栅极;

所述闭环电流控制电路包括电流检测判断电路和电流调节电路,所述电流调节电路的输出端连接第一小信号电子开关 S_1 ,所述第一小信号电子开关 S_1 的控制端连接电流检测判断电路的输出端,所述第一小信号电子开关 S_1 的另一端连接所述第一电阻 R_{cr} ;所述电流检测判断电路用于检测被测功率器件的负载电流并进行限流判断,所述电流调节电路用于基于限流判断结果控制被测功率器件的负载电流;

所述信号产生电路包括自恢复延时电路1、自恢复延时电路2和自恢复短脉冲生成电路,所述自恢复延时电路1接入信号发生器,所述自恢复延时电路1的输出端连接被测功率器件的负载,用于接收信号发生器发出的周期性方波信号并进行延迟后输入被测功率器件的负载,使得负载由额定状态进入短路状态;

所述自恢复延时电路2接入电流检测判断电路的输出端,用于接收电流检测判断电路的输出电压信号;

所述自恢复短脉冲生成电路接通自恢复延时电路1和自恢复延时电路2的输出端;

所述第一电阻 R_{cr} 的输出端连接有第二小信号电子开关 S_3 ,所述第二小信号电子开关 S_3 接地,所述第二小信号电子开关的控制端接通自恢复短脉冲生成电路的输出端。

2. 根据权利要求1所述的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路,其特征在于:

所述电流检测判断电路包括电流检测电路和限流判断电路,所述限流判断电路的输入端接入电流检测电路的输出端,用于接收电流检测电路输出的电流检测值,并进行预阈值判断。

3. 根据权利要求2所述的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路,其特征在于:

所述电流检测电路包括第一电容 C_1 、第二电阻 R_1 、第三电阻 R_2 、第四电阻 R_3 、第五电阻 R_4 和第一运算放大器 op_1 ;

所述第一电容 C_1 的两端分别连接第二电阻 R_1 和第四电阻 R_3 的输入端,所述第二电阻 R_1 和第四电阻 R_3 的输入端连接被测功率器件的检测电阻 R_{sense} ,用于检测负载的电流;

所述第二电阻 R_1 和第三电阻 R_2 串接,且结点接入第一运算放大器 op_1 的负输入端,所述第三电阻 R_2 的输出端连接第一运算放大器 op_1 的输出端;

所述第四电阻 R_3 和第五电阻 R_4 串接,且结点接入第一运算放大器 op_1 的正输入端,所述第五电阻 R_4 的输出端接地;

所述第一运算放大器 op_1 的输出端连接限流判断电路的输入端,用于向限流判断电路输出检测到的负载的电流。

4. 根据权利要求3所述的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路,其特征在于:

所述限流判断电路包括第十电阻 R_9 、第十一电阻 R_{10} 、第十二电阻 R_{11} 、第十三电阻 R_{12} 、第二控制电压源 V_{DD} 和第三运算放大器 op_3 ;

所述第十电阻 R_9 和第十一电阻 R_{10} 串接,且结点接入第三运算放大器 op_3 的正输入端,所述第十一电阻 R_{10} 的输出端接地;

所述第十二电阻 R_{11} 和第十三电阻 R_{12} 串接,且节点接入第三运算放大器 op_3 的负输入端,所述第十三电阻 R_{12} 的输出端接地;

所述第十二电阻 R_{11} 的输入端连接第二控制电压源 V_{DD} ,所述第十一电阻 R_{10} 和第十三电阻 R_{12} 的输出端接地;

所述第十电阻 R_9 的输入端接入电流检测电路的输出端,所述第三运算放大器 op_3 的输出端连接第一小信号电子开关 S_1 的控制端和自恢复延时电路2的输入端,用于基于负载的电流值判断结果控制第一小信号电子开关 S_1 的动作,以及将判断结果输入自恢复延时电路2。

5. 根据权利要求2所述的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路,其特征在于:

所述电流调节电路包括电流调节器和限流基准电路,所述电流调节器的输入端连接电流检测电路的输出端和限流基准电路,所述电流调节器的输出端连接第一小信号电子开关 S_1 ,用于在第一小信号电子开关 S_1 动作后接入被测功率器件的栅极,控制负载电流。

6. 根据权利要求5所述的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路,其特征在于:

所述电流调节器包括第二运算放大器 op_2 ,以及串接的第八电阻 R_7 、第九电阻 R_8 和第二电容 C_2 ;

所述第八电阻 R_7 和第九电阻 R_8 的结点接入第二运算放大器 op_2 的负输入端,所述第二电容 C_2 的自由端接入第二运算放大器 op_2 的输出端,所述第二运算放大器 op_2 的输出端连接第一小信号电子开关 S_1 ;

所述第二运算放大器 op_2 的正输入端接入限流基准电路。

7. 根据权利要求5所述的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路,其特征在于:

所述限流基准电路包括串接的第一控制电压源 V_{CC} 、第六电阻 R_5 和第七电阻 R_6 ,所述第七电阻 R_6 的另一端接地;

所述第六电阻 R_5 和第七电阻 R_6 的连接结点接入电流调节器。

8. 根据权利要求1所述的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路,其特征在于:

所述自恢复延时电路1包括串接的第十四电阻 R_{13} 和第三电容 C_3 ;

所述第十四电阻 R_{13} 的输入端连接信号发生器,所述第十四电阻 R_{13} 和第三电容 C_3 的连接结点接入自恢复短脉冲生成电路和被测功率器件的负载,用于将从信号发生器接收的周期性方波信号传入自恢复短脉冲生成电路和被测功率器件的负载,控制负载从额定状态进入短路状态;

所述第三电容 C_3 的一端接地。

9. 根据权利要求1所述的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路,其特征在于:

所述自恢复延时电路2包括串接的第十五电阻 R_{14} 和第四电容 C_4 ,且结点接入自恢复短脉冲生成电路的输入端,所述第十五电阻 R_{14} 的一端接入电流检测判断电路的输出端,所述第四电容 C_4 的一端接地。

10. 根据权利要求1所述的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路,其特征在于:

所述自恢复短脉冲生成电路包括非门 ng_1 、与非门 ag_1 和与非门 ag_2 ;

所述非门 ng_1 的输入端连接自恢复延时电路的输出端,所述非门 ng_1 的输出端连接与非门 ag_1 的一个输入端,所述与非门 ag_2 的一个输入端连接自恢复延时电路1的输出端;

所述与非门 ag_1 的另一个输入端接入与非门 ag_2 的输出端,所述与非门 ag_2 的另一个输入

端接入与非门 ag_1 的输出端；

所述与非门 ag_1 的输出端连接第二小信号电子开关 S_3 的控制端，用于通过延迟后信号发生器发出的高占空比的周期性方波信号控制第二小信号电子开关 S_3 的通断。

11. 根据权利要求1-10任一项所述的控制电路的控制方法，其特征在于：

步骤1：向被测功率器件的栅极输出高电平电压，控制被测功率器件进入额定状态；

步骤2：

步骤2.1：将同一高电平电压进行延时后输入负载，控制负载进入短路状态，获取负载短路时的电流信号，若其大于限流阈值，则控制电流调节器工作，控制负载的电流处于恒定值，使得被测功率器件进入短路限流状态；

步骤2.2：若负载短路时的电流大于限流阈值，则发出限流控制信号，并进行延时后与延时后的高电平信号结合，生成控制信号，控制被测功率器件的关断，解除被测功率器件短路限流状态，被测功率器件进入关断状态；

