DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.4.1 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

IGBT模块特征参数识别精确性对并联动态均流影响的评估分析

金声超，吴文宝，黄晓宏，罗 玮
(中国电建集团江西省电力建设有限公司智信能源科技有限公司，南昌 330001)

摘要：IGBT模块特征参数差异是导致控制回路参数差异的重要因素，对IGBT并联应用动态均流特性影响至深。在无法更改器件参数的情况下，采用一些驱动补偿控制可以弥补器件差异对动态均流的影响，精确识别IGBT模块特征参数是此类方法的关键。主要研究采用同步脉冲异步驱动方案时，以门电阻为代表的参数识别精度差异对动态均流特性的影响。对IGBT器件本体特征参数的关联特性进行了研究，构建各参数与影响变量的特征模型。建立PSpice器件并联工作模型，结合器件手册数据比对与多工况测试参数校正，拟合出IGBT器件参数与影响因子变化曲线。通过2组模块1 200 V/200 A和1 700 V/300 A IGBT并联开、关特性实验，验证了关于IGBT特征参数差异对并联均流影响的判定。最后总结了特征参数识别精确性差异对动态均流特性的影响。

关键词：IGBT并联均流；异步驱动；参数识别；误差分析

Evaluation and Analysis of Influence of IGBT Characteristic Parameter Identification Accuracy on Parallel Dynamic Current-sharing

JIN Shengchao, WU Wenbao, HUANG Xiaohong, LUO Wei
(Zhixin Energy Technology Co., Ltd., Power China Jiangxi Electric Power Construction Co., Ltd., Nanchang 330001, China)

Abstract: The difference in characteristic parameters of an IGBT module is an important factor leading to the difference in control circuit parameters, which has a significant impact on the dynamic current-sharing characteristics of IGBT parallel applications. When the device parameters cannot be changed, some drive compensation control can make up for the influence of device differences on dynamic current-sharing, and the key to this method is accurately identifying the characteristic parameters of the IGBT module. The influence of parameter (e.g., gate resistance) identification accuracy differences on the dynamic current-sharing characteristics is studied when a synchronous pulse-asynchronous drive method is used. The correlation characteristics of characteristic parameters of IGBT devices are studied, and the characteristic models of each parameter and influencing variables are constructed. The working model of PSpice device parallel switch is established, and the variation curve of IGBT device parameters and influence factors is fitted by combining with the device manual data comparison and multi-working condition test parameter correction. Through the parallel switching characteristic experiments on two groups of modules 1 200 V/200 A and 1 700 V/300 A IGBT, the judgment on the influence of the difference in IGBT characteristic parameters on parallel current-sharing was verified. Finally, the influence of the difference in characteristic parameter identification accuracy on dynamic current-sharing characteristics was summarized.

Keywords: IGBT parallel current-sharing; asynchronous drive; parameter identification; error analysis

收稿日期：2023-07-11；**修回日期**：2023-09-20，2023-11-09；
录用日期：2023-12-06；**网络首发日期**：2024-04-26
基金项目：IGBT功能测试技术研究及装置开发项目(JEPCC-KYXM-2022-034)
This work is supported by IGBT Function Test Technology Research and Device Development under the grant JEPCC-KYXM-2022-034

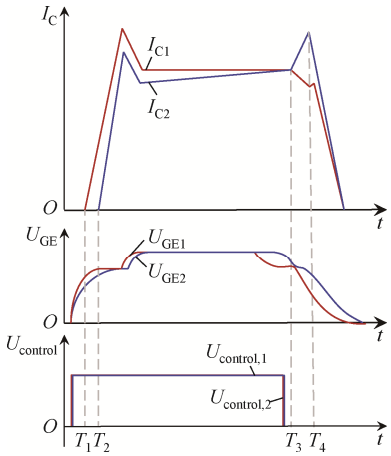
在一般的绝缘栅双极型晶体管 IGBT(insulated gate bipolar transistor)并联应用中，通过优化控制回路和功率回路设计，可以尽量降低参数差异的影响[1-3]。

对于功率回路各支路的阻抗差异和寄生参数差异，通过功率支路的对称设计[2]、阻抗匹配设计及无感连接技术[4]等可将影响降到较低。功率回路等效电路阻抗取决于路径物理形式、材料和电流方向，由于栅极-发射极阻抗 Z_{GE} 和集电极-发射极阻抗 Z_{CE} 的值均会随着相互耦合效应而增加或减小，不同的反馈效应会产生不同的门极电压 U_{GE} 电压降，这些 U_{GE} 信号导致开通和关断延迟时间不一致，从而加剧电流不平衡。因此必须正确设计布局的物理几何形状和尺寸，同时观察不同布局对阻抗的影响从而进行优化设计[5-7]。由于并联各支路功率器件特征参数的固有差异和驱动信号支路设计的客观约束，动态均流特性存在必然的差异，利用完全同步的驱动电压控制并联 IGBT 的开、断，无法实现更优的动态均流特性[8-13]。通过门极信号异步驱动技术[11]，分析动态过程中的电压电流关系，调节驱动信号的延迟以实现并联模块整体集电极电流分布趋于一致，可以进一步改善系统的动态均流特性，将上述影响尽可能降低甚至抵消。

