

# 基于 SiC 器件的大功率交错并联 Buck 电路

栾晓腾,段福兴,夏东伟  
(青岛大学自动化与电气工程学院,青岛 266071)

**摘要:**交错并联 Buck 电路能够以较低的开关频率实现高频输出,在与传统的 Buck 电路输出电流相同的情况下,输出的电流纹波减小,支路电流为主电路的 1/2,从而减小了开关管和二极管的电流应力,在一定程度上可以提升电路效率。碳化硅(SiC)作为一种新型材料,可以在高压、大功率、高频、高温条件下应用。在大功率条件下把碳化硅和交错并联 Buck 电路结合起来,与硅(Si)器件进行对比,通过实验进行验证,结果证明 SiC 交错并联 Buck 电路的应用优势。

**关键词:**交错并联;Buck;SiC 器件

## High-power Interleaving Buck Circuit Based on SiC Device

LUAN Xiaoteng, DUAN Fuxing, XIA Dongwei

(College of Automation and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** An interleaving Buck circuit can achieve a high-frequency output at a lower switching frequency. Compared with the traditional Buck circuit, it can maintain the same output current while reducing the output current ripple and keeping the amplitude of branch current as half of that of the main circuit, which reduces the current stress of the switching tube and the diode. In this way, the circuit efficiency can be improved to a certain degree. As a new type of material, silicon carbide(SiC) can be used in high-voltage, high-power, high-frequency and high-temperature conditions. In this paper, SiC and interleaving Buck circuits were combined under high-power conditions, and they were further compared with Si devices. Experimental results demonstrated the application advantages of the SiC interleaving Buck circuit.

**Keywords:** interleaving;Buck;SiC device

近些年,能源问题愈发严重,电力电子变换器的效率问题越来越引起注意。碳化硅(SiC)器件具有阻断电压高、通态电阻低、损耗小而且耐高温等优势,能够提高变换器的效率并减小其体积,因此受到了广泛关注。交错并联技术由相同的供电电路相互并联,两个电路依次错开 1/2 个周期,交错并联之后电流纹波大大减小,输出电流的纹波频率为原来的 2 倍。在同等输出条件下,交错并联电路中的滤波电感、开关管、二极管上承受的电流比传统 Buck 要小,从而减小了开关损耗。基于 SiC 器件的交错并联 Buck 电路,能有效地降低开关损耗,加快响应速度,具有更广阔的前景<sup>[1-2]</sup>。

为了具体地体现 SiC 器件的性能优势,本文将对 SiC MOSFET 与 Si IGBT、SiC 二极管与 Si 二极管的特性进行分析比较。由于所搭建电路的输入电压为 700 V,输出电压为 220 V,因此高耐压等级的 Si MOSFET 在提高器件阻断电压时,必须加宽器件的漂移区,这会使其内阻迅速增大,在实际过程中效率偏低。因此本文不将 Si MOSFET 列入对比。

## 1 SiC 的特性及器件优势

SiC 半导体器件具有宽禁带(3.0 eV)、高热导率(3.3~4.9 W/(cm·K))、高电压击穿场强(2.4 MV/cm)与低导通阻抗(1mΩ/cm)的特性。禁带越宽,半导体能承受的最大电压越大,最高工作温度越高。

同时, SiC 的热导率与导通电阻都比 Si 器件要好, 这决定了在高温、高频率、高功率的应用场合, SiC 器件是理想的下一代电力电子器件<sup>[3-5]</sup>。

### 1.1 SiC 二极管的性能优势

#### 1.1.1 反向特性

尽管 Si 二极管可以达到比较高的开关频率、较低的正向压降,但在从正向切换到反向的瞬间会产生极大的瞬态电流,从而产生很大的损耗。SiC 二极管不使用少数载流子进行电传导,因此不会产生少数载流子集聚。图 1 为不同温度下 SiC 二极管与 Si 二极管的反向恢复特性,图 2 为相同温度不同正向电流情况下 SiC 二极管与 Si 二极管的反向恢复特性。通过对比可知, SiC 二极管的反向恢复速度与反向恢复电流不会因正向电流和温度的改变产生太大变化。

