

浅谈门极可关断(GTO)晶闸管的“硬驱动”技术

西安石油学院 李宏

摘要: 文章介绍了门极可关断 GTO 晶闸管的“硬驱动”技术之优点, 分析了“硬驱动”技术作用下 GTO 晶闸管的工作特点, 剖析了“硬驱动”条件下 GTO 的关断波形, 给出了“硬驱动”门极电路的典型结构。

关键词: GTO 晶闸管 硬驱动 门极电路

Elementary Introduction of Hard Drive Technology for GTO Thyristor

Li Hong

Abstract: The advantage of hard drive technology for GTO thyristor is discussed in this paper. Not only the GTO thyristor's working particularity under the hard drive technology but also the turn off waves shape of GTO thyristor under the hard drive condition are analysed. Further the typical structure of hard drive gate circuit is also given.

Keywords: GTO thyristor hard drive gate circuit

1 引言

门极可关断 GTO 晶闸管是如今人类可以使用的容量仅次于普通晶闸管的电力半导体器件, 它应用的关键技术之一是其门极驱动电路的设计。门极驱动电路设计不好, 常常造成 GTO 晶闸管的损坏, 门极驱动电路的复杂性, 严重制约了 GTO 晶闸管的大面积应用, 其主要原因是过去使用的 GTO 晶闸管门极驱动电路的下述固有不足所决定。

1) 应用传统的门极驱动电路驱动 GTO 晶闸管时, 造成大容量 GTO 晶闸管内部数个并联的小 GTO 晶闸管开通过程中先是局部几个单元开通, 然后等离子体在整个芯片内向边沿扩展。横向扩展使阳极电流上升率限制在 $di/dt < 500 \text{ A}/\mu\text{s}$ 内。最初较高的电流上升率可能使最先导通的区域过载而导致器件损坏, 因此必须采用较大的抑制电感来限制电流上升率。

2) 为获得数值为 3~5 的合理关断增益, 对于 GTO 晶闸管响应时间来说只能施加较小的门极电流, 从而导致其存储时间过长(约 $20 \mu\text{s}$), 造成关断不同步, dv/dt 耐量低, 并需要体积庞大的吸收电容。

正是由于这些原因, 采用传统“软驱动”技术的 GTO 晶闸管应用中的最高开关频率一般限制在 300~500 Hz, 同时因门极驱动电路造成串联元件的关断时间不同而难于串联使用。为解决这

些棘手的问题, 促使了“硬驱动”门极驱动技术的发展, 并已证明双极型器件的门极“硬驱动”能够改善其关断特性, 使被“硬驱动”的器件开关速度比 MOSFET 和 IGBT 的开关速度快得多, 损耗也低得多。本文介绍有关“硬驱动”的一些问题。

2 “硬驱动”门极驱动技术简介

2.1 “硬驱动”门极驱动技术的优点

所谓 GTO 晶闸管的“硬驱动”是指在 GTO 晶闸管关断过程中的短时间内, 给其门阴极加以上升率 di_G/dt 及幅值都很大的驱动信号, 目前“硬驱动”技术已能用于大功率 GTO 晶闸管的门极驱动, 它能向 3000 A GTO 晶闸管提供足够的门极关断电流, 在 $di/dt > 3000 \text{ A}/\mu\text{s}$ 的条件下其关断驱动电流 $I_{\text{rq}} > 3000 \text{ A}$, 可将被驱动 GTO 晶闸管的存储时间降至 $< 2 \mu\text{s} \pm 100 \text{ ns}$, 几乎做到了同步开关, 从而获得方形安全工作区和器件的无吸收工作, 使 GTO 晶闸管的工作状况几乎可与 IGBT 相媲美。“硬驱动”技术的优点表现在以下几方面。

1) 可使被驱动器件的存储时间下降至 $1 \mu\text{s}$ 左右或基本得以消除。驱动多个并联或串联的器件时, 可使各器件存储时间的差异 $< 1 \mu\text{s}$, 使 GTO 晶闸管的各个参数例如最大关断电流将像希望的一样与器件面积成正比, 因此无需大的吸收电容或复杂的 di/dt 抑制电路及调时电路和 dv/dt 抑制用吸收电容。

2) 可使 GTO 晶闸管器件的关断能力大大超过其额定值, 系统设计者可根据应用要求在开通频率和功率控制能力之间加以选择, 以达到一种合适的组合。

3) 不受 GTO 晶闸管的等级和型号的限制, 这极大地方便了设备的制作和维护, 因为串联电路上的器件无需具备一致的存储时间。可使许多 GTO 晶闸管开关的应用问题得以解决, 同时降低了损耗, 改善了性能。

2.2 “硬驱动”门极技术作用下 GTO 晶闸管的工作过程分析

2.2.1 关断过程

采用 di_G/dt 高达 $3000 \text{ A}/\mu\text{s}$ 的门极脉冲, GTO 晶闸管的存储时间可从 $20 \mu\text{s}$ 下降至约 $1 \mu\text{s}$ (见图 1 所示)。应当控制强关断脉冲的幅值, 以避免在门阴结中产生雪崩击穿。由于主阻断结空间电荷区扩展形成的位移电流将叠加到阳极电流中, 所以门极峰值电流有可能超过阳极电流, 但关断增益仍接近于 1。门极电流脉宽仅需 $2 \mu\text{s}$, 其能量与普通门极驱动电路相当。

