

IGCT 及其逆变电路的 PSpice 仿真

周 勇, 吕中宾

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 集成门极换流晶闸管(IGCT)在中压领域的应用越来越广泛。利用 PSpice 软件包建立了 IGCT 的单 2T-3R 模型仿真电路,并基于此模型对中压变频器中的逆变单元,在载波频率为 800 Hz 时的三种情况(不考虑线路杂散电感、考虑较大杂散电感、考虑一种故障情况)进行了仿真和分析。提出 IGCT 不安装关断吸收电路只是在线路结构紧凑、杂散电感较小的场合;否则要加装关断吸收电路。

关键词: 集成门极换流晶闸管; 中压变频器; 仿真

中图分类号: TN 344

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)06-0077-03

近年来,国内一些厂家也开始利用集成门极换流晶闸管(IGCT)开发各种电力电子产品,在目前缺少足够运行参数的情况下,对 IGCT 的行为特征进行建模仿真就显得尤为重要。在逆变器的设计和试验阶段,对其进行计算机建模仿真分析,有利于缩短开发周期,改善和提高逆变器的性能,减少试验次数,避免无效投资^[1]。本文将介绍利用 PSpice 软件包对 IGCT 及其逆变电路仿真的方法和结果,文中所用的参数来源于某公司正在研制的 IGCT 中压变频器。

1 IGCT 结构与工作原理

IGCT 是集成门极驱动电路和门极换流晶闸管(GCT)的总称,其结构如图 1 所示。

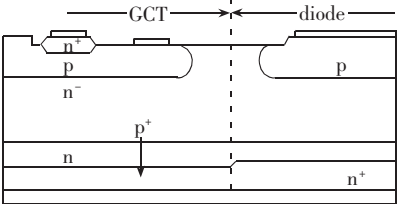


图 1 片内集成二极管的逆导型 IGCT
Fig.1 Reverse-conducted IGCT with integrated diode inside

IGCT 在工艺上采用了单元结构集成的方法,其阴极被细分为许多个单元胞,周围由门极包围,形成所谓多阴极结构,整个芯片的外面是反并联的快速二极管。

IGCT 的阳极 pnp 三极管,是一只高压大电流的三极管,n 基区很厚,在关断之始,n 基区有大量的存储电荷,这就需要阳极电流有一定时间(1~2 μ s)去除这些电荷。由于其阴极 npn 三极管 a_{npn} 值较大,即比较灵敏,因此,在这个时间内,阴极三极管能够转出工作区,这样当阳极电压上升时,就不会有任何阴

极电流了,即在关断时,IGCT 相当于一个基极开路的 pnp 三极管。在开通阶段,数百安培的门极电流强脉冲迅速有效地使阴极 npn 三极管在晶闸管开关动作之前进入饱和区,即使在非常高的 di/dt 的情况下,开通损耗也几乎可以忽略^[2]。

2 IGCT 仿真模型

PSpice 是用于 PC 机的 Spice (Simulation program with IC emphasis) 版本^[3],该软件主要用于电子电路的分析与设计。对 Spice 中原有的小功率器件的详细模型加以改造,引入功率器件模型,便可对电力电子电路进行模拟仿真。

在本文中,建立 IGCT 模型的目的是研究逆变器的动态行为特征。由于 IGCT 的低电感(单元延迟可忽略),故对其采用了单 2T-3R 子电路模型对其进行仿真^[4]。图 2 给出了 ABB 公司生产的型号为 5SHX04D4502 的 IGCT 仿真电路, $U_{\text{DRM}} = 4\,500\text{ V}$, $I_{\text{TQM}} = 630\text{ A}$ 。

