A High-Power Bidirectional DC/DC Converter Based on GaN Devices*

LIU Xiaoyue, BAI Shangwei, CHEN Rui*
(*College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei* 063200, *China*)

Abstract: This paper introduces a new high-power bidirectional isolated DC/DC converter. The DC/DC converter uses power switching devices based on gallium nitride (GaN). The topology of 10 kW GaN high-power DC/DC converter is optimized, parameterized and analyzed, and its effectiveness is verified by simulation. It consists of two single-phase full bridge circuits, two input and output inductors and a high frequency transformer. The high-frequency transformer plays a vital role in realizing the galvanic isolation between the two full-bridge converters. The MATLAB simulation software is used to model the 10 kW converter. MATLAB simulation results verify that the performance of the converter is suitable for high power applications and can achieve zero voltage turn-on (ZVS) and zero current turn-off (ZCS) under light load conditions. And a 7 kW experimental prototype designed verify the effectiveness of the designed topology.

Key words: bidirectional DC/DC converter; soft switching; high power; electrical isolation; GaN device
EEACC: 1290B; 2560P **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2021.01.009

一种基于 GaN 器件大功率双向 DC/DC 变换器*

刘晓悦*, 白尚维, 陈 瑞
(华北理工大学电气工程学院, 河北 唐山 063000)

摘 要: 本文介绍了一种新的高功率双向隔离式 DC/DC 变换器。DC/DC 转换器使用基于氮化镓(GaN)的功率开关器件。本文对 10 kW GaN 大功率 DC/DC 变换器的拓扑结构进行了优化, 参数化和分析, 并通过仿真和验证了其有效性。它由两个单相全桥电路、两个输入输出电感和一个高频变压器组成。高频变压器在实现两个全桥变换器之间的电流隔离方面起着至关重要的作用。使用 MATLAB 仿真软件对 10 kW 的变换器进行了建模。MATLAB 仿真结果验证了变换器的性能适合于高功率应用并能实现轻负载条件下的零电压开通(ZVS)和零电流关断(ZCS)。然后, 设计了一个 7 kW 的实验原型, 以验证所设计拓扑的有效性。

关键词: 双向 DC/DC 变换器; 软开关; 大功率; 电气隔离, GaN 器件
中图分类号: TM46 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2021)01-0046-06

近年来, 随着能源危机的爆发和地球生态环境的不断恶化, 能源节约和能源的高效利用引起了人们的广泛关注, 其中光能, 风能等可再生能源以及再生制动能量的回收利用成为人们研究的热点问题。在分布式能源系统中高压总线的电压往往能够达到 240 V~450 V。但是国内外研究关于 5 kW 以上的 DC/DC 变换器很少, 因此, 研究一种高功率双向 DC/DC 变换器很有必要。

双向 DC/DC 变换器按照有无电气隔离可以分为

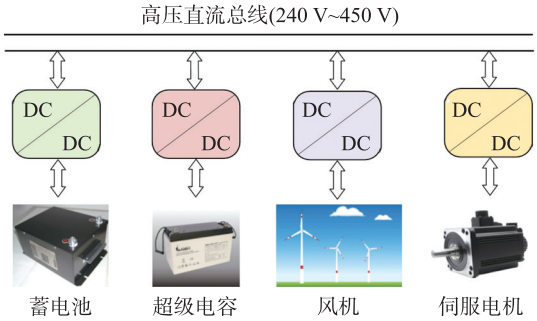


图 1 常见的 DC-DC 变换器应用拓扑

项目来源: 国家自然基金项目(51574102, 51474086); 河北省自然科学基金和重点基础研究专项项目(E2019209492)
收稿日期: 2020-05-14 **修改日期**: 2020-08-05

