

Saber 仿真模型 IGBT1 在固态开关设计中的应用

梅 军¹, 郑建勇¹, 胡敏强¹, 饶 莹¹, 陈 军², 吴恒荣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: 电力电子仿真软件 Saber 提供了丰富的通用模型和各种具体型号器件的专用模型。介绍了 Saber 下绝缘栅双极型晶体管 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)通用模型中 IGBT1 模型的等效电路, 分析了 IGBT1 模型的静态和动态工作特性, 包括直流传输特性、IGBT 并联时的电流分配问题、IGBT 导通过程等, 并提供了 Saber 下 IGBT1 模型与静态、瞬态过程有关的参数取值。当参数取值准确时, 其仿真波形能较好地验证 IGBT 稳态与瞬态的计算结果。最后, 介绍了该模型在固态开关设计中的应用。

关键词: Saber; 仿真模型; 绝缘栅双极型晶体管

中图分类号: TN 32; TP 319 文献标识码: A 文章编号: 1006-6047(2005)06-0053-04

0 引言

随着电力电子技术的进步, 出现了越来越多的新型大功率电力电子器件。其中, 绝缘栅双极型晶体管 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)具有输入阻抗高、控制方便、通流能力强、工作频率高、安全工作区大等特点, 成为普遍使用的半导体功率开关器件。在利用 IGBT 进行设备开发的过程中, 往往首先使用电力电子仿真软件对电路进行稳态及瞬态性能分析, 还包括过电压、过电流等实验室条件下通常难以获得的数据, 为设计提供参考从而加快开发过程。在 IGBT 器件仿真过程中, 仿真效果的准确性取决于相应器件模型的精确性。

目前, 常用电力电子仿真软件有 Matlab, Spice, Psim 及 Saber 等, 这几种软件各有特点。Saber 作为功能强大的电力电子仿真软件之一, 提供了丰富的通用模型和各种精确的具体型号器件的专用模型, 同时还提供了专用的硬件描述语言——MAST 语言, 可以方便地建立用户自身的元件及电路模型。该软件在电力电子仿真中应用越来越广泛。本文通过原理分析的方法, 同时结合 Saber 下 IGBT1 模型仿真的结果, 对 IGBT 静态与动态过程进行分析, 比较理论和仿真的差别, 为利用 IGBT1 模型进行电力电子装置的优化设计打下基础。

1 IGBT1 模型简介

在 Saber 下关于 IGBT 的通用模型有 5 个, 包括 Hefner 模型^[1]、描述动态热特性的模型及描述 IGBT

行为特征的 IGBT1 模型。其中, IGBT1 模型主要用于描述 IGBT 的静态特性、非线性极间电容及关断时拖尾电流等, 因此常用于 IGBT 瞬态及稳态的仿真, 模型等效电路如图 1 所示。

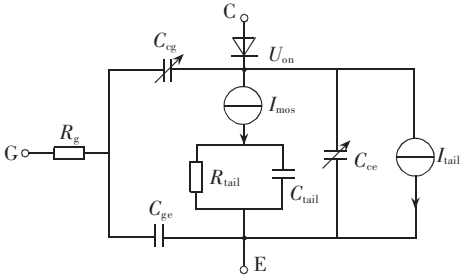


图 1 IGBT 等效电路图

Fig.1 IGBT equivalent circuit

图中 R_g 为内部门极电阻, 受控电流源 I_{mos} 由 U_{ce} 和 U_{ge} 控制, U_{on} 代表 IGBT 导通最小 U_{ce} 阈值, 3 个极间电容满足以下关系:

$$C_{rss} = C_{cg} \quad (1)$$

$$C_{oss} = C_{cg} + C_{ce} \quad (2)$$

$$C_{iss} = C_{cg} + C_{ge} \quad (3)$$

式中 C_{iss} 为输入电容; C_{rss} 为反馈电容; C_{oss} 为输出电容。

等效电路中的 C_{ce} 并不影响器件的开关特性, 它只在设计缓冲电路时需要考虑。

IGBT1 相应的静态参数可以通过器件的输出特性和转移特性获得, 其动态特性则需要通过器件手册中 C_{iss} , C_{oss} , C_{rss} 和 U_{ce} 的关系曲线及门极电荷特性曲线获得。 C_{tail} , R_{tail} 和 I_{tail} 仅与器件关断时刻的拖尾电流有关, 与 IGBT 直流及开通特性无关。在模型中拖尾电流用一阶 RC 电路模拟, 但相应参数要通过实验得到。