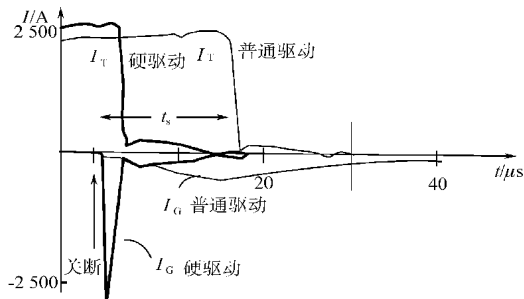


图 1 用硬驱动(粗线)和普通驱动(细线)情况下 GTO 晶闸管关断波形的比较

2.2.2 开通过程

采用更强的门极驱动脉冲能加快开通过程, 开通过程的延迟可从几 μs 下降至几百 ns , 电路所允许的 di/dt 不再受 GTO 晶闸管器件本身的限制, 而受限于变流器支路中反并联续流二极管的关断速度, 即开通过程中变流器支路的电流将由续流二极管换向到 GTO 晶闸管。这样能降低限流电抗器电路的 di/dt , 从而使损耗和费用下降。强门极脉冲将使阴极的电子注入非常均匀, 在阳极电流增大之前降低 GTO 晶闸管器件的通态压降, 从而减小器件的开通损耗。

2.2.3 “硬驱动”GTO 晶闸管与普通门极驱动 GTO 晶闸管性能的比较

表 1 列出了标准的 $3000\text{A}/4500\text{V}$ GTO 晶

闸管采用“硬驱动”与常规“软驱动”的性能测试结果。由表 1 可见, 开通损耗下降了 69.7%, 与均匀开通的结果一样, 而 dv/dt 提高了 3 倍, 最大可关断电流提高了 1.67 倍, 开通延迟时间缩短了 91.7%, 开通 di/dt 增强了 6 倍, 吸收电容减小了 83%, 存储时间缩短了 95%。

表 1 标准 GTO 晶闸管常规“软驱动”与“硬驱动”的性能比较

参数	普通门极单元	硬驱动门极单元
开通 di/dt ($\text{A}/\mu\text{s}$)	500	3 000
开通损耗 E_{on} (J)	3.3	1
开通延迟 t_d (μs)	3.6	0.3
最大关断电流 I_{TGM} (A)	3 000	5 000
开关 dv/dt ($\text{V}/\mu\text{s}$)	500	1 500
关断吸收电容 C (μF)	6	1
存储时间 t_s (μs)	20	1

2.3 “硬驱动”条件下 GTO 晶闸管的关断波形分析

图 2 是普通 $3000\text{A}/4500\text{V}$ 采用常规门极驱动条件下额定吸收电容为 $6 \mu\text{F}$ 的 GTO (ABB 公司的型号为 5SGA 30L4502) 晶闸管采用“硬驱动”使关断过程改善后的特性。这时器件很容易关断两倍于额定值的关断电流。

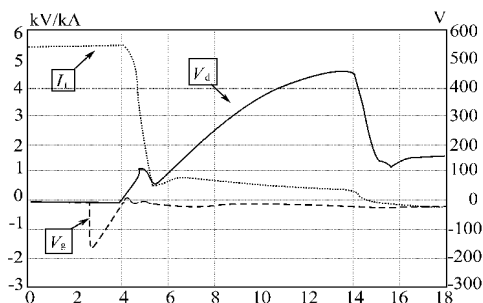


图 2 在 $T_j = 125$ 吸收电容 $C_s = 6 \mu\text{F}$ 时带“硬驱动”的 $3000 \text{ A}/4500 \text{ V}$ GTO 晶闸管关断 5500 A 电流的波形

3 “硬驱动”门极电路的典型结构及分析

3.1 “硬驱动”门极单元的一般结构

图 3 是“硬驱动”门极单元的原理图, 要达到高的 di/dt 需要限制电压, 同时必须降低门极和阴极回路中的杂散电感 (图 3 中的 L_1 和 L_2), 采用最优设计的门极单元和它与 GTO 晶闸管的连接接口, 有可能使杂散电感降到 5 nH 以下。