隔离型和非隔离型,在它们之中,隔离型 DC/DC 变换器是优选的,因为它易于实现电气隔离、高频化、小型化。其中双有源全桥(DAB)DC/DC 变换器更是得到了广泛关注[1]。全桥双有源 DC/DC 变换器是由一个高频变压器两侧分别连接一个全桥电路,一侧全桥电路充当逆变器,另一侧则充当整流器,实现了低压侧和高压侧电气上的隔离。控制双有源全桥开关管之间的相移角,以实现零电压开启(ZVS)和零电流关闭(ZCS)。这严重影响了转换器的效率。文献[2]在高压侧引入了一个 LLC 谐振电路来实现它。该电路可在整个负载范围内提供软开关,但以输出功率为代价。文献[3]为了使变换器正反双向对称工作在低压侧也引入了谐振电感,但是导致低压侧输出电流波纹较大,影响变换器的效率。在参考文献[4]中,高压侧已更改为倍压整流电路。这提高了电压增益,但是开关管难以实现软开关。

为了解决双有源全桥转换器中存在的上述问题,转换器的输出功率需要进一步提高,低压侧电流纹波减小。本文设计了一种基于 GaN 高频率开关器件的大功率双向 DC/DC 变换器,通过 GaN 器件的高频化,进一步提高了变换器的输出功率,利用变压器的漏感与开关管寄生电容构成谐振电路,可以在轻负载条件下实现软开关,减小了开关损耗。变换器采用更少的电容器,进一步减小了变换器的体积。与传统的 DAB 相比,将交流侧的电感移到直流侧,减小了输出电流波纹,降低了无功功率。因此,此变换器具有体积小、高功率输出、损耗小,电流纹波小,无功功率小,效率高等优势。适合作为分布式能源系统,飞机船舶等大功率设备的电力电子转换器。

1　工作原理

1.1　拓扑结构与分析

图 2 显示了基于本文提出的 GaN 器件的大功率双向 DC/DC 转换器。两侧的直流电源通过高频变压器,两个电感器和两个全桥电路连接,其中 S_1、S_4 为低压侧的超前臂,S_2、S_3 为滞后臂,这四个开关管的寄生电容 C_{inss} 与变压器的漏感 L_m 构成谐振电路使低压侧开关管实现零电压开通(ZVS)和零电流关断(ZCS),另一方面,输入电感 L_{in} 可以与开关管

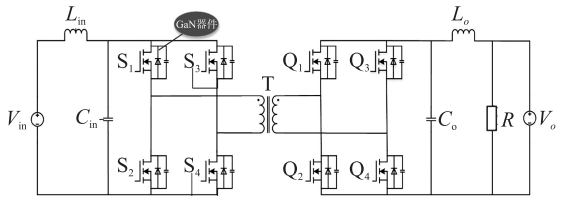


图 2　基于 GaN 器件的大功率 DC/DC 变换器拓扑

的寄生电容和低压开关管的零电压导通(ZVS)形成谐振电路。零电流关断(ZCS)提供条件,另一方面可以有效地吸收回流电流从而降低电路中的无功功率,提高变换器的效率,减少了电路的能量损耗[5]。Q_1、Q_4 为高压侧的超前臂,Q_2、Q_3 为高压侧的滞后臂,这四个开关管构成的全桥电路在高压侧充当整流的作用,其寄生电容与变压器漏感构成谐振电路,使高压侧开关管实现零电压开通(ZVS)和零电流关断(ZCS),输出滤波电感减小了输出电流纹波,提高了系统的稳定性。

1.2　工作模式分析

取决于功率传输的方向,转换器可以具有两种工作模式,升压模式和降压模式。下面将详细分析这两种操作模式。

1.2.1　升压模式

在这种模式下,输入侧为低电压 V_L,输出侧为高电压 V_H,功率从低压侧流向高压侧。一次侧低压电桥执行逆变器操作,二次侧高压电桥执行整流操作以达到稳定的输出电压。放电模式下的各种开关瞬间如图 3 所示。

