

一种基于 Sepic 的新型高增益 DC/DC 变换器

高 双, 赵世伟, 张龙威, 李江荣

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641)

摘 要: 为了解决 Boost 变换器在极限占空比情况下才能获得高电压增益这一缺点, 在传统的 Sepic 变换器基础上提出一种新型的高增益变换器。该变换器保留了 Sepic 变换器输入电流连续等优点, 通过引入无源钳位电路, 降低了开关管的电压应力, 同时由于耦合电感的漏感与电容发生谐振, 有效减弱了二极管反向恢复问题的影响。详细分析了变换器在每个开关模态的工作过程, 推导出变换器的电压增益表达式和开关器件的电压应力。制作一台 100 W 的实验样机, 通过实验验证了理论分析的正确性。

关键词: Sepic 变换器; 高增益; 无源钳位; 谐振

中图分类号: TN86

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200941

中文引用格式: 高双, 赵世伟, 张龙威, 等. 一种基于 Sepic 的新型高增益 DC/DC 变换器[J]. 电子技术应用, 2021, 47(5): 108-111, 116.

英文引用格式: Gao Shuang, Zhao Shiwei, Zhang Longwei, et al. A novel high step-up DC/DC converter based on Sepic[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(5): 108-111, 116.

A novel high step-up DC/DC converter based on Sepic

Gao Shuang, Zhao Shiwei, Zhang Longwei, Li Jiangrong

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to solve the shortcoming that Boost converter can obtain high voltage gain under the limit duty cycle, a new type of high-gain converter is proposed on the basis of the traditional Sepic converter. The converter retains the advantages of the continuous input current of the Sepic converter, by introducing a passive clamp circuit, the voltage stress of the switch tube is reduced, at the same time, the leakage inductance and the capacitor in the circuit have a resonance process, effectively reducing the impact of the diode reverse recovery problem. The working process of the converter in each switching mode was analyzed in detail, the voltage gain expression of the converter was deduced, and the voltage stress of the switching device were calculated. A 100 W experimental prototype was made, and the correctness of the theoretical analysis is verified through experiments.

Key words: Sepic converter; high step-up; passive clamping; resonance

0 引言

近年来, DC/DC 变换器广泛应用在多种工业领域中。例如在可再生能源的直流微网系统中, 太阳能光伏板、燃料电池等微源都需要通过 DC/DC 变换器与直流母线相连接^[1-4]。然而光伏电池和燃料电池这些微源提供的直流电压较低, 要达到较高的电压增益, 必须要求传统的 Boost 变换器工作在极大的占空比下, 这样不仅会使得开关损耗增加, 而且不利于 Boost 变换器的长期工作^[5-8]。文献[9-11]在传统的 Boost 变换器基础上引入开关电容与开关电感单元, 虽然在一定程度上提高了电压增益, 但是所提升的电压增益有限, 并且所用元器件数量较多, 成本高且不利于控制。除了传统的 Boost 变换器基础上改进得到高增益的 DC/DC 变换器拓扑以外, Sepic 变换器以输入与输出同相、输入电流连续等优点也逐渐应用于可再生能源系统中。文献[12-13]通过

将耦合电感与有源开关电感单元与传统的 Sepic 变换器相结合提高了变换器的电压增益, 但是所用开关器件与电感数量较多, 不利于变换器体积的小型化且变换器的控制设计较困难。本文在文献[14]的基础上提出了一种新型的 Sepic 高增益 DC/DC 变换器, 将无源钳位电路和耦合电感单元引入传统的 Sepic 变换器中, 所提出的变换器具有电压增益高、输入电流连续且纹波小、二极管反向恢复问题轻等优点, 并且只使用一个开关管, 其结构和控制方法较简单。

1 变换器工作原理

1.1 电路拓扑

所提出的变换器等效电路结构图如图 1 所示, 耦合电感等效为理想变压器与励磁电感并联后再与漏感串联, 匝比 $N=N_s/N_p$, 耦合系数 $k=L_m/(L_m+L_k)$, 其中 L_m 为励磁电感, L_k 为漏感。为了便于分析变换器的工作原理,

