

# 大功率 IGBT 模块并联均流问题研究

孙 强, 王雪茹, 曹跃龙

(西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要:介绍了 IGBT 扩容的并联方法,分析了导致 IGBT 模块并联运行时不均流的各种因素,提出了相应的解决措施,并进行了仿真分析和实验验证。

关键词:绝缘栅双极晶体管; 并联/静态均流; 动态均流

中图分类号:TN86 文献标志码:A 文章编号:1000-100X(2004)01-0004-03

## Study of the Current Balance of IGBTs in Paralleling

SUN Qiang, WANG Xue-ru, CAO Yue-long

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To extend the rating range of current of IGBT, the parallel methods are presented in this paper. The factors led to current unbalances of each IGBT in parallel are analyzed and corresponding solutions are proposed. The effects are verified by simulation and experiments.

Key words: IGBT; parallel; on-state current balance; dynamic current balance

## 1 引言

由于 IGBT 综合了 GTR 和 MOSFET 既具有大电流、低饱和压降,又具有高输入阻抗、驱动简单和开关频率高等优点,特别适合于中高频、中大功率应用。当单个主开关器件的容量不能满足功率要求时,通常用两种方法来提高功率等级:直接选用更大功率等级的器件;采用功率等级较小、市场货源充足、驱动功率低且线路简单的 IGBT 模块,通过串、并联来满足耐压、耐流等级的要求。由于单纯采用大功率等级 IGBT 模块将大大提高产品成本和驱动电路的复杂性,因此采用多管并联提高电流定额以满足工业要求。但由于并联的 IGBT 自身参数的不一致及电路布局不对称,势必引起器件电流分配不均衡,严重时会使器件失效甚至损坏主电路。为此,须采取相应的措施来解决并联器件的均流问题。

## 2 影响并联均流主要因素及改善措施

IGBT 并联应用时的电流分配不均衡主要有两种:静态电流不均衡和动态电流不均衡。静态电流不均衡主要由器件的饱和压降  $V_{CE(sat)}$  不一致所引起;而动态电流不均衡则是由于器件的开关时间不同步引起的。下面将详细讨论影响静、动态电流分配不均衡的主要因素,并给出相应的解决措施。

基金项目:国家“十五”重大专题(2001BA311A06-3)

定稿日期:2003-10-10

作者简介:孙强(1955-),男,安徽凤阳人,教授,研究方向为大功率特种电源。

## 2.1 并联运行静态均流

### (1) 饱和压降对静态均流的影响

稳态时,主要是单个模块的输出特性影响电流的分配。两个输出特性不一致的器件  $V_{Q1}, V_{Q2}$  并联运行时的电流分配(简称分流)情况如图 1 所示。

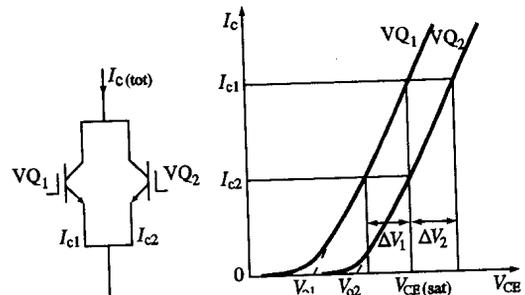


图 1 并联 IGBT 模块输出特性比较

图中  $V_{01}, V_{02}$  ——  $V_{Q1}, V_{Q2}$  的集电极电流为零时对应的集电极电压

$V_1, V_2$  —— 电流为  $I_{C2}, I_{C1}$  时对应的两管通态电压变化量

$V_{Q1}, V_{Q2}$  的输出特性可近似描述为<sup>[1]</sup>:

$$V_{CE(sat)1} = V_{01} + r_1 I_{C1} \quad (1)$$

$$V_{CE(sat)2} = V_{02} + r_2 I_{C2} \quad (2)$$

式中  $r_1 = \frac{V_1}{I_{C1} - I_{C2}}, r_2 = \frac{V_2}{I_{C1} - I_{C2}}$

$V_{Q1}, V_{Q2}$  并联,有:

