

# 新型多输入端口升降压DC-AC变换系统

赖国清<sup>1</sup>, 赖群<sup>1</sup>, 李铭<sup>2</sup>, 冯超坤<sup>1</sup>

(1. 广东电网公司云浮供电局, 广东 云浮 527300;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**在可再生能源发电应用中,多输入端口功率变换系统是一种性价比较高的电能转换方案。提出一种基于单级非隔离升降压功率变换单元的多输入端口DC-AC变换系统。各种直流源经过各自输入端口搭配的全桥电路后进行串联,再通过基于Buck-Boost拓扑的主变换单元处理后产生正弦波交流输出。主输入端口对应的全桥电路高频工作,从输入端口对应的全桥电路工频工作。分析该新型变换系统的工作模式和稳态特性,并使用仿真软件PSIM对分析结果进行了验证。制作并测试了一台峰值效率为96.1%、功率为500 W的硬件样机。实验结果表明,该多输入端口DC-AC变换系统具有效率较高、增益范围宽和结构较为简单的特点。

**关键词:**多输入端口;升降压;逆变器;单级系统;非隔离

**中图分类号:**TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24374

## Novel Multi-input-port Buck-Boost DC-AC Conversion System

LAI Guoqing<sup>1</sup>, LAI Qun<sup>1</sup>, LI Ming<sup>2</sup>, FENG Chaokun<sup>1</sup>

(1. Yunfu Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid, Yunfu 527300, Guangdong, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

**Abstract:** In the application of renewable energy power generation, multi-input-port power conversion system is a high cost-effectiveness option. A multi-input-port DC-AC conversion system based on single-stage non-isolated buck-boost power conversion cell was proposed. Each type of DC source flows into the full-bridge circuit of corresponding input port and cascaded together, then, the total input voltage was processed by main conversion cell based on Buck-Boost topology and sinusoidal AC output was generated. Full-bridge circuit of master input port works in high frequency and full-bridge circuit of slave input port works in low frequency. Operation modes and steady-state characteristics of the proposed novel conversion system were analyzed. Furthermore, PSIM simulation software was employed to verify the analysis results. A 500 W hardware prototype with 96.1% peak efficiency was fabricated and tested. The experimental results demonstrate that the proposed multi-input-port DC-AC conversion system features of relatively high efficiency, wide gain range and simple system structure.

**Key words:** multi-input-port; buck-boost; inverter; single-stage system; non-isolation

风能、太阳能等可再生能源的利用和发展对于降低碳排放有十分积极的推动作用。考虑到这些可再生能源输出的间歇性特点,发电系统中通常需要增加储能环节作为能量缓冲<sup>[1-3]</sup>。使用多输入端口DC-AC变换系统将各种可再生能源和储能环节集成起来并相互备份,对于并网发电或交流负载的独立供电来说是一种较为理想的方案<sup>[4-7]</sup>。

根据功率电路级联的数目,多输入端口DC-AC系统通常分为单级系统和多级系统<sup>[8-10]</sup>。由于

多级系统一般由多输入端口DC-DC变换器与集中型DC-AC变换器级联而成,电路元件较多、成本较高,电路控制相对复杂,效率相对较低<sup>[11-13]</sup>。因此,单级系统得到越来越多的研究和开发。根据电路中是否存在变压器,单级系统又可分为隔离型和非隔离型<sup>[14-16]</sup>。非隔离型DC-AC变换系统具有成本低、重量轻、结构简单、功率密度高等特点。文献[17-18]提出一种基于Z源逆变器系统的多输入端口DC-AC变换系统,具有模块化、单级架构、能够升降压和允许直通的优点。但是