3.2 “硬驱动”门极单元的典型电路

“硬驱动”门极单元的典型电路如图 4 所示, 它可分成两部分: 上部分电路控制开通过程, 下部分电路控制关断过程, 且两部分独立工作。本电路

设计时应使其电感最小值化, L_G 为杂散电感。

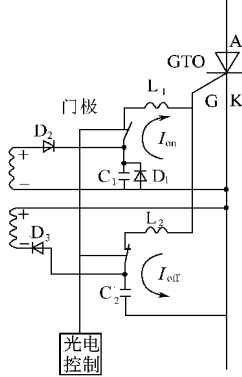


图3 “硬驱动”GTO 晶闸管的门极单元简图

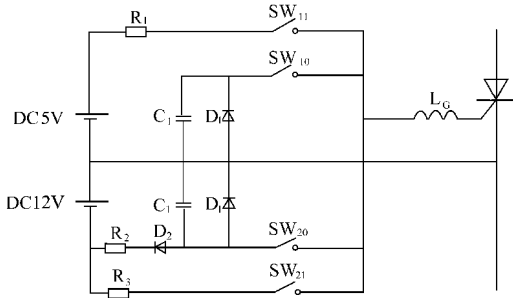


图4 新型“硬驱动”门极单元简图

其工作过程可分析如下。

3.2.1 开通期间的门极电路

在开通期间, 电容通过开关 SW_{10} 放电, 在约 250ns 内产生 1000A 的“硬驱动”门极电流。门极电流通过续流二极管维持在高水平, 然后通过 SW_{11} 由 5V 电源维持。

在较大门极电流脉冲作用下, GTO 晶闸管等效原理电路中 $n\text{-p-n}$ 晶体管(阴极/p 基区/衬底)开通, n 发射区注入电子, 并输送到 n 基区, 同时 n 产生相应空穴注入。空间电荷区开始崩缩, 阳极电压在 100ns 内下降到 $V_A = 200\text{V}$ 。此时, 主电流仍很小, 这就意味着晶体管作用强于晶闸管作用。图 5 给出了 $I_{gm} = 1000\text{A}$ 与 $I_{gm} = 500\text{A}$ 的 GTO 晶闸管采用 500A 门极电流进行“硬驱动”与“软驱动”技术的比较, 由图 5 可见采用“硬驱动”时, 在延

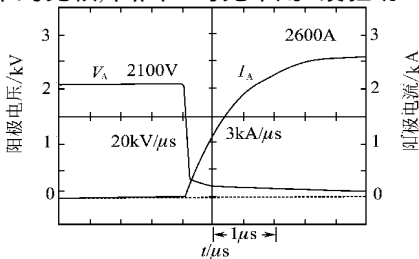


图5 $I_{gm\max} = 1000\text{A}$ 时(硬驱动)和 $I_{gm\max} = 500\text{A}$ 时(软驱动)的开通瞬态实验结果

迟时间内阳极电压以 $20\sim 25\text{kV}/\mu\text{s}$ 的斜率快速下降到 200V , 几乎是一个完美的开通瞬态过程。

3.2.2 关断期间的门极电路

图 4 所示电路的下部分控制关断过程。电容 C_2 通过开关 SW_{20} 吸收数 kA 的大电流脉冲, 大电流脉冲的上升时间约为 $1.5\mu\text{s}$ 。另外, 开关 SW_{21} 用来维持器件的阻断状态。

图 6 示出在 5500A 门极峰值电流下 $I_A = I_{TGM} = 2500\text{A}$ 的 GTO 晶闸管之关断波形。存储时间为 $1.5\mu\text{s}$, 下降时间为 $1\mu\text{s}$, 阳极峰值电压为 1170V (寄生吸收电感所致)。由于门极电路电感低(总计为 $L_G = 36\text{nH}$)以及 GTO 晶闸管门-阴结的雪崩效应, 门极电流很快下降到 1000A 。由于采取了特殊措施以保证拖尾期间门极电压总为负值(通过图 4 中的 D_3 , R_2 和 -15V 电源来实现), 因此即使是在高结温、长大拖尾电流工况下, 也能保证较低的门极阻抗和足够的负偏压。

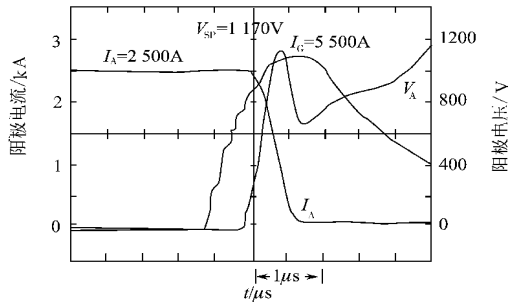


图6 关断瞬间的实验结果: 阳极电流、门极电流($\times 2$)及阳极电压与时间的关系

4 结论

GTO 晶闸管的门极“硬驱动”技术, 可以解决 GTO 晶闸管使用中的主要难题之一, 为 GTO 晶闸管的大量使用提供保证, ABB 公司应用该技术已生产出容量在 100MW 以上的电力电子设备, 毫无疑问其应用前景十分广阔。

参考文献

- 1 张立 现代电力电子技术 北京: 北京科学出版社, 1992
- 2 李宏 晶闸管触发器集成电路实用技术大全 西安: 中国电工技术学会电力电子学会、中国电源学会特种电源专业委员会, 1999
- 3 李宏 电力电子设备常用电力半导体器件和模块使用技术 中国电工技术学会电力电子学会、中国电源学会特种电源专业委员会, 1999
- 4 西安电力电子研究所编 最新功率器件专辑 西安: 西安电力电子研究所, 1999

收稿日期: 2001-05-17