

基于 IGBT 串联运行的动态均压研究

查申森¹, 郑建勇¹, 苏 麟¹, 吴恒荣², 陈 军²

(1. 东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096; 2. 江苏华厦电气集团, 江苏 扬中 212200)

摘要: 绝缘栅双极晶体管 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)串联运行易于实现 IGBT 的扩容, 但同时也带来了不均压的问题。设计了以 L 、 R 为感性负载的实验电路, 采用仿真软件 PSpice 仿真分析出 IGBT 串联运行时动态不均压原因是吸收电路参数不一致、门极驱动信号延时不同、门极驱动电路参数不一致引起的。并提出了 IGBT 串联运行动态均压措施(选同型号 IGBT、吸收电路参数与结构一致、门极驱动信号同步、门极电路参数一致)。

关键词: 绝缘栅双极晶体管; 串联; 动态均压; 吸收电路

中图分类号: TN 344

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)05-0020-03

绝缘栅双极晶体管 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)综合了电力晶体管 GTR 和电力场效应晶体管 MOSFET 的优点, 具有电压型驱动、驱动功率小、开关速度高、饱和压降低和可耐高电压和大电流等一系列优点^[1], 表现出很好的综合性能, 已成为当前在工业领域应用最广泛的电力电子器件。然而, 在许多高压场合的应用中, 由于其单个器件的耐压等级较低, 导致其使用受到局限。于是人们开始研究 IGBT 的串联运行。在 IGBT 串联运行时, 时常会出现动态不均压的问题, 引起其不均压的因素比较多, 如门槛电压、输入电容、密勒电容及栅极电阻、栅极驱动电压波形等。这些因素共同影响串联 IGBT 开通及关断时间的一致性, 使得直接串联的动态均压复杂化^[2]。串联联接 IGBT 实行均压的目的是为了保证在开通、关断瞬间对每个 IGBT 的过电压保持均衡, 因而要求控制电路的响应是快速的, 不允许产生更多的损耗和降低系统的开关频率, 同时在工程上是经济有效的。可见, 设计有效的动态均压电路有重要意义。

1 IGBT 串联运行动态不均压原因分析

为了分析引起 IGBT 串联运行时的动态不均压的原因, 设计了如图 1 所示实验方案, L 和 R 为感性负载, 运用仿真软件 PSpice 对 2 个串联的 V_{IG1} 、 V_{IG2} 进行关断时刻的动态仿真实验, 分别验证在吸收电路参数不一致、门极驱动信号延时不同和门极驱动电路参数不一致三种情况下的不均压情况。

1.1 吸收电路参数不一致

仿真实验电路中, C_1 、 C_2 分别为 V_{IG1} 、 V_{IG2} 吸收电路中的电容参数。

图 2 示出了仿真结果, 仿真结果表明 2 点。

收稿日期: 2004-12-02; 修回日期: 2005-03-08

基金项目: 江苏省科技攻关项目(BE2003043)及江苏省高技术项目(BG2004038)

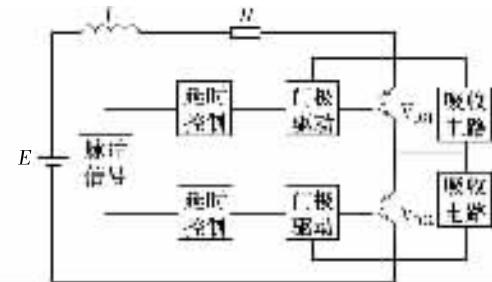


图 1 实验电路原理图

Fig.1 The principle diagram of experimental circuit

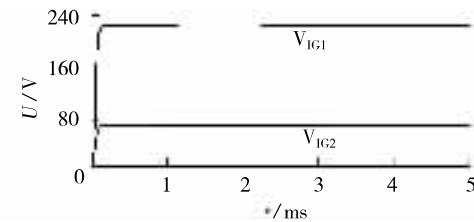
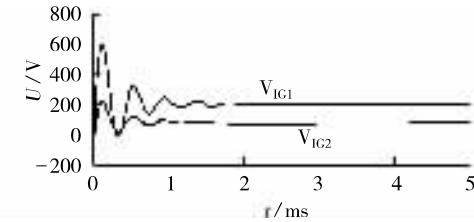
(a) $C_1 < C_2$, 16 μ s 关断电压波形(阻性负载)(b) $C_1 < C_2$, 16 μ s 关断电压波形(感性负载)