**基金项目:**南方电网公司重点科技项目(GDKJXM20198298)

**作者简介:**赖国清(1986—),男,硕士,工程师,主要研究方向为新能源发电技术、电力电子技术,Email:laiguqing@yf.gd.csg.cn

电路中电感、电容等无源器件较多,无源器件通常尺寸较大,不利于功率密度的提升;文献[19-20]研究一种差分输出型双输入端口单级DC-AC变换器,以Boost拓扑和Cuk拓扑分别作为功率处理单元,每组变换单元的输出为直流偏置叠加交流正弦波,两组输出相减后得到交流输出给负载供电。这种方案具有非隔离和单级架构的优点,但是电路中的无源器件同样较多,并且需要严格保证两组输出的直流偏置一致,控制复杂;文献[21]提出一种基于六开关全桥拓扑的双输入端口DC-AC变换器,具有开关器件电压应力低和电容数量少的优点。但是电路中的电感数目依然较多,不利于系统集成度提升;文献[22-23]研究基于级联型全桥架构的多输入端口多电平DC-AC变换系统,具有输出波形质量高、模块化设计和可靠性高等优势。这种方案通常需要保持直流链环节电压一致以保证输出波形质量。直流输入侧不与大地连接,在光伏输入应用中需要考虑漏电流问题。此外,这种架构通常只能实现降压,直流输入侧电压范围较窄。

本文提出一种单电感单级架构的新型多输入端口DC-AC变换系统,具有非隔离和升降压的特征。其中,主输入端口对应主变换单元,由高频工作的全桥电路与一个电感和一个双向开关组成,本质上是Buck-Boost拓扑。各个从输入端口对应工频工作的全桥电路,每个全桥电路的输出以及主变换单元中的全桥电路输出相互串联,从而作为一个整体输入源进行升降压DC-AC变换。因此,与级联型全桥架构不同,本文所提方案的各个输入端口电压不需要保持一致。在一个开关周期内,整个变换系统只有两个功率器件高频动作,并且其中一个功率器件能够实现零电压开通。而在级联型全桥架构中,每一个全桥都有两个功率器件高频动作。

## 1 拓扑结构与工作模式

### 1.1 拓扑结构

图1展示了新型多输入端口DC-AC变换系统的拓扑结构。图中, $V_1$ 对应主输入端口和主变换单元; $S_{a1}$ 和 $S_{a2}$ 高频动作, $S_{a3}$ 和 $S_{a4}$ 工频动作;每个桥臂中的单向通流组合开关分别由 $D_{a1}$ , $S_{a3}$ 和 $D_{a2}$ , $S_{a4}$ 实现,用来在续流阶段强迫电感 $L_f$ 的电流流向输出端; $V_2 \sim V_n$ 分别对应从输入端口2到输入端口 $n$ 的输入电压,相应的全桥电路均工频动

作; $S_{a5}$ 和 $S_{a6}$ 以共源极的方式组成双向开关,在续流阶段为电感提供通流回路; $S_{b1} \sim S_{b4}$ 分别为从端口2所对应全桥电路中4个开关器件, $S_{c1} \sim S_{c4}$ 分别为从端口3所对应全桥电路中4个开关器件,后面以此类推。主变换单元电路本质上是Buck-Boost拓扑,因此该多输入端口DC-AC变换系统具有升降压的能力。