步骤3：被测功率器件进入冷却期，完成老化测试周期。

12. 根据权利要求11所述的控制方法，其特征在于：

步骤1具体包括：

信号发生器输出高电平电压 V_{LH} ，高电平电压一方面通过第一电阻 R_{cr} 输入被测功率器件的驱动电路1，使得驱动电路1处于高电平状态，使得被测功率器件的栅极处于高电平状态，控制被测功率器件导通，进入额定状态：

$$t_{on} = R_{13} C_3 \ln \left(1 - \frac{V_{geILMax}}{V_{LH}} \right)$$

其中， t_{on} 为额定状态的时间； R_{13} 为第十四电阻 R_{13} 的阻值； C_3 为第三电容 C_3 的电容值； V_{LH} 为信号发生器产生的高电平电压信号； $V_{geILMax}$ 为控制负载短路的大功率IGBT开关的驱动电路输入的低电平最大值。

13. 根据权利要求11所述的控制方法，其特征在于：

步骤2.1具体包括：

信号发生器输出高电平电压经过自恢复延时电路1进行延时，然后进入负载的驱动电路2，使得驱动电路进入高电平状态，控制负载进入短路状态；

电流检测电路监测负载的电流数据，并将监测值发送至限流判断电路；

限流判断电路中设置有限流阈值，若负载的电流数据大于限流阈值，限流判断电路输出高电平电压信号至第一小信号电子开关 S_1 的控制端，控制第一小信号电子开关 S_1 导通，将电流调节器接入被测功率器件的栅极，将负载的电流限制在恒定值 I_{Limit} ，使得被测功率器件进入短路限流状态，加热被测功率器件，加速被测功率器件老化。

14. 根据权利要求13所述的控制方法，其特征在于：

步骤2.2具体包括：

限流判断电路输出高电平电压信号至自恢复延时电路2进行延时，然后进入自恢复短脉冲生成电路，自恢复延时电路1将信号发生器发出的高电平电压进行延迟后接入自恢复短脉冲生成电路，自恢复短脉冲生成电路综合自恢复延时电路1和自恢复延时电路2的输出电压信号，输出高电平电压信号使得第二小信号电子开关 S_3 控制端动作，将第二小信号电子开关 S_3 接通，被测功率器件通过第二小信号电子开关 S_3 接地，被测功率器件被关断，其短

路限流状态解除,第一小信号电子开关 S_1 断开,完成一个短路限流时间的控制:

$$t_{sc1} = R_{14} C_4 \ln \left(1 - \frac{V_{scILMax}}{V_{KH}} \right)$$

其中, t_{sc1} 为短路限流时间; R_{14} 为第十五电阻 R_{14} 的电阻值; C_4 为第四电容 C_4 的电容值; V_{KH} 为限流判断电路输出高电平电压信号; $V_{scILMax}$ 为非门 ng_1 的输入低电平的最大值。

15. 根据权利要求11所述的控制方法,其特征在于:

步骤3具体包括:

被测功率器件处于关断状态,信号发生器发出低电平电压信号 V_{LL} ,经自恢复延时电路1的延时后进入负载的驱动电路2,使得驱动电路2发出低电平,控制负载恢复额定状态,限流判断电路收到的电流未超过其限流阈值,限流判断电路输出低电平电压信号,自恢复延时电路2接收限流判断电路的低电平信号,进行延迟后输入自恢复短脉冲生成电路,同时自恢复短脉冲生成电路接入被自恢复延时电路1延时后的信号发生器的低电平信号,自恢复短脉冲生成电路综合延时电路1和延时电路2发出的低电平电压信号,输出低电平电压信号,控制第二小信号电子开关 S_3 的控制端动作,使得第二小信号电子开关 S_3 断开;

自短路限流结束至信号发生器输出高电平,被测功率器件处于关断状态,被测功率器件被冷却,完成老化测试周期。

一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路及控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路及控制方法,属于电力电子技术与电工技术领域。

背景技术

[0002] 功率器件老化测试是研究功率器件可靠性的重要手段。根据功率器件实际应用工况开发出的功率器件老化测试可有效揭示实际工况下的功率器件失效、退化机理,对其实际使用寿命有重要意义。

[0003] 直流固态断路器是利用功率器件作为负载电流通断的开关装置,是直流微电网快速、可靠短路故障保护技术的关键。直流固态断路器在正常工作下长时间保持额定导通状态,流入功率器件的导通电流较小,不会在功率器件芯片内部产生较大温度;当直流微电网发生短路故障时,直流固态断路器可快速将短路大电流限制在可接受的水平,并维持数十微秒至数毫秒,尽管限流时间较短,但是极大的功耗会在功率器件芯片内部产生极大的高温,导致功率器件的退化和失效,此外,在限流状态结束后,保存在线路中的寄生电感能量会通过并联在功率器件两端的压敏电阻吸收,压敏电阻两端的钳位高电压也会对功率器件的退化和失效造成影响。因此,有必要针对直流固态断路器的短路限流工况,开展功率器件老化测试方法研究。直流固态断路器短路限流工况通常是在长时额定工况后开始的,额定导通时间是秒级,而短路限流时间是微秒级,这就导致循环老化测试中控制功率器件开通、关断以及限流时间的控制信号的时间分辨率应在微秒级至秒级范围内变化,如此大的时间跨度,对控制信号产生电路提出了较高的要求。此外,功率器件循环老化测试中,在短路限流后,需要一定时间让功率器件冷却,冷却时间为秒级,这会导致控制信号占空比极低(如,短路限流时间为 $50\mu\text{s}$,额定导通时间为 2s ,冷却时间为 3s ,则短路限流信号的占空比约为 0.001% ,即 $50\mu\text{s}/(2\text{s}+3\text{s})=0.001\%$),这又进一步提高了对控制信号产生电路的要求。

[0004] 现有技术的缺陷和不足:

[0005] (1) 传统功率器件老化测试方法包含:交流秒级加速功率循环测试方法和直流秒级加速功率循环测试方法。在这两种方法中,功率器件加热时间和冷却时间通常较长,在秒级范围内变化,功率器件控制信号的占空比通常较大,对时间分辨率的要求也不高,因此,功率循环过程中,大小负载的循环变化可以完全由电子负载实现,控制电路只需要负责功率器件的开通即可,不存在极低占空比和高时间分辨率问题。传统功率器件老化测试方法的控制电路,难以适用针对直流固态断路器短路限流工况开发的功率器件的老化测试。

[0006] (2) 直流固态断路器的功率器件短路限流的控制方法有基于开环降低栅压的控制方法和基于电流闭环的控制方法两种。基于开环降低栅压的控制方法是当检测到流入功率器件的漏极电流大于等于负载短路电流时,控制电路立即发出信号将功率器件的栅极电压降低到较低值,从而控制功率器件的漏极电流值,达到控制负载短路电流的目的。但是由于功率器件漏极电流不仅与栅极电压有关还与功率器件结温有关。虽然负载短路电流被限制,但是其数值仍然较大,会导致功率器件结温的增大,结温增大会使功率器件漏极电流进

一步增大,因此,基于开环降低栅压的控制方法对负载短路电流的控制能力有限。基于电流闭环的控制方法仍然是通过控制功率器件栅极电压控制漏极电流,但该方法中加入了电流闭环,可以将漏极电流控制到任意可接受的恒定值。但是,目前的基于电流闭环的控制方法没有考虑负载的自动重复短路,不能对功率器件进行循环重复的老化测试;此外,极低占空比、高时间分辨率的控制信号需要借助高性能FPGA控制板才能产生,这增加了控制电路的成本和设计难度,同时使用FPGA控制板产生需要的信号也存在一定门槛,不便于针对直流固态断路器短路限流工况进行功率器件的老化测试。

[0007] 综上,现有用于功率器件老化测试的控制电路及控制方法难以适用于直流固态断路器短路限流工况下的功率器件的老化测试的实际应用。

发明内容

[0008] 本发明所要解决的技术问题是克服现有技术的缺陷,提供一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路及控制方法,本发明的控制电路完全利用纯硬件电路构成,同时只需要借助信号发生器,即可实现对功率器件进行重复短路限流测试,从而达到对功率器件老化测试的目的,本发明的控制方法简单、实施门槛低,控制电路由纯硬件组成,设计成本低和可靠高。

