

文章编号: 1005-0523(2006)04-0083-04

# IGCT 快熔保护的仿真研究

黄 炜<sup>1</sup>, 邱万英<sup>2</sup>

(华东交通大学 1. 电气与电子工程学院; 2. 基础科学学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 针对 6 kV/1 000 kW 高压变频器中的 IGCT 保护电路进行仿真研究, 在分析逆变器短路直通故障的基础上, 选取一种利用快熔对 IGCT 进行保护的方案, 针对 IGCT 的快熔保护电路作出了 MATLAB 仿真, 通过仿真值与理论值相对比, 结果证明选取的快熔能够对 IGCT 器件进行有效的保护.

**关键词:** 高压变频器; 快熔保护; IGCT; MATLAB 仿真

中图分类号: TM921

文献标识码: A

## 1 前言

IGCT(Integrated Gate Commutated Thyristor)是 90 年代在晶闸管技术的基础上, 结合 IGBT 和 GTO 等成熟技术开发的新型器件. 因此, 它比 IGBT 更适合于高电压、大容量方面的使用. 同时 IGCT 在 GTO 的基础上进行了重新优化设计, 因而与 GTO 相比更具有开关状态损耗低、门极控制简单、关断速度快、主回路接线简单等优点<sup>[1]</sup>. 目前使用的 IGCT 元件最高耐压水平为 5.5 kV, 适合于大容量变频器使用. 鉴于 IGCT 器件完好与否关乎变频器设备的安全运行, 所以对 IGCT 的保护十分重要. 目前保护方案是在上下直流母线串连两个 IGCT 来保护逆变主回路上的 IGCT 器件, 这种保护的相对较复杂<sup>[2,3]</sup>. 近年来, 一种新型的通过安装快速熔断器来保护 IGCT 器件的方案兴起, 笔者在分析逆变器短路直通故障的基础上, 针对 6 kV/1 000 kW 高压变频器的中性点钳位三电平结构选取了一种快熔并针对其简化电路<sup>[4]</sup>进行 MATLAB 仿真的研究, 对比仿真波形和理论的简化计算结果, 验证了选择的快熔能够在故障情况下对 IGCT 起保护作用.

## 2 逆变器故障原因分析与等效快熔模型的选取

图 1 为 6 kV/1 000 kW 变频器的逆变器直通故障电路图, 图中每个 IGCT 实际是由两个器件串连所得. IGCT 为 ABB 公司的 5SHX06F6004. 以 A 相为例, 仅分析一种情况, 当 A 相电平从 +E 变换到 0 时, 即开关 S<sub>1</sub> 和 S<sub>3</sub> 相互切换, 由于电力电子元件不是理想的元器件, 都存在开通及关断的延时, 这时就有可能出现 S<sub>1</sub> 和 S<sub>3</sub> 同时开通的情况, 即直流电容发生直通短路, 图 1 中箭头表示直通电流的方向. 一旦发生直通, IGCT 中将通过很高的故障电流, 从而引起 IGCT 的损坏.

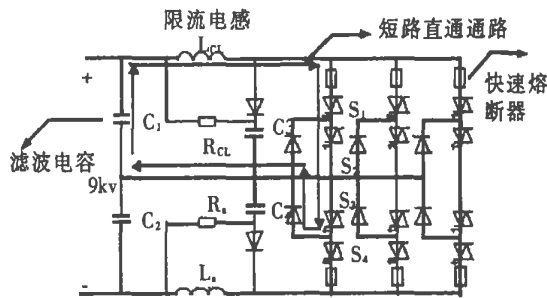


图 1 逆变器直通故障电路图

收稿日期: 2006-04-11

**作者简介:** 黄 炜(1980-), 男, 江西新余人, 华东交通大学电气与电子学院研究生, 主要研究方向为电力电子技术, 电力系统微机保护.

为了防止出现直通,一般在开通之前插入死区时间,然而当变频系统发生故障时,还是有可能造成直通.由于电容  $C_1$  通过限流电感  $L_{CL}$ ,快熔,IGCT 组件迅速放电,较大的短路电流通过快熔和 IGCT,当 IGCT 组件累积一定能量  $I^2t$  后将被破坏.如果快熔能够在 IGCT 被破坏之前衰减电流,使 IGCT 上通过的  $I^2t$  低于一定限值,即可起到保护 IGCT 器件的作用.目前国外也采用快熔产品进行保护 IGCT、GTO 等<sup>[5,6]</sup>,取得良好效果.