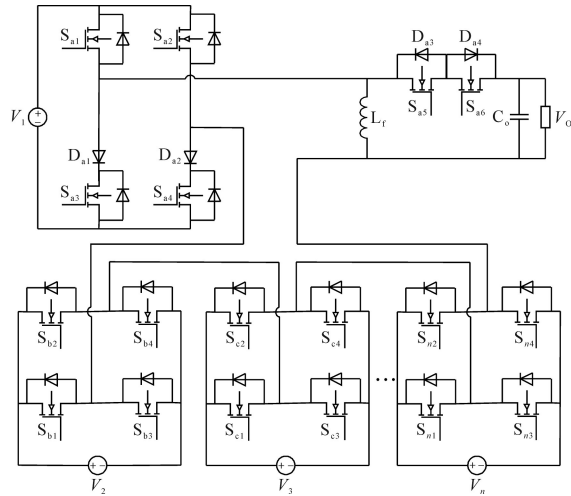


图1 新型DC-AC变换系统拓扑结构图

Fig.1 Topological block diagram of novel DC-AC conversion system

### 1.2 工作模式

以交流正半周期为例,新型多输入端口DC-AC变换系统中存在4种工作模式,它们的等效电路如图2所示。 $S_{a2}$ 和 $S_{a6}$ 高频互补动作, $S_{a3}$ , $S_{a5}$ , $S_{(b \sim n)3}$ 和 $S_{(b \sim n)2}$ 均保持导通。其中,下标 $b \sim n$ 代表端口2到端口 $n$ ,下标 $a \sim n$ 代表端口1到端口 $n$ , $V_{1 \sim n}$ 代表输入源 $V_1$ 到 $V_n$ 的串联叠加。各个工作模式中开关器件的状态和时序如图3所示。

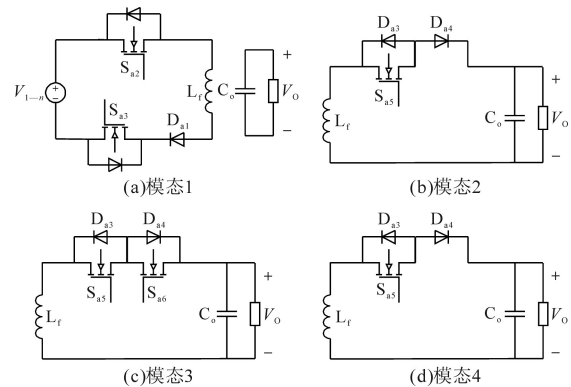


图2 交流正半周期时的工作模式

Fig.2 Operation modes in AC positive half line cycle

模式1( $t_0 < t < t_1$ ): $S_{a2}$ , $S_{a3}$ , $S_{a5}$ , $S_{(b \sim n)3}$ , $S_{(b \sim n)2}$ 和 $D_{a1}$ 导通,其它开关器件关断。输入电压 $V_{1 \sim n}$ 加在电感两端,电感电流线性上升,负载由电容提供

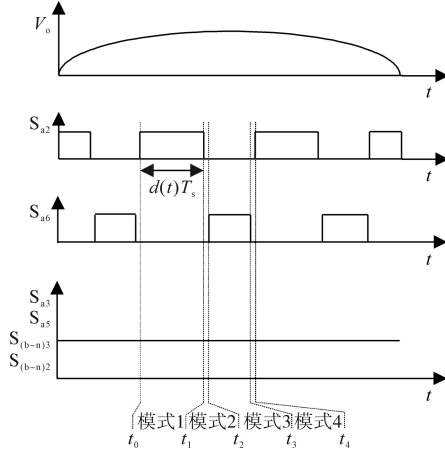


图3 交流正半周期时工作模式的时序图

Fig.3 Time sequence of operation modes in AC positive half line cycle

能量。

$$\begin{cases} v_{L_f} = V_{1-n} \\ i_{C_o} = i_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: $v_{L_f}$ 为电感电压; $i_o$ 为负载电流; $i_{C_o}$ 为电容 $C_o$ 的电流。

模态 2 ( $t_1 < t < t_2$ ):  $S_{a3}$ ,  $S_{a5}$ ,  $S_{(b-n)3}$ ,  $S_{(b-n)2}$  和  $D_{a4}$  导通,其它开关器件关断。电感电流进行续流并线性下降,电感储存的能量提供给负载和电容。这段死区时间用来避免输入侧和输出侧直通。同时  $D_{a4}$  的导通也为  $S_{a6}$  创造了零电压开通的条件。

$$\begin{cases} v_{L_f} = -V_o \\ i_{C_o} = i_{L_f} - i_o \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i_{L_f}$ 为电感电流。

模态 3 ( $t_2 < t < t_3$ ):  $S_{a3}$ ,  $S_{a5}$ ,  $S_{(b-n)3}$ ,  $S_{(b-n)2}$ ,  $D_{a4}$  和  $S_{a6}$  导通,其它开关器件关断。电感电流继续续流并线性下降,电感储存的能量持续提供给负载和电容。

$$\begin{cases} v_{L_f} = -V_o \\ i_{C_o} = i_{L_f} - i_o \end{cases} \quad (3)$$