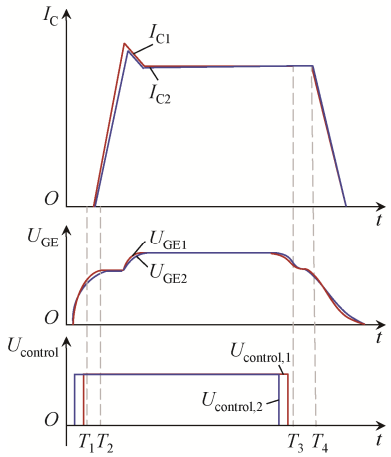
同步脉冲异步驱动方法基于 IGBT 开关特性模型，利用器件本体的特征参数差异，实现对开、关过程时间的相对超前或滞后控制，提高并联 IGBT 的动态均流特性。其中最关键的环节是对相同工况下器件特征参数差异的检定识别。本文提出了 1 种测试数据参数检定识别的方法，实现对影响 IGBT 开、关过程的特征参数进行函数关系拟合，以期实现更准确的 IGBT 特征参数的采集利用，并进一步分析特征参数检定过程中相对差异的影响。首先对 IGBT 开关过程进行分析，考虑检定过程的相对差异；随后构建了特征参数的数学表达式和物理模型，通过仿真和实验，验证了特征参数采集提取的有效性和准确性；最后通过参数提取和校验，获取 IGBT 模块特征参数，验证了特征参数识别精确性差异对动态均流特性的影响。

1 门极回路参数对并联 IGBT 同步脉冲异步驱动均流控制的影响

同步脉冲异步驱动方法的驱动原理如图 1 所示，假设 2 个并联模块功率回路参数完全一致，在完全同步的控制信号 $U_{control,1}$ 和 $U_{control,2}$ 作用下，由于驱动回路特征参数存在差异，使得模块 1 和模块 2 的门极电压 U_{GEx}(x=1, 2)和集电极电流 I_{Cx} 在动态过程的变化趋势不同，主要表现为集电极电流在开通关断时刻不同步及上升和下降率不同导致的动态不均流。如图 1(b)所示，同步脉冲异步驱动方法通过在 IGBT 模块 1 驱动电路中引入经过计算的延迟时间，调节 $U_{control,1}$ 的作用时刻，来改善 2 个模块在开通、关断时刻的同步性，从而改善动态均流特性，该方法实现较为简单，成本低，具有一定经济性。



(a) 普通同步脉冲驱动



(b) 同步脉冲异步驱动

图 1 同步脉冲异步驱动方法驱动原理[10]

Fig. 1 Principle of synchronous pulse-asynchronous drive method[10]

2 个 IGBT 模块并联采用同步脉冲异步驱动

实现均流控制的等效电路如图 2 所示。门极回路特征参数会对 IGBT 开关动态过程产生明显影响，这个阶段的电流特征是并联动态均流特性的直观反映。IGBT 开关工作特性的影响分析如下。

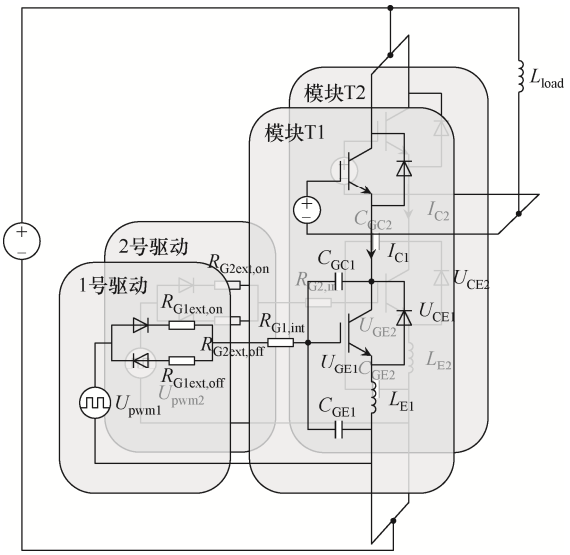


图 2　2 个 IGBT 模块并联等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of two IGBT modules in parallel

(1)开通延迟阶段：驱动电路施加正向电压 $U_{Gx,on}$，通过门极开通电阻 $R_{Gx,on}$ 给输入电容 C_{iesx} 充电，C_{iesx} 两端电压逐渐上升，IGBT 门极电压 U_{GEx} 上升至导通阈值电压 $U_{GE(th)x}$。列写电路方程可得

$$\begin{cases} U_{Gx,on}=R_{Gx,on}\cdot C_{iesx}\dfrac{\mathrm{d}u_{GEx}}{\mathrm{d}t}+u_{GEx} \\ U_{GEx}(0)=U_{Gx,off} \\ I_{Cx}=0 \end{cases} \tag{1}$$