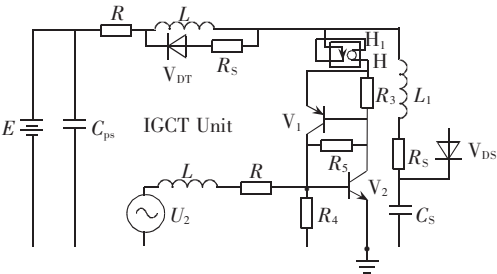
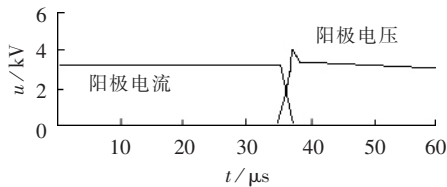
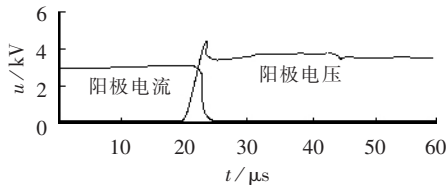


图 2 单 2T-3R IGCT 模型仿真电路
Fig.2 Single 2T-3R simulation model of IGCT

仿真结果如图 3(a)所示,它与 IGCT 实测关断波形(如图 3(b)所示)相比较,基本吻合,从而较好地完成了对 IGCT 的仿真。但仍然存在一些差异:仿真结果比较线性;未能更详细的给出阳极峰值电压之后的振荡过渡过程。而用此模型去仿真逆变单元,将具有足够的精度。



(a) IGCT 关断仿真波形



(b) 实测 IGCT 关断波形

图 3 IGCT 关断波形

Fig.3 The waveform of IGCT during turn-off

3 基于 IGCT 的逆变单元

仿真的中压变频器是针对火电厂风机系统而设计的,容量为 $2\text{ MV}\cdot\text{A}$,交流电源由 6 kV 厂用电系统提供,经过三相 36 脉动整流后生成约 2.5 kV 的直流电压,再经过脉宽调制器(PWM)调制逆变后,输出三相 6 kV , $0\sim 50\text{ Hz}$ 的交流电压,每相均由 2 个逆变功率单元串联叠加组成,每个逆变单元的原理接线如图 4 所示。

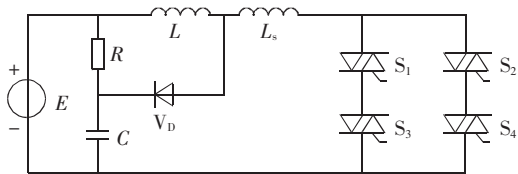


图 4 IGCT 逆变器逆变单元

Fig.4 Inverter unit of IGCT frequency converter

为便于观察逆变器的动态特征,在逆变器的仿真中采用了详细模型。图 4 中的 $S_1\sim S_4$ 均采用图 2 所示单 2T-3R 仿真电路代替,且反并联一快速二极管,从而构成逆导型 IGCT 的 PSpice 模型, R, V_D, L, C 分别是吸收电阻、钳位二极管、扼流电感和钳位电容,它们组成了逆变器的开通吸收回路,即扼流回路, L_s 为电路中的杂散电感。

由于对控制系统特性的仿真需要较长的时间,而本文关注的是逆变装置的特性,故在不失一般性的情况下,将控制环节用如图 5 所示的固定的信号源代替。用表函数(ETABLE,图中的 E_1, E_2)对比较器建模,用于比较两个输入端的三角波载波信号和

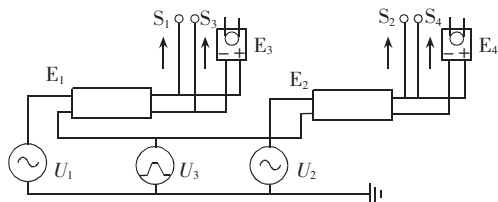


图 5 简化的逆变器控制电路

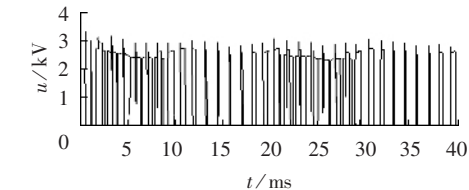
Fig.5 Simplified control circuit of inverter