根据逆变器故障原因的分析,本文选取利用快速熔断器与 IGCT 器件串连的方式来保护 IGCT.选

取 225 A 额定电流的快熔,根据厂商给出的相关系数  $G=10.35$

表 1 225A 额定快熔参数表

Bodies	Type	Rating/A	$U_{PM}/V$	$E_M/V$	Prearc $I^2t/A^2s$	Coef. G
1	URB	225	7 200	7 200	10 800	10.35

$$\text{那么有: } G \times \frac{di}{dt} = G \times \frac{E}{L_1} = 1\ 552.5 \times 10^6 \text{ A/s (1)}$$

根据厂商提供的起、熄弧时刻与线路中  $G \times (di/dt)$  关系,通过查曲线可知起弧时刻为  $118 \mu s$ ,熄弧约为  $264.5 \mu s$ .当短路直通故障电路加入等效的快熔模型后,直通故障的等效电路图如图 2 所示<sup>[4]</sup>:

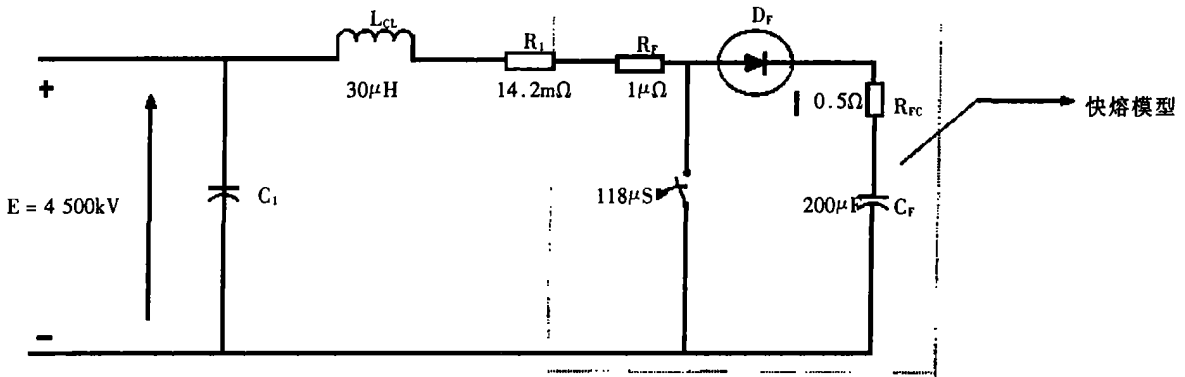


图 2 加入快熔模型的短路故障电路图

在图 2 中,逆变器的电压为 4 500 V,选取滤波电容为  $670 \mu F$ ,限流电感为  $30 \mu H$ ,电感  $L_1 > 10 L_{CL} = 300 \mu H$ ,即电源到放电电容之间的等效电感足够大,这样可以在短路电流第一波冲击计算中忽略充电电流  $I_d$ ,此处取  $L_1$  为  $400 \mu H$ ;考虑电容内阻和开关器件的导通电阻, $670 \mu F$  电容内阻为  $0.4 \text{ m}\Omega$ ,而每个开关器件由两个相串联,每个器件的导通电阻为  $2.3 \text{ m}\Omega$ ,得到的故障电路的总电阻为:

$$R = 6 \times 2.3 + 0.4 = 14.2 \text{ m}\Omega \quad (2)$$

在图 2 的右边为一快熔模型,其各参数如图.起始阶段快熔对外部电路呈现低阻态(起弧以前快熔的开关为合上的),从  $118 \mu s$  时刻起快熔起弧,等效为内部的开关打开,电阻突然增加到  $R_f + R_{FC}$ ,同时,内部等效电容  $C_f$  开始充电,使得短路电流迅速衰减,直至电流为零,从而在理论上实现对 IGCT 器件的保护.

### 3 IGCT 速熔保护的仿真与结果分析

根据对选取的加入快熔模型的短路故障电路图形的分析,作出快熔保护电路的 MATLAB 仿真模

型,其图形如图 3 所示.图中的参数仿照图 2 中的各参数,图 2 中的理想开关用图 3 中的 Ideal Switch 代替,开关用 step 触发电源在  $118 \mu s$  时进行触发,同时,图中也加入了电流测量器、电压测量器、 $I^2t$  积分电路和示波器,来进行对快熔电流、 $I^2t$  能量曲线、快熔电压、电容  $C_1$  电压等波形的观测.通过对仿真结果与理论值的对比,验证快熔对 IGCT 器件的可保护性.