$$V_{CE(sat)1} = V_{CE(sat)2}$$

$$I_{Ctot} = I_{C1} + I_{C2}$$

因此: 
$$I_{C1} = \frac{V_{02} - V_{01} + r_2 I_{Ctot}}{r_1 + r_2} \quad (3)$$

$$I_{C2} = \frac{V_{01} - V_{02} + r_1 I_{Ctot}}{r_1 + r_2} \quad (4)$$

定义电流不平衡率:

$$= \frac{I_{C1} - I_{C2}}{I_{Ctot}} = \frac{2(V_{o2} - V_{o1})}{(r_1 + r_2) I_{Ctot}} + \frac{r_2 - r_1}{r_1 + r_2} \quad (5)$$

当  $V_{o1} \cong V_{o2}$  时,随着总电流  $I_{Ctot}$  的增加,有:

$$\cong \frac{r_2 - r_1}{r_1 + r_2} \quad (6)$$

当  $V_{o1} \cong V_{o2}$  时,器件的通态电阻 ( $V_{CE}/I_C$ ) 是影响电流分配不均衡的主要因素。因此,为确保理想的静态均流,要求并联器件的  $V_{CE(sat)}$  完全匹配。

(2) 静态降额率

由于饱和压降  $V_{CE(sat)}$  对并联器件均流的影响,当两个饱和压降不一致的器件并联时,必须降额使用。电流的静态降额率  $s_s$  可由以下公式计算<sup>[2]</sup>:

$$s_s = 1 - \frac{I_T}{n_p I_M} \quad (7)$$

式中  $s_s$  ——静态降额率

$I_T$  ——并联模块能提供的总额定电流

$I_M$  ——单个模块的最大额定电流

$n_p$  ——并联模块的数目

由式(7)得:  $I_T = (1 - s_s) n_p I_M$  (8)

电流的静态降额率与饱和导通压降  $V_{CE(sat)}$ 、结温、电路设计等因素有关。根据生产厂家给出的不同电压等级器件的静态降额率,可以推算出并联器件的总电流,以此作为选择 IGBT 模块的依据。

2.2 并联运行动态均流

匹配的饱和压降  $V_{CE(sat)}$  有利于器件并联时的静态均流,也有利于其关断时刻的电流平衡。但是,影响开关时刻电流均衡的主要因素是并联器件的转移特性。此外,栅极驱动、电路的布局以及并联模块的温度等因素也会影响开关时刻的动态均流。

(1) 转移特性对动态均流的影响

图 2 所示的是两个转移特性不一致的并联模块特性比较示意图。由图 2 可知:当给每个并联模块施加相同的  $V_{GE}$  时,其中转移特性陡峭的 IGBT 模块将承担大部分由流,开关损耗较大

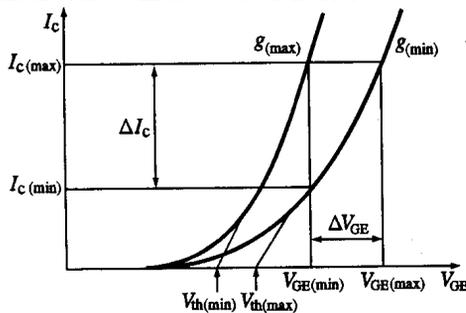


图 2 并联模块转移特性比较示意图

(2) 动态降额率

由于开关时刻的动态电流不均衡,当器件工作

在高频情况下,需要考虑动态降额。动态降额率  $d_d$  可由下式定义<sup>[2]</sup>:

$$d_d = 1 - [(n_p - 1)(1 - \alpha) + 1] / n_p \quad (9)$$

式中  $\alpha$  ——动态不匹配度,  $\alpha = I_{C(PK)} / I_{C(PKmax)}$ ,  $I_{C(PK)}$  =  $I_{C(PKmax)} - I_{C(PKmin)}$

