

IGBT栅极振荡机理与抑制方法研究

张浚坤¹,雷二涛¹,金莉¹,马凯¹,夏晨阳²,王茜睿²

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510000;

2. 中国矿业大学 电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:现代电力电子技术的不断发展推动了IGBT在交流电机驱动、变频器、开关电源及新能源行业的广泛应用。IGBT在应用过程中,由于电路拓扑和系统工况复杂多变,栅极波形振荡的问题普遍存在,如何认识振荡机理并抑制振荡成为IGBT安全稳定应用的基础。从IGBT内部寄生参数结构和开关过程出发,详细介绍了IGBT栅极开通振荡、关断振荡和短路振荡,推导了开通栅极振荡过程的数学模型及射频振荡(关断振荡与短路振荡)的正反馈振荡机理,提出加入负反馈或降低正反馈增益的修正措施。通过改进不同振荡的实验,验证了抑制措施的有效性,提高了IGBT应用的稳定性与可靠性。

关键词:绝缘栅双极型晶体管(IGBT);栅极振荡机理;抑制方法;正反馈

中图分类号:TM315 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25387

Research of IGBT Gate Oscillation Mechanism and Suppression Methods

ZHANG Junkun¹, LEI Ertao¹, JIN Li¹, MA Kai¹, XIA Chenyang², WANG Xirui²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong,

China; 2. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology,

Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: The rapid development of modern power electronics technology promotes the insulated gate bipolar transistor (IGBT) wide range of applications in the AC motor drive, inverter, switching power supply and new energy industry. In the application process of IGBT, due to the complex and varied circuit topology and system conditions, the problem of gate waveform oscillation usually exists. How to understand the oscillation mechanism and suppress methods becomes the basis of IGBT security and stability application. According to the IGBT internal parasitic parameter structure and switching process, the IGBT gate turn-on oscillation, turn-off oscillation and short-circuit oscillation were introduced in detail, the mathematical model of the gate oscillation process and the oscillation of the radio frequency (RF) positive feedback oscillation (turn-off oscillation and short-circuit oscillation) were deduced. The corrective measures of adding negative feedback or decreasing the positive feedback gain were put forward. By improving the experiment of different oscillations, the effectiveness of the suppression measures was verified, and the stability and reliability of IGBT application were improved.

Key words: insulated gate bipolar transistor (IGBT); gate oscillation mechanism; suppression methods; positive feedback

随着电力电子技术的不断发展,绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)越来越广泛地应用于各个领域。工业转换器、逆变器、电力电子变压器、开关电源、电机控制和其他应用广泛使用模块化IGBT作为开关器件。然

而,IGBT的应用涉及到一些需要解决的技术挑战^[1-3],其中一个挑战是在某些时刻栅极波形振荡的发生^[4-8]。这些振荡包括IGBT开通过程中由于栅极电阻和寄生参数不匹配引起的栅极开通波形振荡^[9-10]、IGBT作为反向放大器时由于Colpitts

基金项目:南方电网重点科研项目(GDKJXM20212014)

作者简介:张浚坤(1992—),男,博士,主要研究方向为高效高功率密度电源、与电力电子相关的电力系统等技术领域,

Email:junkunzhang@hnu.edu.cn

通讯作者:雷二涛(1987—),男,博士,工程师,主要研究方向电能质量、无功电压控制,Email:jsc20242024@163.com

反馈支路的存在引起的关断波形振荡^[11-13]及短路条件下由于延迟关断引起的潜在短路振荡^[13-17]。这些振荡与 IGBT 栅极驱动和模块特性密切相关。然而由于驱动器与 IGBT 模块寄生参数之间的匹配关系具有时变性^[18-20],难以建立精确的数学模型。此外,在关断和短路条件下建立振荡模型和确定预测方法具有挑战性,其特点是复杂和不可预测的运行条件^[21-23]。因此,在 IGBT 模块和驱动器的设计中考考虑振荡抑制至关重要,旨在最大限度地减少大规模和严重振荡的发生,从而增强系统稳定性^[24-25]。

目前的研究主要集中在振荡机理和抑制方法上,且大多集中在 IGBT 模块本身。对于与模块紧密相连的驱动电路研究较少。漂移区电荷载流子密度和电场强度的垂直分布被认为是引起高频短路振荡的主要原因^[26],输入直流电压和杂散电感也被认为与栅极振荡有关^[27]。文献[28]提出了一种简化的小信号模型来描述振荡机理。以上大多数文章只关注了短路或关断过程中的栅极振荡。为了抑制栅极振荡现象,文献[15,29-30]提出了改善发射极处电场和通过分析外电路参数来确定振荡极限的方法。上述方法均取得了一定的抑制效果,但在用户侧的实际应用较为复杂。

本文以 IGBT 的内部结构和驱动电路作为研究的出发点,详细分析了 IGBT 栅极振荡的三种类型及其内在机理,提出了用户侧 IGBT 应用中避免栅极振荡的解决方案和生产侧抑制振荡的工艺手段。