正弦波参考信号的大小,并据此产生 PWM 控制信号,分别控制 S_1, S_2 (IGCT 单元);将压控电压源 (E_3, E_4) 控制端与 E_1, E_2 的输出端反接,其输出信号分别控制 S_3, S_4 (IGCT 单元)。

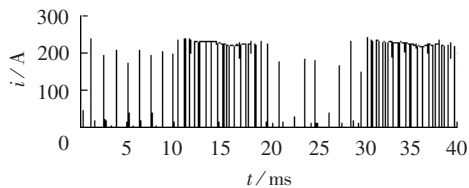
4 仿真与分析

在仿真过程中,载波频率为 800 Hz ,分别仿真了以下三种情况。

a. 理想情况下,不考虑线路的杂散电感,加载阻性负载 $R_{\text{load}}=20\ \Omega$,仿真波形如图 6 所示。



(a) IGCT 端部电压

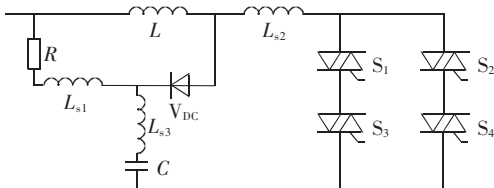


(b) IGCT 桥臂电流

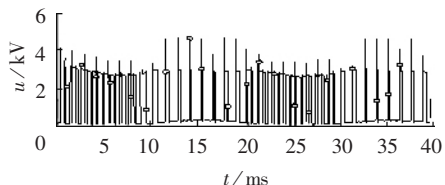
图 6 理想情况下的仿真波形

Fig.6 Simulative result under ideal conditions

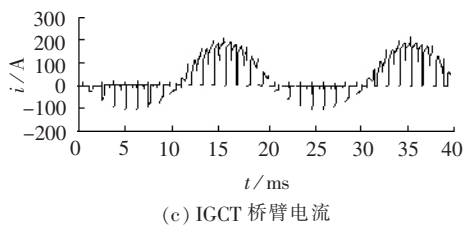
b. 考虑较大的杂散电感。桥臂中的杂散电感对 IGCT 关断时产生过电压的大小和形状影响很大。逆变器的仿真电路中杂散电感的示意图如图 7(a)所示。其中 L_{s1} 为开通吸收电路中吸收电阻 R 支路的杂散电感,其数值跟吸收电阻的选型有关,一般在 $100\sim 500\text{ nH}$ 之间; L_{s2} 为换流回路的杂散电感,其数值跟主电路的机械结构设计有关,一般在 $100\sim 1000\text{ nH}$ 之间; L_{s3} 为开通吸收电路中电容支路的杂散电感,其数值跟吸收电容的选型有密切关系,一般 $100\sim 500\text{ nH}$ 之间^[5]。在仿真过程中,分别取 $L_{s1}=100\text{ nH}$, $L_{s2}=400\text{ nH}$, $L_{s3}=500\text{ nH}$ 。同时加载感性负载, $R_{\text{load}}=20\ \Omega$, $L_{\text{load}}=10\text{ mH}$,其他参数同 **a**,仿真波形如图 7 (b)和(c)所示。



(a) 杂散电感示意图



(b) IGCT 端部电压

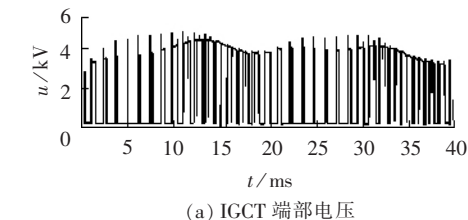


(c) IGCT 桥臂电流

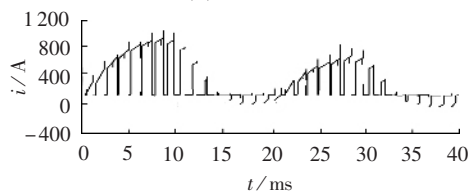
图 7 考虑杂感情况下的仿真波形

Fig.7 Schematic diagram of stray inductances and its simulative results

c. 考虑一种故障情况, 交流电源输入侧的中性点与逆变器交流输出侧 LC 滤波器中的电容接地点接至同一接地网, 当电容器的容量较大时, 例如取 $9000\mu\text{F}$, 其他参数同 a, 其仿真波形如图 8 所示。