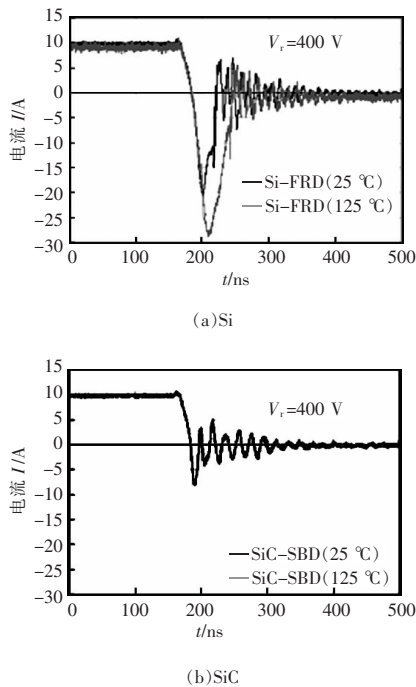


图 1 不同温度 SiC 与 Si 的反向恢复特性曲线

Fig.1 Reverse recovery characteristic curves of SiC and Si at different temperatures

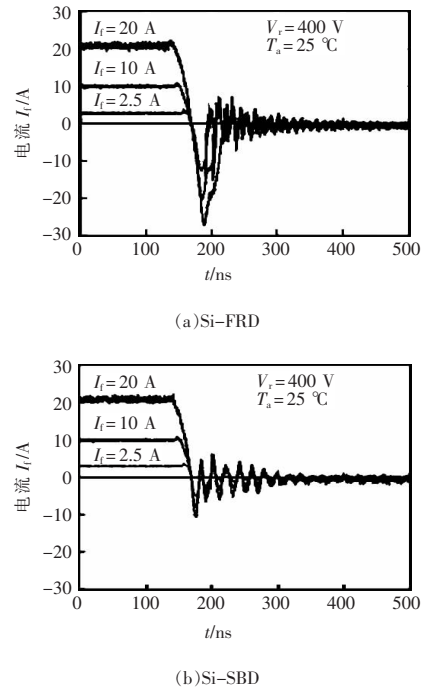


图 2 不同正向电流下 SiC 与 Si 反向恢复特性

Fig.2 Reverse recovery characteristics of SiC and Si under different forward currents

#### 1.1.2 损耗对比

为了进一步说明 SiC 器件的优势,对电路中的二极管进行理论计算,公式为

$$\begin{cases} P_{on} = (1-D)U_f I_f \\ P_{off} = D U_r I_r \\ P_{rr} = U_r Q_{rr} f_s \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{on}$  为导通损耗;  $P_{off}$  为阻态损耗;  $P_{rr}$  为开关损耗;  $D$  为开关导通占空比;  $U_f$  和  $I_f$  分别为正向导通压降和电流;  $U_r$  和  $I_r$  分别为反向截止电压和电流;  $Q_{rr}$  为二极管结电荷;  $f_s$  为开关频率。交错并联 Buck 电路每路的输入电压为 700 V, 输出电压为 220 V, 开关频率为 40 kHz, 占空比为 31.4%。根据器件资料中 25 °C 条件下的相关数据, 器件参数以及损耗理论计算结果如表 1 所示。

由理论计算结果可知,在相同工况下, SiC 二极

表 1 损耗计算的对应参数及计算结果

Tab.1 Parameters in calculation of loss and the corresponding results

型号	$U_f/V$	$I_f/A$	$U_r/V$	$I_r/\mu A$	$Q_{rr}/nC$	$P_{on}/W$	$P_{off}/W$	$P_{rr}/W$	$P_{total}/W$
C4D40120D	1.8	22.5	700	100	90	27.800	0.022	2.520	30.342
APT60D120B	2.5	22.5	700	230	1 000	38.570	0.051	28.000	66.621

管C4D40120D的损耗要比Si二极管APT60D120B小,而总的损耗为Si二极管的1/2,在更高的频率上优势将会更加明显。

### 1.2 SiC MOSFET与Si IGBT静态分析

Si MOSFET中,器件耐压越高,单位面积的导通电阻也越大(以耐压值的2~2.5次方的比例增加),因此600V以上的电压中主要采用IGBT。IGBT通过电导率调制,向漂移层内注入作为少数载流子的空穴,因此导通电阻比MOSFET还要小,但是同时由于少数载流子的积聚,在关断时会产生尾电流,从而造成极大的开关损耗。SiC器件漂移层的阻抗相对较低,因此能实现高耐压与低阻抗。而且MOSFET原理上不会产生尾电流,所以用SiC MOSFET代替Si IGBT可以明显地减少开关损耗,并且实现散热部件的小型化。