[0009] 为达到上述目的,第一方面,本发明提供一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路,包括信号发生器,用于产生周期性方波电压信号,所述信号发生器连接有闭环电流控制电路和信号产生电路;

[0010] 所述信号发生器与闭环电流控制电路之间设置有第一电阻 R_{cr} ,所述第一电阻 R_{cr} 的输出端连接被测功率器件的栅极;

[0011] 所述闭环电流控制电路包括电流检测判断电路和电流调节电路,所述电流调节电路的输出端连接第一小信号电子开关 S_1 ,所述第一小信号电子开关 S_1 的控制端连接电流检测判断电路的输出端;所述电流检测判断电路用于检测被测功率器件的负载电流并进行限流判断,所述电流调节电路用于基于限流判断结果控制被测功率器件的负载电流;

[0012] 所述信号产生电路包括自恢复延时电路1、自恢复延时电路2和自恢复短脉冲生成电路,所述自恢复延时电路1接入信号发生器,所述自恢复延时电路1的输出端连接被测功率器件的负载,用于接收信号发生器发出的周期性方波信号并进行延迟后输入被测功率器件的负载,使得负载由额定状态进入短路状态;

[0013] 所述自恢复延时电路2接入电流检测判断电路的输出端,用于接收电流检测判断电路的输出电压信号;

[0014] 所述自恢复短脉冲生成电路接通自恢复延时电路1和自恢复延时电路2的输出端;

[0015] 所述第一电阻 R_{cr} 的输出端连接有第二小信号电子开关 S_3 ,所述第二小信号电子开关 S_3 接地,所述第二小信号电子开关的控制端接通自恢复短脉冲生成电路的输出端。

[0016] 进一步地,所述电流检测判断电路包括电流检测电路和限流判断电路,所述限流判断电路的输入端接入电流检测电路的输出端,用于接收电流检测电路输出的电流检测值,并进行阈值判断。

[0017] 进一步地,所述电流检测电路包括第一电容 C_1 、第二电阻 R_1 、第三电阻 R_2 、第四电阻 R_3 、第五电阻 R_4 和第一运算放大器 op_1 ;

[0018] 所述第一电容 C_1 的两端分别连接第二电阻 R_1 和第四电阻 R_3 的输入端,所述第二电阻 R_1 和第四电阻 R_3 的输入端连接被测功率器件的检测电阻 R_{sense} ,用于检测负载的电流;

[0019] 所述第二电阻 R_1 和第三电阻 R_2 串接,且结点接入第一运算放大器 op_1 的负输入端,所述第三电阻 R_2 的输出端连接第一运算放大器 op_1 的输出端;

[0020] 所述第四电阻 R_3 和第五电阻 R_4 串接,且结点接入第一运算放大器 op_1 的正输入端,所述第五电阻 R_4 的输出端接地;

[0021] 所述第一运算放大器 op_1 的输出端连接限流判断电路的输入端,用于向限流判断电路输出检测到的负载的电流。

[0022] 进一步地,所述限流判断电路包括第十电阻 R_9 、第十一电阻 R_{10} 、第十二电阻 R_{11} 、第十三电阻 R_{12} 、第二控制电压源 V_{DD} 和第三运算放大器 op_3 ;

[0023] 所述第十电阻 R_9 和第十一电阻 R_{10} 串接,且结点接入第三运算放大器 op_3 的正输入端,所述第十一电阻 R_{10} 的输出端接地;

[0024] 所述第十二电阻 R_{11} 和第十三电阻 R_{12} 串接,且节点接入第三运算放大器 op_3 的负输入端,所述第十三电阻 R_{12} 的输出端接地;

[0025] 所述第十二电阻 R_{11} 的输入端连接第二控制电压源 V_{DD} ,所述第十一电阻 R_{10} 和第十三电阻 R_{12} 的输出端接地;

[0026] 所述第十电阻 R_9 的输入端接入电流检测电路的输出端,所述第三运算放大器 op_3 的输出端连接第一小信号电子开关 S_1 的控制端和自恢复延时电路2的输入端,用于基于负载的电流值判断结果控制第一小信号电子开关 S_1 的动作,以及将判断结果输入自恢复延时电路2。

[0027] 进一步地,所述电流调节电路包括电流调节器和限流基准电路,所述电流调节器的输入端连接电流检测电路的输出端和限流基准电路,所述电流调节器的输出端连接第一小信号电子开关 S_1 ,用于在第一小信号电子开关 S_1 动作后接入被测功率器件的栅极,控制负载电流。

[0028] 进一步地,所述电流调节器包括第二运算放大器 op_2 ,以及串接的第八电阻 R_7 、第九电阻 R_8 和第二电容 C_2 ;

[0029] 所述第八电阻 R_7 和第九电阻 R_8 的结点接入第二运算放大器 op_2 的负输入端,所述第二电容 C_2 的自由端接入第二运算放大器 op_2 的输出端,所述第二运算放大器 op_2 的输出端连接第一小信号电子开关 S_1 ;

[0030] 所述第二运算放大器 op_2 的正输入端接入限流基准电路。

[0031] 进一步地,所述限流基准电路包括串接的第一控制电压源 V_{CC} 、第六电阻 R_5 和第七电阻 R_6 ,所述第七电阻 R_6 的另一端接地;

[0032] 所述第六电阻 R_5 和第七电阻 R_6 的连接结点接入电流调节器。

[0033] 进一步地,所述自恢复延时电路1包括串接的第十四电阻 R_{13} 和第三电容 C_3 ;

[0034] 所述第十四电阻 R_{13} 的输入端连接信号发生器,所述第十四电阻 R_{13} 和第三电容 C_3 的连接结点接入自恢复短脉冲生成电路和被测功率器件的负载,用于将从信号发生器接收的周期性方波信号传入自恢复短脉冲生成电路和被测功率器件的负载,控制负载从额定状态进入短路状态;

[0035] 所述第三电容 C_3 的一端接地。

[0036] 进一步地,所述自恢复延时电路2包括串接的第十五电阻 R_{14} 和第四电容 C_4 ,且结点接入自恢复短脉冲生成电路的输入端,所述第十五电阻 R_{14} 的一端接入电流检测判断电路的输出端,所述第四电容 C_4 的一端接地。

[0037] 进一步地,所述自恢复短脉冲生成电路包括非门 ng_1 、与非门 ag_1 和与非门 ag_2 ;

[0038] 所述非门 ng_1 的输入端连接自恢复延时电路的输出端,所述非门 ng_1 的输出端连接与非门 ag_1 的一个输入端,所述与非门 ag_2 的一个输入端连接自恢复延时电路1的输出端;

[0039] 所述与非门 ag_1 的另一个输入端接入与非门 ag_2 的输出端,所述与非门 ag_2 的另一个输入端接入与非门 ag_1 的输出端;

[0040] 所述与非门 ag_1 的输出端连接第二小信号电子开关 S_3 的控制端,用于通过延迟后信号发生器发出的高占空比的周期性方波信号控制第二小信号电子开关 S_3 的通断。

[0041] 第二方面,本发明基于第一方面任一项所述的控制电路提供一种控制方法,包括如下步骤:

[0042] 步骤1:向被测功率器件的栅极输出高电平电压,控制被测功率器件进入额定状态;

[0043] 步骤2:

[0044] 步骤2.1:将同一高电平电压进行延时后输入负载,控制负载进入短路状态,获取负载短路时的电流信号,若其大于限流阈值,则控制电流调节器工作,控制负载的电流处于恒定值,使得被测功率器件进入短路限流状态;

[0045] 步骤2.2:若负载短路时的电流大于限流阈值,则发出限流控制信号,并进行延时后与延时后的高电平信号结合,生成控制信号,控制被测功率器件的关断,解除被测功率器件短路限流状态,被测功率器件进入关断状态;