2 IGBT1 模型静态与动态过程分析

IGBT 开关电路如图 2 所示,其中 R_1 与 L_1 为线路负载, U_c 为直流电源, U_g 为周期分段线性电源。

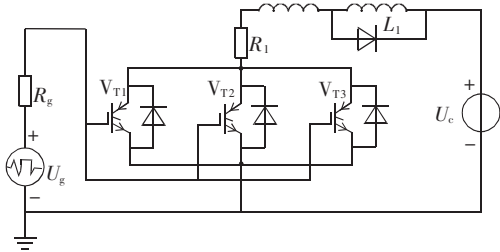


图 2 IGBT 开关电路
Fig.2 IGBT switch circuit

下文将采取原理分析与仿真相结合的方法针对开关电路进行分析。

2.1 静态工作特性

Saber 下 IGBT1 模型与静态特性有关的参数根据器件手册^[2]取值如表 1 所示。

表 1 IGBT 1 模型与静态特性有关的参数值
Tab.1 IGBT 1 parameter values relative to static characteristics

U_{ce1}/V	U_{ge1}/V	I_{c1}/A	U_{ce2}/V	U_{ge2}/V	I_{c2}/A
3.6	15	350	3	7	25
U_{ce3}/V	U_{ge3}/V	I_{c3}/A	U_t/V	U_{on}/V	
3	15	200	5.5	1.1	

2.1.1 直流传输特性

根据器件手册参数,IGBT 1 模型仿真所得直流传输特性如图 3 所示,与器件手册^[2]中有关图形完全符合。

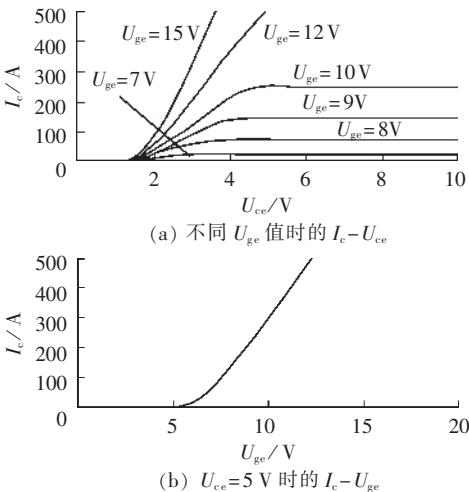


图 3 MG200Q2YS40 直流传输特性仿真曲线
Fig.3 Simulated DC transfer characteristics of MG200Q2YS40

2.1.2 IGBT 并联

通常电力电子器件的容量有限,例如当通过的电流超过单管所能承受的极限时,往往需要将多个器件并联,将电流在几个器件间分流。但由于电力

电子器件个体的差异会引起器件间电流分配不均,某个管子可能通过的电流远远大于平均电流,甚至超过单管极限。因此,在设计时需要对此有所考虑。导通状态 IGBT 等效电路^[3,4]见图 4。

由等效电路,导通电压 U_{ce} 为

$$U_{ce}=U_{on}+IR_{ds(on)} \tag{4}$$

根据 MG200Q2YS 40 数据手册^[2],可以得到 $R_{ds(on)}$ 约为 $5\text{ m}\Omega$,在同一温度下,集射极饱和电压降最大有 1 V 偏差。考虑器件个体的差异在导通的极端情况下,图 3 电路电流有如下电流偏差:

$$\Delta I=\frac{\Delta U_{ce}}{R_{ds(on)}}=\frac{1}{0.005}=200(A) \tag{5}$$

所以 3 个管子中单管最大通过电流为

$$I=\frac{U_c/R_1-\Delta I}{3}+\Delta I=\frac{200/0.5-200}{3}+200=266.7(A) \tag{6}$$

为仿真 IGBT 导通特性差异最大情况下并联效果,根据 MG200Q2YS40 最大饱和导通电压为 4 V , V_{T1}, V_{T3} 的参数取值更改如表 2 所示。

表 2 并联 IGBT 导通特性差异最大时的参数值
Tab.2 The parameter values when the turn-on characteristic differences among parallel IGBTs are maximal

U_{ce1}/V	U_{ge1}/V	I_{c1}/A	U_{ce3}/V	U_{ge3}/V	I_{c3}/A
4.5	15	275	4	15	200

仿真结果如图 5(a)所示,并联 IGBT 最大导通电流为 280 A ,另 2 只管子只导通 56.4 A 。仿真与计算结果对比显示,用 IGBT 1 模型仿真器件并联情况是比较准确的。图 5(b)为三管特性完全一样时的单管通过电流。