利用 MATLAB 对快熔保护电路进行 SIMULINK 仿真,其实验仿真图如图 3 所示.在仿真波形图 4、5 中,起弧时刻为  $118 \mu s$ ,熄弧时刻小于  $264.5 \mu s$ ,起弧时刻快熔上电流达到的最大值接近  $1.6 \text{ kA}$ ,快熔在起弧时刻的电压迅速上升至  $4.5 \text{ kV}$ ;理论上,根据短路故障电路的各器件参数,对电路中的电压和短路电流进行计算:

$$T = 2\pi \sqrt{L_{CL}C_1} = 890.77 \times 10^{-6} \text{ s} \quad (3), \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 7.05365 \times 10^3 \text{ rad/s} \quad (4)$$

$$i = E \sqrt{\frac{L_{CL}}{C_1}} \sin \omega t = 21\ 266 \times \sin(7035 \times 118 \times 10^{-6}) = 1\ 572.6 \text{ A} \quad (5)$$

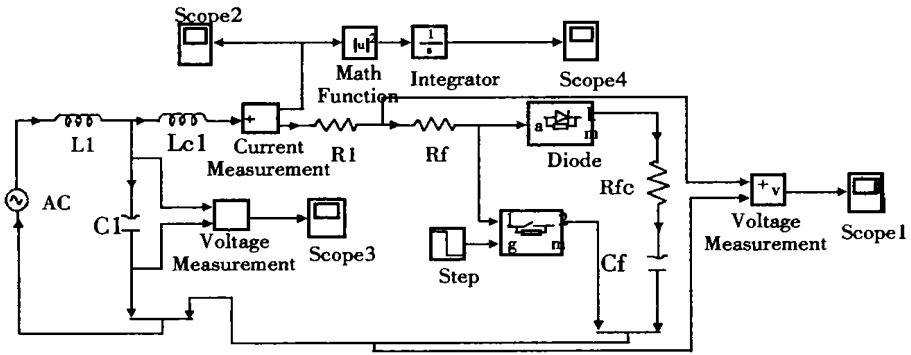


图3 加入快熔模型后短路故障电路图的 MATLAB 仿真

计算出的起弧时刻电流为 1.57 kV, 而且在快熔起弧时刻电源电压基本加在快容的两端, 因此快熔电压为 4.5 kV 左右. 显然, 仿真出的波形图与理论相吻合, 验证了所选快熔对 IGCT 保护电路的可保护性和利用 MATLAB 对快熔保护电路进行仿真的有效性和正确性.

能量修正系数为: 2.3, 根据 IGCT 主要参数表(表 2), 从短路直至熄弧后的总的 IGCT 要承受的容量为:  $I^2t = 2.3 \times 10\ 800 = 24\ 840\ \text{A}^2/\text{s}$ , 而在表 2 中 1 ms 所承受的最大容量为:  $36\ 900\ \text{A}^2/\text{s}$ , 10 ms 所承受的最大容量为  $94\ 300\ \text{A}^2/\text{s}$ , 此理论值均大于 IGCT 需要承受的容量, 因此, 可以对 IGCT 器件进行良好的保护. 在 MATLAB 仿真的波形 6、7 图中,

表 2 IGCT 主要参数表

$V_{\text{DRM}}$	$I_{\text{TQM/A}}$	$I_{\text{TSM/kA}}$	$V_{\text{To/V}}$	$\eta/\text{mQ}$	$V_{\text{Delink/V}}$	$I^2/\text{A}^2\text{s}$ $t_p = 1\ \text{ms}, t_p = 10\ \text{ms}$
5 500	520	4.3	2.3	2.3	3 300	36 900 94 300

可见电容在起弧时刻电压接近 3 kV 而熄弧时刻约为 1.6 kV,  $I^2t$  能量曲线在起弧时刻约为  $10\ 800\ \text{A}^2/\text{s}$  而在熄弧时刻约为  $25\ 000\ \text{A}^2/\text{s}$ , 仿真结果都和简化电路计算结果吻合, 这都说明利用 MATLAB 仿真出的结果的正确性和所选快熔对 IGCT 保护电路的可保护性.

#### 4 结语

本文在对 6 kV/1 000 kW 的高压变频器中 IGCT 器件短路故障原因进行分析的同时, 选取了在逆变器上下桥臂串入快速熔断器进行保护的方法, 利用其简化计算电路进行了 MATLAB 仿真. 而后, 通过仿真值与理论值相对比, 证明了简化电路计算出的快熔参数的有效性和对 IGCT 器件的可保护性, 结果表明所选的快熔能够达到保护 IGCT 的目的.

