

[控制系统]

# IGBT的特性仿真与分析研究

文/河北工业大学电磁场与电器可靠性联合省教育部重点实验室 李昊宇  
台湾勤益科技大学 李玲玲

对IGBT的静态特性、动态特性和热特性进行了分析，在Matlab中实现了IGBT模块不同特性的仿真，并对IGBT特性进行了分析研究，为进一步研究IGBT的寿命和可靠性提供了基础。

绝缘栅双极晶闸管是目前最为常用的电压驱动型器件，IGBT既具有MOSFET的高速开关能力，又具有双极型晶体管的低饱和电压特性，导通状态下可以通过较大电流。IGBT优良的综合表现，使其大规模地应用于大功率领域。对IGBT的静态特性、动态特性、及热特性进行分析，可以为进一步对IGBT的可靠性、开关损耗等方面的研究提供理论支撑。

## IGBT静态特性分析

IGBT的静态特性主要是指转移特性和输出特性。IGBT的转移特性是指集电极电流 $I_c$ 随着栅极控制电压 $U_{ge}$ 的变化趋势，IGBT的输出特性是指栅极控制电压 $U_{ge}$ 发生变化时，集电极电流和发射极电压之间的关系。

Matlab的仿真电路图如图1所示，对IGBT的转移特性进行仿真。此模块是一个N通道的IGBT模块。默认的器件特性由伏安特性曲线定义，不同的门极电压对应不同的伏安特性曲线。动态特性取决于建模时候的结电容。 $I-U$ 曲线是来自数据表定义的参数或直接使用表格数据。简化的应用模型，每一个门极电压对用一个导通状态下的伏安特性。简化的动态特性由基本方程，导通，上升，关断和下降时间定义。这样可以提高模型仿真计算速度，但是减小了模型仿真的真实性。

仿真过程中，使用的IGBT参数为，门极电压为0时，集电极电流为2 mA。 $V_{ce}$ 电压为600 V。发

射极间的阈值电压为6 V。集电极-发射极饱和电压为2.6 V。集电极电流在 $U_{ce}$ 的定义为400 A。栅极-发射极电压 $U_{ge}$ 的定义为10 V。测量温度为25℃。输入电容为26.4 nF。反向传输电容为2.7 nF。不考虑输出电容。IGBT的发射系数为3。

对IGBT的静态特性分析主要是分析 $I_c$ 和 $U_{ce}$ 之间的关系。仿真时，在采用不同的门极电压下的伏安特性曲线。仿真结果如图2所示。

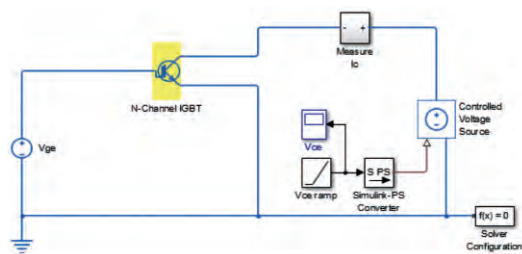


图1 IGBT静态特性分析仿真电路

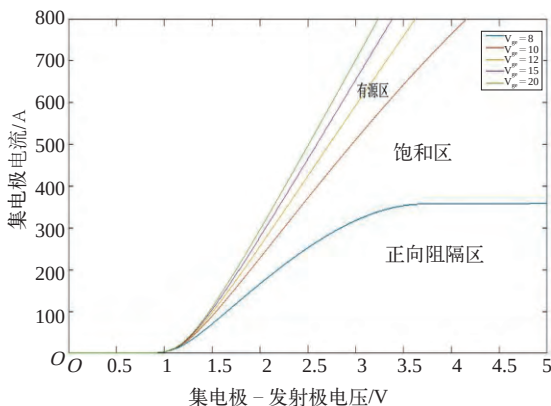


图2 IGBT静态特性仿真结果

$U_{ge}$  低于  $U_{ge(th)}$  的阈值电压时, 此时IGBT没有开启, 处于关闭状态, 电流  $I_c$  为0。

$U_{ge}$  高于  $U_{ge(th)}$  的阈值电压时, 此时IGBT开启, 电流  $I_c$  不为0。当  $U_{ce}$  电压一定时,  $I_c$  随  $U_{ge}$  的增加而增加。IGBT的输出特性可以分为3个区: 正向阻隔区、有源区和饱和区。