1 IGBT 结构与原理

IGBT 结合了 MOSFET 与 BJT 双极晶体管的优势,是一种复合全控型功率半导体器件,兼有 MOS 管高输入阻抗与 GTR 的低导通压降等优点,已经广泛应用于交流电机驱动、变频器、开关电源等领域。

IGBT 的等效电路如图 1 所示。图中, R_{in} 为 IGBT 的栅极寄生电阻; C_{GE} , C_{GC} 和 C_{CE} 分别为栅射极电容、米勒电容和集射极电容。IGBT 大致开关过程为:开通时,驱动器先给 C_{GE} 充电,当其电压达到阈值电压 $V_{ge(th)}$ 时,IGBT 开通,驱动器给 C_{GE} 和 C_{GC} 同时充电,栅极电压出现米勒平台,最终继续上升达到正向电压最大值;关断时 C_{GC} 与 C_{GE} 同时放电,栅极电压下降至米勒平台,此时 C_{GC} 单独放

电,发生强烈米勒效应,之后 C_{GC} 与 C_{GE} 继续放电至反向电压最大值。

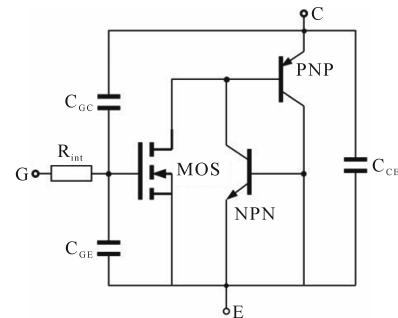


图1 IGBT 等效电路图

Fig.1 IGBT equivalent circuit diagram

在 IGBT 的参数手册中,给出三个电容值,分别为:输入电容 $C_{ies}=C_{GC}+C_{GE}$,输出电容 $C_{oes}=C_{GC}+C_{CE}$,反向传输电容 $C_{res}=C_{GC}$ 。

2 栅极振荡

栅极驱动器作为驱动 IGBT 正常开关、提供驱动功率与各类保护的装置,与 IGBT 模块联系最为紧密,因此驱动器的性能对于 IGBT 而言十分重要。在驱动器电路中由于制作工艺与连接线材的限制,必然会有寄生参数的存在。含寄生参数栅极驱动器等效电路如图 2 所示。

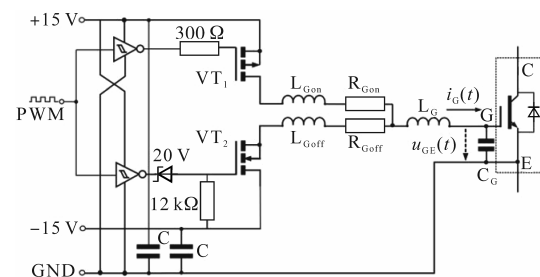


图2 含寄生参数的栅极驱动电路

Fig.2 The circuit of IGBT gate-driver

including parasitic parameters

驱动器振荡是 IGBT 振荡类型中最为常见的情况,通常是因为门极电阻 R_{Gon} , R_{Goff} 和引线电感 L_G 与额外附加电容 C_G 发生谐振效应,导致栅极波形出现超调不稳定现象。

栅极开通波形振荡容易导致以下危害:

- 1) 引起 IGBT 驱动器损坏,无法维持栅极电压,系统无法正常工作。
- 2) 导致 IGBT 栅极振荡,引起模块 PCB 失效。
- 3) 容易导致 V_{CE} 超过阈值电压,引起 IGBT 误导通,进而引发短路等故障。

分析寄生参数不匹配导致的栅极振荡,需要分析驱动器与 IGBT 的联系电路。由于栅极振荡

的频率通常远高于平时的开关频率,因此在米勒平台期间栅极电压相对固定,对快速的振荡影响较小。与内部的米勒效应相比,电路布局、寄生电感、驱动器特性等外部因素可能更为重要。IGBT在开通时忽略米勒电容,可以近似看作一个输入电容 C_{ies} ,通常栅极波形振荡发生在开通时刻,含有寄生参数的栅极驱动电路(图2)化简可得IGBT栅极处等效电路如图3所示,其中, $R_{\Sigma}=R_{gon}+R_{int}$, $L_{\sigma}=L_{gon}+L_G$, v_g 为驱动电压,输入电容 $C_{ies}=C_{GC}+C_{GE}$ 。

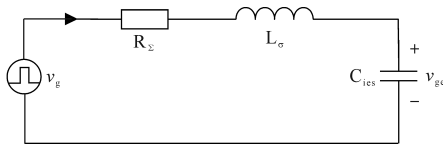


图3 IGBT驱动开通等效电路

Fig.3 IGBT driver turn-on equivalent circuit

在开通过程中,驱动电压 v_g 由闭锁电压 -15 V 上升至开通电压 $+15\text{ V}$,在该阶段,驱动电压通过开通电阻与 L_{σ} 为输入电容 C_{ies} 充电,因此该阶段可视为二阶电路全响应。根据电路暂态过程分析理论,简化门极驱动传递函数得到二阶系统标准型:

$$G(s) = \frac{1/(L_{\sigma}C_{ies})}{s^2 + 2(R_{\Sigma}/2 \cdot \sqrt{C_{ies}/L_{\sigma}}) \sqrt{1/(L_{\sigma}C_{ies})} s + 1/(L_{\sigma}C_{ies})} \quad (1)$$

