

文章编号: 1672-2892(2010)02-0215-04

## 电压瞬变对高压固态开关的影响

朱鸿志, 杨永辉, 李华梅

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 对于高压放电回路, 高压开关是一个关键器件。高压放电回路中高压固态开关上电压可能出现瞬变, 这种瞬变会引起高压固态开关的误触发或者击穿。开关的工作异常将导致整个放电回路的失效。本文从原理上分析了这种失效产生的原因, 并且进行了电路仿真, 通过仿真分析提出了如何去避免这种失效的发生, 给出了相应的防护措施, 最后通过实验验证了保护措施的有效性。

**关键词:** 瞬变电压; 场控晶闸管;  $dU/dt$ ; 误触发; 仿真

**中图分类号:** TN34

**文献标识码:** A

## Effect of transient voltage on the solid-state switch

ZHU Hong-zhi, YANG Yong-hui, LI Hua-mei

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

**Abstract:** High-voltage switch is a key component to discharge circuit. Nevertheless, the voltage on the high-voltage switch in discharge circuit appears transient sometimes, which will cause the spurious triggering or breakage of the high-voltage switch. Furthermore, the abnormality of the high-voltage switch will cause the failure of the discharge circuit. The reason of this kind of failure was explored in this study. The circuit was simulated and analysed. A protection method was proposed to solve this problem according to simulation results. Practical tests were employed on the real circuit, which validated the simulation results and the effectiveness of the protection method.

**Key words:** transient voltage; MOS-Controlled Thyristor;  $dU/dt$ ; spurious trigger; simulate

对于高压放电回路, 高压开关是一个关键器件。高压开关种类很多, 一般放电回路采用的是真空触发管或者固态开关。场控晶闸管(MOS Controlled Thyristor, MCT)就属于固态开关这一类, 作为一种新型的功率器件, 它以导通电阻低, 耐压高, 驱动电路简单等优点被应用于大电流放电场合。随着使用环境越来越恶劣, 高压固态开关阳极上经常会出现极高的  $dU/dt$ , 高的  $dU/dt$  可能导致在没有正常的栅极触发信号时高压固态开关开通。最常见的可能是由于寄生电容和电感引起的。高压固态开关上增长的电压通过阴阳两极间电容会导致一个栅极电压产生, 感应的电压可能会短时间开通高压固态开关, 开关管上电压和电流的交叠会导致额外的损耗, 严重情况下可能会烧坏开关。 $dU/dt$  的问题与高压固态开关特征(如极间电容、内部门极电阻、门极电压和封装特征)、驱动能力以及版图设计有关, 引起误触发或者击穿的主要因素是高压固态开关的寄生参数<sup>[1-2]</sup>。

### 1 高压固态开关失效原因分析

MCT 的结构剖面见图 1, 一个 MCT 元件是由大量图 1 中元胞构成, 其等效为一个宽基区的 PNP 晶体管、一个窄基区的 NPN 晶体管(二者构成晶闸管)、一个 Off-FET 和一个 On-FET。

