

大功率 IGBT 仿真建模及其应用

李伟邦, 侯 凯, 范镇淇, 骆 健

(国网智能电网研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 大功率 IGBT 模块成本较高且容易损坏, 在使用时需对其及相关电路进行仿真以考察其电应力, 但电力电子仿真软件缺少对此类 IGBT 模块的模型支持。采用 Saber 的 IGBT1 建模工具建立了 FZ600R17KE4 仿真模型, 并参照其数据手册参数, 对模型静态特性、门极电荷特性及动态特性进行对比, 模型与数据较好匹配。同时, 将该器件应用于 4 单元 IGBT 串联阀臂, 通过设计相应门极驱动保护单元(GDU), 并将其应用在脉冲环境中, 进行了脉冲放电电压测试。基于已建立模型进行了电路仿真, 仿真与实验结果基本一致。

关键词: 绝缘栅双极型晶体管; 串联; 大功率

中图分类号: TN32

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2012)12-0049-03

Modeling and Application of High Power IGBT

LI Wei-bang, HOU Kai, FAN Zhen-qi, LUO Jian

(State Grid Smart Grid Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: It is necessary to simulate the electrical stress for the high power IGBT as its high cost and easy to damage. However, there is less power electronic simulation software to support such IGBT modules model. This paper builds the FZ600R17KE4 type IGBT model by the Saber IGBT1 model tool. Compared with its datasheet, it is found that the static characteristics, the gate charge characteristics and dynamic characteristics of the built model match well with the datasheet. Then, 4 pieces of such IGBTs are used to design a valve arm, with own designed gate drive protection unit(GDU), voltage-sharing performance is observed in the pulse test process. The results show that the model simulation and experimental results match very well.

Keywords: insulated gated bipolar transistor; series; high power

Foundation Project: Supported by Very Large Scale Integrated Circuit Manufacturing Technology and Complete Process(No.2011ZX02603-005, 2011ZX02503-006)

1 引言

IGBT为新型电力电子器件, 具有 MOSFET 器件驱动功率小和开关速度快的优点, 又具有双极型器件饱和压降低而容量大的优点, 在高压、大电流应用领域逐渐取代传统晶闸管, 得到广泛应用。但由于其价格昂贵, 容易损坏, 在应用时必须进行仿真以考察其电应力。因此建立精确的 IGBT 模型尤为重要^[1]。很多学者采用了不同方法, 从不同角度对 IGBT 模型进行了深入研究, 并成功应用于 Saber, Spice 等仿真软件。作为功能强大的电力电子仿真器, Saber 提供了丰富的精准仿真模型库。但与其他仿真器件一样, 它缺少对中高压大功率 IGBT 的模型支持。但 Saber 提供了基于行为模型

的 IGBT1 建模工具。行为模型与器件具体类型无关, 仅模仿 IGBT 行为, 与物理机理无关。它以实验为基础, 采用某种算法求出模型与电流、电压、温度等参数的函数关系, 模拟器件开关状态^[2-4]。

这里基于 IGBT1 建模工具, 通过模拟 IGBT 工作特性, 建立了器件 FZ600R17KE4 仿真模型, 并通过仿真获取了模型静态特性曲线、电荷特性曲线及动态特性曲线, 仿真结果和数据手册基本吻合。基于该模型, 针对 IGBT 串联运用进行了驱动电阻和吸收电容设计, 并进行了 4 个 IGBT 直接串联阀臂脉冲实验和基于器件模型的串联仿真, 仿真与实验结果基本一致, 验证了模型的有效性。

2 IGBT 仿真建模及测试

2.1 IGBT 仿真建模

在柔性直流输电工程中, 通常运用耐压等级适中的多个 IGBT 串联以解决低压 IGBT 耐压低、高压 IGBT 成本高的矛盾。这里选用单管 IGBT FZ600R17KE4 作为开关器件进行仿真, 其耐压为

基金项目: 国家极大规模集成电路制造技术及成套工艺资助项目(2011ZX02603-005, 2011ZX02503-006)