模态 4 ( $t_3 < t < t_4$ ):  $S_{a3}$ ,  $S_{a5}$ ,  $S_{(b-n)3}$ ,  $S_{(b-n)2}$  和  $D_{a4}$  导通,其它开关器件关断。这段死区时间用来避免输入侧和输出侧直通。电感电流继续续流并线性下降,电感储存的能量持续提供给负载和电容。此模态与模态二相同。

$$\begin{cases} v_{L_f} = -V_o \\ i_{C_o} = i_{L_f} - i_o \end{cases} \quad (4)$$

## 2 稳态特性与调制策略

### 2.1 稳态特性

在新型多输入端口 DC-AC 变换系统的分析过程中,做如下假设:1)所有器件均为理想状态;

2)开关频率远高于工频频率;3)忽略死区时间对分析过程的影响。

在 1 个高频开关周期中,电感的伏秒平衡关系如下式所示:

$$V_{1-n} \cdot d(t) \cdot T_s = V_o \sin(\omega t) \cdot [1 - d(t)] \cdot T_s \quad (5)$$

式中: $d(t)$ 为  $S_{a1}$  (负半工频周期)或  $S_{a2}$  (正半工频周期)的占空比; $T_s$ 为开关周期; $V_o$ 为输出电压幅值。

对式(5)进行整理后可得电压增益  $M(t)$  如下式所示:

$$M(t) = \frac{d(t)}{1 - d(t)} \quad (6)$$

根据前文对工作模式的分析结果,可以得到各个开关器件的电压应力情况,如表 1 所示。由于多输出端口串联的原因,可以看出,高频动作的开关器件  $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ ,  $D_{a1}$  和  $D_{a2}$  承受较高的电压应力。

表 1 开关器件的电压应力

Tab.1 Voltage stress of switching devices

器件名称	电压应力	器件名称	电压应力
$S_{a1}, S_{a2}, S_{a5}, S_{a6}$	$V_{1-n} + V_o$	$S_{c1} \sim S_{c4}$	$V_3$
$S_{a3}, S_{a4}$	$V_1$	$S_{n1} \sim S_{n4}$	$V_n$
$S_{b1} \sim S_{b4}$	$V_2$	$D_{a1}, D_{a2}$	$V_{1-n} + V_o$

根据电感的电气特性方程,其电流纹波如下式所示:

$$\Delta i_{L_f} = \frac{V_{1-n} d(t) T_s}{L_f} \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)后得到电感电流纹波与输入电压、输出电压和感量的关系,如下式:

$$\Delta i_{L_f} = \frac{V_{1-n} V_o \sin(\omega t) \cdot T_s}{L_f [V_{1-n} + V_o \sin(\omega t)]} \quad (8)$$

当  $\omega t = \pi/2$  时,电感电流纹波达到最大,如下式:

$$\Delta i_{L_{fmax}} = \frac{V_{1-n} V_o T_s}{L_f (V_{1-n} + V_o)} \quad (9)$$

定义负载电阻为  $R_o$ ,则可得电感和开关器件的电流应力(即电流最大值)如下式:

$$i_{L_{fmax}} = i_{S_{max}} = \frac{V_o}{R_o} + \frac{V_{1-n} V_o T_s}{2L_f (V_{1-n} + V_o)} \quad (10)$$

式中: $i_{S_{max}}$ 为开关器件的电流应力。

### 2.2 调制策略

新型多输入端口 DC-AC 变换系统基于高频三角波载波  $v_c$  和控制信号  $v_m$  相互比较的方式产生 SPWM 信号,如图 4 所示。控制信号  $v_m$  由闭环控制回路中的误差放大器产生。