$I_{C(PKmax)}$  ——单模块独立运行时最大允许峰值电流

$I_{C(PKmin)}$  ——并联运行时单个模块的最小峰值电流

一般说来,静态降额率高于动态降额率,实际并联应用中须根据具体情况合理地降额使用。

(3) 其他影响动态均流的因素

回路寄生电感特别是射极引线电感的不同将会使器件开关时刻不同步;驱动电路输出阻抗的不一致将引起充放电时间不同;驱动电路的回路引线电感可能引起寄生振荡;以及温度不平衡会影响到并联器件动态均流。

2.3 改善并联电流分配不均衡的措施

欲获得理想的均流要求做到: 尽量选取特性一致的器件进行并联; 使用独立的栅极电阻消除寄生振荡; 选用同样的驱动电路,尽可能降低驱动电路的输出阻抗和回路寄生电感; 设计和安装时尽可能使电路布局对称和引线最短,以减小寄生参数的影响。将并联模块放置在同一块散热装置上,使模块工作温度差在 10℃ 以内。另外,当负载为感性时,随着频率的增加,电流不均衡程度会减小;而当输出电流一定时,较小的占空比有利于电流均衡<sup>[3]</sup>。当并联的器件特性不易选配一致时,可主要通过调节栅极电阻值来改变器件的栅极充放电时间,从而改善电流的不均衡。

3 对并联均流的仿真分析

文中主要采用栅极电阻补偿方法来改善电流分配的不均衡,并利用电路仿真软件 PSPICE 对半桥 IGBT 模块的并联不均流问题进行分析。仿真线路考虑了缓冲电路及各种寄生参数的影响;在电路布局完全对称条件下的并联仿真线路如图 3 所示。

图 3 中  $V_{I1}$ ,  $V_{I2}$  (虚线框内) 均采用三菱公司生产的半桥 IGBT 模块 CM300DY - 28H 的 PSPICE 模型,以提高器件的耐压等级。半桥耐压为 2800 V,集电极额定电流 300 A,电路负载为感性。采用图 3 所示的仿真线路,详细讨论器件特性对并联电流分配不均的影响及相应的改善措施。

(1) 用两个饱和导通压降不一致的器件并联作为主开关器件

将  $V_{I1}$ ,  $V_{I2}$  的饱和压降分别改变为 3.1 V, 2.5 V。对低饱和压降的管子采用栅极电阻补偿前

后,两管的分流情况如图 4 所示。

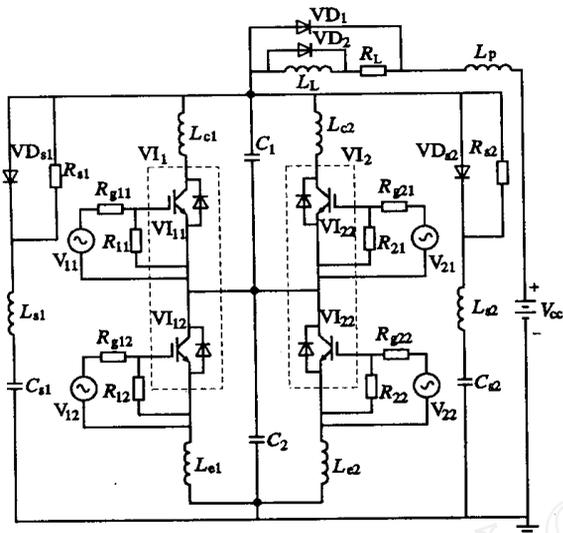


图 3 理想情况的仿真线路图

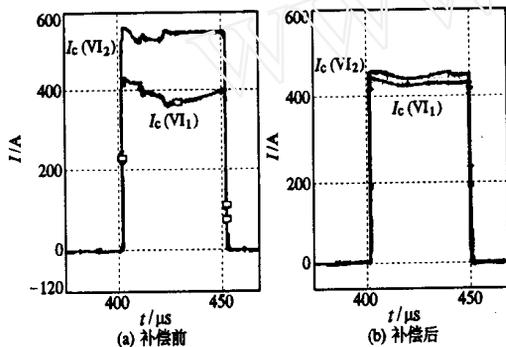


图 4  $V_{CE(sat)}$  不一致时两管的分流波形

(2) 用两个转移特性不一致的器件并联作为主开关器件

将  $V_{I1}$ ,  $V_{I2}$  的开启电压  $V_{th}$  分别改变为 7.0560 V, 6.5560 V。对低阈值电压的管子进行栅极电阻补偿前后,两管的分流情况如图 5 所示。