图 2 吸收电路仿真结果

Fig.2 The simulative results of absorption circuit

a. 在 IGBT 关断瞬间, 器件两端的电压上升率 dU/dt 主要取决于吸收电路中吸收电容 C 的大小。吸收电容越大, 器件关断瞬间端电压上升越慢, 即 dU/dt 越小; 相反, 吸收电容越小, 器件关断瞬间端电压上升越快, dU/dt 越大, 容易造成过冲电压和器件静态不均压, 通过仿真可发现, 吸收电容小的器件在静态时电压较高, 容易对器件产生损害, 反之亦然。

b. 吸收电容的大小对IGBT开通时的特性几乎没有影响。

1.2 门极驱动信号延时不同

图3示出了仿真结果。

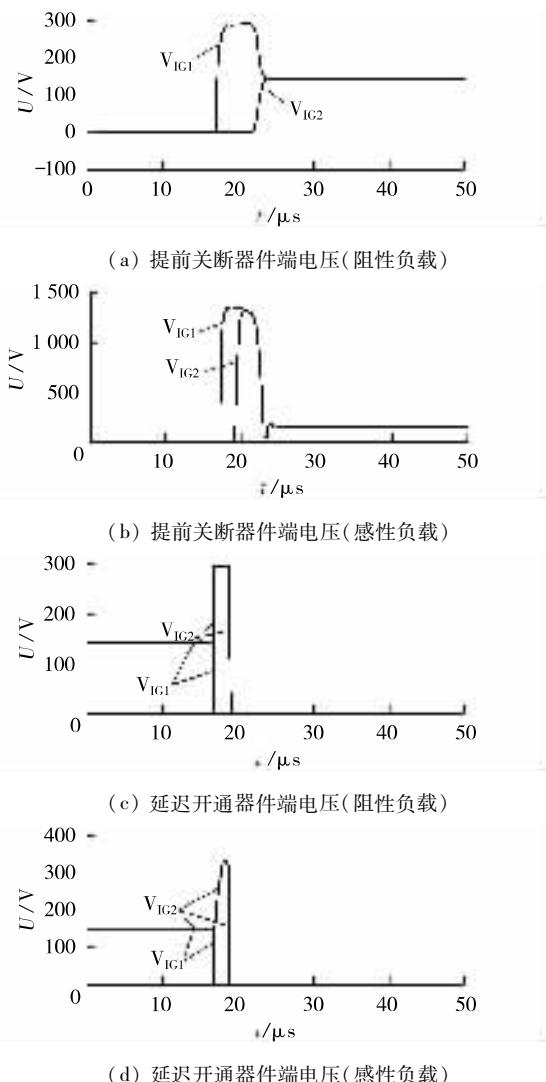


图3 门极驱动信号仿真结果

Fig.3 The simulative results of gate driving signals

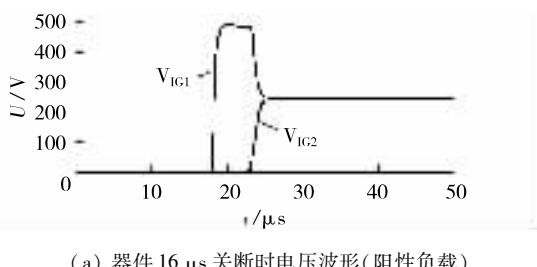
图3仿真结果表明:串联IGBT门极信号的延迟会引起电压的不平衡。

a. 在延迟开通的器件上会产生电压尖峰。

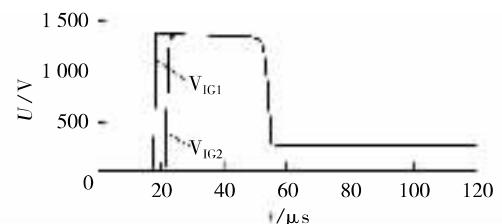
b. 在提前关断的器件上会产生过电压。

1.3 门极驱动电路参数不一致

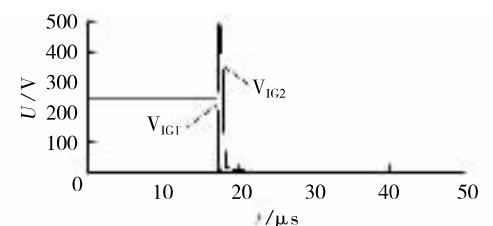
仿真时设定 $R_{g1} < R_{g2}$ (R_{g1}, R_{g2} 分别为 V_{IG1}, V_{IG2} 的门极电阻)。图4示出了仿真结果。