比对二阶系统传递函数形式,可以得到系统振荡角频率 ω_n 和阻尼系数 ζ :

$$\begin{cases} \omega_n = 1/\sqrt{L_{\sigma}C_{ies}} \\ \zeta = \frac{R_{\Sigma}}{2} \sqrt{C_{ies}/L_{\sigma}} \end{cases} \quad (2)$$

根据 ζ 的取值分三种情况讨论:

1) 当 $\zeta \in (0, 1)$ 时,系统为欠阻尼状态,阶跃响应应为

$$v_{ge}(t) = v_{g+} - \frac{v_{g+}}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \varphi) \quad (3)$$

其中 $\varphi = \arccos \zeta$

式中: φ 为阻尼角。

存在稳态分量和一个正弦振荡分量,振荡幅度由 v_{g+} 和 ζ 决定。

2) 当 $\zeta=1$ 时,系统为临界阻尼状态,阶跃响应应为

$$v_{ge}(t) = v_{g+} - v_{g+} e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t) \quad (4)$$

3) 当 $\zeta \in (1, \infty)$ 时,系统为过阻尼状态,阶跃响应应为

$$v_{ge}(t) = v_{g+} + v_{g+} \frac{e^{-t/\tau_1}}{\tau_2/\tau_1 - 1} + v_{g+} \frac{e^{-t/\tau_2}}{\tau_2/\tau_1 - 1} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} \tau_1 = \frac{1}{\omega_n(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})} \\ \tau_2 = \frac{1}{\omega_n(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})} \end{cases} \quad (6)$$

不同阻尼系数的门极电压波形如图4所示。对于门极信号传递函数的稳定性,我们可以通过改变阻尼系数的值来调整,而 ζ 的值由 R_{gon} , L_{σ} , C_{ies} 决定,一般而言,线路寄生参数电感值不易调整,而门极电阻的阻值调整比较方便。

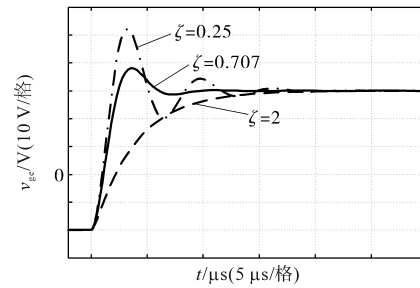


图4 不同阻尼系数的门极电压波形

Fig.4 Gate voltage waveforms with different ζ

由于过阻尼系统响应速度慢,IGBT缓慢的开通速度会使得其损耗较大,而且IGBT在开通延迟内会一直处于线性工作区,导致门极振荡严重,损伤器件结构,因此通常不采取阻尼系数过大的配置。工程上的经验认为,门极电压可以允许小部分的振荡存在,这样做开通损耗会得到优化,同时也不会影响 di/dt 的安全工作区,因此阻尼系数的选择变得多样化。在大功率IGBT的驱动器中,器件开通损耗很大,尽量避免开通过于缓慢,且器件的 di/dt 承受能力较高,通常 ζ 取值在0.7~1.5范围内较为合适,小功率IGBT的 ζ 取值在2.0~3.0较为合适。

为了验证栅极电阻选择方法的正确性,文章选取三菱的一款1200 V IGBT进行测试,其测试电路原理图如图5所示。图中, R_{Σ} 为驱动器开通电阻与寄生电阻之和, L_{σ} 为驱动器寄生电感, D 为上管IGBT的反并联二极管, L_{load} 为负载电感, L_s 为功率回路中的寄生电感, v_g 为IGBT模块外部和驱动器进行连接的端子间电压。在双脉冲测试过程中上管IGBT保持闭锁,通过驱动器为下管栅极发送两次开通的脉冲信号,最终获取模块相关的暂态特性。

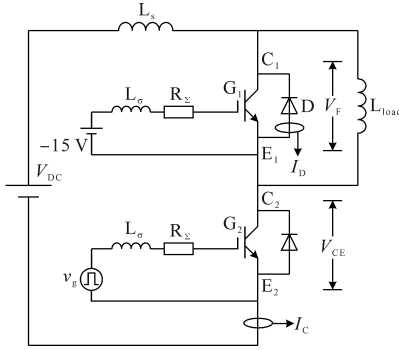


图5 典型双脉冲测试电路

Fig.5 Circuit for typical double-pulse-test

IGBT 开关栅极振荡测试平台如图 6 所示。为了获取较快的 IGBT 开通速度并且满足开关损耗较小的原则,初始测试中将栅极电阻设定为 $0.5\ \Omega$,栅极最大振荡电压达到 $37\ \text{V}$ 。经过测量,驱动器的引线电感为 $40\ \text{nH}$,IGBT 输入电容 C_{ies} 为 $100\ \text{nF}$,栅极寄生电阻为 $0.3\ \Omega$,按照电阻选择原则计算最小开通电阻 R_g 为 $1.0\ \Omega$ 左右,因此调整开通电阻为 $1.5\ \Omega$,相同电压电流等级测试后得到稳定的开通波形,栅极振荡电压仅为 $5\ \text{V}$,如图 7 所示。其中, I_D 为二极管电流, V_F 为二极管电压, V_{ge} 为门极电压, E_{on} 为开通损耗。