[0046] 步骤3:被测功率器件进入冷却期,完成老化测试周期。

[0047] 进一步地,步骤1具体包括:

[0048] 信号发生器输出高电平电压 V_{LH} ,高电平电压一方面通过第一电阻 R_{cr} 输入被测功率器件的驱动电路1,使得驱动电路1处于高电平状态,使得被测功率器件的栅极处于高电平状态,控制被测功率器件导通,进入额定状态:

$$[0049] \quad t_{on} = R_{13} C_3 \ln \left(1 - \frac{V_{geILMax}}{V_{LH}} \right)$$

[0050] 其中, t_{on} 为额定状态的时间; R_{13} 为第十四电阻 R_{13} 的阻值; C_3 为第三电容 C_3 的电容值; V_{LH} 为信号发生器产生的高电平电压信号; $V_{geILMax}$ 为控制负载短路的大功率IGBT开关的驱动电路输入的低电平最大值。

[0051] 进一步地,步骤2.1具体包括:

[0052] 信号发生器输出高电平电压经过自恢复延时电路1进行延时,然后进入负载的驱动电路2,使得驱动电路进入高电平状态,控制负载进入短路状态;

[0053] 电流检测电路监测负载的电流数据,并将监测值发送至限流判断电路;

[0054] 限流判断电路中设置有限流阈值,若负载的电流数据大于限流阈值,限流判断电路输出高电平电压信号至第一小信号电子开关 S_1 的控制端,控制第一小信号电子开关 S_1 导通,将电流调节器接入被测功率器件的栅极,将负载的电流限制在恒定值 I_{Limit} ,使得被测功率器件进入短路限流状态,加热被测功率器件,加速被测功率器件老化。

[0055] 进一步地,步骤2.2具体包括:

[0056] 限流判断电路输出高电平电压信号至自恢复延时电路2进行延时,然后进入自恢复短脉冲生成电路,自恢复延时电路1将信号发生器发出的高电平电压进行延迟后接入自恢复短脉冲生成电路,自恢复短脉冲生成电路综合自恢复延时电路1和自恢复延时电路2的输出电压信号,输出高电平电压信号使得第二小信号电子开关 S_3 控制端动作,将第二小信号电子开关 S_3 接通,被测功率器件通过第二小信号电子开关 S_3 接地,被测功率器件被关断,其短路限流状态解除,第一小信号电子开关 S_1 断开,完成一个短路限流时间的控制:

$$[0057] \quad t_{sc1} = R_{14} C_4 \ln \left(1 - \frac{V_{scILMax}}{V_{KH}} \right)$$

[0058] 其中, t_{sc1} 为短路限流时间; R_{14} 为第十五电阻 R_{14} 的电阻值; C_4 为第四电容 C_4 的电容值; V_{KH} 为限流判断电路输出高电平电压信号; $V_{scILMax}$ 为非门ng₁的输入低电平的最大值。

[0059] 进一步地,步骤3具体包括:

[0060] 被测功率器件处于关断状态,信号发生器发出低电平电压信号 V_{LL} ,经自恢复延时电路1的延时后进入负载的驱动电路2,使得驱动电路2发出低电平,控制负载恢复额定状态,限流判断电路收到的电流未超过其限流阈值,限流判断电路输出低电平电压信号,自恢复延时电路2接收限流判断电路的低电平信号,进行延迟后输入自恢复短脉冲生成电路,同时自恢复短脉冲生成电路接入被自恢复延时电路1延时后的信号发生器的低电平信号,自恢复短脉冲生成电路综合延时电路1和延时电路2发出的低电平电压信号,输出低电平电压信号,控制第二小信号电子开关 S_3 的控制端动作,使得第二小信号电子开关 S_3 断开;

[0061] 自短路限流结束至信号发生器输出高电平,被测功率器件处于关断状态,被测功率器件被冷却,完成老化测试周期。

[0062] 本发明所达到的有益效果:

[0063] 本发明提供一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路及控制方法,克服了传统用于功率器件老化测试的控制电路难以适用于功率器件短路限流测试的难题。

[0064] 本发明的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路及控制方法,利用简单的硬件电路和信号发生器即可实现,解决了传统用于功率器件短路限流测试的控制电路及控制方法对高端设备依赖程度高的难题,具有高可靠、低成本、设计方法简单、实施门槛低等优势。

[0065] 本发明的本发明的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路及控制方法适用于各种类型功率器件短路限流测试的应用,如常规的Si基功率器件(即,Si-MOSFET、Si-IGBT等)以及新型宽禁带功率器件(即SiC MOSFET,SiC IGBT以及GaN HEMT等)。

附图说明

[0066] 图1是本发明实施例提供的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路的电路图;

[0067] 图2是本发明实施例提供的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路中各部分的详细的电路原理图;

[0068] 图3是本发明实施例提供的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路连接功率器件老化测试功率电路后的测试原理图;

[0069] 图4是本发明实施例提供的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路的工作波形图。

具体实施方式

[0070] 下面结合附图对本发明作进一步描述。以下实施例仅用于更加清楚地说明本发明的技术方案,而不能以此来限制本发明的保护范围。

[0071] 实施例一:

[0072] 本发明的实施例一提供一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路如图1至图3所示,包括信号发生器、闭环电流控制电路和信号产生电路,所述信号发生器的一端接地,一端连接闭环电流控制电路和信号产生电路;所述信号发生器发出周期性的方波电压信号,通过方波电压信号的高低电平变换控制被侧功率器件的负载进行额定状态和短路状态的变换;所述闭环电流控制电路用于监测被测功率器件的负载电流,在负载发生短路后,控制负载的电流处于恒定值,控制被测功率器件进入短路限流状态;所述信号产生电路接收信号发生器发出的方波信号进行延迟后传送至被测功率器件的负载,控制负载在额定状态和短路之间切换;本发明克服了传统用于功率器件老化测试的控制电路难以适用于功率器件短路限流测试的难题;同时利用简单的硬件电路和信号发生器即可实现,解决了传统用于功率器件短路限流测试的控制电路及控制方法对高端设备依赖程度高的难题,具有高可靠、低成本、设计方法简单、实施门槛低等优势。

[0073] 在具体设计时,所述信号发生器与闭环电流控制电路之间设置有第一电阻 R_{cr} ,所述第一电阻 R_{cr} 的输出端接通被测功率器件的栅极,信号发生器发出的方波信号经第一电阻 R_{cr} 进入被测功率器件的栅极的驱动电路1,方波信号为高电平时,控制驱动电路1为高电平,控制被测功率器件的栅极导通,被测功率器件导通,被测功率器件进入额定状态。

[0074] 在具体设计时,所述闭环电流控制电路包括电流监测电路和电流调节电路,所述电流调节电路的输出端连接第一小信号电子开关 S_1 ,所述第一小信号电子开关 S_1 的控制端连接电流检测判断电路的输出端;所述所述电流检测判断电路用于检测被测功率器件的负载电流并进行限流判断,所述电流调节电路用于基于限流判断结果控制被测功率器件的负载电流;在被测功率器件的负载短路时,器电流超出电流监测电路的限流判断阈值,电流监测电路获取到短路电流后,由于短路电流超出限流判断阈值,则电流监测电路发出控制信号,控制第一小信号电子开关 S_1 的控制端动作,第一小信号电子开关 S_1 导通,电流调节电路工作,控制负载的电流为恒定值,使被测功率器件处于短路限流状态。

[0075] 在具体设计时,所述电流检测判断电路包括电流检测电路和限流判断电路,所述限流判断电路的输入端接入电流检测电路的输出端,用于接收电流检测电路输出的电流检测值,并进行阈值判断。