MCT 器件属于典型的半导体器件。在大多数情况下, 当 MCT 处于断态时, 其阴阳两

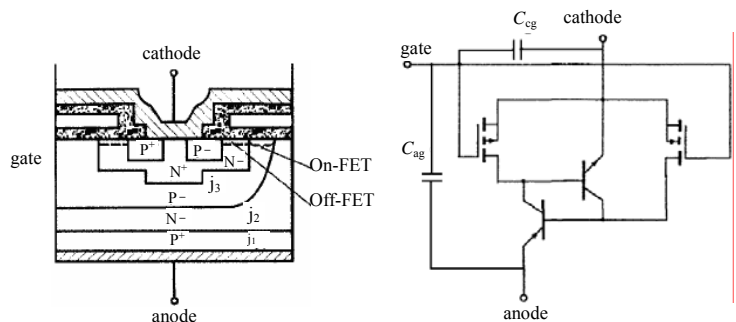


Fig.1 Architecture graph of MCT  
图1 MCT 结构剖面图

Fig.2 Equivalent circuit of MCT  
图2 MCT 等效电路

极间不会面临太大的  $dU/dt$ ，但是一旦涉及到阴阳两极间存在很高的  $dU/dt$  时，就不得不考虑 MCT 器件的寄生参数，特别是阳极与栅极之间的寄生电容。图 2 为 MCT 的等效电路图，包括阳极和栅极间寄生电容  $C_{ag}$ 、阴极与栅极间寄生电容  $C_{cg}$ ，其中栅极输入电容为  $C_{iss}=C_{ag}+C_{cg}$ 。

如果 MCT 阳极和阴极之间在极短的时间里产生很大的电压变化，就会形成所谓的  $dU/dt$ 。该电压变化将通过结电容  $C_{ag}$  对开关的栅极产生一个电流  $I$  到栅极电阻  $R_g$ ， $R_g$  是栅极的总电阻，其上的总电压为：

$$U_{gs}=IR_g=R_gC_{ag}dU/dt$$

通常 MCT 器件的栅极与阴极之间的驱动电压  $U_{gc}$  有一个额定值  $U_{TH}$ 。当 MCT 的栅极电压  $U_{gs}$  超过这个额定值时，若开关阳极与阴极又处于高压状态，则可能使开关发生误导通或者使开关发热引起损坏。这种机理决定了高压固态开关所能承受的最大  $dU/dt$ ：

$$dU/dt=U_{TH}/R_gC_{ag}$$

从上面可以得知，栅极额定电压  $U_{TH}$  越低，高压固态开关所能承受的  $dU/dt$  值越小，从而在瞬变电压影响下，器件更容易被触发。开关的工作异常产生的直接后果是整个放电回路的失效。

## 2 仿真与实验

为了验证上述分析结果，用 OrCAD 软件建立了对应的模型，对实际情况进行了模拟仿真，仿真电路见图 3。此仿真电路与实际电路基本相符，高压固态开关是根据 MCT 器件的等效电路建立的组合模型<sup>[3-4]</sup>。仿真时用一个接触式开关 (switch) 代替模拟负载，给高压电容充电至  $U_0$ ，当接触式开关闭合时，加在高压固态开关上的电压为  $U_0$ ；而当接触式开关断开时，不形成回路，此时高压电容是浮地的，那么加在高压固态开关阴阳两极间的电压就变为零。这样就可以通过接触式开关的通断让高压固态开关阳极上产生一个很大的  $dU/dt$ <sup>[5-7]</sup>。这里要注意的是，接触式开关的通断是瞬变的，但是这种瞬变过程在此软件中是无法模拟的，所以只能近似地用一个可控开关模型 S1 代替，这里设定的可控开关参数为： $U_{off}=0\text{ V}$ ； $U_{on}=0.01\text{ V}$ ； $R_{off}=1 \times 10^{12}\ \Omega$ ； $R_{on}=0.000\ 1\ \Omega$ 。可控开关导通时等效于一个非常小的电阻  $R_{on}$ ，断开时等效于一个非常大的电阻  $R_{off}$ ，通过参数设置使两种状态之间转换时间非常短，那么用此模型来模拟接触式开关的通断是合理的。

如图 3 所示，仿真时高压固态开关驱动电路保证高压固态开关处于关断状态，给  $V_2$  设定一个特定的脉冲波形控制可控开关 S1 的通断，模拟接触式开关的通断。仿真结果见图 4，可以看出在模拟接触式开关通断的过程中，高压固态开关阳极电压发生了比较大的波动直至最后下降为零，并且监测到在没有给触发信号的情况下回路出现峰值为 2 kA 左右的放电电流，说明此时开关已经发生误触发，这与前