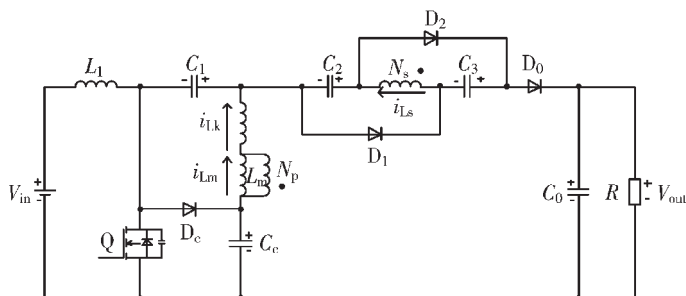


图1 所提变换器等效电路原理图

做以下假设:(1)所提变换器工作在电流连续模式下;(2)开关管与所有二极管均为理想器件;(3)所有的电容值足够大,其电压纹波值视为零。

1.2 工作原理

当变换器工作在稳态时,元件在一个开关周期内的工作波形如图2所示,各个开关模式的等效电路如图3所示。

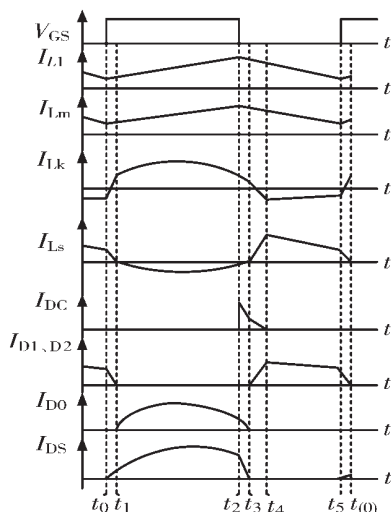


图2 变换器工作波形图

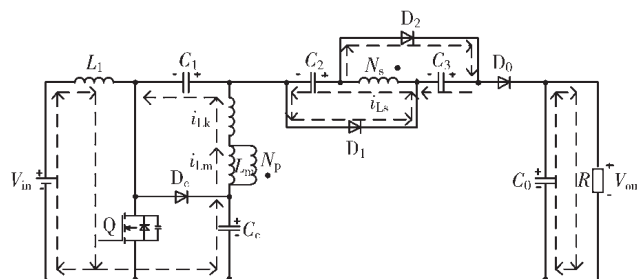
开关模式1 $[t_0 < t < t_1]$:在 t_0 时刻,开关管Q处于零电流开通状态,二极管 D_1 、 D_2 导通,二极管 D_c 、 D_0 关断。耦合电感的漏感电流 I_{Lk} 上升,二次侧电流 I_{Ls} 下降,当 I_{Ls} 下降到零时,此时励磁电感电流值与漏感电流值相等,模式1结束。

开关模式2 $[t_1 < t < t_2]$:在 t_1 时刻,开关管Q、二极管 D_0 导通,二极管 D_1 、 D_2 、 D_c 关断。钳位电容 C_c 在给励磁电感提供能量的同时还为电容 C_1 充电,此时电容 C_2 、 C_3 放电为负载提供能量。在此模式中,漏感与钳位电容 C_c 、电容 C_1 之间发生谐振,此时可以得到如下等式:

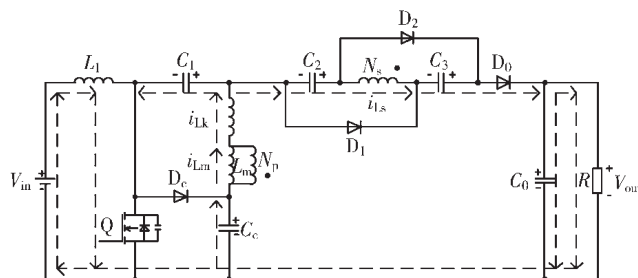
$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_k \frac{C_1 \cdot C_c}{C_1 + C_c}}} \quad (1)$$

式中 f_r 表示谐振频率。

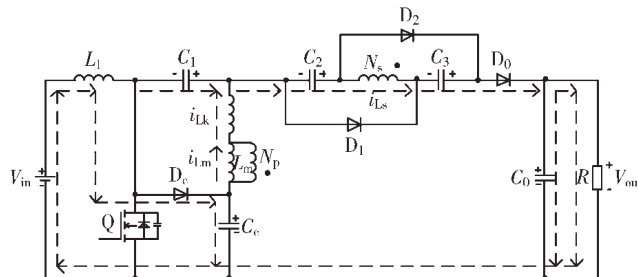
开关模式3 $[t_2 < t < t_3]$:在 t_2 时刻,开关管Q、二极管 D_1 、 D_2 关断,二极管 D_c 、 D_0 导通。输入电流、励磁电感电