[0076] 在具体设计时,所述信号产生电路包括自恢复延时电路1、自恢复延时电路2和自恢复短脉冲生成电路,所述自恢复延时电路1接入信号发生器,所述自恢复延时电路1的输出端连接被测功率器件的负载;信号发生器发出的周期性的方波信号经自恢复延时电路1后输入被测功率器件的负载的驱动电路2,当方波信号为高电平电压信号时,控制驱动电路2输出高电平电压信号,使得负载由额定状态进入短路状态。

[0077] 在具体设计时,所述自恢复延时电路2接入电流检测判断电路的输出端,在电流监

测判断电路监测到负载的短路电流超过限流判断阈值时,产生的控制信号同时输入自恢复延时电路2。

[0078] 在具体设计时,所述所述第一电阻 R_{cr} 的输出端连接有第二小信号电子开关 S_3 ,所述第二小信号电子开关 S_3 接地,所述第二小信号电子开关的控制端接通自恢复短脉冲生成电路的输出端自恢复短脉冲生成电路接通自恢复延时电路1和自恢复延时电路2的输出端;自恢复短脉冲生成电路综合自恢复延时电路1和自恢复延时电路2输出的高电平电压信号,输出控制信号至第二小信号电子开关 S_3 的控制端,控制第二小信号电子开关 S_3 导通,使得被测功率器件接地,被测功率器件转换为断开状态。

[0079] 如图1、图2和图3所示,上述的电流检测电路包括第一电容 C_1 、第二电阻 R_1 、第三电阻 R_2 、第四电阻 R_3 、第五电阻 R_4 以及第一运算放大器 op_1 ;

[0080] 上述的限流基准包括第一控制电压源 V_{CC} 、第六电阻 R_5 和第七电阻 R_6 ;

[0081] 上述的电流调节器包括第八电阻 R_7 、第九电阻 R_8 、第二电容 C_2 以及第二运算放大器 op_2 ;

[0082] 上述的限流判断电路包括第十电阻 R_9 、第十一电阻 R_{10} 、第十二电阻 R_{11} 、第十三电阻 R_{12} 、第二控制电压源 V_{DD} 以及第三运算放大器 op_3 ;

[0083] 上述的自恢复延时电路1包括第十四电阻 R_{13} 和第三电容 C_3 ;

[0084] 上述的自恢复延时电路2包括第十五电阻 R_{14} 和第四电容 C_4 ;

[0085] 上述的自恢复短脉冲生成电路包括非门 ng_1 、与非门 ag_1 以及与非门 ag_2 。

[0086] 上述的信号发生器的输出电压信号的正极与L点连接,负极与控制地连接,且本发明的用于功率器件老化测试的纯硬件实现控制电路的电路地均为控制地;L点还同于与第一电阻 R_{cr} 的一端以及第十四电阻 R_{13} 的一端连接;

[0087] 上述的第一电阻 R_{cr} 的另一端同时与第一小信号电子开关 S_1 的一端和第二小信号电子开关 S_3 的一端连接,同时H点也作为被测功率器件驱动电路的输入端;第一小信号电子开关 S_1 的另一端与I点连接;I点还与第二运算放大器 op_2 的输出端和第二电容 C_2 的一端相连接;第二电容 C_2 的另一端与k点连接,k点还与第九电阻 R_8 的一端连接,第九电阻 R_8 的另一端和第二运算放大器 op_2 的负输入端连接与i点,i点还与第八电阻 R_8 的一端连接;第二运算放大器 op_2 的正输入端与第六电阻 R_5 、第七电阻 R_6 的一端连接与h点,第六电阻 R_5 的另一端与第一控制电压源 V_{CC} 连接,第七电阻 R_6 的另一端与控制地连接;

[0088] 上述的电流检测电路的输入端一端与D点连接,另一端与B点连接,D点和B点应与测量负载电流 I_{Load} 的检测电阻 R_{Sense} 两端连接,第一电容 C_1 的两端并联在D点和B点;D点还与第二电阻 R_1 的一端连接,第二电阻 R_1 的另一端、第三电阻 R_2 的一端以及第一运算放大器 op_1 的负输入端连接于a点,第三电阻 R_2 的另一端与第一运算放大器 op_1 的输出端连接于d点;第四电阻 R_3 的一端与B点连接,第四电阻 R_3 的另一端、第五电阻 R_4 的一端以及第一运算放大器 op_1 的正输入端连接与b点,第五电阻 R_4 的另一端与控制地连接;

[0089] 上述的d点还与第十电阻 R_9 的一端连接,第十电阻 R_9 的另一端、第十一电阻 R_{10} 的一端和第三运算放大器 op_3 的正输入端连接于e点,第十一电阻 R_{10} 的另一端与控制地连接;第三运算放大器 op_3 的负输入端、第十二电阻 R_{11} 一端和第十三电阻 R_{12} 的一端连接于f点,第十二电阻 R_{11} 另一端与第二控制电压源 V_{DD} 连接,第十三电阻 R_{12} 的另一端与控制地连接;第三运算放大器 op_3 的输出端K点与第一小信号电子开关 S_1 的控制极连接;

[0090] 上述的K点还与第十五电阻 R_{14} 的一端连接,第十五电阻 R_{14} 的另一端与第四电容 C_4 的一端连接于m点,第四电容 C_4 的另一端与控制地连接;

[0091] 上述的m点还与非门 ng_1 的输入端连接,非门 ng_1 的输出端和与非门 ag_1 的一个输入端连接与n点,与非门 ag_1 的另一个输入端和与非门 ag_2 的输出端连接于p点,与非门 ag_2 的一个输入端和与非门 ag_1 的输出端连接于J点,与非门 ag_1 的输出端还与第二小信号电子开关 S_3 的控制极连接,第二小信号电子开关 S_3 的另一端与控制地连接;

[0092] 上述的与非门 ag_2 的另一个输入端与第三电容 C_3 的一端和第十四电阻 R_{13} 的一端连接于M点,第三电容 C_3 的另一端连接于控制地,第十四电阻 R_{13} 的另一端与信号发生器的输出电压信号的正极L点连接。

[0093] 上述的用于功率器件老化测试的纯硬件实现控制电路及控制方法用于功率器件的老化测试;

[0094] 上述的功率器件的老化测试是针对直流固态断路器短路限流工况而设计开发的功率器件重复短路限流测试,即让被测功率器件在额定状态、短路限流状态以及关断状态之间进行循环重复工作,首先,被测功率器件工作于额定状态,该状态下被测功率器件承受较小功率,不足以在其芯片上产生高温,芯片温度与功率器件散热外壳温度基本相同,被测功率器件处于热稳定状态;然后,被测功率器件工作于短路限流工作状态,该状态下被测功率器件承受较大的功率,芯片被加热,在其芯片上产生较大的温度;最后,被测功率器件工作于关断状态,该状态下功率器件内部无电流流过,芯片被冷却。在上述的重复循环过程中,实现了对功率器件的加速老化。

[0095] 如图3所示,上述的被测功率器件的开通和关断受被测功率器件的栅极电压控制,被测功率器件的栅极电压由驱动电路1提供;

[0096] 上述的驱动电路1输出端直接与被测功率器件的栅极连接,驱动电路1输入端与本发明的纯硬件实现控制电路的H点相连接,由本发明的纯硬件实现控制电路提供驱动电路1的输入电压信号;

[0097] 上述的老化测试中的功率器件的额定状态是指流入功率器件的电流是额定电流 I_N ,该电流数值较小,不足以引起芯片结温变化,该状态的持续时间 t_{on} 较长约数秒;

[0098] 上述的老化测试中的功率器件的短路限流状态是指,当负载短路时,将流入功率器件的电流限制在恒定的较高数值(即限流值 I_{Limit} ,约是额定电流数倍)并保持一段时间(即限流时间 t_{sc1} ,该时间在几十微秒至数毫秒的范围内变化),之后功率器件被关断,关断后线路寄生电感 L_{line} 的能量通过并联在被测功率器件漏源极两端的压敏电阻(MOV)吸收,该此阶段时间 t_{sc2} 的数值由线路寄生电感和限流值确定,在数微秒至几百微秒范围内变化;