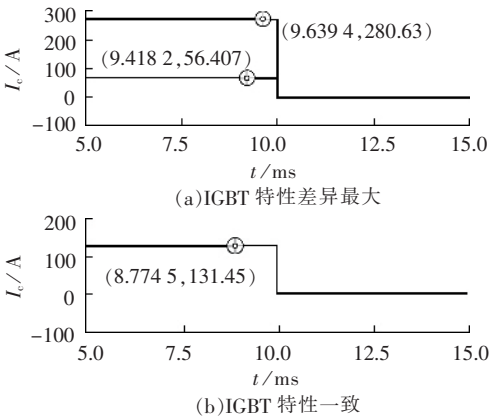


图 5 IGBT 单管工作电流范围

Fig.5 Single IGBT working current range

由上面分析可见,在开关电路通过较大的电流而需要进行器件并联时,某个单管可能因电流分配

不均而使导通电流过大,影响器件安全运行。在选型时应尽量注意选取参数较为一致的器件,同时还要注意因器件性能差异较大时可能对电路产生的影响,应留有足够的裕度。

2.2 瞬态工作特性(图 2 中仅保留 V_{T1})

电力电子装置成功研制的关键,除了设计时需要考虑器件稳态时的工作状况,还需要研究通断瞬间 IGBT 的工作特性,过大的瞬间过载同样会影响装置的安全运行,因此,对系统的正确描述同样依赖于准确的瞬态过程仿真。下面将主要针对导通过程进行分析。IGBT 的瞬态等效电路见图 6,其中 i_D 为压控电流源。

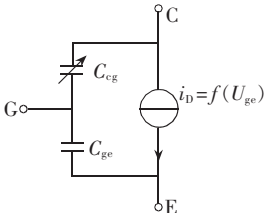


图 6 IGBT 瞬态过程等效电路
Fig.6 IGBT equivalent circuit for transient process

相应的 IGBT1 模型中与瞬态过程有关的参数如表 3 所示。

表 3 IGBT1 模型与瞬态特性有关的参数值

Tab.3 IGBT1 parameter values relative to transient characteristics

C_{rss1}/nF	C_{rss2}/nF	U_{ce4}/V	C_{oss1}/nF	C_{oss2}/nF	Q_1/nC
30	9	9	33	10	100
Q_2/nC	Q_3/nC	U_{ge4}/V	U_{ge5}/V	U_{ce5}/V	U_{ce6}/V
750	1100	7	15	2.5	200

注: $Q_1 \sim Q_3$ 分别对应导通瞬间门极负电荷变化情况,其取值可由门极电荷特性曲线得到。

从文献[5,6]中可看出,当 $U_{ce} > 0$ 、门极加电时,门极电流首先是对 $C_{cg1} + C_{ge}$ 充电, U_{ge} 电压上升但 $U_{ge} < U_{ge(th)}$ 时, IGBT 并不导通,此时处于延时开通时间 $t_{d(on)}$ 。当 $U_{ge} > U_{ge(th)}$ 时, VDMOS 的沟道区内形成导电沟道, IGBT 进入正向导通状态, 电流 I_c 开始上升, 在 U_{ge} 达到 $U_{ge,10}$ 前, 门极充电时间常数 $\tau_1 = R_g(C_{gd1} + C_{ge})$, 当 I_c 达到稳定值 I_0 后, U_{ce} 开始下降, 此时门极只有电容 C_{cg} 起作用, 对应 U_{ce} 电压下降最剧烈的部分。当 U_{ce} 达到稳定值 $U_{ce(on)}$, 门极电压以时间常数 $\tau_2 = R_g(C_{gd2} + C_{ge})$ 继续充电直到等于 U_{GG} 。

当 U_{ce} 开始下降时,其门极电流可由下式估算:

$$I_g = \frac{U_{GG} - U_{ge,10}}{R_g} = \frac{15 - 9.5}{15} = 0.37(A) \tag{7}$$

相应的 I_g 的仿真波形见图 7, 其平均值为 0.337 25 A。

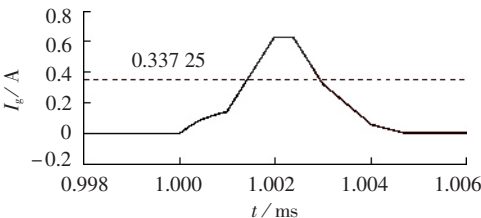


图 7 基极电流 I_g 波形

在 IGBT 正常导通后,栅极驱动电路同样需要

能提供 IGBT 足够的驱动电压和电流,其输出功率应能维持 IGBT 始终处于饱和状态。

与此同时, U_{ce} 电压下降率满足:

$$\frac{dU_{ce}}{dt} = \frac{I_g}{C_{cg}} = \frac{U_{GG} - U_{ge,10}}{R_g C_{cg}} \tag{8}$$