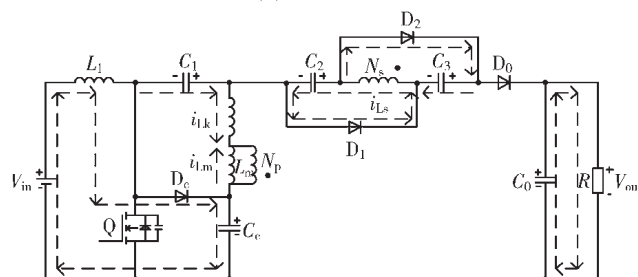
(a) 开关模式1



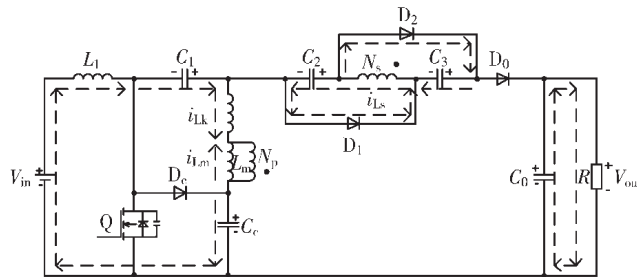
(b) 开关模式2



(c) 开关模式3



(d) 开关模式4



(e) 开关模式5

图3 各个开关模式等效电路图

流、漏感电流均开始下降,当励磁电感电流下降到与漏感电流相等时,此模式结束。

开关模式4 $[t_3 < t < t_4]$:在 t_3 时刻,二极管 D_0 关断,二极管 D_c 、 D_1 、 D_2 导通。耦合电感二次侧通过二极管 D_1 、 D_2

给电容 C_1 、 C_2 充电,输入电压通过钳位二极管 D_c 继续给钳位电容 C_c 充电,此时的负载 R 能量由输出电容 C_0 提供。

开关模式 5 [$t_4 < t < t_5$]: 在 t_4 时刻,钳位二极管 D_c 关断,二极管 D_1 、 D_2 继续导通。电容 C_1 给钳位电容 C_c 充电,耦合电感二次侧通过二极管 D_1 、 D_2 继续给电容 C_1 、 C_2 充电。

2 工作特性分析

2.1 电压增益

为方便分析电路在稳态时的工作特性,忽略模式 1、模式 3 这两个持续时间很短的工作模式。

根据开关模式 2 可得到如下等式:

$$V_{L1} = V_{in} \quad (2)$$

$$V_{Lm} = k(V_{cc} - V_{c1}) \quad (3)$$

$$V_0 = V_{in} + V_{c1} + V_{c2} + V_{c3} + NV_{Lm} - V_{L1} \quad (4)$$

式中 V_{L1} 表示电感 L_1 上的电压,其他以此类推。

根据开关模式 4 可得到如下等式:

$$V_{L1} = V_{cc} - V_{in} \quad (5)$$

$$V_{Lm} = V_{c1} \quad (6)$$

$$V_{c2} = V_{c3} = NV_{Lm} \quad (7)$$

结合式(2)、(3)、(5)、(6),再根据输入电感 L_1 与励磁电感 L_m 的伏秒平衡原理可得:

$$V_{cc} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (8)$$

$$V_{c1} = \frac{kD}{1-D+kD} \cdot \frac{V_{in}}{1-D} \quad (9)$$

忽略实际工作过程中漏感对变换器的影响,联立式(4)、(6)、(7)、(9),得到理想情况下电压增益 M 的表达式为:

$$M_{CCM} = \frac{V_0}{V_{in}} = \frac{N(1+D)+D}{1-D} \quad (10)$$

图 4 给出了当 $N=2$ 时,本文所提变换器与传统 Sepic 变换器、文献[15]所提变换器电压增益对比图。可以明显地看出,本文所提变换器具有更高的电压增益。