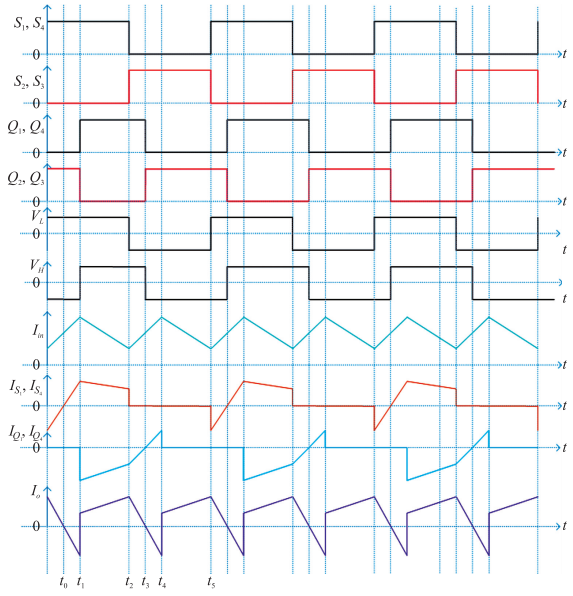


图 3　升压模式下脉冲以及主要波形图

图 3 中的波形描绘了晶体管 S_1 到 D_4 的栅极电压、V_L 和 V_H 桥上的电压、输入电感的电流 I_{in}、一次侧和二次侧的流过开关管的电流 I_{S1} 和 I_{Q4} 以及输出电流 I_O。

(1)模式 1(t_0-t_1)

一次侧开关管 S_1,S_4 导通,I_{S1},I_{S4} 增加直到 t_1 时刻达峰值,一次侧电压 V_L 通过 S_1,S_4 和高频变压器原边线圈为电感 L_{in} 充电,I_L 增加直到 t_1 时刻达峰值。高压侧开关管 Q_2,Q_3 导通,因此二次侧电压被

钳位到$-V_H$。

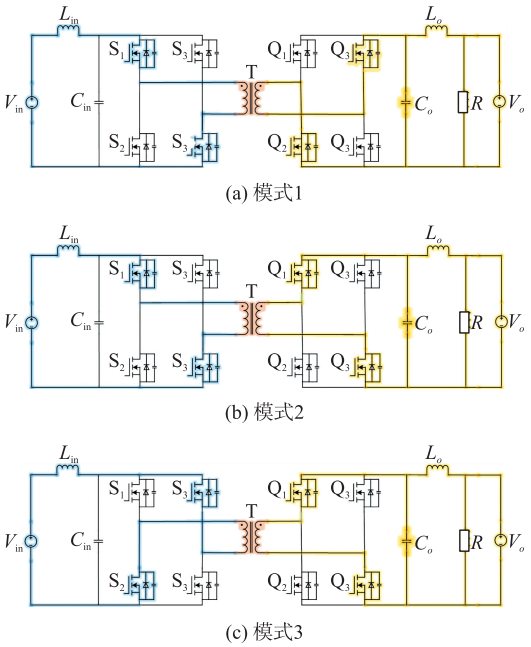
(2)模式 2(t_1-t_2)

初级侧开关管 S_1,S_4 继续导通,与高频变压器原边绕组构成环路,初级侧电流经过变压器耦合到次级侧,此时次级开关管 Q_2,Q_3 零电流关断(ZCS)和 Q_1,Q_4 零电压开通(ZVS),与次级电压 V_O 构成完整环路,从而变压器次级侧电压钳位到 V_H。此时电感 L_{in}中流过的电流持续减小,并且其储存的能量在两侧的电容中流动。

(3)模式 3(t_2-t_3)

一次侧开关管 S_1,S_4 零电流关断,S_2,S_3 零电压开通,因此,一次侧电压 V_{in}被反向钳位到$-V_L$,与高频变压器原边绕组构成回路。初级电流通过高频变压器耦合到次级侧,次级开关管 Q_1,Q_4 保持开通状态,并与次级电压 V_O 形成完整环路。此时,电感 L_{in}电流不断增大,储能增加,同时由电容向负载 R 供电。这就完成了循环的半个周期,在 t_3 时刻循环被重复。

变换器工作的一个重要特点是,由于二极管在所有晶体管的导通瞬间具有零电流,因此消除了由二极管反向恢复引起的损耗。



(a) 模式1

(b) 模式2

(c) 模式3

图 4 升压模式下各个阶段的等效电路图

1.2.2 降压模式

因为本拓扑采用对称设计,其反向降压模式与升压模式原理相同,变换器中电压电流波形与升压模式相似,本节不再赘述。

最大功率传输是在 90°移相时实现的,其中占空比 $D=0.5$。由于所有器件都在 ZVS 条件下工作,在很大的负载范围内都能获得高效率。该电路可以实现升压或降压。升压和降压的转换取决于相移。