由式(8)可见,当 U_{GG} , $U_{ge,10}$ 一定时, U_{ce} 的下降率与 $R_g C_{cg}$ 成反比, 设 C_{cg} 在此过程中为某一定值, 则电压的下降率仅与 R_g 成反比。图 8 为导通过程中, R_g 分别取值为 15, 100, 200 Ω 的 U_{ce} 电压波形图。

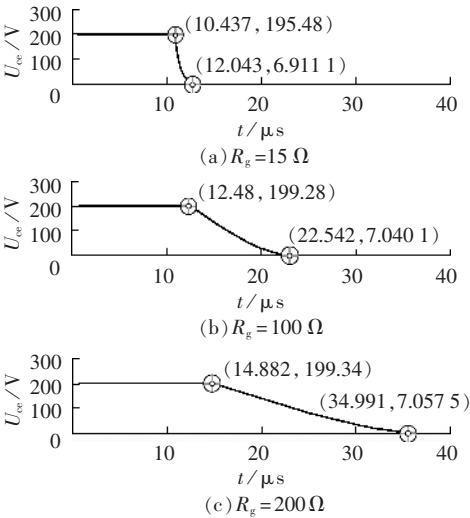


图 8 不同 R_g 条件下 IGBT 导通瞬间 U_{ce} 波形图

由图可知,图 8(b) 的电压下降率约是图 8(a) 的 6 倍,图 8(c) 的下降率大约是图 8(b) 的 2 倍,都与 R_g 值的变化大体相当。从结果中可以看出,当 R_g 较大时, IGBT 的导通时间将相应延长, 这将加大导通时间产生的损耗,使结温升高。如果对电路的开通速度和频率有较高要求时,往往在栅极加上前沿很陡的电压,同时需要考虑减小栅极电阻。

从以上分析可见,当 IGBT1 模型参数取值准确时,其仿真波形能较好地验证 IGBT 稳态与瞬态计算结果,因此,在电力电子仿真领域使用 Saber 能够得到比较精确的仿真结果。

3 固态开关设计中的应用

图 9 是基于 Saber 下的电力电子器件模型构造的固态开关[7]的仿真电路,其中 V_PWL 为分段线性电源,可以通过图形方式直观地修改 IGBT 的通断时刻,VCVS 为压控电压源,在一个电源驱动下同时控制 2 只 IGBT,保证 2 只管子的精确同步。本电路中采用了 Saber 特有的分层设计思想,图中方框内为开关模块展开后具体结构,可大大简化元件间复杂的连线关系。

图 9 中固态开关在 0.01~0.04 s 内处于导通状态,图 10(a)(d), (b)(e), (c)(f) 分别为电源相位在 $0^\circ, 120^\circ$ 及 220° 时的负载电压 U_L 以及相应的 2 只 IGBT 管中单管工作时的 U_{ds} 波形。

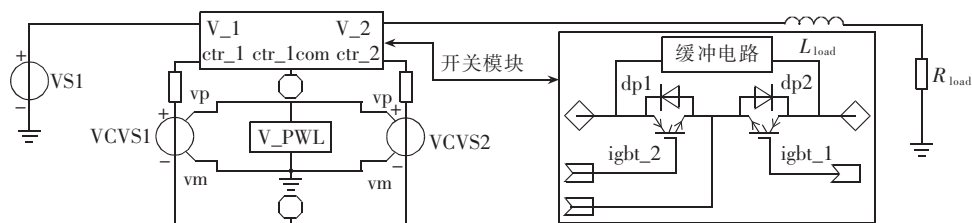
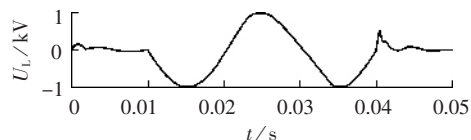
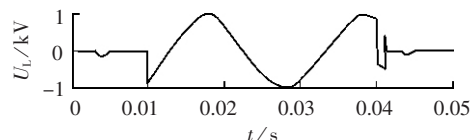


图 9 固态开关仿真电路

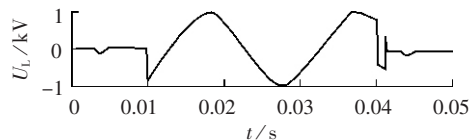
Fig.9 Simulative circuit for solid-state switch