定稿日期: 2012-11-22

作者简介: 李伟邦(1985-), 男, 广西贵港人, 硕士, 研究方向为全控型电力电子器件。

1 700 V, 额定电流为 600 A。由于 Saber 未提供此类 IGBT 模块的模型, 不能直接运用。利用 IGBT1 仿真建模工具, 可方便的建立该器件行为模型。

IGBT1 模型基于器件数据手册, 可对开关速度、开关损耗及开关温度特性等进行表征。且可对基于该模型的相关电路进行电力电子仿真, 获得较为准确的电应力预测。图 1 示出 IGBT 模型测试电路, 其中虚线框内为该模型内部结构图。

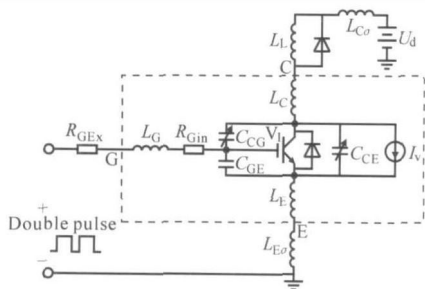


图 1 IGBT 模型测试电路

Fig. 1 Test circuit of IGBT model

内部结构中 V_i 为理想 IGBT 器件, 可通过 ratings 选项设置相关耐压、耐流、结温、功耗等基本参数。 R_{Gin} 为 IGBT 内部寄生电阻; L_G, L_C, L_E 分别为 IGBT 栅极、集电极和发射极分布漏感, 它们将严重影响 IGBT 开关速度。 C_{GG} 为集电极-栅极电容, 也称米勒电容; C_{GE} 为栅极-发射极电容; C_{CE} 为集电极-发射极电容; 它们的大小决定了栅极驱动电荷大小并影响器件驱动能力。它们与输入电容 C_{ies} 、反馈电容 C_{res} 、输出电容 C_{oes} 之间的关系为:

$$C_{ies} = C_{GE} + C_{GG}, C_{res} = C_{CG}, C_{oes} = C_{CE} + C_{CG} \quad (1)$$

C_{ies} 主要影响 IGBT 开关速度、开关损耗等; C_{res} 主要影响栅极-发射极驱动电压 u_{GE} 和集电极-发射极电压 u_{CE} 耦合关系; C_{oes} 主要影响 u_{CE} 变化。仿真设置时需注意:

$C_{res0} > C_{res1} > C_{res2}, C_{oes0} > C_{oes1} > C_{oes2}, C_{ies0} > C_{ies1} > C_{ies2}$ (2)
式中: $C_{res0}, C_{res1}, C_{res2}, C_{oes0}, C_{oes1}, C_{oes2}, C_{ies0}$ 均为模型对应的特征点参数。

I_v 为电流源, 用于模拟 IGBT 拖尾电流。数据手册上未提供该选项, 可由具体实验进行测量, 并加以适当调整。

2.2 IGBT 模型测试

根据模型内部结构设置相应参数, 然后按建模流程建立器件模型, 并根据图 1 进行仿真测试。其中, U_d 为测试主电源; R_{Gex} 为外接驱动电阻, 它和 R_{Gin} 一起构成 IGBT 驱动栅极电阻 R_G , IGBT 开通和关断均取决于 R_G 的大小; L_L 为负载; L_{Cr} 和 L_{Er} 为测量电路中引入的寄生电感, 为简化仿真, 设

$L_{Cr} = L_{Er} = 0.5L_{\sigma}$ 。驱动脉冲为双脉冲, 设置脉冲时间来获取测量点电流。测量电路选取的 $U_d, R_{Gex}, L_L, L_{\sigma}$ 均可从数据手册中获得。

2.2.1 静态特性对比

静态特性包括转移特性和输出特性。通过时域仿真和参数扫描仿真分别获取模型转移特性和输出特性, 并与数据手册进行对比, 如图 2 所示。从两者对比可见, 仿真结果与数据手册基本吻合。