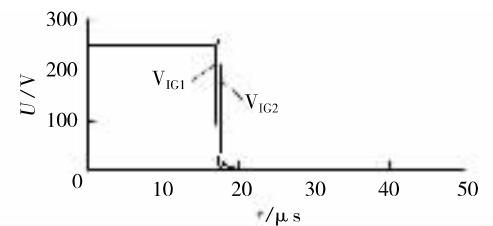
(a) 器件 16 μs 关断时电压波形(阻性负载)



(b) 器件 16 μs 关断时电压波形(感性负载)



(c) 器件 16 μs 开通时电压波形(阻性负载)



(d) 器件 16 μs 开通时电压波形(感性负载)

图4 门极驱动电路仿真结果

Fig.4 The simulative results of gate driving circuit

图4仿真结果表明:串联IGBT的门极驱动电路参数的不一致也会引起电压的不平衡。门极电阻大的IGBT在开通瞬间会产生电压尖峰,门极电阻的不同会导致串联的IGBT在关断瞬间出现过电压失衡。

此外,IGBT型号和引线电感的不一致,都会导致不同的开关特性和电压尖峰^[3,4]。

2 IGBT串联运行动态均压措施

受上面的仿真实验启发,提出IGBT串联动态均压的5条措施。

a. 选用相同型号的IGBT。

b. 选择合适的吸收电路;吸收电路参数和结构应保持一致。

c. 门极驱动信号保持同步。

d. 门极电路参数应保持一致。

e. 本文实验建立在2个IGBT串联基础上,故这里重点讨论二级串联的动态均压措施,图5为动态均压电路图^[5,6]。

图5中: R, L 为负载; $V_{D3} \sim V_{D6}$ 分别为 $V_{IG1} \sim V_{IG4}$ 的续流二极管; $C_1, R_3, V_{D5}, V_{IG3}$ 及门极驱动电路组成 V_{IG1} 的吸收电路^[7]; $C_2, R_4, V_{D6}, V_{IG4}$ 及门极驱动电路组成 V_{IG2} 的吸收电路; V_{IG3}, V_{IG4} 的门极驱动电路参数、驱动信号延迟应分别与 V_{IG1}, V_{IG2} 保持一致。

这种吸收电路的优点是:吸收电容 C_1 和 C_2 能够

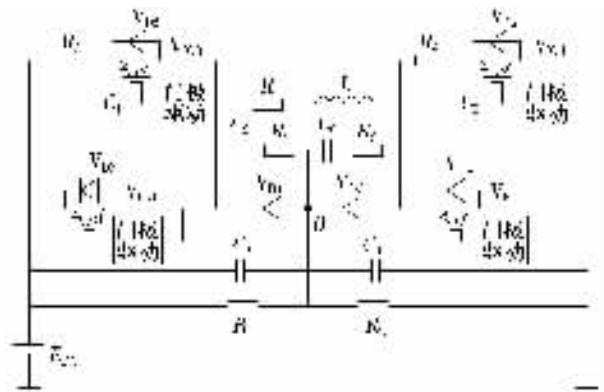


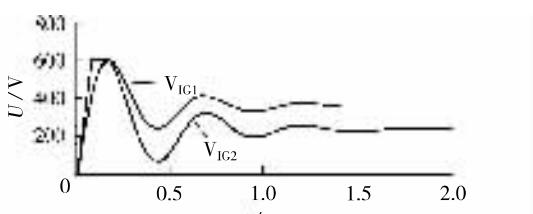
图 5 动态均压电路

Fig.5 The dynamic voltage balancing circuit

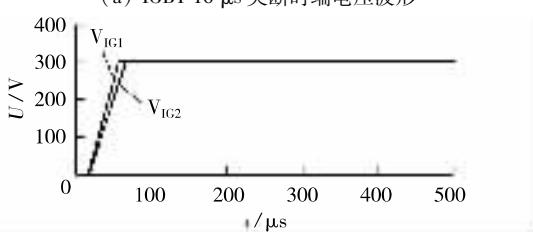
有效地降低过压值,同时很大程度上降低突变电压的上升率,抑制动态擎住效应的发生;振荡的频率低,次数很少,不会对电路及 IGBT 的功耗产生不良影响,效果比较理想,适用于电压等级中等或者较高的场合。