式中：$U_{Gx,on}$ 和 $U_{Gx,off}$ 分别为开通和关断驱动电压；u_{GEx} 为门极电压测量值。门极开通电阻 $R_{Gx,on}$ 为实际外接门极电阻与器件手册中 IGBT 模块内置电阻之和。通过求解 RC 全响应方程得到 U_{GE} 的开通延迟阶段表达式，并将 U_{GEx}=$U_{GE(th)x}$ 代入，即得到开通延迟时间 $t_{d(on)x}$[10]的表达式为

$$t_{d(on)x}=-C_{iesx}R_{Gx,on}\cdot\ln\frac{U_{Gx,on}-U_{GE(th)x}}{U_{Gx,on}-U_{Gx,off}} \tag{2}$$

(2)集电极电流上升阶段：集电极电流从 0 上升至支路额定负载电流 I_L 的时间为 $t_{d(cr)x}$[10]，其表达式为

$$t_{d(cr)x}=\frac{\dfrac{1}{n}I_L L_{Ex}+R_{Gx,on}C_{iesx}(U_{GE(pl)x}-U_{GE(th)x})}{U_{Gx,on}-(U_{GE(pl)x}+U_{GE(th)x})/2} \tag{3}$$

式中：L_{Ex} 为辅助发射极电感；$U_{GE(pl)x}$ 为米勒平台电压；n 为 IGBT 器件数量。

(3)关断延迟阶段：门极电压从 $U_{Gx,on}$ 开始下降直至 $U_{GE(pl)x}$ 的时间为 $t_{d(off)x}$[10]，其表达式为

$$t_{d(off)x}=-C_{iesx}R_{Gx,off}\cdot\ln\frac{U_{GE(pl)x}-U_{Gx,off}}{U_{Gx,on}-U_{Gx,off}} \tag{4}$$

(4)集电极电压上升阶段：集电极电压上升阶段可分为缓慢上升及迅速上升 2 个阶段。在缓慢上升阶段，可将米勒电容 C_{GCx} 等效为恒定的较大容值电容 C_{GC1}；在迅速上升阶段，可将米勒电容 C_{GCx} 等效为恒定的小容值电容 C_{GC2}[14]，得到集电极电压由通态饱和压降 $U_{CE(sat)}$增加至母线电压 $U_{CE(dc)}$ 时，经历的时间 $t_{d(vr)x}$[10]的表达式为

$$t_{d(vr)x}\approx\frac{R_{Gx,off}[C_{GC1}(U_1-U_{CE(sat)})+C_{GC2}(U_{CE(dc)}-U_1)]}{U_{GE(pl)x}-U_{Gx,off}} \tag{5}$$

式中，U_1 为转折点的电压。

通过对开通和关断过程的分析可知，涉及 IGBT 模块动态特性的特征参数会影响并联各支路 IGBT 开关过程中的电流动态特性。其中，导通阈值电压 $U_{GE(th)}$、饱和压降 $U_{CE(sat)}$、开通延迟时间 $t_{d(on)}$、关断延迟时间 $t_{d(off)}$可以从芯片手册中查询基本数据，而模块内部门极电阻、输入电容等无法从芯片手册中获取，需要通过实验测试数据进行检定识别，且参数数据的精准性影响异步驱动方法的均流效果。驱动回路特征参数的差异由器件本体参数差异和检定识别误差构成。其中，器件本体参数差异可通过相同型号批次的器件筛选来弥补，本文着重关注特征参数检测识别误差对均流控制的影响。

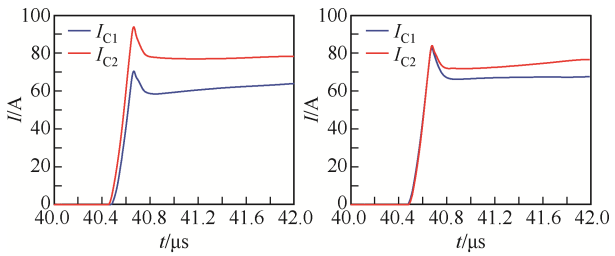
通过参数检定识别和计算可以得到异步驱动补偿时间，但在参数识别检定过程中存在一定的识

别精度误差，对动态过程均流具有一定的影响。定义相对差异 α 为 $\alpha=(X_{T2}-X_{T1})/X_{T1}$，其中 X_{T1} 和 X_{T2} 分别为模块 T1 和模块 T2 的某一特征参数的实际参数值；定义参数识别误差 β 为 $\beta=(X_{T2*}-X_{T2})/X_{T2}$，其中 X_{T2*} 为参数识别检定得到的参数值；定义总体参数差异 γ 为 $\gamma=(X_{T2*}-X_{T1})/X_{T1}$，可以体现同步脉冲异步驱动方法对模块驱动脉冲的补偿。