2 主电路参数设计

2.1 GaN 器件分析

近年来,氮化镓(GaN)器件已成为商用器件,具有低导通电阻、快速开关速度和在高温度下的工作能力。GaN 器件具有的这些优良器件特性,对 DC/DC 电源应用有着重要的影响。与 Si 器件相比,基于 GaN 器件的 DC/DC 变换器是通过降低器件功率损耗、放宽热设计和通过在更高频率下工作以减小无源元件来提高变换器的功率效率和功率密度的。表 1 显示了具有类似电压和电流额定值的最先进 GaN 和 Si 器件的比较[6-8]。

表 1 器件关键参数比较

参数名称	器件 1	器件 2	器件 3	器件 4
类型	共源共栅	增强	Si-1	Si-2
额定电压/V	650	650	600	650
额定电流(25 ℃)/A	16	15	19	18
导通电阻(125 ℃)/mΩ	260	220	200	223
输出电容/pF	106	71	515	579
栅电荷/nC	6.2	3.0	34.0	35.0
反向恢复电荷/nC	52	0	3 500	7 000

GaN 器件的状态电阻与 Si 器件相当,但寄生电容、栅电荷和反向恢复电荷要比 Si 器件低得多。结果表明,用 GaN 器件代替 Si 器件可以在器件导通损耗基本不变的情况下,显著降低开关损耗和扩大软开关工作范围[9-10]。

2.2 变换器关键参数设计

DAB 转换器的关键方程总结如下[11-12],在高压开关瞬间的峰值电感电流表示为:

$$I_P=\frac{T_S}{4L}[V_O(2d-1)+nV_{in}] \tag{1}$$

式中:I_P 为峰值电感电流,T_S 为开关周期,L 为电感,V_O 为输出电压,d 为占空比,n 为变压器匝数比,V_{in}为输入电压。

输入电感电流 I_{in}的表达式,即低压开关瞬间电流:

$$I_{in}=\frac{T_S}{4L}[nV_{in}(2d-1)+V_O] \tag{2}$$

式中:I_{in}为输入电流。

输出电流 I_O 表达式为:

$$I_O=\frac{T_S nV_{in}}{2L}(d-d^2) \tag{3}$$

将平均输出电流归一化为:

$$I_O'=d-d^2 \tag{4}$$

从式(4)中,将整个控制范围(0~1)代入占空

比 d,可以看出,对于 0.5 的占空比,发生了最大的功率传递。

3　仿真和实验验证

3.1　仿真验证

使用 MATLAB 软件进行了详细的仿真,以验证第 2 节中设计的基于 GaN 的大功率 DC/DC 转换器的性能。本节介绍使用 MATLAB 软件的仿真结果。仿真结果适用于 10 kW DAB 转换器。图 5 显示了转换器的 Simulink 模型。

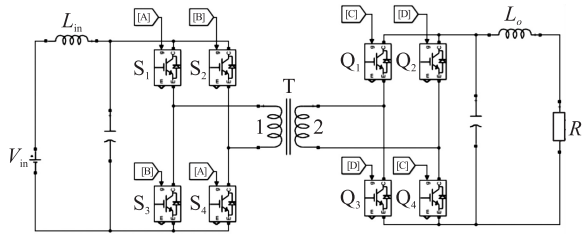


图 5　基于 GaN 的大功率 DC/DC 变换器 Simulink 仿真模型

图 5 中,V_{in} 为输入电压,L_{in} 为输入电感,$S_1 \sim S_4$ 为一次侧 GaN 器件,T 为高频变压器,Q_1-Q_4 为二次侧 GaN 器件,L_0 为输出电感,R 为负载。本仿真模型针对轻载下进行建模仿真,负载仅有 3 Ω。其中仿真模型主要参数如表 2 所示。