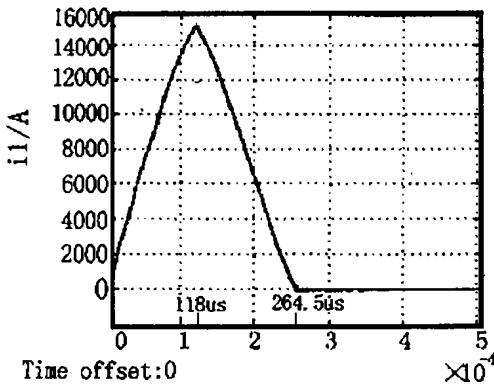


图4 快熔电流仿真图

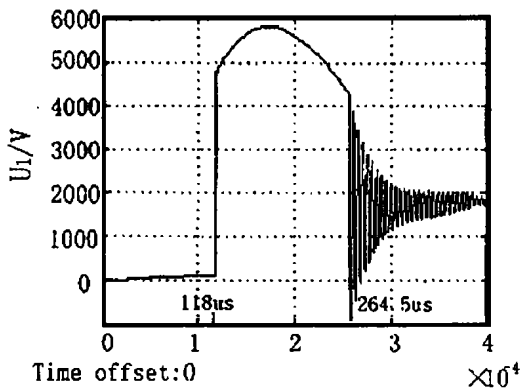
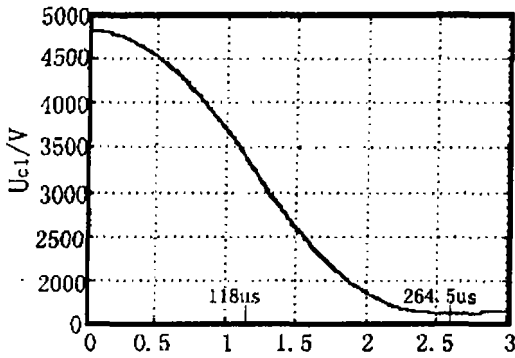
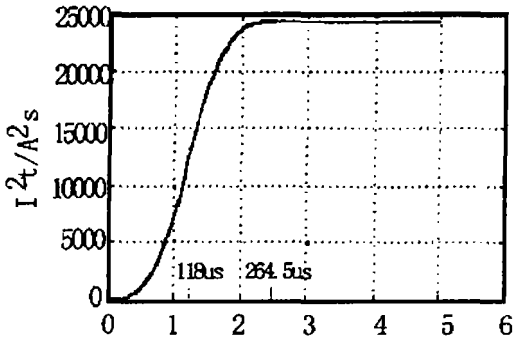


图5 快熔电压仿真图

由公式(3)、(4), 在理论上可得知起弧时刻充电电容的电压计算为:

$$U_{c1} = E \cos \alpha = 4\ 500 \times \cos(7035 \times 118 \times 10^{-6}) = 3015\text{V} \quad (6)$$

又根据  $U_{c1}$  以及厂商提供的曲线, 可以得到  $I^2t$

图6 电容  $c_1$  电压仿真图图7  $I^2t$  能量曲线

## 参考文献:

- [1] 刘文华, 宋强等. 采用IGCT电压型三电平逆变器的高压变频调速器[J]. 电力系统及其自动化, 2002.
- [2] 韩安荣. 通用变频器及其应用[M](第2版). 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] P K steamer, J K steinke, H E gruning. A reliable interface friendly Medium-voltage Drive with Based on the Robust IGCT and DTC Technology. Industry Application Conference, 1999. thirty-fourth. IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE. Phoenix, Arizona, October, vol. 3, 1505-1512.
- [4] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明, 等. 高压变频器中快熔模型及IGCT的保护[J]. 高压电器, 2003. 29(1): 8-10.
- [5] J F Palma, C Mulem. IGBT. Characterisation for their Protection by fuse Power Electronics And Drive System, Proceeding Of International Confer. 1995. (1): 59-64.
- [6] S Duong, C schaeffer, L L Rouve. Fuses for Power IGBT-converter. Industry Application Society Annual Meeting. Conference Record Of The IEEE, 1942. 1336-1343.

## Simulation Study of IGCT FUSE Protection Circuit

HUANG Wei<sup>1</sup>, QIU Wan-ying<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Eng., 2. School of Natural Science, East China Jiaotong Univ., Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Protection circuit for IGCT in 6 kV/1 000 kW HV inverter is studied. FUSE protection is selected for IGCT based on the analysis of the short circuit. The protection circuit is simulated by MATLAB. The simulation results show that the theoretical analysis is correct and the protection circuit is effective.

**Key words:** HV inverter; FUSE protection; IGCT; MATLAB simulation