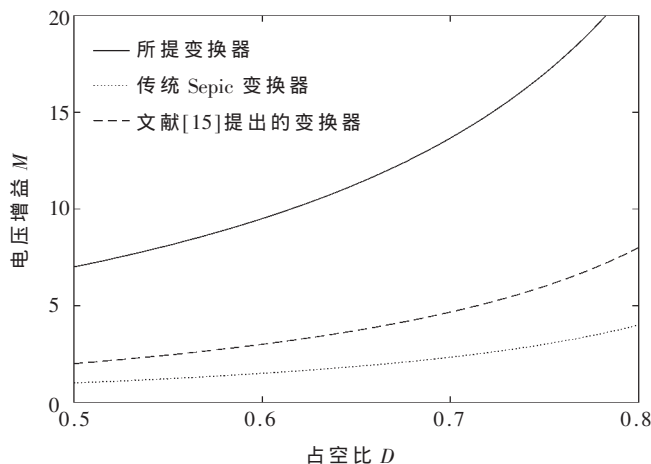


图 4 各变换器电压增益对比

2.2 开关器件的电压应力

开关管 Q 以及二极管上的电压应力表达式如下:

$$V_{DS} = V_{Dc} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (11)$$

$$V_{D1} = V_{D2} = \frac{NV_{in}}{1-D} \quad (12)$$

$$V_{D0} = \frac{(N-1)V_{in}}{1-D} \quad (13)$$

2.3 变换器之间的工作特性比较

表 1 给出了文中所提变换器与其他变换器之间的一些数据特性对比。从表 1 中可以看到,本文所提变换器有着更高的电压增益以及更低的开关管电压应力,并且所需要的二极管数量也远少于文献[15]中的变换器,有效降低了电路的成本以及控制的复杂性。

表 1 不同变换器之间的工作特性对比

变量名称	所提变换器	传统 Sepic 变换器	文献[15]所提变换器
电压增益	$\frac{N(1+D)+D}{1-D}$	$\frac{D}{1-D}$	$\frac{2D}{1-D}$
开关管电压应力	$\frac{1}{1-D} V_{in}$	$\frac{1}{1-D} V_{in}$	$\frac{1+D}{1-D} V_{in}$
输出二极管电压应力	$\frac{N-1}{1-D} V_{in}$	$\frac{1}{1-D} V_{in}$	$\frac{1+D}{1-D} V_{in}$
开关管数量	1	1	1
二极管数量	4	1	7
电容数量	5	2	3

3 实验验证

为了验证理论分析的正确性以及所提变换器的可行性,搭建了一台 100 W 的实验样机,样机的实验参数为:输入电压 $V_{in}=20$ V,输出电压 $V_0=200$ V,输出功率 $P_0=100$ W,开关频率 $f_s=50$ kHz,匝比 $N=2.5$ 。满载时的实验波形如图 5 所示。示波器的时基为 4 μ s/格。

图 5(a)给出了变换器的驱动波形以及输入电感电流、漏感电流波形图。当变换器满载工作时,输出电压在占空比为 0.6 左右达到了 200 V。由于漏感的存在,会造成一定值的占空比丢失,这也与理论分析保持一致。

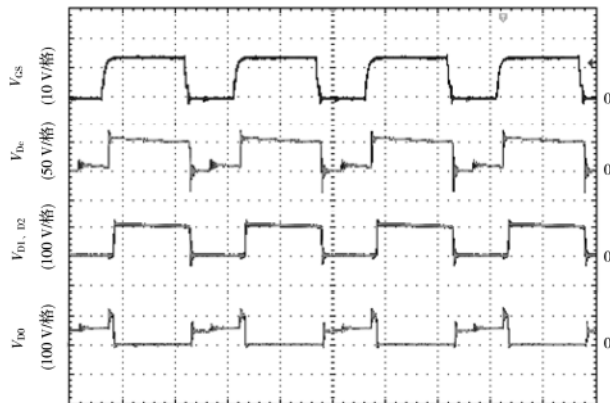
图 5(b)、(c)、(d)是开关管和二极管两端的电压和电流波形。如 1.2 节分析所示,在开关管开通的过程中,漏感 L_k 与钳位电容 C_c 、电容 C_1 之间有一个谐振过程,因此其电流波形并不是完全呈线性变化的,开关管也基本实现了零电流开通。同理由于谐振的存在,输出二极管 D_0 的电流波形呈正弦波变化,有效减轻了反向恢复的影响。

图 5(e)是电容以及输出电压波形。电容 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_c 的电压分别为:38 V、58 V、55 V、60 V,其实际值与理论计算值基本一致。