表 2　仿真模型主要参数

参数	数值
输入电压 V_{in}/V	60
输出电压 V_O/V	300
输出电流 I_O/A	35
变压器匝比 N	0.2∶1
输入,输出电感 L_{in}、L_O/μH	2.11
负载 R/Ω	3
工作频率 f_S/Hz	50 kHz

图 6 显示了四个开关管的仿真结果。从该图可以看出,转换器的每个开关管在轻载时都可以实现零电压接通(ZVS)和零电流关断(ZCS),减少开关损耗。

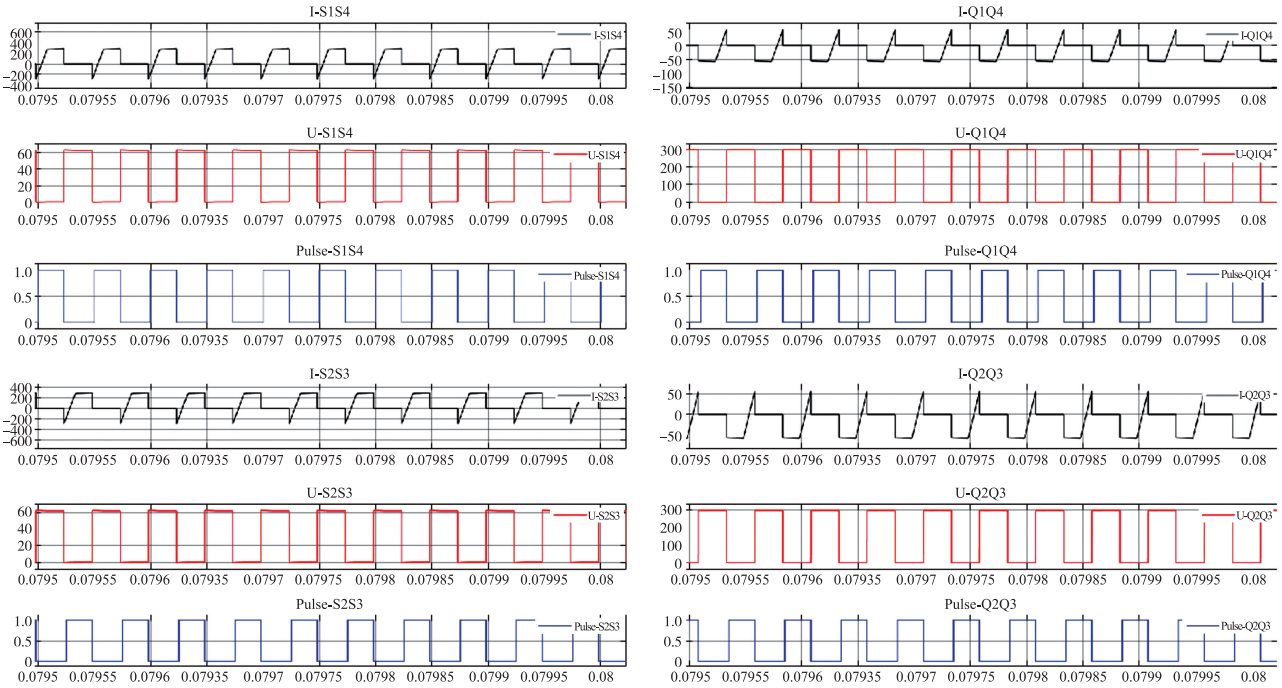


图 6　软开关仿真波形图分析

在图 7 中,I_{o-1} 和 U_{o-1} 是传统双向 DC/DC 变换器处于稳定状态时的输出电流和电压,而 I_{o-2} 和 U_{o-2} 是优化后处于稳态时的输出电流和电压。传统的电流纹波约为 1 A。优化后,电流纹波减小到 0.01 A。可以看到,经过优化,可以有效降低 DC/DC 输出电流和电压纹波,并可以实现输出功率为 10 kW 的稳定输出。

3.2　实验验证

为了验证本文描述的拓扑的准确性,我们设计了具有 20 kHz 功率传输的 7 kW 实验原型。具体参数:$d=0.5$,$V_H=390$ V,$V_L=180$ V,变压器匝数比 $N=1$,耦合电感 $L=61$ μH,负载 $R=5$ Ω。测量结果如图 8 所示。