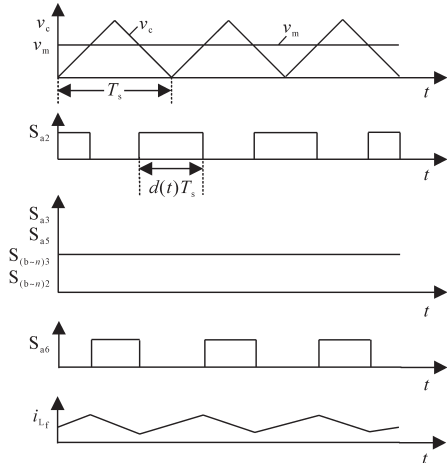


图4 新型DC-AC变换系统的调制过程

Fig.4 Modulation process of novel DC-AC conversion system

为了产生正弦波输出,根据式(6)可以反推出控制信号 \$v\_m\$ 应具有如下式所示的波形包络形态:

$$v_m = k \cdot \frac{V_o |\sin(\omega t)|}{V_1 + V_o |\sin(\omega t)|} \quad (11)$$

式中:\$k\$为比例系数。

主要由输入电压和输出电压采样电路的分压比以及闭环控制回路中的相关增益系数决定。

图5给出了调制策略的具体实施逻辑框图。输出电压与地电平比较后得到工频方波信号,即为 \$S\_{a3}\$, \$S\_{(b-n)3}\$ 和 \$S\_{(b-n)2}\$ 的门极驱动。该信号经过反相后得到 \$S\_{a4}\$, \$S\_{(b-n)1}\$ 和 \$S\_{(b-n)4}\$ 的门极驱动。其余开关器件的门极驱动产生过程如图中所示,这里不再赘述。

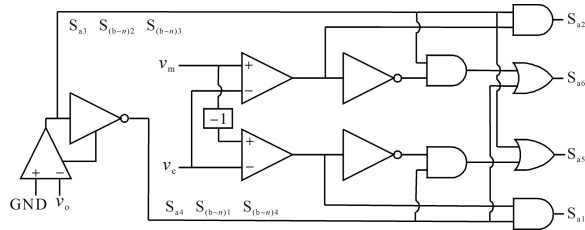


图5 调制过程逻辑框图

Fig.5 Logical block diagram of modulation process

### 3 仿真与实验

使用软件工具 PSIM 对本文研究的新型多输入端口升降压 DC-AC 变换系统进行仿真分析。考虑3个输入端口的情况,每个输入端口的直流电压为 50 V。仿真电路中其它的主要参数为:输入电压 \$V\_{1-3}=150\$ V,开关频率 \$f\_s=45\$ kHz,电感 \$L\_f=1.2\$ mH,电容 \$C\_o=22\$ μF,输出电压 \$V\_o\$ 有效值 220 V,输出电压 \$V\_o\$ 频率 50 Hz,负载 \$R\_o=90\$ Ω。其中 \$V\_{1-3}\$ 是指端口 1 到端口 3 的串联总电压。

依据前文对电路结果的理论分析和探讨的

调制策略进行仿真实验,获得相关仿真波形如图6所示。其中,自上而下分别给出了电感电流、\$S\_{a2}\$ 的门极驱动、\$S\_{a3}\$ 的门极驱动、\$S\_{a6}\$ 的门极驱动、\$S\_{a2}\$ 的漏源电压以及单向通流开关组合 \$S\_{a3}\$ 和 \$D\_{a1}\$ 的端电压。