图 6 是变换器的实测与理论电压增益对比图。从图中可以看出,如果忽略漏感所造成的占空比丢失,实际测得的电压增益曲线与理论计算的增益曲线基本上是相一致的。

(a) 驱动电压及 I_{L1} 、 I_{Lk} 波形

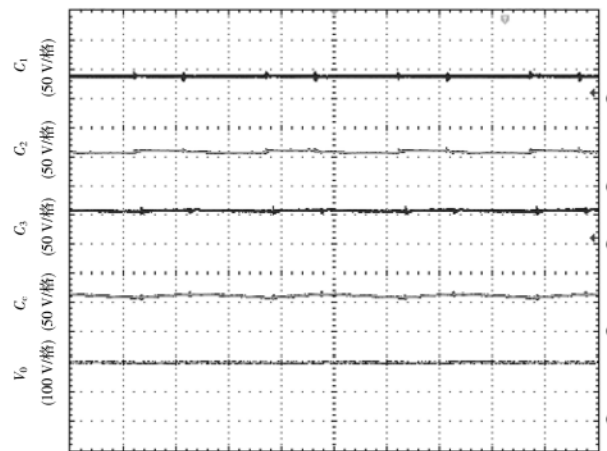
(b) 开关管电压及电流



(c) 二极管两端电压



(d) 二极管电流



(e) 电容及输出电压

图 5 满载时实验波形

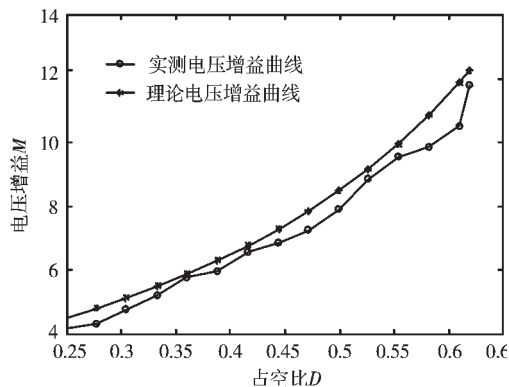


图 6 理论与实测电压增益对比

4 结论

本文提出一种新型的 Sepic 高增益变换器,在保留经典 Sepic 变换器输入电流连续和低纹波优点的基础上,通过引入耦合电感单元,改变耦合电感匝比来获得较高的电压增益。由于变换器在工作过程中漏感与电容之间产生的谐振,降低了开关管的电流峰值,同时也极大地减轻了二极管的反向恢复问题。针对上述优点,所提出的高增益变换器适合应用在可再生能源系统中。

参考文献

[1] 姚佳.基于耦合电感的高增益 DC-DC 拓扑及其建模研

(下转第 116 页)

设计,满足系统对建立及保持时间的要求。

(2)在服务器主板设计时,时钟信号匹配电阻位置对信号质量影响很大,同时注意信号间等长问题。

(3)线缆和连接器部分,主要注意信号和地管脚的比例及线缆和连接器组装时线缆接地导体要就近焊接到地管脚,不允许两个线缆的接地导体焊接到同一个地管脚,否则容易造成信号间的干扰。

(4)智能网卡设计时,可以增加缓冲芯片以增加 NCSI PHY 芯片的驱动能力,同时注意缓冲芯片的摆放位置,对于总体走线较短的链路,可以使用跨接电阻,不焊接缓冲芯片进一步降低成本。

NCSI 接口时钟为 50 MHz,数据速率只有 100 Mb/s,但稍有不慎很容易出问题,一方面是因为服务器和智能网卡设计时,都不知道对方走线长度及芯片驱动能力;另一方面是该频段内,普通的电气工程师缺乏高速高频的知识,意识不到可能出问题的地方,而对于专门的高速信号完整性工程师而言,更多关注 1 Gb/s 以上高速差分信号,容易遗漏。常见的三维电磁场仿真软件在几十兆赫兹的相对低频段内主要通过线性外推得到结果,仿真误差较大,今后需要重视该频段内的仿真和测试拟合问题。此外,电路原理图设计正确只是第一步,印制电路板上元件的布局布线也会严重影响产品功能,一件成功的产品是电路设计、布局布线、散热、机械等多方面共同成果,尤其对于可靠性要求很高的企业级产品更是如此。