(a) IGCT 端部电压



(b) IGCT 桥臂电流

图 8 故障情况下的仿真波形

Fig.8 Simulative results under accident condition

由仿真结果可以看出, 对于情况 a 即理想情况的仿真, 与理论结果相比, 波形中出现了毛刺, 这是由于电路中含有轭流电感的缘故, 符合实际情况。

情况 b 最接近现场情况, 仿真时所用的参数描述了结构比较松散, 且电缆杂散电感比较大的情况, 其仿真结果与实测结果基本吻合。当负荷较大时, 由仿真结果可知, IGCT 的端电压已经超过 U_{DRM} (4500V), IGCT 可能击穿。在现场调试时, 也测到了较大的上升电压。为了解决此问题, 加装了关断吸收电容 ($0.047\mu\text{F}$), 从仿真和实测结果来看, 大大改善了 IGCT 关断过程中的端电压。

而对于情况 c, 则是一种严重的故障状态, 桥臂

电流远大于 $I_{\text{TGM}} = 630\text{A}$ 。同时, IGCT 所承受的电压在某些点上已超过 U_{DRM} (4500V), IGCT 必定会被击穿乃至烧毁。

5 结论

根据仿真和分析结果, 可以得出 2 点结论。

a. IGCT 不安装关断吸收电路, 是有条件限制的, 要求线路结构紧凑, 杂散电感较小。当主换流回路杂散电感较大时, 必须加装关断吸收回路。

b. 通过 PSpice 仿真, 可以再现故障状态, 并可以人为模拟故障状态, 在电力电子产品的研发阶段, 可找出有关的运行数据, 为产品调试提供依据, 同时还可以缩短研制周期, 节约开发经费。

参考文献:

- [1] MOHAN N, RONBINS W P, UNDELAND T M, et al. Simulation of power electronics and motion control systems — An overview[J]. *Proceeding of the IEE*, 1994, 82(8): 1287–1302.
- [2] 杨大江, 姚振华, 朱长纯, 等. 新型功率器件(IGCT)的工作原理及其设计技术[J]. *电力电子技术*, 1999, (5): 55–57. YANG Da-jiang, YAO Zhen-hua, ZHU Chang-chun, et al. Principle and technology of new power electronic device IGCT[J]. *Power Electronics*, 1999, (5): 55–57.
- [3] 贾新章, 武岳山, 贾 冬. OrCAD/PSpice 9 实用教程[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- [4] 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.
- [5] 袁立强, 赵争鸣, 刘建政, 等. 基于 IGCT 的大功率 NPC 逆变器设计仿真与分析[J]. *电力自动化设备*, 2004, 24(1): 46–53. YUAN Li-qiang, ZHAO Zheng-ming, LIU Jian-zheng, et al. Design, simulation and analysis of IGCT-based high power NPC inverter [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2004, 24(1): 46–53.

(责任编辑: 汪仪珍)

作者简介:

周 勇 (1957–), 男, 河南信阳人, 副教授, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用 (E-mail: Zhouy@zzu.edu.cn);

吕中宾 (1974–), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

PSpice simulation of IGCT and its inverter circuit

ZHOU Yong, LÜ Zhong-bin

(College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: IGCT(Integrated Gate Commutated Thyristor) is widely used in mid-voltage field. A single 2T–3R simulation model of IGCT is established with PSpice(Personal Simulation program with IC emphasis). Based on it, an inverter unit of mid-voltage frequency converter is simulated and analyzed at 800 Hz. Three conditions are involved: no line stray inductances, large stray inductances and accident. It is pointed out that the turn-off absorption circuit is unnecessary only in conditions of compact line structure and small stray inductances.

Key words: IGCT; mid-voltage frequency converter; simulation