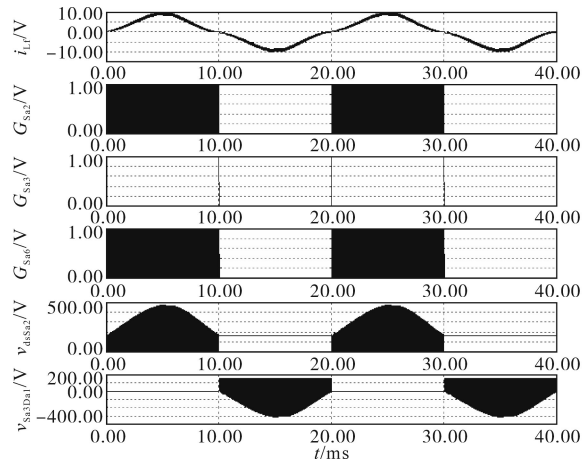


图6 新型DC-AC变换系统中主要电量波形

Fig.6 Waveforms of main electric variables in novel DC-AC conversion system

图7为图6中相关电量波形的细部放大。可以看出,在正半工频周期内,\$S\_{a2}\$ 和 \$S\_{a6}\$ 进行高频互补开关动作,\$S\_{a3}\$ 则一直保持开通状态。\$S\_{a2}\$ 的电压应力为输入电压与输出电压之和,与前文的理论分析结果一致。

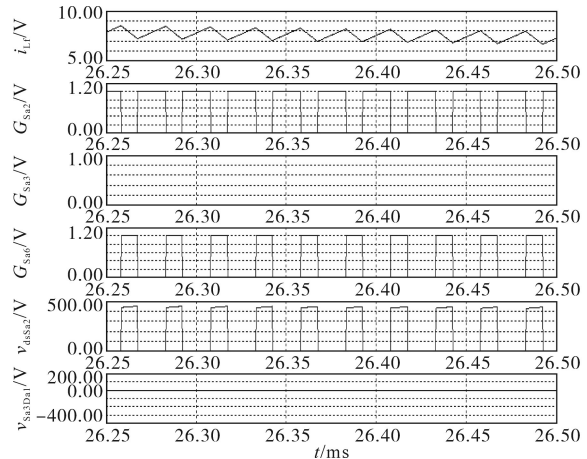


图7 主要电量波形的细部放大图

Fig.7 Detailed zoom-in of main electrical variables waveforms

由于本文研究的多输入端口 DC-AC 变换系统本质上是各个端口的输入电源串联后作为一个统一的输入电源进行升降压变换,因此并不要求各个输入电源电压完全相同。以三输入端口为例,通过仿真实验来验证各个输入电源电压不同的情况,仿真结果如图8所示。波形从上到下依次为端口 1 输入电压 160 V、端口 2 输入电压 100 V、端口 3 输入电压 190 V、输出电压以及负载



电流。可以看出,各个输入端口电压的差异并不会影响该DC-AC变换系统的正常工作。

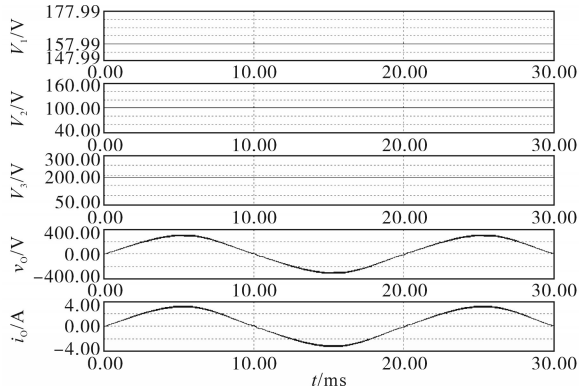


图8 各端口输入电压不同时的输出电压和负载电流波形  
Fig.8 Waveforms of output voltage and load current under different input port voltage

调试一台功率为500 W的样机进行硬件实验。样机主要参数与仿真参数相同,开关器件选择时考虑1.5倍左右的余量。 $S_{a3}, S_{a4}, S_{b(1\sim4)}, S_{c(1\sim4)}$ 和 $S_{n(1\sim4)}$ 选择英飞凌公司的IPB049N08N5ATMA1,额定电压80 V,典型通态电阻4.9 mΩ。考虑到 $S_{a1}, S_{a4}, S_{a5}$ 和 $S_{a6}$ 较高的电压应力,选择时偏向门极电荷较低的型号以减小开关损耗,本文选择英飞凌公司的IPZ65R065C7,额定电压为650 V,典型通态电阻65 mΩ,典型门极电荷为65 nC。图9分别给出了负载电流和控制信号的波形。电感电流经过输出电容滤波后得到具有较低THD的负载电流。由于正负半周之间换流时需要添加死区以防止桥臂直通,负载电流在过零时存在一定畸变。为了减小畸变对波形质量的影响,死区时间以过零点为中心应尽量保持对称。

