

新型单相高频隔离型 Delta 源 AC-AC 变换器

房绪鹏, 赵冰冰, 王煦超, 孙翔飞
(山东科技大学电气与自动化工程学院, 青岛 266590)

摘要: 为降低成本、减少器件并保证电路安全运行, 提出 1 种单相隔离型 Δ 源 AC-AC 变换器。新型变换器可以提供更宽范围的 Buck-Boost 输出电压, 输入/输出电压可同相或反相, 同时可抑制浪涌和谐波电流, 提高电路可靠性。对所提电路的工作原理进行分析, 推导得到各工作过程中主要元器件电压及输入/输出电压的关系式, 并与其他改进的交流变换器进行对比, 从理论上证明了新型交流变换器性能的优越性。根据所设计的参数搭建仿真模型和实验模型进行验证, 仿真与实验的结果证实了理论分析的正确性与可行性。

关键词: AC-AC; 隔离型; 高频变压器; Δ 源

Novel Single-phase High-frequency Isolated Delta-source AC-AC Converter

FANG Xupeng, ZHAO Bingbing, WANG Xuchao, SUN Xiangfei
(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: To reduce the cost and the number of components while ensuring the safe operation of the circuit, a single-phase isolated Δ -source AC-AC converter is proposed. This novel converter can provide a wider range of Buck-Boost output voltage, and the input voltage and output voltage can be in-phase or out-phase. Meanwhile, the surge and harmonic currents are suppressed, and the circuit reliability is improved. The working principle for the proposed circuit is analyzed, the voltage values of main components in each working process are deduced, and the relationship between input voltage and output voltage is formulated, which is further compared with those of other improved AC-AC converters. The theoretical analysis proves the performance of the novel AC-AC converter. A simulation model and an experimental model were built according to the designed parameters for verification, and simulation and experimental results verified the correctness and feasibility of the theoretical analysis.

Keywords: AC-AC; isolated; high-frequency transformer; Δ -source

随着现代电力电子技术的高速发展,人们对电能质量和电能转换效率的需求得到更好的满足,其中 AC-AC 变换器被广泛应用于各个领域,发挥着不可或缺的作用。AC-AC 变换器是指将一种形式的交流电转换成另一种形式的交流电的电力电子变换装置,其可以满足电网对不同负荷的供电需求,提高现有电网的可靠性^[1]。应用比较广泛的是

脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation)控制的交流斩波器^[2]及矩阵式变换器^[3-4]。PWM 控制的交流斩波器具有单级转换、拓扑简单、控制简单、转换效率高、体积小、费用低及电流谐波小的优点^[5]。传统交流斩波电路按照电路结构的不同可分为 Buck、Boost、Buck-Boost、Cuk 等变换电路。Buck 和 Boost 电路结构简单,但局限性大; Buck-Boost 电路可以实现升降压功能,但开关应力大,输入输出反相; Cuk 电路则存在结构复杂、输入输出反相等问题^[6]。矩阵式变换器具有结构紧凑、输入和输出波形优良及谐波畸变率小等优点,但其电压利用率低,调制方法复杂^[7]。文献^[8]提出的 Z 源变换器

收稿日期: 2022-04-07; 修回日期: 2022-06-14; 录用日期:

2022-06-24; 网络首发日期: 2022-08-03

基金项目: 山东省重点研发计划资助项目(2019GGX103049)

This work is supported by Shandong Key Research and Development Program under the grant 2019GGX103049

不仅能改变或控制电压相位,还具有升降压功能,且输出电压范围大;文献[9]提出了1种基于 Γ 结构的新单源Z源交流变换器,采用耦合变压器来实现所需的电压增益。基于Z源网络的准Z源变换器^[10]适用于输入电压变化较大的场合,既具有升降压的能力,又提高了控制的可靠性,被相继应用于单相交流变换电路^[11-12]。但当非隔离型Z源交流变换器用作动态电压恢复器DVR(dynamic voltage restorer)时,往往需要在外部添加1个体积庞大的变压器,以在输入侧和输出侧之间提供电气隔离,保障线路安全。该变压器增加了电路成本、设备质量及损耗,而且存在启动浪涌电流和饱和问题^[13]。文献[14]提出高频隔离型准Z源AC-AC变换器的新结构,虽然省去了用作DVR时的外接变压器,但除了附加的双向开关外,还使用了额外的无源元件,如2个电容和1个高频变压器HFT(high-frequency transformer),也增加了电路的成本、体积和损耗。

为克服以上缺点,本文提出1种新型具有高频隔离功能且减少无源元件数量的单相高频隔离型 Δ 源交流变换器。其中 Δ 阻抗源网络使电压增益变得更加灵活,电压增益不仅局限于占空比的控制^[15-17]。

1 变换器工作原理分析

1.1 电路拓扑

本文所提单相高频隔离型 Δ 源AC-AC变换器如图1所示。图中: V_{in} 为输入电压; L_1 为储能电感; C_1 、 C_2 为储能电容; $N_1 \sim N_3$ 为三耦合电感的匝数,各绕组电压与其匝数成正比; S_{1a} 、 S_{1b} 、 S_{2a} 、 S_{2b} 、 S_{3a} 、 S_{3b} 为3对反向串联的双向IGBT开关管; L_s 为高频绕组; C_f 为储能电容; R_0 为负载电阻。该变换器由电感 L_1 、3对反向串联的双向IGBT开关管、储能电容 C_1 和 C_2 及单相HFT组成。反向串联的双向IGBT控制电路的运行,保证了线路在交流电源的正负周期均可导通。