根据测试电路的相应参数,选取型号为C2M0160120D的SiC MOSFET与型号为APT45GP120B2DQ2G的Si IGBT做导通特性对比。

图3为在合适栅电压的条件下,SiC MOSFET(1200V,  $V_{gs}=18V$ )、Si MOSFET(900V,  $V_{gs}=10V$ )、Si IGBT(1200V,  $V_{gs}=15V$ )不同温度下的导通

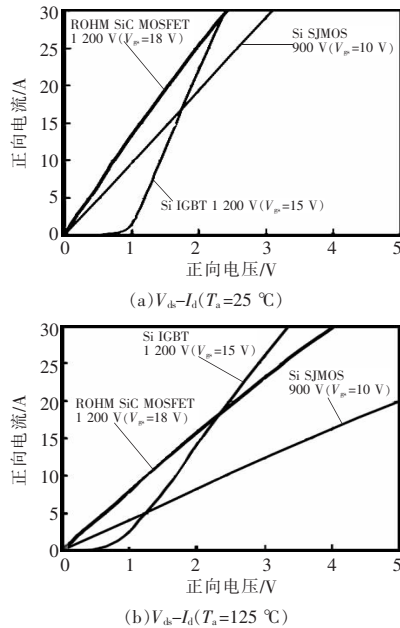


图3 不同温度下SiC MOSFET、Si MOSFET、Si IGBT导通特性曲线

Fig.3 Conduction characteristic curves of SiC MOSFET, Si MOSFET and Si IGBT at different temperatures

特性曲线。根据对比,SiC MOSFET从很小电流到大电流都能实现低损耗的导通;而IGBT在低电流时损耗相对较大。在150℃条件下,Si MOSFET的导通损耗上升到25℃的2倍以上,而SiC MOSFET上升率不高,因此在热设计时更加方便,导通损耗也相对较低。通过对比,进一步验证了在大功率条件下,Si MOSFET并没有竞争优势。

图4为Si MOSFET与Si IGBT在相同温度、不同栅极电压情况下的导通特性,从图4(a)可以看出,在栅极电压 $V_{GS}>18V$ 时,特性曲线斜率(导通电阻)变化很小。图4(b)所示,栅极电压 $V_{GE}$ 大于11V特性曲线斜率就基本稳定。这是因为器件不同的跨导特性导致,SiC MOSFET的导通沟道迁移率比较低,因而沟道内部阻抗相对Si器件要高,为了获取较低的导通阻抗,需要加大栅极电压,在测试电路中,SiC MOSFET的驱动电压为20V。

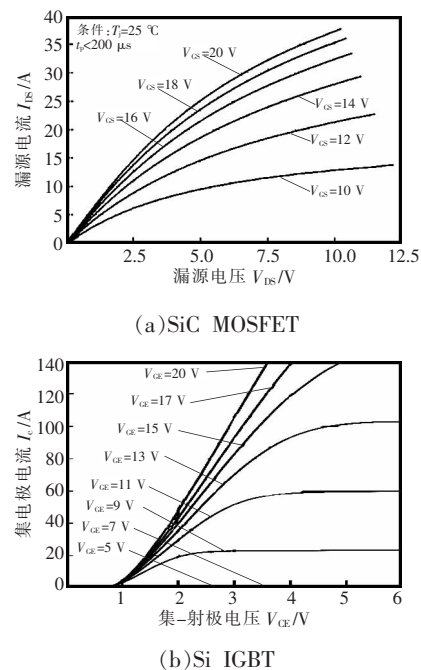


图4 SiC MOSFET与Si IGBT的导通特性曲线  
Fig.4 Conduction characteristic curves of SiC MOSFET and Si IGBT

## 2 交错并联Buck电路分析

### 2.1 交错并联Buck电路原理

交错并联技术可以有效地减小输出纹波,其原

理如图 5 所示,主电路采用两路 Buck 并联,通过控制电路使得  $S_1, S_2$  与  $S_3, S_4$  脉宽相同,导通时间相差半个周期,实现交错并联。