在 PSpice 仿真软件中搭建图 2 所示的 2 个模块并联等效电路模型，模拟开通过程存在识别精确误差的情况。仿真工况设定母线电压为 500 V、负载电流为 100 A，图 3(a)为补偿前存在参数相对差异为 5.00%的 2 个支路集电极电流的分布情况，此时电流不均衡度表示为

$$\delta=\frac{I_{C\max}-I_{C\min}}{I_{C\max}+I_{C\min}} \tag{6}$$

式中：I_{Cmax} 为各支路集电极电流中达到的最大值；I_{Cmin} 为集电极电流到达最大值时刻的另一支路的电流。此时的电流不均衡度为 14.25%。图 3(b)为参数相对差异为 5.00%，不存在参数识别误差时，补偿后的电流分布情况，此时电流不均衡度为 0.73%。可以看出异步驱动方法对动态过程电流的改善作用。图 3(c)为保持总体参数差异不变，相对差异仍为 5.00%的前提下，当识别误差 β=5.00%时的电流分布情况，此时电流不均衡度为 13.33%，与异步驱动补偿前相比具有一定的改善作用，但相较于图 3(b)，异步驱动补偿效果大幅降低。图 3(d)为保持总体参数差异不变，当识别误差 β=−5.00%时的电流分布情况，此时电流不均衡度为 15.28%，相较于图 3(a)，反而恶化了集电极电流的不均衡问题。



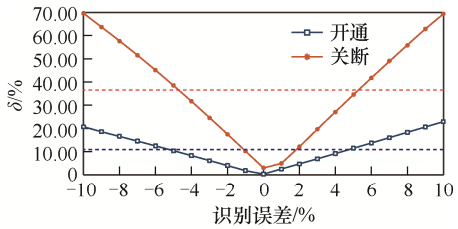
(a) 相对差异为5.00%补偿前 (b) 相对差异为5.00%补偿后

(c) 识别误差为5.00% (d) 识别误差为−5.00%

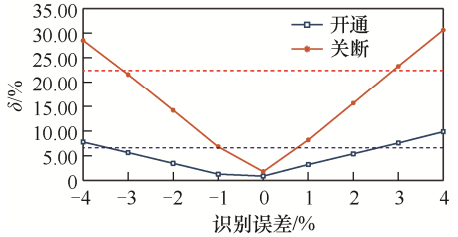
图 3 开通过程存在参数相对差异和精确误差的仿真结果

Fig. 3 Simulation results with parameter relative error and precision error existing in turning-on process

图 4 所示为不同相对差异情况下的门极电阻识别误差对电流不均衡度的影响，其中深色、浅色实线分别代表开关过程电流不均衡度随识别误差变化而变化，深色、浅色虚线分别表示开关过程未加延时的电流不均衡度，超过虚线认为同步脉冲异步驱动方法对开通或关断过程改善效果较差。综合仿真结果可以看出，门极电阻识别误差对关断过程的电流不均衡度影响较大，与相对差异的影响一致，识别误差使得异步驱动补偿的动态均流效果变化，其影响与相对差异有关，当识别误差小于相对差异时，同步脉冲异步驱动方法对动态过程电流具有改善作用。



(a) 相对差异为5%



(b) 相对差异为3%

图 4 不同相对差异情况下的门极电阻识别误差对电流不均衡度的影响

Fig. 4 Influence of gate resistance identification error on current imbalance degree with different relative differences

2　并联支路 IGBT 模块特征参数检定识别

对模块门极驱动回路特征参数的检定识别，可以了解并联 IGBT 模块间的参数差异，得到各模块间的延迟时间差，为门极异步驱动提供控制依据。首先通过对开通、关断过程的进一步分析，推导出特征参数的计算公式；然后搭建图 5 所示的实验平台进行双脉冲测试；接着分析双脉冲测试的电流和电压波形；最终得到特征参数实际的差异范围。

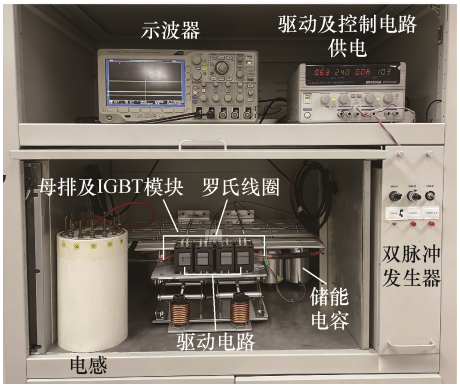


图 5　双脉冲测试实验硬件电路

Fig. 5 Hardware circuit of double-pulse test experiment

IGBT 模块参数提取电路原理如图 6 所示，虚线方框内的部分为被测的 IGBT 模块。门极开通电阻 $R_{\mathrm{G,on}}$ 和门极关断电阻 $R_{\mathrm{G,off}}$ 通常由模块内部的门极电阻 $R_{\mathrm{G,int}}$ 和门极驱动电路板上的外部电阻 $R_{\mathrm{G,ext}}$ 组成。当集电极电流相同的情况下，观测开关过程平台电压 $U_{\mathrm{G2(pl),on}}$ 和 $U_{\mathrm{G2(pl),off}}$，计算得到内部门极电阻 $R_{\mathrm{G,int}}$，可表示为

$$U_{\mathrm{G2(pl),on}} = U_{\mathrm{GE(pl)}} + I_{\mathrm{G,on}} R_{\mathrm{G,int}} \tag{7}$$

$$U_{\mathrm{G2(pl),off}} = U_{\mathrm{GE(pl)}} + I_{\mathrm{G,off}} R_{\mathrm{G,int}} \tag{8}$$