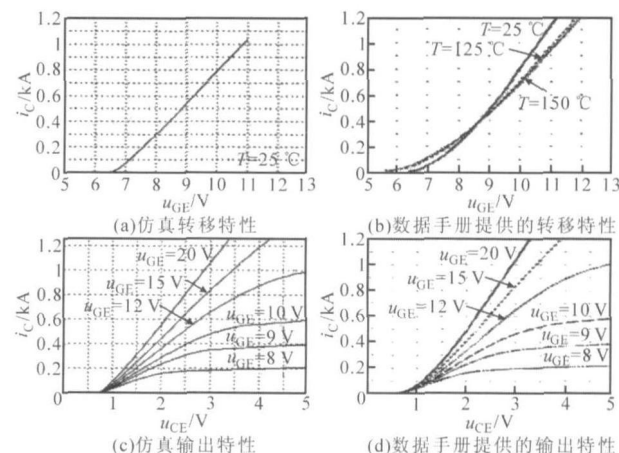


图 2 IGBT 模型转移特性和输出特性

Fig. 2 Transfer and output characteristics of IGBT model

2.2.2 电荷特性仿真

器件电荷特性对其驱动设计具有重要作用, 只有当驱动电荷满足其电荷特性要求时, 器件才能正常工作。图 3 示出 IGBT 电荷特性仿真。当 u_{GE} 上升到驱动电源电压时, 对应电荷量 Q 即为数据手册中栅极电荷 Q_G 。仿真结果表明, $Q_G \approx 6.1 \mu C$, 与数据手册一致。

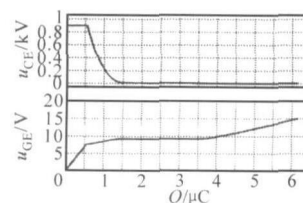


图 3 IGBT 模型栅极电荷特性

Fig. 3 Gate charge characteristics of IGBT model

2.2.3 动态特性仿真

表 1 示出仿真提取的开关特性与数据手册对比结果。可见, 仿真模型与数据手册在开关特性上有一定误差, 但数量级基本一致。一方面是由于 IGBT1 模型在寄生参数上考虑比较简单, 另一方面是由于未考虑外围电路复杂的寄生参数。考虑到实际器件寄生参数分散性, 模型已具有一定准确性, 可用来表征器件相关行为特征并考察其在电力电子电路中的电应力。

表 1 IGBT 模型与数据手册动态特性对比
Table 1 Dynamic characteristics comparison

	t_{don}/ns	t_r/ns	t_{on}/ns	$t_{\text{doff}}/\text{ns}$	t_f/ns	t_{off}/ns
数据手册	240	50	290	700	80	780
仿真模型	142	67	209	316	243	559
误差/%	40.8	34	27.9	54.8	196.2	15.5

t_{don} 为开通延迟时间; t_r 为上升时间; t_{on} 为开通时间; t_{doff} 为关断延迟时间; t_f 为关断下降时间; t_{off} 为关断时间。

3 仿真建模在 IGBT 直接串联中的应用

3.1 基于仿真模型的驱动电阻及吸收电容设计

IGBT 直接串联, 关键是要解决 IGBT 关断过压问题。在保证门极触发信号同步性满足要求的前提下, 通常解决方案为改变门极电阻和并联 RCD 吸收电路。图 4 示出基于已建立的 IGBT 模型, 针对不同 R_{GEX} 和 RCD 吸收电路的仿真结果。仿真参数: $U_d=750\text{ V}$, $L_o=200\text{ }\mu\text{H}$, 工作电流 300 A , RCD 电阻 $R=50\text{ }\Omega$ 。结果表明, 浪涌过电压随 R_{GEX} 增大而减小, 随 RCD 电容 C 增大而减小。然而, R_{GEX} 越大, 其开通和关断时间就越大, 交换损耗也越大; C 越大, 损耗也越大。故 R_{GEX} 和 C 需在损耗与吸收效果间折中。同时, C 过大会导致 IGBT 关断时充电时间变长, 如果其时间超过了驱动脉冲时间, 将造成 u_{CE} 均压严重畸变, 导致器件损坏。