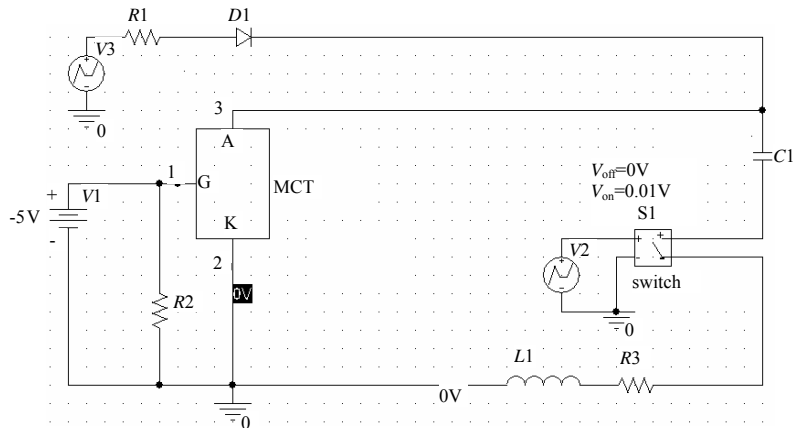


Fig.3 Circuit without snubber protection  
图 3 未加防护时的电路

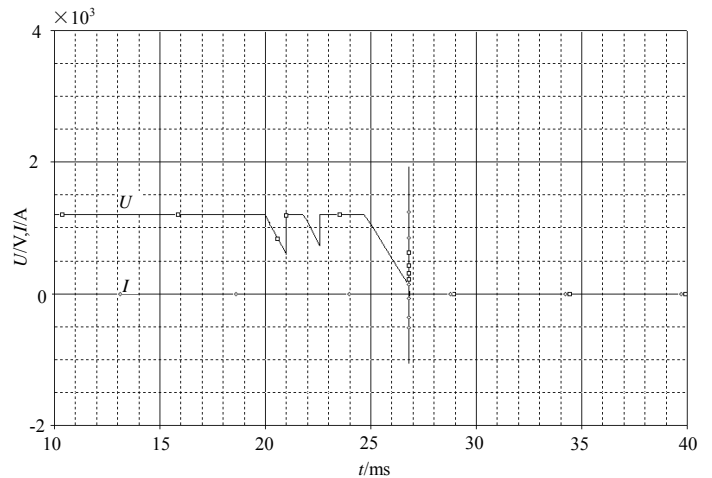


Fig.4 Anode voltage and current of the solid-state switch  
图 4 高压固态开关阳极电压  $U$  和回路放电电流  $I$

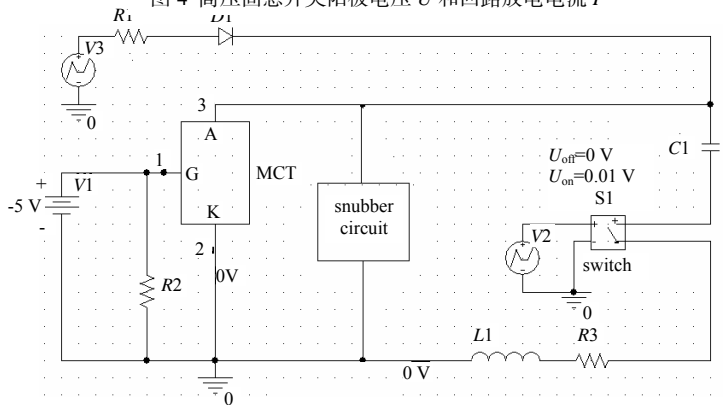


Fig.5 Circuit with snubber protection  
图 5 加了防护时的电路

面的实验结果是相符的。

为了预防这种可能的失效,减小高压固态开关阳极电压的波动,防止高压固态开关误触发或者击穿,在图 3 基础上给高压固态开关阴阳两极间增加吸收电路(或者叫缓冲电路),缓冲电路的基本原理是通过电阻电容组成吸收网络,其本质是一个低通滤波网络,能够吸收譬如瞬变电压之类的高频分量,此时仿真电路见图 5,仿真结果见图 6。