图 8 显示了全桥产生的电压和变压器电流,图 9 中显示了高压侧 GaN 的电流和电压波形,以及电感电流和输出电压波形。

图 10 显示了低压侧 GaN 的电流和电压波形以及输出电流波形。低压侧 GaN 电压,电流和变压器

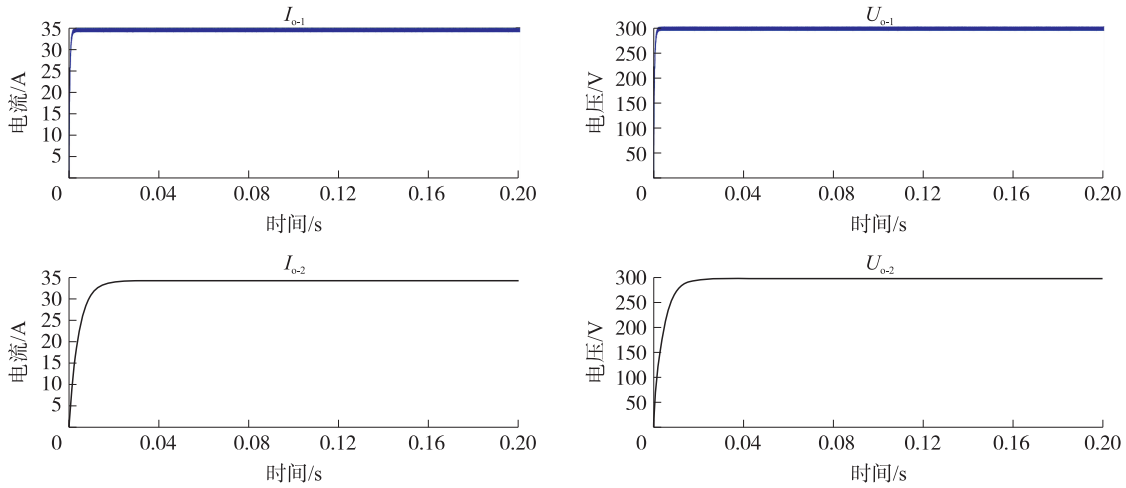


图 7 与传统的 DC/DC 相比输出电流输出电压波形图

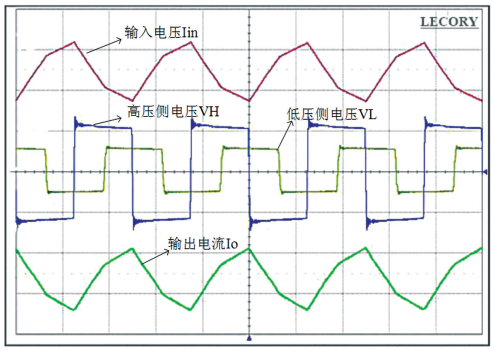


图 8 全桥产生的电压和变压器电流

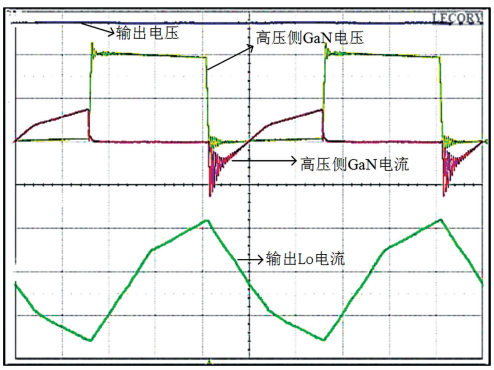


图 9 高压侧 GaN 的电流,电压波形,电感电流和输出电压波形

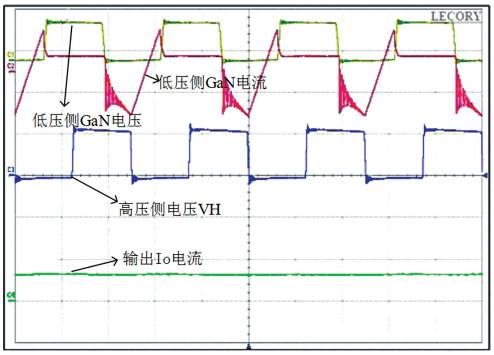


图 10 低压侧 GaN 的电流和电压波形以及输出电流波形

电压中出现的振荡是由于在器件开关瞬变期间电感器和缓冲电容器之间发生谐振。在 7 kW 时,转换器的效率为 90%。预期的稳态值是 $I_P=79.7$ A,$I_O=39.8$ A,$I_{L_1}=40.7$ A,$I_{RM}=51.7$ A,测量结果是 $I_P=73$ A,$I_O=35$ A,$I_{L_1}=31$ A,$I_{RM}=47$ A。实验结果,模拟结果和数学分析之间有很好的一致性。

4 结论

本文介绍了基于 GaN 器件的大功率双向 DC-DC 变换器并对其性能进行验证。变换器已使用 MATLAB 封装建模。它具有体积小、高功率输出、损耗小,电流纹波小,无功功率小,效率高等优势。变换器获得的仿真和实验结果验证了以其作为分布式能源系统,飞机船舶等大功率设备的电力电子转换器具有良好的性能。

参考文献:

[1] De Doncker R W A, Divan D M. A Three-Phase Soft-Switched High-Power-Density DC/DC Converter for High-Power Applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1991, 27(1): 63-73.

[2] 杨子靖,王聪,辛甜. 双向全桥 LLC 谐振变换器的理论分析与仿真[J]. 电源学报,2012,10(3):48-51.

[3] 江添洋,张军明,汪槱生. 同步控制双向 LLC 谐振变换器[J]. 电工技术学报,2015,30(12):87-96.

[4] Peng Fangzheng, Li Hui, Su Guijia. A New ZVS Bidirectional DC-DC Converter for Fuel Cell and Battery Application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 19(1): 54-65.

[5] 郭洪玮,吴学智,王伟. 新型无无功环流的双向隔离型 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报,2018,38(z1):201-208.