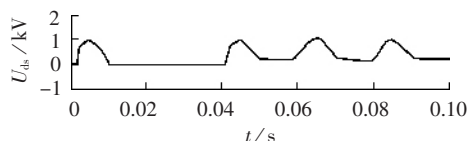
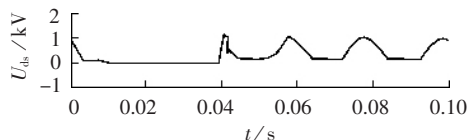
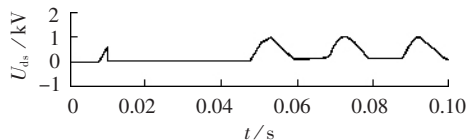
(a) 电源相位为 0° 时的负载电压



(b) 电源相位为 120° 时的负载电压



(c) 电源相位为 220° 时的负载电压

(d) 电源相位为 0° 时的 U_{ds} (e) 电源相位为 120° 时的 U_{ds} (f) 电源相位为 220° 时的 U_{ds} 图 10 负载电压及 U_{ds} 波形Fig.10 The load waveforms and U_{ds} waveforms

4 结论

目前,市场上有很多的电力电子仿真软件,相应的 IGBT 模型也有很多,其中 Saber 下的 IGBT1 模型的特点是通过器件特性曲线的准确描述,可方便地调整模型参数,以准确地模拟实际 IGBT 的相关稳态和动态特性。本文通过对 IGBT 的工作特性的理论分析及计算,对比 IGBT1 模型参数的取值及相应的仿真结果表明,Saber 下的 IGBT1 模型在描述电路中的行为特征时较为准确可信,这为电力电子仿真提供了一种有效的手段。

参考文献:

- [1] HEFNER A R, DIEBOLT D M. An experimentally verified IGBT model implemented in the Saber circuit simulator [J]. **IEEE Trans. on Power Electronics**, 1994, 9(5): 532-542.
- [2] TOSHIBA. MG200Q2YS 40 [EB/OL]. <http://www.21icsearch.com/searchpdf/default.asp?tl=MG200Q2YS40>, 1997-03-03.
- [3] 陈建业. 电力电子电路的计算机仿真[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [4] 杨晶琦. 电力电子器件原理与设计[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.
- [5] MOHAN N, UNDELAND T M. Power electronics, converter, applications and design[M]. 2nd ed. New York: Chichester Brisbane Toronto Singapore, John Wiley & Sons, INC, 1995.
- [6] 黄家善, 王廷才. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [7] 梅 军, 郑建勇, 胡敏强, 等. 基于 IGBT 软关断的混合式限流断路器结构与分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 59-62.
- [8] AGRAWAI J P. Power electronic systems theory and design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [9] 苏 麟, 梅 军, 郑建勇, 等. PSPICE 和 MATLAB 在 IGBT 动态仿真中的应用研究 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 58-61.
- SU Lin, MEI Jun, ZHENG Jian-yong, et al. Research on the application of PSPICE and MATLAB in IGBT's dynamic simulation[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2004, 24(6): 58-61.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

梅 军(1971-),男,江苏淮安人,博士研究生,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中应用(E-mail:mei__jun@sina.com);

郑建勇(1966-),男,福建福州人,教授,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中应用(E-mail:jy_zheng@seu.edu.cn);

胡敏强(1961-),男,江苏丹阳人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电机与电器;

饶 莹(1982-),女,江苏如皋人,硕士研究生,专业方向为电力电子在电力系统中应用。

Application of Saber's simulation model IGBT1 in solid-state switch design

MEI Jun¹, ZHENG Jian-yong¹, HU Min-qiang¹, RAO Ying¹, CHEN Jun², WU Heng-rong²

(1. Electrical Engineering Department of Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Huaxia Electric Corp., Yangzhong 212200, China)

Abstract: Saber, as a power electronic simulator, provides abundant universal models and special models for types of devices. The model IGBT1 in saber for IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) is introduced firstly, and its equivalent circuitry is presented. Its static and dynamic characteristics are studied, consisting of DC transfer characteristics, current distribution in parallel IGBTs and the turn-on process of IGBT. The IGBT1 parameters relative to static and transient process are brought forward as well. When the proper parameters are selected, the simulative waves confirm the calculated results better. Its application in solid-state switch design is introduced.

This project is co-supported by High-tech Project of Jiangsu Province (BG2004038) and Scientific and Technological Brainstorm Project of Jiangsu Province (BE2003043).

Key words: Saber; simulation model; IGBT