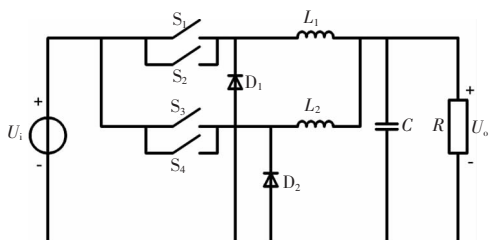


图 5 交错并联 Buck 原理

Fig.5 Schematic of interleaving Buck

为了进一步的降低开关管的损耗,在每一路的 Buck 电路中采用 2 个开关管并联的方式,开关同步。一个开关周期内的工作过程分为 4 个阶段。

第 1 阶段: $S_1, S_2$  导通,  $S_3, S_4$  关断;  $D_1$  截止  $D_2$  导通续流;  $L_1$  储能的同时电流升高,  $C$  储能。

第 2 阶段: $S_1, S_2$  关断,  $S_3, S_4$  关断;  $D_1, D_2$  导通续流;  $L_1, L_2$  电流减小,  $C$  放电。

第 3 阶段: $S_1, S_2$  关断,  $S_3, S_4$  导通;  $D_1$  导通续流  $D_2$  截止;  $L_2$  储能的同时电流升高,  $C$  储能。

第 4 阶段: $S_1, S_2$  关断,  $S_3, S_4$  关断;  $D_1, D_2$  导通续流;  $L_1, L_2$  电流减小,  $C$  放电。

### 2.2 电路静态分析

交错 Buck 变换器的开关管和二极管的电压应力均为输入电压,但其电流应力为输出电流的 1/4,减小了开关损耗。采用交错控制后,输出电流  $i_o$  的脉动小于单个滤波电感电流脉动,定量分析如下。

单个 Buck 变换器电感电流脉动为

$$\Delta I_{Lr} = \frac{U_{in}}{L_r} (1-D) D \quad (1)$$

从图 5 可以看出,当开关管同时关断时,两电感电流同时下降,这段时间内电感电流下降量之和就是  $i_o$  的脉动量,即

$$\Delta I_{Lr} = 2 \frac{U_o}{L} \left( \frac{T_s}{2} - T_{on} \right) = \frac{U_{in}}{L_r} (1-2D) D \quad (2)$$

由式(2)可知,交错并联 Buck 电路因其结构降低了输出电流的纹波。综上,本文所用的交错并联拓扑在降低开关应力与电流纹波的方面有明显效果,还能够降低电路的损耗以及输出电容容量。

## 3 实验验证

根据上述理论分析,搭建了实验平台。电路参数为:输入电压 700 V,输出电压 220 V,输出电流范围为 0~45 A,开关频率为 40 kHz。样机满载运行时的波形如图 6~图 8 所示。从图 6 可知, SiC 二极管反向恢复速度更快,实验结果验证了 SiC 二极管可减小反向恢复时间,降低了开关损耗。

从图 7 可知, SiC MOS 管的关断延迟时间为 20 ns, 而 Si IGBT 为 120 ns, 并且伴有严重的拖尾电流,所以 Si IGBT 关断损耗更大。由于 SiC MOS 管的开关速度较快,在关断时  $V_{ds}$  会有 100 V 左右的振荡。对比图 8 可知; IGBT 开通时间较长,电流波动较大,故开通损耗较 SiC MOS 管大。

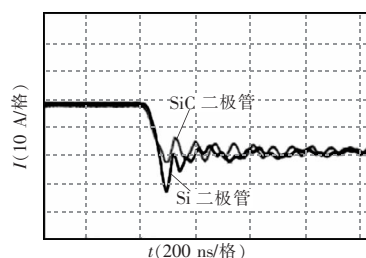
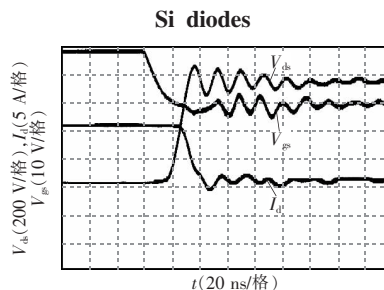
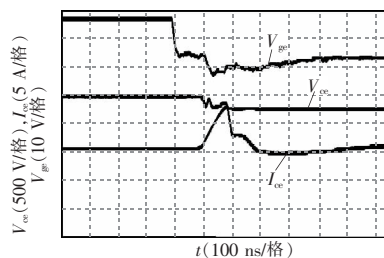