此时高压固态开关上的电压虽然有所下降,但是下降幅度很小,说明加入的缓冲电路起到了吸收高压固态开关两极间电压波动的作用,并且起到了保护高压固态开关的作用。为了验证上述分析的结论,设计了如下实验:

根据图 7 搭建实验电路,高压固态开关采用某型号 MCT 器件,其相关参数:最大反向耐压为 1 400 V,栅极额定电压为  $\pm 20$  V,最大  $dU/dt$  承受能力为  $5\,000\text{ V}/\mu\text{s}$ 。

模拟负载用接触式开关(switch)代替。试验中给高压电容分别充电至 800 V,1 000 V,1 200 V 的电压,然后通断接触式开关,检测高压固态开关栅极和阳极电压以及回路状态,记录数据及实验结果见图 8 和表 1。图 8 中记录了高压固态开关阳极电压的变化情况,由于接触式开关完全是靠手动接触的,所以不可避免会出现瞬间的抖动,造成接触式开关出现瞬间的通断。这种瞬间的通断会引起高压固态开关阳极电压出现上升与下降交替变化。通过图 8 可以发现,当接触式开关闭合时,阳极电压瞬间上升,其  $dU/dt$  能够达到一个极大的值;当接触式开关断开时,阳极电压瞬间下降,但是其  $dU/dt$  大约为  $1\text{ V}/\mu\text{s}$  的量级。

表 1 中未加保护电路时分别在 800 V,1 000 V,1 200 V 这 3 种电压状态下做了上述实验。当实验电压为 800 V 时,对 4 片高压固态开关每片分别做 3 次模拟实验,实验发现高压固态开关栅极出现震荡的耦合电压,但回路未放电,高压固态开关工作正常;当实验电压为 1 000 V 时,对 4 片高压固态开关每片分别做 3 次模拟实验,实验发现高压固态开关栅极出现震荡的耦合电压,此时回路出现放电脉冲电流,但高压固态开关还未出现损伤;当实验电压为 1 200 V 时,也对 4 片高压固态开关分别做模拟实验,每一次实验都发现高压固态开关栅极出现震荡的耦合电压,回路出现放电脉冲电流,并且高压固态开关出现击穿损伤。所以由表 1 所示的实验结果可知,当接触式开关通断时,高压固态开关上电压随之发生瞬变,高压固态开关的栅极耦合出一定幅度的电压。并且随着电压瞬变量的增加,耦合电压的幅度也会增加,对高压固态开关的损坏程度也会随之加大,轻者高压固态开关发生误动,重者对高压固态开关造成永久性的损坏。另外结合图 8 记录的数据可以得出,实验中高压固态开关的失效主要是由于接触式开关闭合时引起的电压瞬变造成的。增加缓冲电路以后进行上述实验,整个放电回路工作正常。

### 3 结论

本文通过理论分析、仿真分析与实验研究相结合的手段研究了电压瞬变对高压放电回路的影响。研究发现回路中高压固态开关阳极上电压的瞬变,会导致其误动或者击穿,这种可能存在的失效对于放电回路来说是致命的。

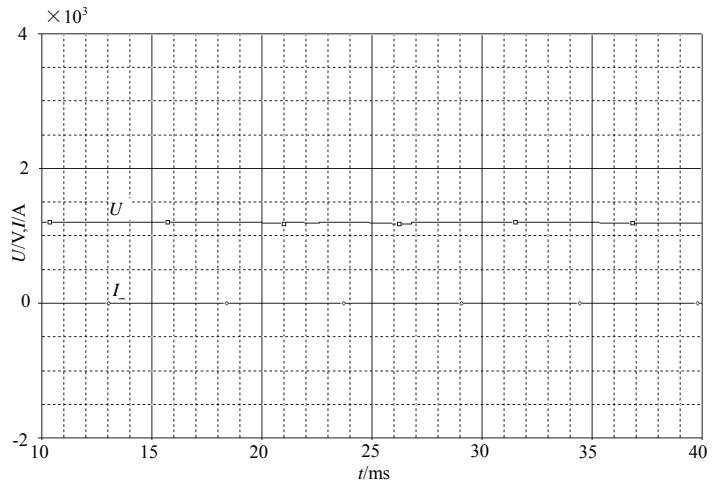


Fig.6 Anode voltage and current of the solid-state switch  
图 6 高压固态开关阳极电压  $U$  和回路放电电流  $I$