[6] Hu B, Brothers J A, Zhang X, et al. An Isolated Phase-Shift-Controlled Quasi-Switched-Capacitor DC/DC Converter with Gallium Nitride Devices[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2019: 609-621.

[7] 何圣仲,覃福班,何晓琼,等. 一种串联超级电容器均压电路

[J]. 电机与控制学报,2019(11):33-41.

[8] 李广地,阮杰,王昆,等. 一种混合调制型三路输出 DC-DC 变换器[J]. 电工技术学报,2019,34(22):4719-4727.

[9] 王议锋,崔玉璐,马小勇,等. 一种交错并联双 Buck 全桥型双向并网逆变器[J]. 电工技术学报,2019,34(21):4529-4539.

[10] Narimani M,Moschopoulos G. An Investigation on the Novel Use of High-Power Three-Level Converter Topologies to Improve Light-Load Efficiency in Low Power DC/DC Full-Bridge Converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2014,61(10):5690-5692.

[11] Xiong S,Wong S C,Tan S C,et al. A Family of Exponential Step-Down Switched-Capacitor Converters and Their Applications in Two-Stage Converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(4):1870-1880.

[12] Moradisizkoohi H,Elsayad N,Mohammed O A. Experimental Demonstration of a Modular,Quasi-Resonant Bidirectional DC/DC Converter Using GaN Switches for Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2019,55(6):7783-7803.



刘晓悦(1965—),女,2008 年获中国矿业大学通信与信息工程博士学位。2010 年,她是美国纽约康奈尔大学的访问学者。现为华北理工大学教授。主要研究方向为电力电子、复杂系统建模与控制、新能源和智能电源;



陈　瑞(1994—),男,2018 年获得洛阳理工学院学士学位。目前,在华北理工大学攻读控制工程学位,研究方向为智能技术及应用。



白尚维(1994—),男,2017 年获得河北建筑工程学院建筑电气与智能化学士学位。目前,正在华北理工大学攻读控制科学与工程硕士学位。研究方向为电力电子、电子电路、新能源和智能电源;