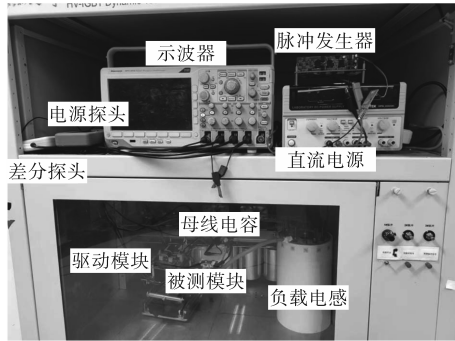
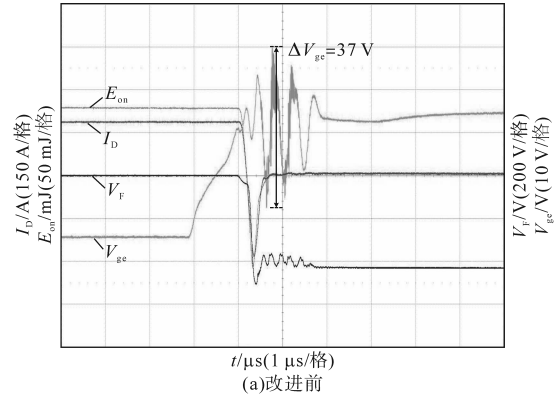


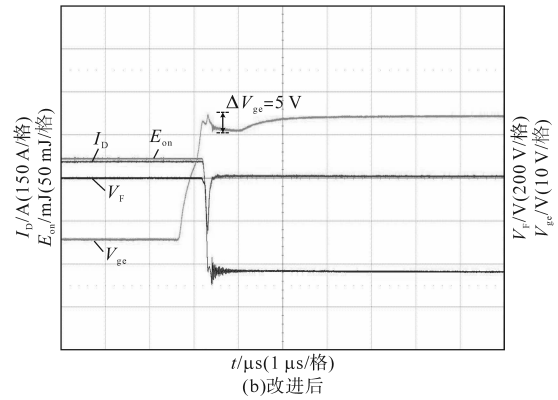
图6 IGBT开关栅极振荡测试平台

Fig.6 IGBT switching oscillation test platform

功率器件一个重要指标是开关损耗,通常与 IGBT 开通速度成反比关系,它对器件的温升有着很大的影响,因此在应用时会在安全工作区内尽量加快 IGBT 开通速度,常规的 IGBT 驱动器可变的仅仅是栅极开通电阻,需要综合考虑驱动电阻阻值大小,均衡开关速度与损耗的关系。另一种常规的方法是 IGBT 驱动器中在栅极和发射极之间额外附加电容 C_g ,如图 8 所示,在 IGBT 开通时需要同时给 C_g 和 C_{ies} 充电,在不改变栅极开通电阻的情况下减缓了开通速度,起到抑制振荡的作用,缺点是会使 IGBT 关断速度减慢,增大关断损耗。



(a)改进前



(b)改进后

图7 改进栅极开通电阻前后的开通波形

Fig.7 Tun-on waveforms of IGBT gate voltage before and after modifying R_{Gon}

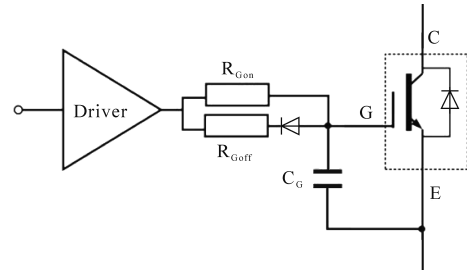


图8 外接调节 C_g 的 IGBT 驱动器

Fig.8 IGBT driver additional have adjust C_g

3 射频振荡

IGBT 可以看成是一个反相放大器,此时 IGBT 处于放大工作区,若 IGBT 输入信号(门极驱动信号)能够没有相位差地反馈到输入端,则系统的放大倍数降低,此时形成负反馈;若有一定相位差,系统的放大倍数会越来越大,会导致正反馈,并且可能导致振荡产生。形成 IGBT 反馈支路的元件有模块米勒电容 C_{GC} , C_{GE} , C_{CE} 和杂散电感 L_G ,如图 9 所示,这样组成的振荡回路称之为 Colpitts 振荡,其回路正反馈示意图如图 10 所示。产生振荡不仅会影响 IGBT 模块误导通和误关断,影响系统正常工作甚至发生危险,同时其产生的 EMI 会干扰周围电子电路,影响系统稳定性。