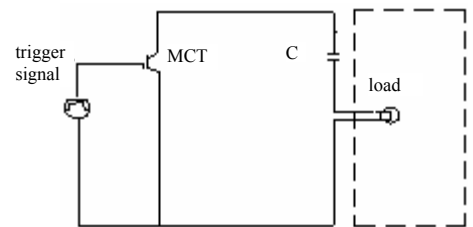


Fig.7 Discharge circuit  
图 7 放电回路

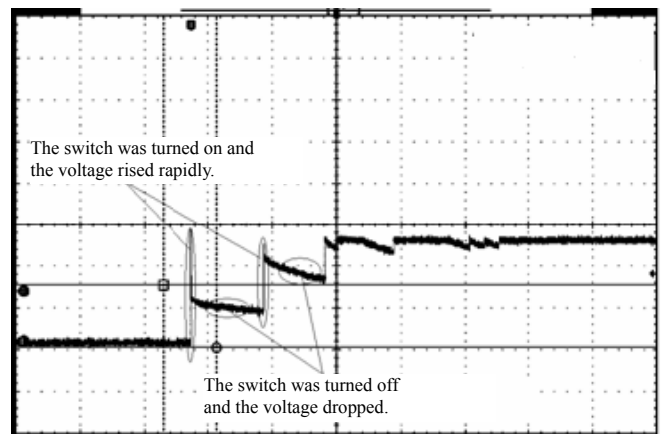


Fig.8 Anode voltage of the solid-state switch  
图 8 高压固态开关阳极电压

基于这种可能存在的失效模式,文章提出了一种可行的防护措施,即在高压固态开关两极间加入吸收电路,通过仿真和实验发现此吸收电路能够很好地吸收高压固态开关上的电压波动,对整个回路能够起到良好的保护作用。

表1 实验结果

technical state of the discharge circuit	number of the samples	experimental voltage of the anode/V	operation times (each piece)	coupling voltage of the gate	technical state of the solid-state switch during the experiment
without snubber	4	800	3	coupling voltage appeared	no discharge current
	4	1 000	3	coupling voltage appeared	there was discharge current, but the solid-state switch was not damaged
	4	1 200	1	coupling voltage appeared	there was discharge current,the solid-state switch was damaged
with snubber	2	1 200	3	coupling voltage appeared	no discharge current

#### 参考文献:

- [1] 高勇,陈治明. 新型电力电子器件与功率集成电路最新进展[J]. 半导体技术, 1997,22(6):12-15.
- [2] 陈静,陈敏德. 基于功率 MOS 型场效应管的 4kV 纳秒脉冲源[J]. 信息与电子工程, 2008,6(3):230-232.
- [3] 何湘宁. 用 Pspice 多瞬态分析法建立新型电力电子器件的模型特性[J]. 电力电子技术, 1995,29(3):62-67.
- [4] 李丹,汤亚芳,施怀瑾. 基于 OrCAD/PSpice 的 MCT 仿真研究[J]. 机械与电子, 2001,19(1):49-52.
- [5] 陆建明,王月明,杨子亮. 电气接插件瞬断测试技术[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2008,24(2):49-50,57.
- [6] 张仁豫,陈昌渔,王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [7] 韩旻. 强电流脉冲放电技术[M]. 北京:清华大学出版社, 1989.

#### 作者简介:



朱鸿志(1985-),男,湖北省宜昌市人,在读硕士研究生,从事武器电子学方面的研究.email: toy721@163.com.

杨永辉(1973-),男,江西省丰城市人,博士,副研究员,从事武器电子学方面的研究.

李华梅(1980-),女,四川省攀枝花市人,硕士,助理研究员,从事武器电子学方面的研究.