[0099] 上述的老化测试中的负载短路是指,负载由额定电阻 R_L 和大功率IGBT开关 S_2 构成,并且额定电阻 R_L 和大功率IGBT开关 S_2 构成并联;额定负载下,大功率IGBT开关 S_2 处于关断状态,负载短路时,大功率IGBT开关 S_2 处于开通状态;

[0100] 上述的大功率IGBT开关 S_2 的开通和关断受大功率IGBT开关 S_2 的栅极电压控制,栅极电压由驱动电路2提供;

[0101] 上述的驱动电路2输出端直接与 S_2 的栅极连接,驱动电路2输入端与本发明的纯硬件实现控制电路的M点相连接,由本发明的纯硬件实现控制电路提供驱动电路2的输入电压信号;

[0102] 上述的老化测试中的功率器件的关断状态是指,功率器件被关断,无电流流入功率器件,该阶段功率器件被冷却,为使功率器件完全冷却下来,持续时间较长,约数秒。

[0103] 上述的第一电阻 R_{cr} ,第一小信号电子开关 S_1 ,电流调节器,电流检测电路,限流判断电路用于检测被测功率器件的负载电流 I_{Load} 并判断电流值是否大于电流阈值,若 I_{Load} 大于电流阈值, S_1 被接通,电流调节器工作,电流调节器的输出电压控制被测功率器件的栅极,从而控制 I_{Load} 为恒定值;

[0104] 上述的电流检测电路用于检测被测功率器件的负载电流 I_{Load} 。

[0105] 上述的限流判断电路用于判断 I_{Load} 是否高于电流阈值,若高于电流阈值,则限流判断电路输出高电平电压 V_{KH} ,使得 S_1 被接通,若低于电流阈值,则限流判断电路输出低电平电压零伏, S_1 保持关断状态。

[0106] 上述的电流调节器对负载电流 I_{Load} 的调节功能只有在第一小信号电子开关 S_1 被接通后才起作用;所述的限流基准用于为电流调节器设定基准值,通过该基准值的设定,可以将负载电流 I_{Load} 控制到恒定值。

[0107] 上述的信号发生器用于产生周期性的具有高占空比的高低电平相间的方波电压信号;

[0108] 上述的信号发生器产生的周期性的具有高占空比的电压信号的高电平为 V_{SH} ,低电平为零;

[0109] 上述的信号发生器产生的周期性的具有高占空比的方波电压信号可通过第一电阻 R_{cr} 以及被测功率器件的驱动电路直接控制被测功率器件的栅极电压,栅极电压为高电平时被测功率器件开通,栅极电压为低电平时被测功率器件关断;

[0110] 上述的信号发生器产生的周期性的具有高占空比的方波电压信号还可通过自恢复延时电路1控制功率器件老化测试系统的负载状态。

[0111] 上述的自恢复延时电路1,自恢复延时电路2和自恢复短脉冲生成电路用于接受来自信号发生器的周期性的具有高占空比的电压信号以及限流判断电路的输出电压信号,并产生具有极低占空比、高时间分辨率的电压信号。

[0112] 上述的自恢复延时电路1可以将信号发生器发出的电压信号进行延时,延时后的信号可以用于控制负载,使负载能够从额定状态进入短路状态,由于信号发生器产生的电压信号具有周期性,因此,负载也能够重复的从额定状态进入短路状态;自恢复延时电路1中的第三电容 C_3 和第十四电阻 R_{13} 、信号发生器产生的高电平电压信号 V_{LH} 以及大功率IGBT开关 S_2 的驱动电路输入低电平最大值 $V_{geILMax}$ (即,当输入电压大于 $V_{geILMax}$ 时,驱动电路输出电压将从低电平变为高电平),共同确定了额定状态的时间 t_{on} 的数值,具体的,根据公式(1)获得,

$$[0113] \quad t_{on} = R_{13} C_3 \ln \left(1 - \frac{V_{geILMax}}{V_{LH}} \right) \quad (1)$$

[0114] 其中, t_{on} 为额定状态的时间; R_{13} 为第十四电阻 R_{13} 的阻值; C_3 为第三电容 C_3 的电容值; V_{LH} 为信号发生器产生的高电平电压信号; $V_{geILMax}$ 为控制负载短路的大功率IGBT开关的驱动电路输入的低电平最大值。

[0115] 上述的自恢复延时电路2接受限流判断电路的输出电压信号后,其输出电压信号与自恢复延时电路1的输出电压信号一起作为自恢复短脉冲生成电路的输入电压信号,然

后,自恢复短脉冲生成电路的输出电压信号作为第二小信号电子开关 S_3 的控制信号;

[0116] 上述的限流判断电路输出高电平电压 V_{KH} 时,经自恢复延时电路2和自恢复短脉冲生成电路后,输出高电平电压信号,使第二小信号电子开关 S_3 开通,第二小信号电子开关 S_3 开通后,被测功率器件的栅极电压为低电平,被测功率器件被立即关断,从而确立了短路限流时间 t_{sc1} 的数值,若非门 ng_1 的输入低电平最大值为 $V_{scILMax}$, t_{sc1} 值可由公式(2)获得,

$$[0117] \quad t_{sc1} = R_{14} C_4 \ln \left(1 - \frac{V_{scILMax}}{V_{KH}} \right) \quad (2)$$

[0118] 其中, t_{sc1} 为短路限流时间; R_{14} 为第十五电阻 R_{14} 的电阻值; C_4 为第四电容 C_4 的电容值; V_{KH} 为限流判断电路输出高电平电压信号; $V_{scILMax}$ 为非门 ng_1 的输入低电平的最大值。

[0119] 上述的第二小信号开关 S_3 开通后,线路寄生电感 L_{line} 的能量在 t_{sc2} 时间内被压敏电阻MOV吸收,若功率器件老化测试的直流母线电压为 V_{DC} ,MOV钳位电压为 V_{OP} ,限流电流为 I_{Limit} ,则, t_{sc2} 可由公式(3)获得,

$$[0120] \quad t_{sc2} = \frac{I_{Limit} L_{line}}{V_{OP} + V_{DC}} \quad (3)$$

[0121] 上述的自恢复是指,当信号发生器产生低电平电压信号 V_{LL} 时,经过第三电容 C_3 和第十四电阻 R_{13} 的延时作用,大功率IGBT开关 S_2 恢复关断状态,从而负载由短路状态恢复为额定状态,第二小信号电子开关 S_3 也由开通状态恢复到关断状态,设大功率IGBT开关 S_2 的驱动电路输入高电平最小值 $V_{geIHMin}$ (即,当输入电压小于 $V_{geIHMin}$ 时,驱动电路输出电压将从高电平变为低电平),恢复时间 t_{de} 可由公式(4)决定,

$$[0122] \quad t_{de} = -R_{13} C_3 \ln \left(\frac{V_{scIHMin}}{V_{KH}} \right) \quad (4)$$

[0123] 其中, R_{13} 为第十四电阻 R_{13} 的电阻值; C_3 为第三电容 C_3 的电容值;

[0124] 恢复时间 t_{de} 应小于信号发生器信号的低电平时间 t_{off} 。

[0125] 上述的信号发生器产生低电平电压信号 V_{LL} 时,立即通过第一电阻 R_{cr} 将被测功率器件的栅极电压降为低电平,在信号发生器信号产生低电平电压信号 V_{LL} 阶段,被测功率器件始终处于关断状态,其栅极电压不再受第二小信号电子开关 S_3 的开通状态的影响。

[0126] 实施例二:

[0127] 基于提供的一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路,本发明实施例二提供一种上述电路的控制方法,包括如下步骤:

[0128] 步骤1:向被测功率器件的栅极输出高电平电压,控制被测功率器件进入额定状态:

[0129] 信号发生器输出高电平电压 V_{LH} ,高电平电压一方面通过第一电阻 R_{cr} 输入被测功率器件的驱动电路1,使得驱动电路1处于高电平状态,使得被测功率器件的栅极处于高电平状态,控制被测功率器件导通,进入额定状态:

$$[0130] \quad t_{on} = R_{13} C_3 \ln \left(1 - \frac{V_{geILMax}}{V_{LH}} \right)$$

[0131] 其中, t_{on} 为额定状态的时间; R_{13} 为第十四电阻 R_{13} 的阻值; C_3 为第三电容 C_3 的电容值; V_{LH} 为信号发生器产生的高电平电压信号; $V_{geILMax}$ 为控制负载短路的大功率IGBT开关的

驱动电路输入的低电平最大值。

[0132] 步骤2:

[0133] 步骤2.1:将同一高电平电压进行延时后输入负载,控制负载进入短路状态,获取负载短路时的电流信号,若其大于限流阈值,则控制电流调节器工作,控制负载的电流处于恒定值,使得被测功率器件进入短路限流状态:

[0134] 信号发生器输出高电平电压经过自恢复延时电路1进行延时,然后进入负载的驱动电路2,使得驱动电路进入高电平状态,控制负载进入短路状态;

[0135] 电流检测电路监测负载的电流数据,并将监测值发送至限流判断电路;

[0136] 限流判断电路中设置有限流阈值,若负载的电流数据大于限流阈值,限流判断电路输出高电平电压信号至第一小信号电子开关 S_1 的控制端,控制第一小信号电子开关 S_1 导通,将电流调节器接入被测功率器件的栅极,将负载的电流限制在恒定值 I_{Limit} ,使得被测功率器件进入短路限流状态,加热被测功率器件,加速被测功率器件老化。

[0137] 步骤2.2:若负载短路时的电流大于限流阈值,则发出限流控制信号,并进行延时后与延时后的高电平信号结合,生成控制信号,控制被测功率器件的关断,解除被测功率器件短路限流状态,被测功率器件进入关断状态:

[0138] 限流判断电路输出高电平电压信号至自恢复延时电路2进行延时,然后进入自恢复短脉冲生成电路,自恢复延时电路1将信号发生器发出的高电平电压进行延迟后接入自恢复短脉冲生成电路,自恢复短脉冲生成电路综合自恢复延时电路1和自恢复延时电路2的输出电压信号,输出高电平电压信号使得第二小信号电子开关 S_3 控制端动作,将第二小信号电子开关 S_3 接通,被测功率器件通过第二小信号电子开关 S_3 接地,被测功率器件被关断,其短路限流状态解除,第一小信号电子开关 S_1 断开,完成一个短路限流时间的控制:

$$[0139] \quad t_{sc1} = R_{14} C_4 \ln \left(1 - \frac{V_{scILMax}}{V_{KH}} \right)$$

[0140] 其中, t_{sc1} 为短路限流时间; R_{14} 为第十五电阻 R_{14} 的电阻值; C_4 为第四电容 C_4 的电容值; V_{KH} 为限流判断电路输出高电平电压信号; $V_{scILMax}$ 为非门ng₁的输入低电平的最大值。

[0141] 步骤3:被测功率器件进入冷却期,完成老化测试周期:

[0142] 被测功率器件处于关断状态,信号发生器发出低电平电压信号 V_{LL} ,经自恢复延时电路1的延时后进入负载的驱动电路2,使得驱动电路2发出低电平,控制负载恢复额定状态,限流判断电路收到的电流未超过其限流阈值,限流判断电路输出低电平电压信号,自恢复延时电路2接收限流判断电路的低电平信号,进行延迟后输入自恢复短脉冲生成电路,同时自恢复短脉冲生成电路接入被自恢复延时电路1延时后的信号发生器的低电平信号,自恢复短脉冲生成电路综合延时电路1和延时电路2发出的低电平电压信号,输出低电平电压信号,控制第二小信号电子开关 S_3 的控制端动作,使得第二小信号电子开关 S_3 断开;

[0143] 自短路限流结束至信号发生器输出高电平,被测功率器件处于关断状态,被测功率器件被冷却,完成老化测试周期。

[0144] 所述随着信号发生器输出高电平,被测功率器件将开始新一周期的老化测试。

[0145] 图3所示是功率器件老化测试原理图,图3中的功率器件老化测试控制电路是本发明的用于功率器件老化测试的纯硬件实现控制电路。图3中,直流电压源 V_{DC} 为功率器件老化测试提供功率电源,直流电容 C_{DC} 用于稳定直流母线电压并为功率器件老化测试提供短时间

大电流, Q_1 是被测功率器件, Q_1 的栅极由驱动电路1控制, 散热器和风扇用于冷却被测功率器件, 压敏电阻MOV用于吸收线路寄生电感 L_{line} , 检测电阻 R_{Sense} 用于测量负载电流 I_{Load} , 负载由负载电阻 R_L 和大功率IGBT开关 S_2 构成, S_2 的栅极由驱动电路2控制; V_{DC} 的阳极、 Q_1 的漏极以及 C_{DC} 的一端连接于A点, Q_1 的源极、驱动电路1的一端以及 R_{Sense} 的一端连接于控制地于B点, R_{Sense} 的另一端与 L_{line} 的一端连接于D点, L_{line} 的另一端、 V_{DC} 的阴极、 C_{DC} 的另一端、 S_2 的集电极以及 R_L 的一端连接于F点, F点连接于功率地。

[0146] 图4是本发明的用于功率器件老化测试的纯硬件实现控制电路的工作波形图, 结合图3和图4说明本发明的用于功率器件老化测试的纯硬件实现控制电路及控制方法的具体工作原理:

[0147] t_1-t_2 阶段, 信号发生器输出高电平, S_2 处于关断状态, 负载为额定负载, 被测功率器件 Q_1 处于额定状态, 导通电流为 I_N , 导通时间 t_{on} , t_{on} 的计算参考公式(1); 此外, 由于负载电流 I_N 数值较小, 限流判断电路输出低电平, 第一小信号电子开关 S_1 和第二小信号电子开关 S_3 均处于关断状态, 电流环不投入工作, 负载电流不受电流环控制; 该阶段自恢复延时电路1的输出仍为低电平。

[0148] t_2-t_3 阶段, t_2 时刻, 经过自恢复延时电路1的延时作用, 其输出高于 S_2 的驱动电路2的输入低电平最大值 $V_{geILMax}$, 驱动电路2输出电压变为高电平, 负载立即进入短路状态, 电路检测电路检测到短路电流并经限流判断电路的判断之后, 立即输出高电平, 第一小信号电子开关 S_1 立刻被开通, 电流环投入工作, 经过电流调节器和限流基准的作用, 将被测功率管的驱动电压 V_{gs} 降低到一定数值, 使负载电流调节到 I_{Limit} 值; 该阶段, 由于限流判断电路输出高电平, 自恢复延时电路2的第四电容 C_4 被充电, 直至 t_3 时刻, 自恢复延时电路2的输出电压超过非门 ng_1 的输入低电平最大值 $V_{scILMax}$, 使得自恢复短脉冲生成电路的输出变为高电平, 第二小信号电子开关 S_3 立即导通, 被测功率器件被关断, 持续时间 t_{sc1} 的计算参考公式(2); 该时间段, 被测功率器件 Q_1 被加热。

[0149] t_3-t_4 阶段, 该阶段线路寄生电感 L_{line} 的能量被压敏电阻MOV吸收, 其中压敏电阻的钳位电阻为 V_{op} , 经过 t_{sc2} 后, 线路寄生电感 L_{line} 的能量被吸收完毕, t_{sc2} 由公式(3)决定; 该阶段风扇开始投入工作, 被测功率器件 Q_1 在 t_{sc1} 时间段产生的热量开始通过散热器被风扇带走。