式中，$I_{\mathrm{G,on}}$、$I_{\mathrm{G,off}}$ 分别为门极开通电流、关断电流。

等效门极电容 C_{GE} 可由集电极电流上升阶段等效电路建立的回路方程计算得到，表达式为

$$u_{\mathrm{G2E}}(t) = u_{\mathrm{GE}}(t) + i_{\mathrm{G}} R_{\mathrm{G,int}} = U_{\mathrm{G,off}} + (U_{\mathrm{G,on}} - U_{\mathrm{G,off}})(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{C_{\mathrm{GE}} R_{\mathrm{G,on}}}}) + i_{\mathrm{G}} R_{\mathrm{G,int}} \tag{9}$$

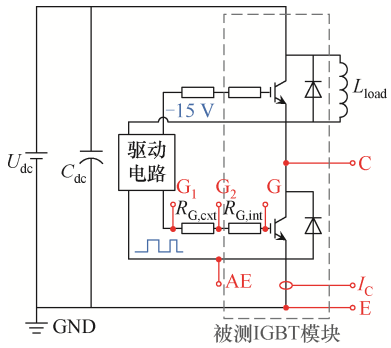
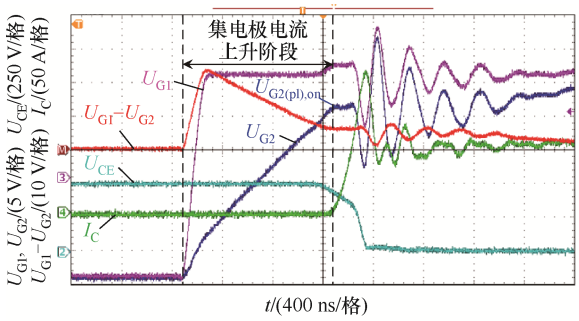


图 6　IGBT 模块参数提取电路

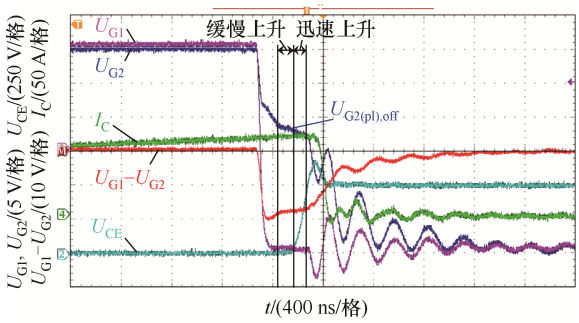
Fig. 6 IGBT module parameter extraction circuit

通过图 7 观测 U_{G2E} 得到集电极电流上升阶段的时间和门极电流 I_{G}，由式(9)解得等效门极电容 C_{GE}。等效门极集电极电容 C_{GC} 通过测量关断时的集电极电压和门极电流计算得到。根据电容的充放电公式可得

$$I_{\mathrm{G}} = C_{\mathrm{GC}} \frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{CE}}}{\mathrm{d}t} = \frac{U_{\mathrm{G1(pl)}} - U_{\mathrm{G2(pl)}}}{R_{\mathrm{G,ext}}} \tag{10}$$



(a) 开通过程



(b) 关断过程

图 7　IGBT 模块驱动回路特征参数提取实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms of characteristic parameter extraction of IGBT module driving circuit

以 U_{CE} 波形曲率最大点 U_1 为分界，将集电极电压分为缓慢上升过程和迅速上升过程，代入式(10)可解得 C_{GC1}、C_{GC2}，其表达式为

$$\begin{cases} I_{G1}=C_{GC1}\dfrac{U_1-U_{CE(sat)}}{\Delta T_1} \\ I_{G2}=C_{GC2}\dfrac{U_{CE(dc)}-U_1}{\Delta T_2} \end{cases} \tag{11}$$

3 IGBT 特征参数识别与均流实验

实际应用中，由于实验设备精度、实验环境条件等因素限制，误差难以避免，异步驱动补偿方法在计算补偿值时对参数计算精度比较敏感，为研究检定过程中误差对均流的作用规律，以 2 个富士 2MBI200U4H-120 模块(模块 I、模块 II)和 2 个英飞凌 FF300R17KE3 模块(模块 III、模块 IV)作为被测对象，通过参数检定识别方法测得 4 个 IGBT 的门极驱动回路特征参数差异范围，为后续的并联实验提供数据基础，测试设备及型号见表 1。采用精度较高的 LCR 电桥测量得到外部门极电阻，通过式(7)和式(8)计算得到内部门极电阻，最终得到门极开通电阻 $R_{G,on}$ 和门极关断电阻 $R_{G,off}$。通过开通过程波形得到开通延迟时间，代入式(9)得到等效门极电容 C_{GE}。结合关断过程 U_{CE} 上升波形，转折电压取曲率最大点，代入式(11)可计算出等效门极集电极电容 C_{GC1} 和 C_{GC2}。

表 1 异步驱动测试设备及型号

Tab. 1 Asynchronous drive test devices and types

测试设备	型号
示波器	Tektronix DPO3034 300 MHz
u_{CE} 测量探头×2	Tektronix THDP0100 6 kV/100 MHz
u_{GE} 测量探头×2	Tektronix THDP0200 1.5 kV(150 V)/ 100 MHz
u_G 测量探头×2	Pintech PT-8002 700 V(70 V)/25 MHz
i_C 测量探头×2	PEM CWTMini 3B 600 A/20 MHz