C_3, C_4, R_1, R_2 组成分压电路。其中 R_1, R_2 阻值相同, C_3, C_4 为大电容,只有这样,才能实现在 V_{IG} 关断、开通及稳态工作时, B 点的电位基本保持在直流电源电压的一半。二极管 V_{D1}, V_{D2} 起到钳位作用。分析使 B 点电压基本保持为直流电源电压的一半,当 V_{IG1} 或 V_{IG2} 两端出现过冲电压大于直流电压一半时,相应的二极管导通,将端电压钳制为直流电压的一半,避免了过电压对器件的损坏。 C_5, R_5 和 C_6, R_6 组成的缓冲电路起到保护二极管 V_{D1}, V_{D2} 的作用。

图 5 所示的均压电路在各种因素导致出现器件动态不均压时,能够较好地实现器件的均压。例如:吸收电容 $C_1 < C_2$,器件关断时,串联的两 V_{IG} 两端将会出现图 6(a)所示的电压,出现动态和静态电压失衡现象。如果加上图 5 的均压电路,则 V_{IG1}, V_{IG2} 之间的动态不均压程度将会大大减小,并且在静态时实现均压,仿真结果如图 6(b)所示。



(a) IGBT 16 μs 关断时端电压波形



(b) IGBT 16 μs 关断时端电压波形

图 6 动态均压电路仿真结果
Fig.6 The simulative results of dynamic voltage balancing circuit

3 结论

IGBT 串联运行时的动态均压,关系到 IGBT 应用于高压场合的可靠性和稳定性,对于扩展 IGBT 耐压容量有着十分重要的意义。引起 IGBT 串联不均压的因素很多,最主要的因素有:吸收电路参数不一致、门极驱动信号延时不同和门极驱动电路参数不一致。本文通过 PSpice 仿真着重分析了以上三种因素影响下的动态不均压情况,并在此基础上提出了两种有效的解决方案,为实现 IGBT 串联运行时的动态均压问题提供了一定的参考。

参考文献:

- [1] 付志红,苏向丰,周雒维. 功率器件 IGBT 串联的移相控制技术[J]. 重庆大学学报,2003,26(2):113-116.
FU Zhi-hong, SU Xiang-feng, ZHOU Luo-wei. A phase -shifting controlling technique for series connection of IGBTs [J]. **Journal of Chongqing University**, 2003, 26 (2): 113-116.
- [2] 王兆安,张明勋. 电力电子设备设计和应用手册[M]. 第 2 版. 北京:机械工业出版社,2002.
- [3] HONG S, CHITTA V, TORREY D A. Series connection of IGBT's with active voltage balancing [J]. **Proc. IEEE PESC**, 1999, 35(4): 917-923.
- [4] PALMER P R, GITHIARA A N. The series connection of IGBT's with optimized voltage sharing in the switching transient [J]. **Proc. IEEE PESC**, 1995, 1(1): 44-99.
- [5] 熊承义,孙奉葵. IGBT 串联运行时的动态均压[J]. 中南民族学院学报(自然科学版),2000,19(3):1-4.
XIONG Cheng-yi, SUN Feng-lou. Active voltage balance-ment of series connected IGBTs [J]. **Journal of South -Central University for Nationalities (Nat. Sci.)**, 2000, 19(3): 1-4.
- [6] 苏麟,梅军,郑建勇,等. PSPICE 和 Matlab 在 IGBT 动态仿真中应用[J]. 电力自动化设备,2004,24(6): 58-61.
SU Lin, MEI Jun, ZHENG Jian-yong, et al. Application of PSPICE and Matlab in IGBT dynamic simulation [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2004, 24 (6): 58-61.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

查申森(1980-),男,安徽芜湖人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动(E-mail:seuzss@seu.edu.cn);

郑建勇(1966-),男,江苏南京人,教授,系副主任,研究方向为电力电子与电力传动;

苏麟(1980-),男,四川泸州人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动(E-mail:sulin_2000@163.net)。