图 6 SiC 二极管与 Si 二极管反向恢复电流波形

Fig.6 Reverse recovery current waveforms of SiC and Si diodes



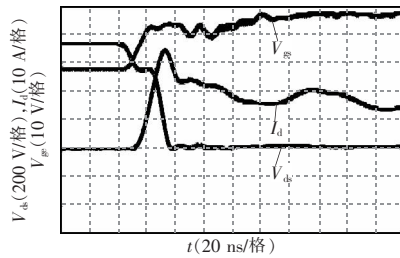
(a) SiC MOSFET



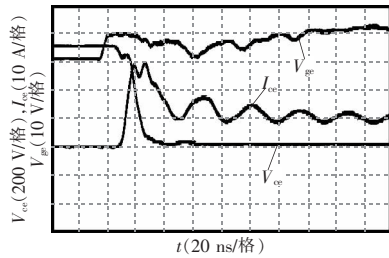
(b) Si IGBT

图 7 SiC MOSFET 与 Si IGBT 关断波形

Fig.7 Turn-off waveforms of SiC MOSFET and Si IGBT



(a)SiC MOSFET



(b)Si IGBT

图 8 SiC MOSFET 与 Si IGBT 开通波形

Fig.8 Turn-on waveforms of SiC MOSFET and Si IGBT

图 9 为 SiC MOSFET 与 Si IGBT 的损耗对比,可见, SiC MOSFET 导通损耗与开关损耗均低于 Si IGBT, 在同等条件下, SiC MOSFET 的温度要比 Si IGBT 低 15 ℃。由于开关损耗会导致器件的结温上升, 而器件结温的上升反过来会增加开关损耗; 因此 SiC 器件良好的热导率就会进一步降低损耗。

图 10 为 2 种器件在不同电路中的效率对比, 在开关频率 40 kHz 条件下, SiC 器件在交错并联电路中相对于 Si 器件满载效率有 1% 的提升, 在普通 Buck 电路中无论是 SiC 器件还是 Si 器件, 其电路效率都有明显的降低。这说明, 在相同条件下, SiC 交错并联 Buck 电路有明显的效率优势。图 11 为交错并联 Buck 电路下的电感电流, 由于两电感电流的交错作用, 电路总电流的纹波得到了大幅度的降低。

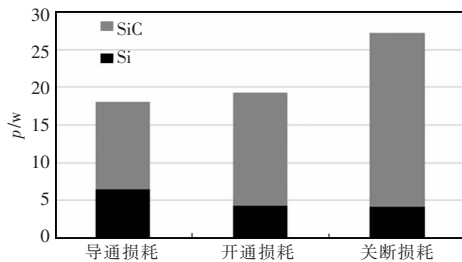


图 9 SiC MOSFET 与 Si IGBT 损耗对比

Fig.9 Comparison of lose between SiC MOSFET and Si IGBT

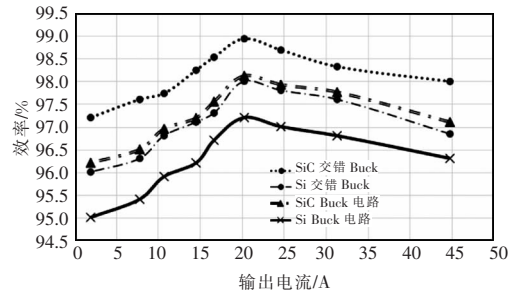


图 10 2 种器件在不同电路下的效率对比

Fig.10 Comparison of efficiency among different devices in different circuits

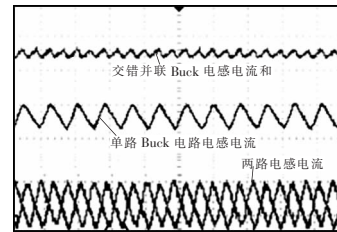


图 11 交错并联 Buck 电路电感电流

Fig.11 Inductor current of interleaving Buck circuit

### 4 结语

本文基于交错并联 Buck 电路, 对比了 SiC MOSFET 和 SiC 二极管以及 Si IGBT 和 Si 二极管的静态特性和开关特性, 分别对其进行了理论分析与实验验证, 还搭建了相应的 Buck 电路进行了对比验证。分析结果可知, SiC 功率器件具有开关损耗低、热导性好、无反向电流等优点; 交错并联 Buck 电路具有减小开关电流应力、降低输出电流纹波等优势, 两者的结合对提高电路整体效率、减小电路体积具有很好的效果, 在未来的实际应用中有更广的前景。