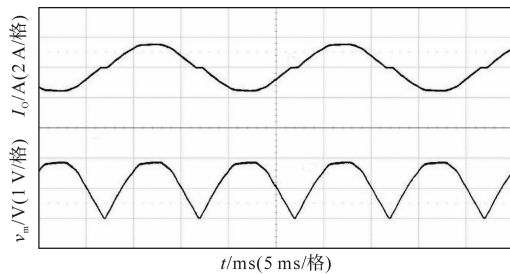


图9 负载电流和调制信号的波形

Fig.9 Waveforms of load current and modulation signal

图10分别测试了20%~100%负载中5个负载点的效率值,并拟合出实验样机的效率曲线。图中,横坐标 $P_o$ 为负载功率,纵坐标 $\eta$ 为效率。所测负载范围内效率均高于94%,峰值效率达到96.1%。

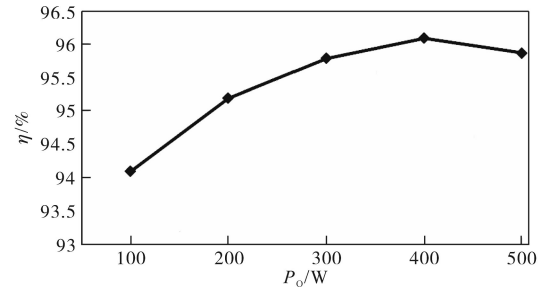


图10 实验样机效率曲线

Fig.10 Efficiency curve of the experimental prototype

## 4 结论

对所提出的一种新型单电感单级非隔离升降压DC-AC变换系统进行了工作模式和稳态特性的分析。给出了电压增益、电压应力和电流应力等指标的表达式。给出了相应的调制策略,在任意一个开关周期内,只有两个开关器件高频动作,并且其中一个开关器件可实现零电压开通。通过仿真分析和硬件样机测试验证了理论分析的正确性。在20%~100%负载范围内,样机效率均高于94%,峰值效率达到96.1%。理论分析和实验结果表明该多输入端口DC-AC变换系统具有效率较高、升降压和电路结构较为简单的特点。由于本文的主要工作集中在DC-AC变换系统工作原理和稳态特性的分析验证,因此实验样机的效率等电气性能并未经过优化设计。下一步的研究工作主要有以下几方面:DC-AC变换系统的损耗建模和效率优化;DC-AC变换系统的控制器研究和设计;DC-AC变换系统的动态性能分析和优化。

### 参考文献

- [1] GUO Z J, WEI W, CHEN L J, et al. Impact of energy storage on renewable energy utilization: a geometric description[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 874-885.
- [2] BOICEA V. Energy storage technologies: the past and the present[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(11): 1777-1794.
- [3] 陈亚爱,洪忆南,周京华,等.级联型储能功率变换系统控制策略综述[J].电气传动,2021,51(7):3-11.  
CHEN Ya'ai, HONG Yinan, ZHOU Jinghua, et al. Summary of control strategies for cascaded energy storage power conversion system[J]. Electric Drive, 2021, 51(7): 3-11.
- [4] VARZANEH M, RAJAEI A, FOROUZESH M, et al. A single-stage multi-port Buck-Boost inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7769-7782.
- [5] 郭立东,杨子龙,王一波,等.户用微网系统多端口逆变器的控制策略研究[J].电力电子技术,2019,53(11):83-85.