### IGBT动态特性分析

IGBT的动态特性是指IGBT在开关器件的特性, IGBT的工作频率很高, IGBT工作期间, 长时间处于动态过程, 所以研究IGBT的动态特性非常重要。IGBT的动态特性取决于IGBT的参数, 输入电容 ( $C_{ies}$ ), 反向传输电容 ( $C_{res}$ ), 栅极集电极氧化电容 ( $C_{ox}$ )。IGBT模块结电容的大小对IGBT的动态特性有不同的影响。

通过预先设定动态特性数据值, 测量动态特性时使用的其他参数与测量静态特性时使用的参数相同。图3所示为Matlab的仿真图, 图4所示为IGBT一个开关周期内  $U_{ge}$ 、 $U_{ce}$ 、 $I_c$  的波形图。

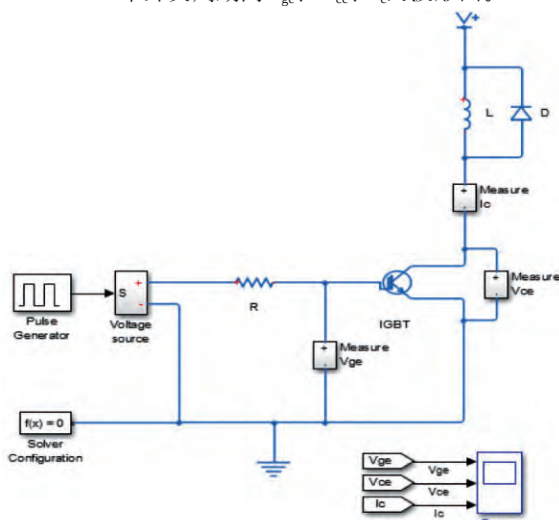


图3 动态特性仿真电路

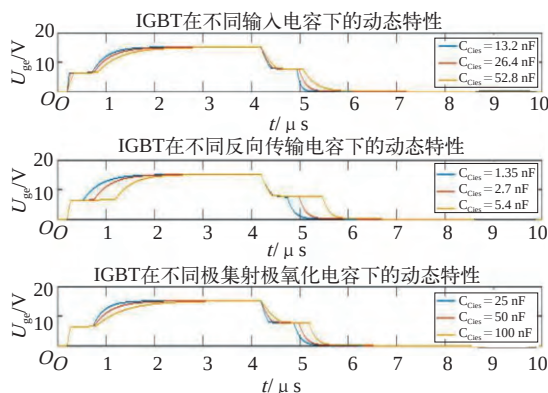


图4 IGBT动态特性

对IGBT栅极电容充电时, 栅极电压呈现为3个阶段。第一个阶段  $U_{ce}$  较大并且基本不变, 此时的IGBT可以认为, 在向  $C_{ies}$  充电,  $C_{ies}$  越小, 充放电速度越快。第二个阶段, 由于米勒效应 (miller effect), 电压  $U_{ge}$  被钳制在一个固定值上,  $U_{ge}$  保持一段时间大小不变, 形成的“平台”称为米勒平台,  $C_{res}$  越小, 米勒平台的超度越小。第三个阶段, IGBT向  $C_{ies}$  和  $C_{ox}$  同时充电,  $C_{ox}$  只影响第三阶段的充电速度。IGBT关断过程同样也是分阶段的, 关断过程中的米勒平台与导通过程的米勒平台是一致的。

### IGBT热特性分析

IGBT是双极晶体管与MOSFET的复合器件, 但是IGBT的温度特性不是双极晶体管的温度特性与MOSFET的温度特性的简单叠加。室温下, 典型的IGBT的输出特性与MOSFET的输出特性相似。IGBT热特性测量仿真电路如图4所示。

高温工作特性是IGBT的一个主要特性, IGBT在高温工作时优于其他功率型MOSFET。当工作温度升高到150℃时, 功率MOSFET的工作电流密度下降一倍, 而IGBT仍能保持较高的工作电流密度。