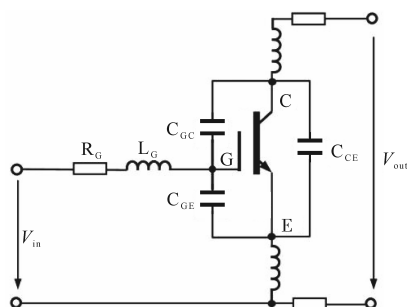


图9 IGBT的Colpitts振荡回路

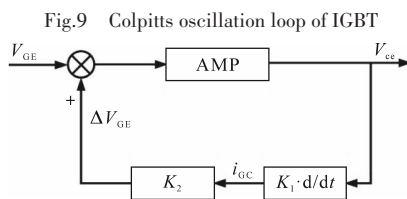


图10 Colpitts回路正反馈示意图

Fig.10 diagram of Colpitts positive feedback

3.1 关断振荡

图11所示为Colpitts反馈振荡电路,IGBT在关断过程中,集电极电压的变化率 dV_{CE}/dt 通过Miller电容 C_{GC} 反馈到IGBT的门极,产生位移电流 i_{GC} :

$$i_{GC} = C_{GC} \cdot \frac{dV_{CE}}{dt} \quad (7)$$

$$\Delta V_{GE} = i_{GC} \cdot (R_{g,int} + R_g + R_{dr}) \quad (8)$$

该电流通过IGBT模块内部的寄生电阻 $R_{g,int}$ 、外部门极电阻 R_g 和驱动器的电阻 R_{dr} ,在门极产生附加压降,在 V_{CE} 缓慢上升时,门极电压会处于Miller平台,该位移电流有利于保持Miller平台稳定。

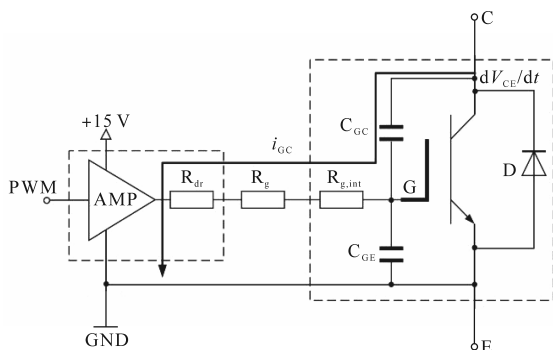


图11 Colpitts反馈振荡电路

Fig.11 Colpitts feedback oscillation circuit

在IGBT硬关断时,存在较大的集电极电流 I_C ,根据IGBT的半导体特性,其Miller电容随着 I_C 的增大而变大,因此如果IGBT芯片并联使用时,正反馈容易引起振荡,表1为影响IGBT关断时振荡的主要参数。

为了抑制关断振荡现象,器件生产厂家可通

表1 影响关断振荡的参数

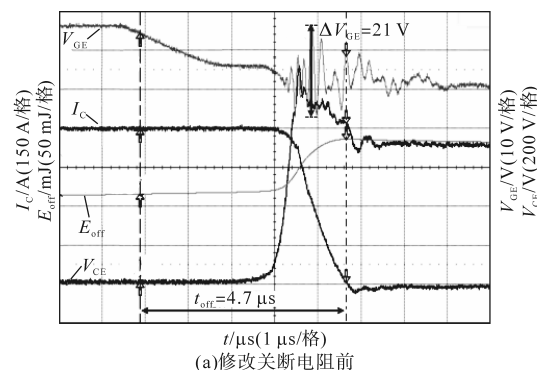
Tab.1 Parameters influences turn-off oscillation

振荡类型	振荡时刻	振荡频率	影响因素
关断振荡	关断过程中的Miller平台	约几十MHz	栅极电阻,模块封装 IGBT参数, dV_{CE}/dt , I_C

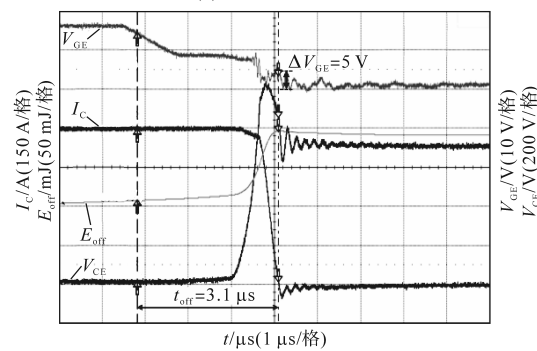
过调节模块内部寄生电阻、降低Miller电容、提高模块栅射极电压、设计并联性能更加优异的模块封装等方式进行产品性能优化。

对于应用对象来说,可以通过调节栅极关断电阻来抑制振荡的产生,但栅极关断电阻过小会导致IGBT关断过快,在集电极出现很高的电压尖峰。因此在进行关断电阻选择时要权衡这两方面,具体方法如下:若偶尔出现关断振荡,且振荡幅度不是很大时,可以忽略;若频繁出现振荡或幅度很大时,可以将关断电阻减小为原来的0.6~0.8倍,此时观察是否出现振荡以及集电极关断过电压是否满足要求。