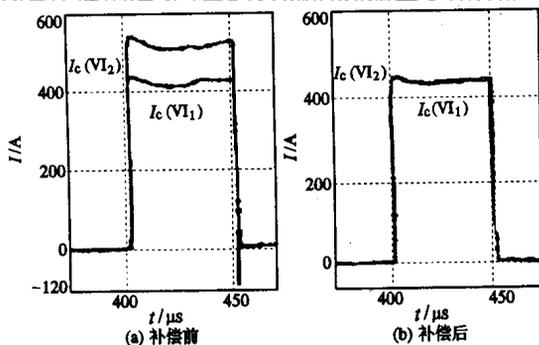


图 5  $V_{th}$  不一致时两管的分流波形

针对饱和压降不一致对静态均流的影响和转移特性不一致对动态均流的影响分别进行了分析,并提出采用栅极电阻补偿以改善动、静态不均流的方法。比较图 4 和图 5 发现:补偿前,两管严重不均流,补偿后,两管的不均流情况得到明显改善。

## 4 实验结果

将上述分析及调节方法应用于 250 kVA 的微弧氧化脉冲电源中,其中,负载电感为  $40 \mu\text{H}$ ,开关器件为西门康 SKM400GB176D,并联四路 IGBT 模块。图 3 所示的仿真电路即为此实际电源主电路的模型。由于特定工艺的需要和现场供电的限制,实际的实验条件为:智能全控整流模块的输出电压  $V_{cc} = 500 \text{ V}$ ;输出波形占空比为 10%;频率为 600 Hz。采用栅极电阻补偿后的实验波形如图 6 所示。

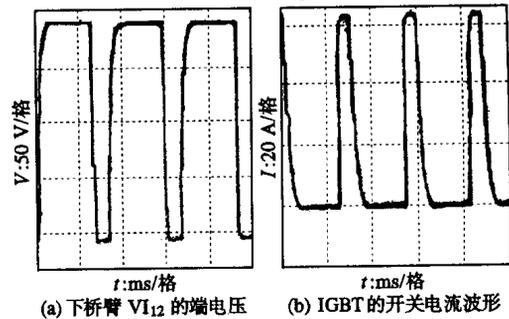


图 6 实测波形

图 6 示出的实测波形为采用栅极电阻补偿后的半桥模块下桥臂 IGBT 两端电压波形和流经 IGBT 的电流波形,其它各支路电流波形与其一致。该电源作为新开发的系列产品已正式投入生产并连续可靠运行了一年多时间。可见采用栅极电阻补偿的方法,可使并联的各 IGBT 模块获得良好的均流效果。

## 5 结束语

当并联器件的参数不易选配一致时,可通过调节栅极电阻,使并联两管开通和关断趋于同步,从而有效地改善动、静态分流不均的情况。仿真分析和实验结果验证了这种方法的有效性。

影响并联均流的因素有很多,在设计并联电路时,应尽可能选用参数匹配的器件,对称的并联电路布局,并使各种寄生电感最小化,以有利于器件并联运行时达到理想的均流效果。实际应用中,由于受到各种客观因素限制,往往需要折衷考虑各种影响因素;当工作频率较低频时,主要考虑改善静态不均流;当工作频率较高时,主要考虑改善动态不均流。

## 参考文献

- [1] He J, Jacobs M E. Non-Dissipative Dynamic Current-Sharing Snubber for Parallel Boost Connected IGBTs in High Power Converters. IEEE APEC Conf. '99, 1999, 2: 1105 ~ 1111.
- [2] Dynex Semiconductor. AN5505. Parallel Operation of Dynex IGBT Modules[Z], 2001.
- [3] International Rectifier Application Notes. AN990. Application Characterization of IGBTs[Z], 2002.