各模块门极驱动回路特征参数提取结果见表 2。对模块门极驱动回路特征参数提取得到模块合成差异，计算对应开通、关断过程中需要补偿的延迟时间，见表 3。将计算得到的延迟时间补偿到并联各支路，并进行双脉冲实验观察其改善作用。通过计算结果可知同型号的 2 个模块间，关断过程的延迟时间补偿值 $t_{d(off)}$ 和 $t_{d(vr)}$ 差异较小，即并联模块的关断过程一致性较好，因此在开通过程进行异步驱动补偿。

表 2 各模块门极驱动回路特征参数提取结果

Tab. 2 Extraction results of characteristic parameters for gate drive circuit of each module

测试条件	IGBT 模块	$R_{G,int}$/Ω	$R_{G,on}$/Ω	$R_{G,off}$/Ω	C_{GE}/nF	C_{GC1}/nF	C_{GC2}/nF
U_{DC}=500 V	模块 I	3.56	23.53	13.56	36.42	9.86	0.70
I_L=100 A	模块 II	3.47	24.47	13.46	35.39	9.45	0.76
U_{DC}=900 V	模块 III	2.41	4.41	4.39	28.98	9.17	0.62
I_L=250 A	模块 IV	2.33	4.65	4.35	29.92	9.29	0.64

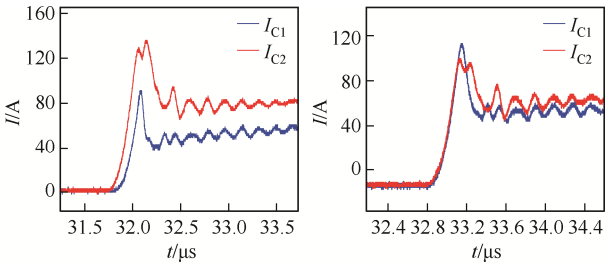
表 3 开通关断过程各阶段的总时间

Tab. 3 Total time at each stage of turning-on and turning-off processes

IGBT 模块	$t_{d(on)}$/ns	$t_{d(cr)}$/ns	$t_{d(off)}$/ns	$t_{d(vr)}$/ns
模块 I	1 151	445	88	439
模块 II	1 166	450	85	411
模块 III	154	191	11	208
模块 IV	168	206	12	211

采用参数检定识别后的模块 I 和模块 II 并联进行双脉冲实验。如图 8 所示，引入门极异步驱动补偿前开通过程的电流不均衡度为 46.55%，而加入异步驱动补偿后的电流不均衡度为 9.49%，可以看出门极异步驱动补偿对动态过程的改善作用。在此实验基础上保持总体参数差异不变，相对差异为 4.00%。图 9(a)为识别误差为 4.00%的实验结果，此时参数提取结果大于实际参数值，电流不均衡度为 19.72%，对应的驱动效果改善情况一般。图 9(b)为识别误差为 −4.00%的实验结果，此时参数提取结果小于实际参数值，电流不均衡度为 18.62%，识别误差绝对值小于相对差异，对应的驱动效果改善情况较好。可以看

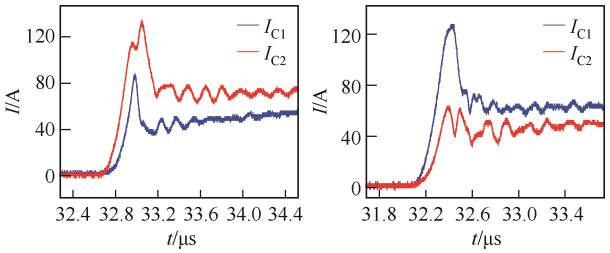
出，实验与仿真结果一致，识别误差不超过参数相对差异范围时异步驱动补偿有动态均流效果。



(a) 补偿前　　(b) 补偿后

图 8　2MBI200U4H-120 模块开通过程并联实验结果

Fig. 8 Experimental results of 2MBI200U4H-120 modules in parallel during turning-on process



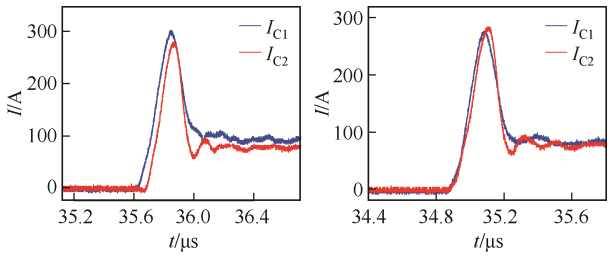
(a) 识别误差4.00%　　(b) 识别误差−4.00%

图 9　不同参数识别误差的 2MBI200U4H-120 模块并联实验结果

Fig. 9 Experimental results of 2MBI200U4H-120 modules in parallel with different parameter identification errors