为了验证修改栅极关断电阻对于抑制关断振荡的有效性,本文采取额定电压为1 200 V的英飞凌IGBT模块进行700 V/600 A的开关实验,相关波形如图12所示。在首次测量中,栅极关断电阻为7.8 Ω ,测试结果显示在该实验条件下发生栅极与集电极电压振荡,栅极振荡电压最大值为20 V;根据已有分析,将关断电阻更换为5.5 Ω ,即原有关断电阻0.6~0.8倍后,振荡得到有效抑



(a)修改关断电阻前



(b)修改关断电阻后

图12 修改关断电阻前后的IGBT的关断波形

Fig.12 IGBT turn-off waveforms before and after modifying R_{Goff}

制,栅极振荡电压下降至 5 V,同时发现关断速度变快。

减小栅极关断电阻之后,虽然栅极振荡抑制效果较好,却使得稳定的集电极电压尖峰变高,此时就需要依赖栅极有源钳位进行尖峰抑制。通过在集电极与栅极加入双向 TVS,形成对集电极电压的闭环负反馈控制,能有效降低电压尖峰。IGBT 有源钳位电路与原理如图 13 所示。

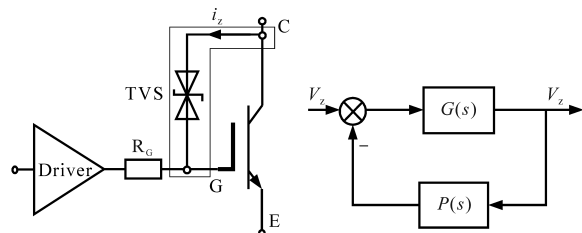


图 13 IGBT 有源钳位电路与原理

Fig.13 The active clamping circuit and principle

3.2 短路振荡

短路振荡与短路类型有关,IGBT 有两种短路类型,分别是 SC1 与 SC2。SC1 型短路是指在 IGBT 开通前已经发生短路故障,即 IGBT 所在桥臂或支路发生短路以后,该 IGBT 开通进入短路状态;SC2 型短路是指由于 IGBT 的导通导致了短路的发生。这两种短路引发的振荡有所区别,在 SC1 型短路的发生过程中,短路电流在稳定之后的很短时间内发生振荡,栅极电压出现明显的振荡,同时集射极电压和集电极电流也可能出现较为明显的振荡现象;SC2 型短路振荡则是发生在 IGBT 退饱和过程,栅极电压出现明显振荡现象,但是集射极电压与集电极电流振荡现象不明显。IGBT 两种短路振荡类型的电压、电流波形如图 14 所示,影响短路振荡的参数如表 2 所示。

短路时,IGBT 集射极电压 V_{CE} 出现较高的变化率 dV_{CE}/dt ,特别是在 SC2 短路中,IGBT 从导通时的低饱和压降状态迅速进入退饱和状态,此时,IGBT 承受直流母线电压和由于杂散电感引起的电压尖峰之和,这样的电压变化率会产生很大的反馈电流 i_{GC} ,可能导致 IGBT 门极电容继续充电,使得门极电压继续升高甚至超过 IGBT 的最高标称门极电压阈值,由于 IGBT 可以看成由跨导组成的放大器,集电极电流变大,进一步加深短路效应,形成正反馈。因此,限制门极电压对于短路电流的抑制和模块剧烈振荡有重要意义。对于应用 IGBT 的对象来说,可以采取以下措施进行改进:

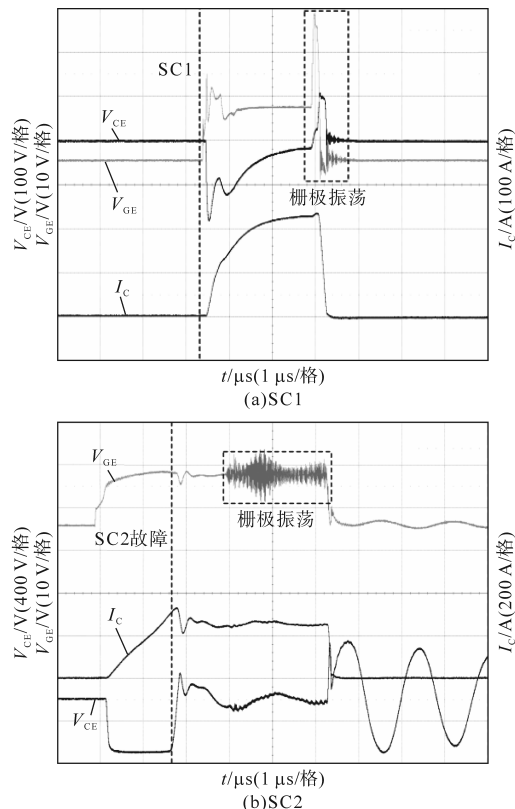


图 14 IGBT 两种短路振荡类型的电压电流波形

Fig.14 Voltage and current waveforms of two types of short-circuit oscillation in IGBT