IGBT结温为  $T_j$ , 芯片与外壳温度差为  $\Delta T_{jc}$ , 外壳与散热器温度差为  $\Delta T_{ch}$ , 散热器与环境温度差为  $\Delta T_{ha}$ , 环境温度为  $T_a$ 。即

$$T_j = \Delta T_{jc} + \Delta T_{ha} + T_a \quad (1)$$

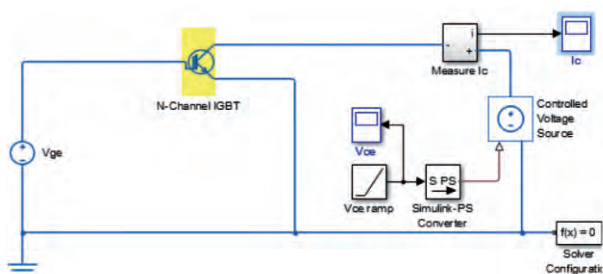


图5 IGBT热特性测量仿真电路

高温工作状态, IGBT的饱和区的工作电压升高, IGBT的跨导和阈值电压减小, IGBT这一减小, 导致器件沟道迁移率减小。IGBT高温静态特性如图6所示, 随着温度的升高, IGBT的开关损耗也有明显的变化。从图7可以看到, 在25℃和125℃下的IGBT的开通损耗和关断损耗。高温下的IGBT的开通损耗和关断损耗都高于低温下的开通损耗和关断损耗。

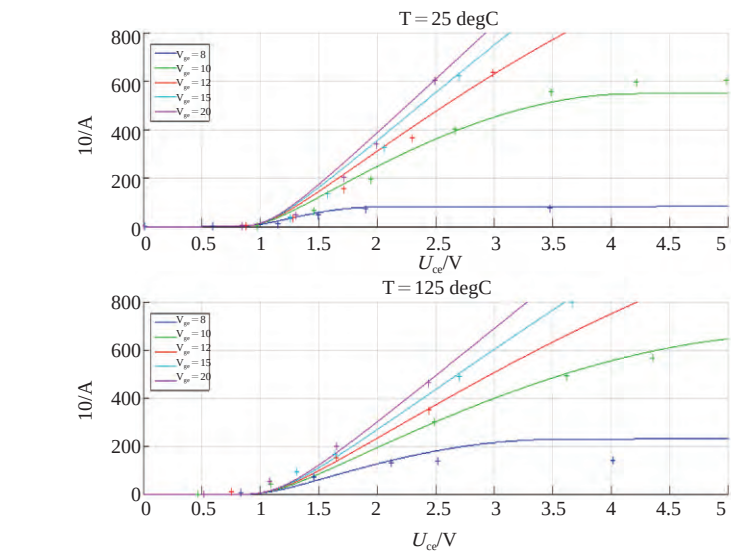


图6 IGBT不同温度下的静态特性

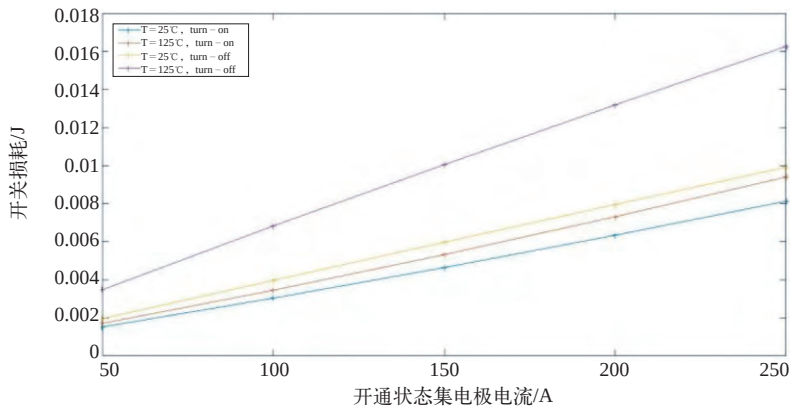


图7 IGBT不同温度下的开关损耗

结束语

通过在Matlab中搭建IGBT特性的测量电路，并对IGBT的静态特性、动态特性及热特性进行仿真，仿真结果能够较为准确地仿真IGBT

的各个特性，为进一步深入研究IGBT做了充分的准备工作。[EA](#)

(收稿日期：2016.09.30)

(编辑：杨得润)

(上接第90页)

任务执行输出操作，操作完成后，10 ms任务进行指令表解析，即在蓝色框中间的红色框实现了集中输出。

结束语

本文提出将软PLC的设计思想应用于配电终端，并设计了图形化的设计平台，通过设计功能块图，就可以不修改配电终端程序，而改变配电终端的功能。配电终端设计人员和电力用户可以

根据实际需要，利用图形化的开发环境，在线编写出所需的各种逻辑功能。在配电终端中实现PLC功能，使装置集PLC和通用微处理器的优点于一身，符合未来电力系统的应用。

在当前配电自动化不断升级、配电终端功能不断发展变化的形式下，配电终端中实现PLC功能必将成为趋势。[EA](#)

(收稿日期：2016.09.29)

(编辑：杨得润)