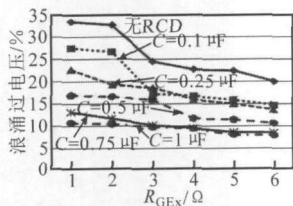


图 4 IGBT 浪涌过电压与 R_{GEX} , RCD 的关系

Fig. 4 Relationship between surge overvoltage and R_{GEX} or RCD

参照数据手册和仿真结果, 在 $R_{\text{GEX}}=2\text{ }\Omega$, $C=0.5\text{ }\mu\text{F}$ 时, 浪涌过电压为基准电压的 16.7%, 满足 IGBT 串联要求。实验中选取容值为 $0.47\text{ }\mu\text{F}$, 耐压 $1\text{ }700\text{ V}$ 的薄膜电容。

3.2 仿真和实验

将 4 个 FZ600R17KE4 模块串联, 使用高频变压器系统对其隔离供电, 研制了一套 IGBT 串联阀臂, 并将其应用在脉冲电路中, 如图 5 所示。每个 IGBT 对应一个 GDU 板, 外置调压器给脉冲电容 C_0 充电到 3 kV , 通过 GDU 板给串联的 4 个 IGBT 发送同步触发脉冲, 负载电阻 R_L 为 $8\text{ }\Omega$, 其自带电感 $L_L\approx 40\text{ }\mu\text{H}$, 负载回路通过二极管 VD_0 续流。主回路寄生电感 $L_o\approx 1\text{ }\mu\text{H}$ 。

图 6 为实验和仿真结果对比图。可见, 实验与仿真较为吻合。可见, 4 个 IGBT 均压效果良好, 同

步性及动、静态特性都较为理想。浪涌过电压约为 16%, 与之前仿真分析基本一致。随后的振荡是由吸收电路中二极管 VD 反向恢复造成的, 振荡会带来可观的附加损耗, 严重时可损坏 IGBT 器件。因此, 需选用快恢复二极管, 以抑制该振荡现象。

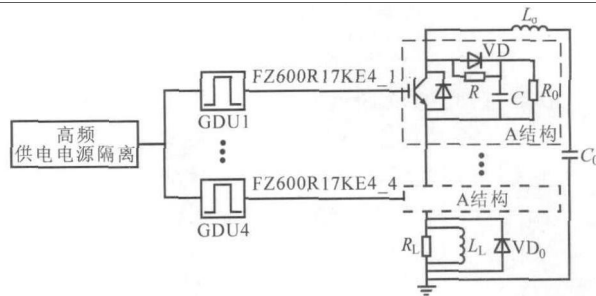


图 5 仿真和实验电路

Fig. 5 Simulation and experimental circuit

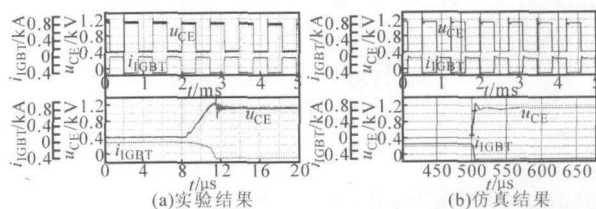


图 6 仿真和实验结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation and experimental results

4 结 论

这里基于 Saber 的 IGBT1 建模工具建立了 FZ600R17KE4 仿真模型, 对该模型静态特性、栅极电荷特性和动态特性曲线进行了描述, 并与数据手册进行对比, 仿真模型与数据手册提供的参数基本吻合; 结合该模型, 对 IGBT 驱动电阻及吸收电容等外围电路进行设计并将其应用在 3 kV , 4 单元串联阀臂脉冲电路中, 对比基于该模型的电路仿真结果, 与实验基本一致, 表明了该模型具有较高的可靠性。

参考文献

- [1] Pang H, Tang G, He Z. Evaluation of Losses in VSC-HVDC Transmission System[A]. IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting[C]. 2008: 1-6.
- [2] Githiari A N, Gordon B M, McMahon R A, et al. A Comparison of IGBT Models for Use in Circuit Design[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1999, 14(4): 607-614.
- [3] 梅 军, 郑建勇, 胡敏强, 等. Saber 仿真模型 IGBT1 在固态开关设计中的应用[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6): 53-57.
- [4] Sheng K, Williams B W, Finney S J. A Review of IGBT Models[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2000, 15(6): 1250-1266.