表 2 影响短路振荡的参数

Tab.2 Parameters influences short-circuit oscillation

短路类型	振荡时刻	振荡频率	影响因素
SC1	短路电流稳定后	10~20 MHz	模块内部结构,IGBT 特性,低 V_{CE} ,高 V_{GE}
SC2	退饱和阶段	> 10 MHz	模块内部结构,IGBT 特性,高 V_{CE} ,低 dV_{CE}/dt

1)在驱动器中使用较小的门极电阻 R_g ,这样会降低由于位移电流 i_{GC} 引起的压降,抑制门极电压,防止振荡的发生。

2)使用在栅极和发射极之间外接附加电容 C_g 的 IGBT 驱动器,这样位移电流在给模块门极电容充电的同时,也需要给 C_g 充电,可以抑制门极电压的上升,但模块内部的寄生电阻会解耦内外电容,限制增益。

3)采用接地式的 IGBT 驱动器。器件生产厂家可以调整 IGBT 内部的寄生门极电阻,增加门极电阻会大大减小振荡,调整 IGBT 的阈值电压 $V_{ge(th)}$,提升阈值电压势必减缓了 IGBT 开通的速度,加快关断速度,有利于抑制振荡,同时也可以改变模块布局,如通过制造工艺的改进减少内部的反馈回路,防止反馈进入模块等。经过改进

后的IGBT短路波形如图15所示。

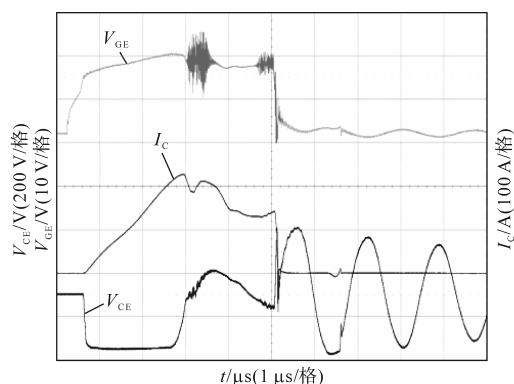


图15 改进之后的IGBT短路波形

Fig.15 IGBT short-circuit waveforms after improvement

4 结论

本文以IGBT及其驱动电路作为出发点,详细探讨了引发IGBT栅极波形振荡的三个主要类型以及相关产生机理,通过推导栅极开通振荡的数学模型,提出了可以抑制栅极开通振荡现象的系统阻尼参数的选择方式与调整原则。同时针对IGBT作为反向放大器所引起的正反馈振荡机制进行分析研究。

对于振荡现象,文章提出了一系列引入负反馈回路或降低正反馈增益的抑制措施,具体包括:通过调整IGBT栅极电阻、引入有源钳位等措施抑制关断振荡;采用栅极电阻调整策略、外接 C_G 的驱动器和适当的接地措施以抑制短路振荡。通过针对各种振荡类型的系统优化实验,验证了相关修正措施的有效性,为确保IGBT系统的可靠性和稳定性提供了理论依据和实际验证。

参考文献

- [1] 栗静男,金晶,郑峰. 基于超导限流器混合式直流断路器开断特性分析[J]. 广东电力, 2020, 30(8): 1-10.
LI Jingnan, JIN Jing, ZHENG Feng. Breaking characteristic analysis of hybrid DC circuit breaker based on superconducting current limiter[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 30(8): 1-10.
- [2] 严志星,徐铭康,孙劫,等. 用于微电网储能装置的新型双向变流器[J]. 广东电力, 2020, 30(7): 11-18.
YAN Zhixing, XU Mingkang, SUN Jie, et al. Novel bidirectional converter for energy storage devices in microgrid[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 30(7): 11-18.
- [3] 韦甜柳,李巍巍,杨煜,等. 10 kV 碳化硅柔性直流功率变换单元设计[J]. 广东电力, 2020, 30(8): 27-35.
WEI Tianliu, LI Weiwei, YANG Yu, et al. Design of 10 kV VSC-HVDC converter unit based on silicon carbide device[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 30(8): 27-35.
- [4] SAITO K, MIYOSHI T, KAWASE D, et al. Suppression of self-excited oscillation for common package of Si-IGBT and SiC-MOS[C]//2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD), 2017: 427-430.
- [5] OMURA I, FICHTNER W, OHASHI H. Oscillation effects in IGBT's related to negative capacitance phenomena[J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 1999, 46(1): 237-244.
- [6] HONG T, PFIRSCH F, REINHOLD B, et al. Transient avalanche oscillation of IGBTs under high current[C]//2014 IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD), 2014: 43-46.
- [7] MA Jie, ZHANG Long, ZHU Jing, et al. Simulation study of novel trench gate U-Shaped channel SOI lateral IGBTs with suppressed gate voltage overshoot and reduced di/dt [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(8): 3930-3935.
- [8] 马继晶,吴有智,蒋小龙,等. 一种数字式IGBT软关断策略的研究[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(6): 159-160.
MA J J, WU Y Z, JIANG X L, et al. Research on a digital IGBT soft-switching strategy[J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(6): 159-160.
- [9] WANG R, CHEN Y, CHEN J, et al. Plug-in gate-loop compensators for series-connected IGBT drivers in a solid-state fault current limiter[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(1): 165-174.
- [10] GROSSNER U, KAKARLA B, ZIEMANN T, et al. Requirements for highly accurate multiphysics modeling of SiC power MOSFETs and power modules[J]. ECS Transactions, 2017, 80(7): 89-100.
- [11] 何怡刚,王建鑫,谢望,等. 基于VEe反馈控制的大功率IGBT软开关驱动策略[J]. 制造业自动化, 2021, 43(9): 87-92.
HE Y G, WANG J X, XIE W, et al. Drive strategy of high power IGBT soft switch based on VEe feedback control[J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(9): 87-92.
- [12] 李鑫. 具有健康状态监测功能的IGBT驱动电路[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
LI Xin. IGBT driver circuit with health monitoring function[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [13] LOU Z, MAMEE T, HATA K, et al. IGBT power module design for suppressing gate voltage spike at digital gate control[J]. IEEE Access, 2023, 11: 6632-6640.
- [14] MARTINEZ-PADRON D S, PATIN N, MONMASSON E. EMI mitigation induced by an IGBT driver based on a controlled gate current profile[C]//2022 24th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE/22 ECCE Europe), 2022: 1-10.
- [15] 谢佳明. 超高频、低延时、大功率IGBT驱动模块[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
XIE Jiaming. Ultra-high frequency, low latency, high power IGBT driver module[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [16] 周野,王旭,鲜亮,等. 基于门极放电补偿的串联IGBT有源