对照前一组实验通过采用参数检定识别的模块 III 和模块 IV 并联进行双脉冲实验，结果如图 10 和图 11 所示。可以看出未引入异步驱动补偿前的开通过程模块 III 电流较为超前，与计算结果及理论分析趋势相符。引入门极异步驱动补偿前开通过程的电流不均衡度为 6.00%。此时关断过程较为均流，开通过程需要引入异步驱动补偿。加入同步脉冲异步驱动补偿后的电流不均衡度为 4.00%。对照上一组实验说明通过异步驱动方法来改善动态均流具有一定的通用性。

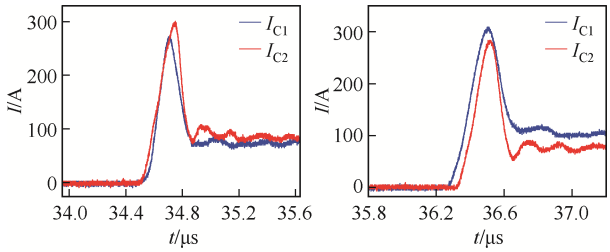
2 组实验中 2 种模块并联的参数差异见表 4，表中结合集电极电流上升率、峰值和动态电流不均衡度评价了异步驱动方法补偿前、后的效果，可以看出异步驱动补偿在现有差异下可以带来较好的动态均流改善效果。表 5 为参数识别误差对均流情况的影响。从表 5 可以看出，2MBI200U4H-120 2 模块在识别误差在±4.00%范围内具有改善效果，FF300R17KE3 2 模块在识别误差在−4.00%~5.00%范围内具有改善效果。通过上述驱动回路特征参数识别误差对异步驱动均流情况的影响分析和实验可知，识别误差与相对差异相关联。当参数识别检定误差绝对值在相对差异范围内，该方法对其具有改善效果，相比于普通同步驱动方法降低了电流不均衡度；当识别误差绝对值超过相对差异范围，采用异步驱动不能降低电流不均衡程度，对动态均流无效。为提高均流特性实验结果的可靠性，需要进一步提高参数识别准确度，方法包括使用更高精度的测量设备；针对相同参数进行多次测量，采用平均或加权的方式减小单次测量的误差；定期对测量设备进行校准，以确保其精度和准确性等。



(a) 补偿前　　(b) 补偿后

图 10　开通过程 FF300R17KE3 模块并联实验结果

Fig. 10 Experimental results of FF300R17KE3 modules in parallel during turning-on process



(a) 识别误差3.00%　　(b) 识别误差−4.00%

图 11　不同参数识别误差的 FF300R17KE3 模块并联实验结果

Fig. 11 Experimental results of FF300R17KE3 modules in parallel with different parameter identification errors

表 4 驱动回路特征参数识别精度对并联 IGBT 同步脉冲异步驱动均流情况的影响

Tab. 4 Influence of identification accuracy of driving circuit characteristic parameters on current-sharing of parallel IGBT synchronous pulse-asynchronous drive

IGBT 模块	$R_{G,on}$/Ω	相对差异/%	$R_{G,off}$/Ω	相对差异/%	C_{GE}/nF	相对差异/%	C_{GC}/nF	相对差异/%
模块 I	23.53	>3.00	13.56	<3.00	36.42	<3.00	9.86	>3.00
模块 II	24.47		13.46		35.39		9.45	
模块 III	4.41	>5.00	4.39	<5.00	28.98	>5.00	9.17	<5.00
模块 IV	4.65		4.35		29.92		9.29	

IGBT 模块	并联驱动方法	I_C 上升率/(A·μs^{-1})	I_C 峰值/A	不均衡度/%
模块 I	普通同步脉冲驱动	666.67	107.2	19.36
模块 II		670.27	121.6	
模块 I	改进同步脉冲异步驱动	571.43	112.0	9.49
模块 II		522.39	104.0	
模块 III	普通同步脉冲驱动	1 764.71	300.0	6.00
模块 IV		1 922.33	278.4	
模块 III	改进同步脉冲异步驱动	1 831.58	276.0	4.00
模块 IV		1 904.19	283.2	

表 5 驱动回路特征参数识别误差对并联 IGBT 同步脉冲异步驱动均流情况的影响

Tab. 5 Influence of identification error of driving circuit characteristic parameters on current-sharing of parallel IGBT synchronous pulse-asynchronous drive

IGBT 模块	识别误差/%	I_C 上升率/(A·μs^{-1})	I_C 峰值/A	电流不均衡度/%	对应效果改善情况
2MBI200U4H-120 相对差异 4.00%	0	571.43	112.0	9.49	—
		522.39	104.0		
	−6.00	627.15	152.8	25.33	较差
		404.42	64.0		
	−4.00	607.58	132.6	18.62	较好
		575.25	84.8		
	4.00	538.46	80.0	19.72	一般
		566.93	129.6		
	6.00	542.37	66.4	26.82	较差
		774.19	173.6		
FF300R17KE3 相对差异 6.00%	0	1 831.58	276.0	4.00	—
		1 904.19	283.2		
	−7.00	2 229.51	298.0	19.23	较差
		2 036.36	242.5		
	−4.00	1 920.00	309.6	5.31	较好
		1 732.22	283.2		
	3.00	1 620.72	271.2	5.01	较好
		2 033.90	300.0		
	5.00	1 828.32	254.3	8.39	一般