- GUO Lidong, YANG Zilong, WANG Yibo, et al. Research on the control strategy of multi-port inverter used in household microgrid system[J]. *Power Electronics*, 2019, 53(11): 83-85.
- [6] 江加辉, 陈道炼, 余敏. 准单级隔离 Buck-Boost 型多输入逆变器[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(18): 4323-4334.
- JIANG Jiahui, CHEN Daolian, SHE Min. Quasi single stage isolated Buck-Boost mode multi-input inverter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(18): 4323-4334.
- [7] 邱琰辉, 陈道炼, 江加辉. 多绕组同时供电直流变换器型多输入逆变器[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(6): 181-190.
- QIU Yanhui, CHEN Daolian, JIANG Jiahui. Multi-winding simultaneously-supplying DC-DC converter mode multi-input inverter[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(6): 181-190.
- [8] 刘俊峰, 胡仁俊, 曾君. 一种多输入端口的多电平高频逆变器[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(S1): 111-118.
- LIU Junfeng, HU Renjun, ZENG Jun. A high-frequency multi-level inverter with multi-inputs[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(S1): 111-118.
- [9] JIANG J H, LI Z Q, CHEN D L. A quasi single stage isolated Buck-Boost mode multi-input inverter[C]//International Conference on Power Electronics and ECCE Asia, 2019: 50-55.
- [10] ARCHANA N, ANUPAMMA K. Multi-input inverter for hybrid wind-photovoltaic standalone system[C]//International Conference on Computing Methodologies and Communication, 2018: 451-455.
- [11] RAGJAVENDRA S. The multi-input renewable source inverter with controlled DC-DC converter and the H-bridge inverter[C]//International Conference on Power and Advanced Control Engineering, 2015: 12-17.
- [12] REDDI N, RAMTEKE M, SURYAWANSHI H, et al. An isolated multi-input ZCS DC-DC front-end-converter based multilevel inverter for the integration of renewable energy sources[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(1): 494-504.
- [13] CHEN Y M, LIU Y C, HUNG S C, et al. Multi-input inverter for grid-connected hybrid PV/wind power system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(3): 1070-1077.
- [14] DHIVYA T, SHYAMALA A, VELNATH R, et al. Implementation of multi-input ZCS based multilevel inverter for renewable energy sources[C]//Smart Technologies, Communication and Robotics, 2021: 54-56.
- [15] HAN L, CHEN D L, QIU Y H. Boost type two-stage multi-input high frequency link's inverter with multiple windings simultaneous power supply[C]//Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2020: 4176-4181.
- [16] CHEN D L, ZHAO T, HAN L, et al. Single-stage multi-input buck type high-frequency link's inverters with series and simultaneous power supply[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(6): 7411-7421.
- [17] JIANG S, PENG F. Modular single-phase trans-Z-source inverter for multi-input renewable energy system[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2012: 2107-2114.
- [18] DEHGHAN S, MOHAMADIAN M, YAZDIAN A, et al. A dual-input-dual-output Z-source inverter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, 25(2): 360-368.
- [19] WANDHARE G, AGARWAL V, JAIN S. Novel multi-input solar PV topologies for 1 phase and 3 phase stand alone applications to mitigate the effects of partial shading[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2013: 76-83.
- [20] KANNA P. Analysis and design of DC-DC/AC non isolated Cuk converter using sliding mode controller[C]//International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies, 2015: 1-8.
- [21] AZIZI M, MOHAMADIAN M, BEIRANVAND R, et al. Dual-input single-output DC-DC/AC converter[C]//International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, 2013: 315-320.
- [22] 杨真理, 唐红雨. 混合 H 桥级联逆变器的改进型调制策略[J]. *电气传动*, 2021, 51(23): 27-32.
- YANG Zhenli, TANG Hongyu. An improved modulation strategy suitable for H-bridge hybrid cascaded inverters[J]. *Electric Drive*, 2021, 51(23): 27-32.
- [23] 张影, 祝杰, 王宁, 等. CHB 逆变器  $3N+1$  与 SVM 容错切换[J]. *电气传动*, 2020, 50(12): 21-26.
- ZHANG Ying, ZHU Jie, WANG Ning, et al.  $3N+1$  and SVM fault-tolerant switching of CHB inverter[J]. *Electric Drive*, 2020, 50(12): 21-26.

收稿日期:2022-05-17

修改稿日期:2022-07-05