参考文献

- [1] DMTF.Network Controller Sideband Interface(NC-SI) specification, version: 1.1.0[Z].2015.
- [2] Eric Bogatin.Signal and power integrity-simplified[M].Second Edition, PRENTICE HALL, 2010.
- [3] POZAR D M.微波工程(第三版)[M].张肇仪,周乐柱,吴德明,译.北京:电子工业出版社,2010.
- [4] ASPEED Technology Inc.AST2500 integrated remote management processor A2 datasheet, V1.31[Z].2016.
- [5] ASPEED Technology Inc., AST2500/AST2520 design guide, V1.3[Z].2017.
- [6] Reduced Media Independent Interface(RMII) Consortium. RMII Specification, Rev.1.2[Z].1998.
- [7] Mellanox Technologies.ConnectX-5 Adapter IC Datasheet [DB/OL].[2020-09-24]www.mellanox.com.
- [8] IBIS Open Forum.I/O Buffer Information Specification, Version 6.0[Z].2013.
- [9] OTT H W.Electromagnetic compatibility engineering[M]. WILEY, John Wiley & Sons, 2009.
- [10] JEDEC.DDR4 SDRAM STANDARD, JESD79-4A[Z].2013.
- [11] PCI-SIG.PCI express base specification revision 3.1a[Z].2015.
- [12] PCI-SIG.PCI express card electromechanical specification revision 3.0[Z].2013.
- [13] IEEE.IEEE802.3, IEEE standard for Ethernet[S].2018.
- [14] SFF Committee.SFF-8661, Specification for QSFP+ 4X

(下转第 121 页)

(上接第 111 页)

- [1] 侯世英,冯斌,颜文森,等.基于有源开关电感网络和 DCM 单元组的 DC-DC 升压变换器[J].电机与控制学报,2017,21(7):20-28.
- [2] 刘俊峰,胡仁俊,曾君.具备高增益的非隔离三端口变换器[J].电工技术学报,2019,34(3):529-538.
- [3] 熊泽成,尹强,任晓丹.高增益隔离 DC-DC 变换器的研究[J].电气传动,2017,47(12):39-43.
- [4] 王鹏.基于有源网络的高增益变换器[J].电气传动,2019,49(5):63-66.
- [5] 丁杰,赵世伟,文楚强.单开关低电压应力的高增益 Boost 变换器[J].电子技术应用,2019,45(12):125-128.
- [6] MOHSENI P, HOSSEINI S H, SABAHI M, et al. A new high step-up multi-input multi-output DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5197-5208.
- [7] 高珊珊,王懿杰,徐殿国.一种高频高升压比改进型 Sepic 变换器[J].电工技术学报,2019,34(16):3366-3372.
- [8] 丁杰,赵世伟,尹华杰.新型软开关隔离型高增益 DC-DC 变换器[J].电工电能新技术,2020,39(6):18-25.
- [9] 刘明杰,陈艳峰,张波,等.一种混合开关电感和开关电容的高增益 DC-DC 变换器[J].电源学报,2020,18(4):85-93.
- [10] 王挺,汤雨.基于开关电感的有源网络升压变换器研究[J].电子技术应用,2014,29(12):73-79.

- [11] 侯世英,冯斌,颜文森,等.基于有源开关电感网络和 DCM 单元组的 DC-DC 升压变换器[J].电机与控制学报,2017,21(7):20-28.
- [12] 郭瑞,韩冬,任佳炜.一种高增益耦合电感双管 Sepic 变换器[J].电机与控制学报,2020,24(7):130-138.
- [13] 李洪珠,曹人众,张垒,等.磁集成开关电感交错并联 Buck/Boost 变换器[J].电机与控制学报,2018,22(6):87-95.
- [14] HSIEH Y P, CHEN J F, LIANG T J. Novel high step-up DC-DC converter for distributed generation system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1473-1482.
- [15] 李洪璠,李洪亮,李洪珠,等.磁集成开关电感高增益 Sepic 变换器[J].电力电子技术,2017,51(12):53-55.

(收稿日期:2020-09-25)

作者简介:

高双(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:直流微电网中的高增益 DC/DC 变换器设计。

赵世伟(1979-),男,副教授,主要研究方向:电机设计及其控制、直流微电网。

张龙威(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:分布式能源系统应用管理。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所