### 参考文献:

[1] Qiu Yang, Xu Ming, Yao Kaiwei, et al. The multi-frequency small-signal model for buck and multiphase interleaving buck converters[C]. Twentieth IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE, 2005:392-398.  
 [2] 毕超, 肖飞, 谢桢. 交错并联技术在并联 DC-DC 变换器纹波抑制中的分析与应用[J]. 电气自动化, 2013, 35(4):

具有比较快的开关速度。这时的应用碳化硅 MOSFET 可以应用驱动能力一般的驱动技术。或者在相同的驱动条件下,碳化硅 MOSFET 具有比硅 MOSFET 快一个数量级的开关速度。

相同的漏极电流条件下,碳化硅 MOSFET 的导通电压是高性能硅 MOSFET 导通电压的一半,在高结温条件下碳化硅 MOSFET 导通电压则可能为高性能硅 MOSFET 的 1/4。如果将栅极驱动电压提升至 20 V,则效率的提高会更明显。

本文实验结果表明,直接将碳化硅 MOSFET 替代硅 MOSFET,可以在 20%~100%负载范围内提高整机效率 3%左右。

#### 参考文献:

- [1] Callanan R J, Agarwal A, Burk A, et al. Recent progress in SiC DMOSFETs and JBS diodes at cree[C]. IEEE Industrial Electronics 34th Annual Conference. IECON 2008, 2008, 10-13:2885-2890.
- [2] 徐静平,李春霞,吴海平. 4H-SiC n-MOSFET 的高温特性分析[J]. 物理学报, 2005, 54(6):2918-2923.  
Xu Jingping, Li Chunxia, Wu Haiping. Analyses on high-temperature electrical properties of 4H-SiC n-MOSFET[J].
- (上接第 94 页)
- 37-41.  
BI Chao, Xiao Fei, Xie Zhen. Analysis and application of interleaving technique in paralleling DC-DC converter with ripple suppression[J]. Electrical Automation, 2013, 35(4): 37-41(in Chinese).
- [3] 方瑜,秦海鸿,朱梓悦,等. 硅与碳化硅二极管在 Buck 变换器中的对比研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(2):37-39.  
Fang Yu, Qin Haihong, Zhu Ziyue, et al. Comparison of Si diode and SiC diode in Buck converter[J]. Power Electronics, 2014, 48(2):37-39(in Chinese).
- [4] 潘三博,黄军成,刘建民. 碳化硅功率器件在电力电子中的应用[J]. 上海电机学院学报, 2013, 16(3):107-112.  
Pan Sanbo, Huang Juncheng, Liu Jianmin. The silicon power devices research on power electronics applications [J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2013, 16(3): 107-112(in Chinese).

Acta Physica Sinica, 2005, 54(6):2918-2923(in Chinese).

- [3] 张波,邓小川,张有润,等. 宽禁带半导体 SiC 功率器件发展现状及展望[J]. 中国电子科学研究院学报. 2009, 4(2):111-118.  
Zhang Bo, Deng Xiaochuan, Zhang Yourun, et al. Recent development and future perspective of silicon carbide power devices-opportunity and challenge[J]. Journal of China Academy of Electronics & Information Technology, 2009, 4(2):111-118(in Chinese).
- [4] 黄维,常少辉,陈之战,等. 11 kV 大功率 SiC 光电导开关导通特性[J]. 强激光与粒子束. 2010, 22(3):511-514.  
Huang Wei, Chang Shaohui, Chen Zhizhan et al. On-state characteristics of an 11 kV high-power SiC photoconductive semiconductor switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(3):511-514(in Chinese).



陈之勃

#### 作者简介:

陈之勃(1985-),男,硕士,实验师,研究方向:高效率功率变换,E-mail:changebird@163.com。

陈永真(1956-),男,中国电源学会高级会员,教授,研究生导师,研究方向:高效率功率变换、电力电子元件应用,E-mail:0416chenyongzhen@163.com。

- [5] Ma Chengbin, Yoshida K, Honda K. Si-IGBT versus SiC-MOSFET-An isolated bidirectional resonant LLC DC-DC converter for distributed power systems[C]. 2015 54th Annual conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan, 2015:894-899.



栾晓腾

#### 作者简介:

栾晓腾(1991-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:电力电子,E-mail:277870252@qq.com。

段福兴(1991-),男,硕士研究生,研究方向:电力电子,E-mail:343042329@qq.com。

夏东伟(1963-),男,中国电源学会高级会员,博士,教授,博士生导师,研究方向:电力电子技术在电源工程中的应用,E-mail:xiadw@163.com。