[0150] t_4-t_5 阶段, 该阶段信号发生器产生的信号仍然是高电平, 低电平信号尚未到了, 因此, S_3 和 S_2 仍然是导通状态, 负载仍然是短路状态, S_3 也不能恢复到初始关断状态, 但是由于负载电流已降低为零, S_1 恢复到初始关断状态, 该阶段持续时间为 t_{pre} 。

[0151] t_5-t_6 阶段, t_5 时刻, 信号发生器产生的低电平信号, 自恢复延时电路1的第三电容 C_3 开始放电, 在 t_6 时刻, 第三电容 C_3 两端电压也即自恢复延时电路1的输出电压开始小于驱动电路输入高电平最小值 $V_{geIHMin}$, 第二小信号电子开关 S_3 和 S_2 恢复到初始关断状态, 即负载恢复为额定负载, 被测功率器件 Q_1 的驱动电压也恢复到初始关断状态, 持续时间 t_{de} 由公式(4)计算得到, 并且 t_{de} 值应小于信号发生器总的低电平时间 t_{off} 。

[0152] t_6-t_7 阶段, 信号发生器输出仍然保持低电平, 风扇在 t_7 时刻关闭, 保证被测功率器件 Q_1 完全被冷却, t_7 时刻信号发生器的低电平时间结束。

[0153] 此后, 电路重复 t_1-t_7 阶段的工作状态, 不在赘述。

[0154] 可以看出, 信号发生器输出的矩形方波信号的占空比较大, 且由较大的可调节裕

度,而且对时间分辨率的要求也不高,这是因为 t_{pre} 数值是可调的,只要保证 t_{pre} 数值远大于 $t_{sc1}+t_{sc2}$,即 $t_{pre} > 10(t_{sc1}+t_{sc2})$,且与 t_{on} 数量级相近,则信号发生器整个高电平时间就可以自由设置,对时间分辨率的要求就会大大降低,可由传统的微秒级时间分辨率增大到数百毫秒的数量级,由于信号发生器非常容易操作,大大降低了老化测试对高端控制信号产生设备,如FPGA控制板的需求。

[0155] 综上所述,本发明一种功率器件老化测试用纯硬件实现控制电路及控制方法,克服了传统用于功率器件老化测试的控制电路难以适用于功率器件短路限流测试的难题;本发明巧妙利用简单的硬件电路和信号发生器,即可产生功率器件老化测试用的控制信号,解决了传统用于功率器件短路限流测试的控制电路及控制方法对高端设备依赖程度高的难题,具有高可靠、低成本、设计方法简单、实施门槛低等优势;此外,本发明适用于各种类型功率器件短路限流测试的应用,如常规的Si基功率器件(即,Si-MOSFET、Si-IGBT等)以及新型宽禁带功率器件(即SiC MOSFET,SiC IGBT以及GaN HEMT等)。

[0156] 本领域内的技术人员应明白,本申请的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0157] 本申请是参照根据本申请实施例的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0158] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0159] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0160] 以上所述仅是本发明的优选实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明技术原理的前提下,还可以做出若干改进和变形,这些改进和变形也应视为本发明的保护范围。

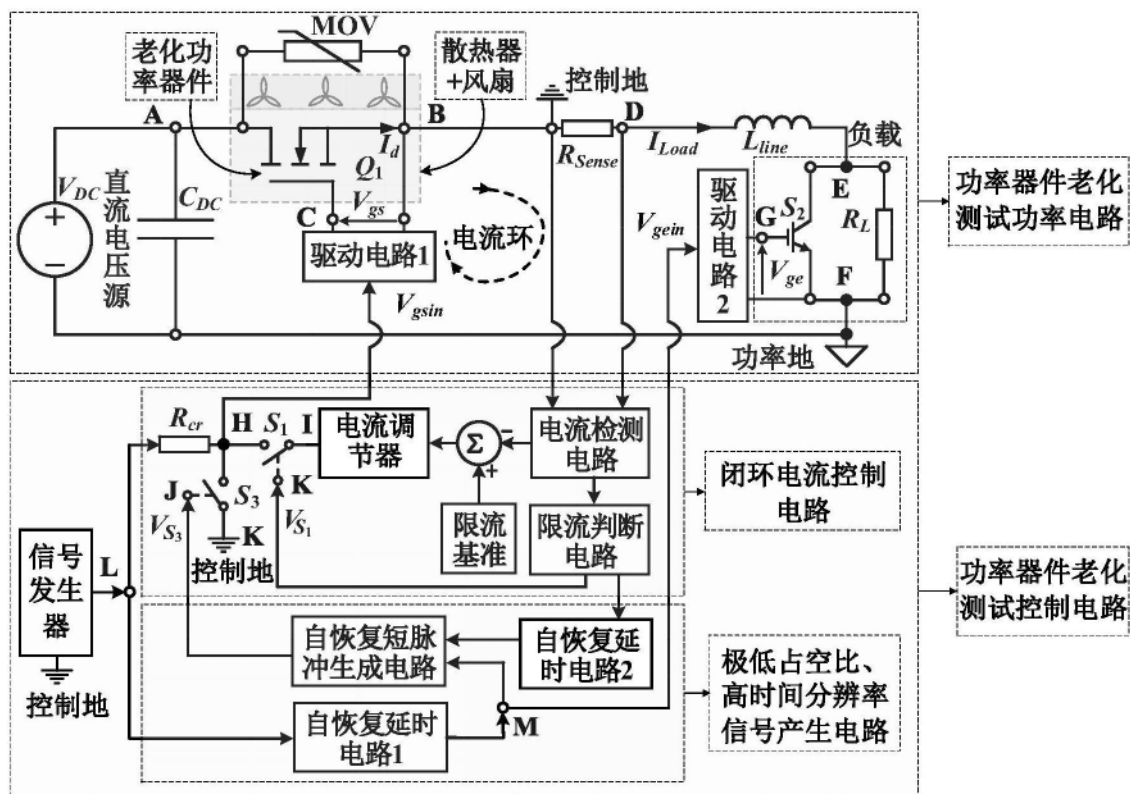


图3

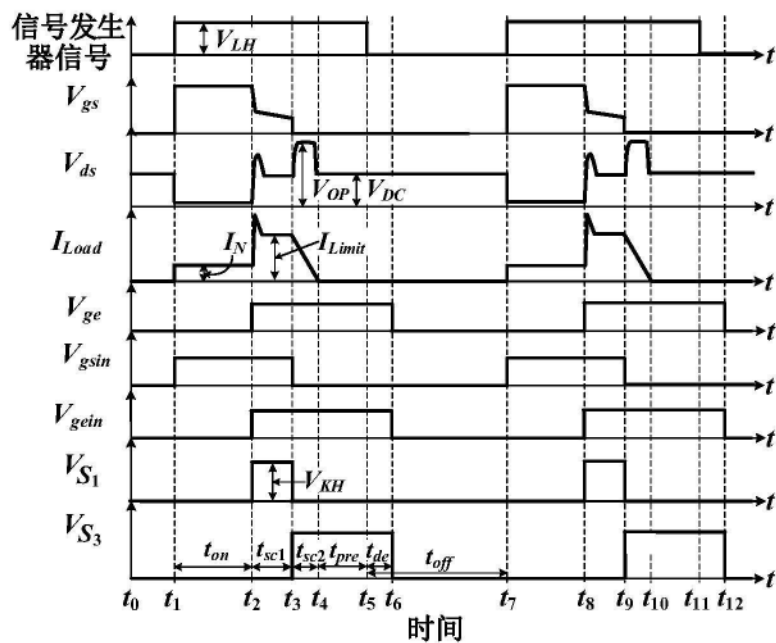


图4