4 结论

本文通过仿真建模和实验对并联动态均流的特征参数进行了分析，得出本体参数相对差异与特征参数识别误差对并联动态均流特性会产生影响，主要结论如下。

(1)分析 IGBT 模块开、关过程各参数变化规

律，推导得出关键参数计算公式，提出 1 种特征参数检定识别方法。该方法较传统方法更为精确，可以得到传统方法或数据手册中不易获得的门极驱动回路特征参数及模块间的合成参数差异，对研究并联均流特性具有重要意义，故选择参数特性相近的 IGBT 模块并联使用，可为门极异步驱动补偿提供参数依据。

(2)考虑到检定过程中的识别误差，通过仿真和实验分析了识别误差对动态过程的影响，识别误差绝对值不超过参数相对差异范围时，异步驱动补偿具有动态均流效果。

(3)获取了 2 组 IGBT 模块特征参数，进行了异步驱动延迟时间补偿，实现了均流特性的改进，反映了同步脉冲异步驱动方法的有效性和通用性，进一步验证了本体参数相对差异与特征参数识别误差对并联动态均流特性的影响，同时考虑到存在识别误差的情况，实验验证得到了与仿真相同的结果，为后续并联实验提供了理论基础。

参考文献：

[1] Matallana A, Andreu J, Garate J I, et al. Analysis of impedance and current distributions in parallel IGBT design [C]// 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Edinburgh, UK, 2017: 616-621.

[2] Spang M, Katzenberger G. Current sharing between parallel IGBTs in power modules during short circuit with unsymmetrically connected load [C]// 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe). Karlsruhe, Germany, 2016: 1-9.

[3] Wissen M, Domes D, Brekel W, et al. How asymmetric busbar design causes symmetric switching behavior of paralleled IGBT modules [C]// 10th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Berlin, Germany, 2018.

[4] Kong Liang, Zhang Dong, Ning Puqi, et al. The IGBT module layout design considering the electrical and thermal performance [C]// 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Beijing, China, 2014: 1-5.

[5] 冯源. 大功率 IGBT 抑制开关尖峰驱动设计优化[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
Feng Yuan. Design optimization of high-power IGBT suppression switching spike drive [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022. (in Chinese)

[6] Weigel J, Boehmer J, Wahl E, et al. Paralleling of high power dual modules: Standard building block design for evaluation of module related current mismatch [C]// Proceedings of 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe). Riga, Latvia, 2018: 1-10.

[7] Wissen M, Dome D, Brekel W, et al. Effects of influencing the individual leg inductance in case of paralleling modules on basis of XHPTM3 and Econo DUALTM [C]// PCIM Europe 2017: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg, Germany, 2017: 359-364.

[8] Matallana A, Andreu J, Garate J I, et al. Analysis and modelling of IGBTs parallelization fundamentals [C]// IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, Italy, 2016: 3247-3252.

[9] Alvarez R, Bernet S. A new delay time compensation principle for parallel connected IGBTs [C]// 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, AZ, USA, 2011: 3000-3007.

[10] Huang Xianjin, Mu Feng, Liu Yixin, et al. Asynchronous gate signal driving method for reducing current imbalance of paralleled IGBT modules caused by driving circuit parameter difference [J]. IEEE Access, 2021, 9: 86523-86534.

[11] Tang Yunyu, Ma Hao. Dynamic electrothermal model of paralleled IGBT modules with unbalanced stray parameters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 1385-1399.

[12] 穆峰, 刘宜鑫, 李鑫, 等. IGBT 并联应用均流控制技术综述[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 119-132.
Mu Feng, Liu Yixin, Li Xin, et al. Review of current-sharing control technologies for parallel-operating IGBTs

[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 119-132. (in Chinese)

[13] 肖雅伟, 唐云宇, 刘秦维, 等. 并联 IGBT 模块静动态均流方法研究[J]. 电源学报, 2015, 13(2): 64-70, 76.
Xiao Yawei, Tang Yunyu, Liu Qinwei, et al. Research on method of balancing static and dynamic current for paralleled IGBT modules [J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(2): 64-70, 76. (in Chinese)

[14] 陈玉林, 孙驰, 艾胜, 等. 一种中电压大功率 IGBT 模块行为模型[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 25-34.
Chen Yulin, Sun Chi, Ai Sheng, et al. The medium-voltage high power IGBT module behavior model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 25-34. (in Chinese)



金声超

作者简介：

金声超(1985—)，男，硕士，中级工程师。研究方向：风电机组设备和风电场管理。E-mail：jepcc-jinshengchao@foxmail.com。

吴文宝(1982—)，男，本科，高级工程师。研究方向：企业管理和新能源行业研究。E-mail：wuwenbao@foxmal.com。

黄晓宏(1985—)，男，通信作者，博士，高级工程师。研究方向：新能源技术的开发和传统能源的清洁化利用。E-mail：838087091@qq.com。

罗玮(1981—)，男，本科，中级工程师。研究方向：调试项目管理及新能源应用。E-mail：jepcc-luowei@foxmail.com。

(责任编辑：郭凯凯)



公益广告来源：阜平县融媒体中心（电视台）