- 驱动电路[J]. 电工技术学报, 2021, 36(18): 3934-3945.
- ZHOU Y, WANG X, XIAN L, et al. Active gate drive with discharge compensation for series-connected IGBT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(18): 3934-3945.
- [17] 凌亚涛, 赵争鸣, 姬世奇. 基于主动栅极驱动的IGBT开关特性自调节控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(12): 2482-2494.
- LING Y T, ZHAO Z M, JI S Q. Self-regulating control of IGBT switching characteristics with active gate drive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(12): 2482-2494.
- [18] 王佳军, 陈息坤, 顾隽楠, 等. 一种大功率IGBT模块驱动电路设计[J]. 微特电机, 2021, 49(11): 43-46, 52.
- WANG J J, CHEN X K, GU J N, et al. A high-power IGBT module drive circuit design[J]. Small & Special Electrical Machines, 2021, 49(11): 43-46, 52.
- [19] ZHANG H, YAMASAKI H, HATA K, et al. Overcurrent detection method by monitoring gate voltage while periodically repeating discharging and charging of constant gate charge in IGBTs[C]//2022 IEEE 7th Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2022.
- [20] 李云涛. 大功率IGBT驱动及过压抑制研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
- LI Yuntao. Research on high-power IGBT drive and overvoltage suppression[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2021.
- [21] PRABADANE S, SAILAJA M L, KAVYA K M. A reliable passive gate driver circuit for IGBT in traction applications[C]//2022 2nd Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODI-CON), 2022.
- [22] LIU X, BASLER T. Investigation of the gate voltage overshoot of IGBTs under short circuit type II condition[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 70(4): 1763-1768.
- [23] BAI H, LIU C, RATHORE A K, et al. An FPGA-based IGBT behavioral model with high transient resolution for real-time simulation of power electronic circuits[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6581-6591.
- [24] DING Y, YANG X, LIU G, et al. Physics-based trench-gate field-stop IGBT modeling with optimization-based parameter extraction for device parameters[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(12): 6305-6312.
- [25] 朱世蔚, 冯全源. 带软关断和欠压保护的IGBT去饱和和过流检测电路[J]. 微电子学, 2021, 51(5): 632-635.
- ZHU Shiwei, FENG Quanyang. An IGBT desaturation and over-current detection circuit with soft turn-off and under-voltage protection[J]. Microelectronics, 2021, 51(5): 632-635.
- [26] KONO H, OMURA I. A study of parasitic oscillations in trench IGBT during short-circuit type II based on signal flow graph model[C]//CIPS 2022; 12th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, 2022.
- [27] KIKUCHI T, NAKAMURA K, TAKAO K. Investigation of the mechanism of gate voltage oscillation in 1.2 kV IGBT under short circuit condition[C]//2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2018.
- [28] LONG H Y, SWEET M R, NARAYANAN E M S. Investigation of negative gate capacitance in MOS-gated power devices[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, 59(12): 3464-3469.
- [29] REIGOSA P D, IANNUZZO F, RAHIMO M, et al. Improving the short-circuit reliability in IGBTs: how to mitigate oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5603-5612.
- [30] ABBATE C, BUSATTO G, SANSEVERINO A, et al. Experimental and numerical study of low and high frequency oscillations in IGBTs during short circuit[C]//PCIM Europe 2014; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2014.

收稿日期: 2023-09-23

修改稿日期: 2023-11-06