1.2 工作状态分析

开关 S_{1x} 与 S_{2x} 、 S_{3x} ($x=a, b$)在PWM的控制下互补开通,通过改变开关管导通占空比 D ,使输出与

输入同相或异相、升压或降压。变换器等效电路如图2所示,图中: V_{L_1} 、 V_{L_s} 分别为电感 L_1 和 L_s 的电压; V_{C_1} 、 V_{C_2} 分别为电容 C_1 、 C_2 的电压; V_L 为 N_1 处的电压; i_{L_1} 为通过 L_1 的电流; V_{sh} 为开关 S_{2x} 的电压; V_{rect} 为开关 S_{3x} 的电压; V_o 为输出电压; n 为 N_1 与 L_s 的匝数比。开关管控制策略及关键波形如图3所示,图中, K 为阻抗网络绕组系数。

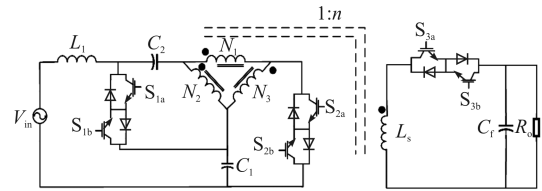
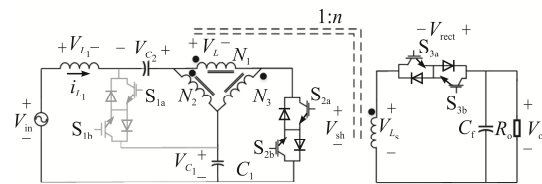
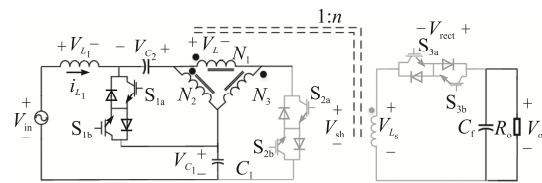


图1 单相高频隔离型 Δ 源AC-AC变换器拓扑结构
Fig. 1 Topology of single-phase high-frequency isolated Δ -source AC-AC converter



(a) 工作状态1



(b) 工作状态2

图2 变换器等效电路

Fig. 2 Equivalent circuits of converter

工作状态1如图2(a)所示,此时 S_{1x} 关断, S_{2x} 、 S_{3x} 导通。电源和电容 C_2 通过开关 S_2 给电感 L_1 充电储能,电容 C_1 、 C_2 的能量一部分储存在 Δ 源耦合电感中,另一部分通过高频绕组 L_s 和开关 S_3 给二次侧 C_f 充电, L_s 的能量也通过 S_3 释放给负载。根据基尔霍夫电压定律KVL(Kirchhoff's voltage law),此时的电路满足关系

$$-V_{in} + V_{L_1} - V_{C_2} + \frac{N_2}{N_1} V_L + V_{C_1} = 0 \quad (1)$$

$$-V_{C_1} - \frac{N_3}{N_1} V_L + V_{sh} = 0 \quad (2)$$

$$-V_{L_s} - V_{\text{rect}} + V_o = 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} V_{\text{sh}} = 0 \\ V_{\text{rect}} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$V_{L_s} = nV_L = V_o = -\frac{nN_1}{N_3}V_{C_1} \quad (5)$$

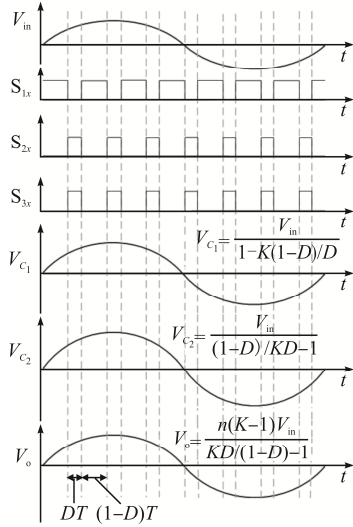


图 3 开关管控制策略及关键波形

Fig. 3 Switch control strategy and key waveforms

工作状态 2 如图 2(b)所示, 此时 S_{1x} 导通, S_{2x} 、 S_{3x} 关断。电源 V_{in} 和电感 L_1 通过开关 S_1 给电容 C_1 充电储能, Δ 源耦合电感通过开关 S_1 向电容 C_2 提供能量, C_1 给负载提供能量。由 KVL 可得

$$-V_{in} + V'_{L_1} + V_{C_1} = 0 \quad (6)$$

$$-V_{C_2} + \frac{N_2}{N_1}V'_{L_1} = 0 \quad (7)$$

$$-V_{C_1} - \frac{N_3}{N_1}V'_{L_1} + V_{\text{sh}} = 0 \quad (8)$$

$$-V_{L_s} - V_{\text{rect}} + V_o = 0 \quad (9)$$

$$V_{L_s} = nV'_{L_1} = V_o - V_{\text{rect}} = \frac{nN_1}{N_2}V_{C_2} \quad (10)$$

式中: V'_{L_1} 为在 $(1-D)T$ 期间施加到电感上的电压; V'_L 为在 $(1-D)T$ 期间施加到 N_1 的电压。

Δ 源阻抗网络中的绕组匝数满足 $N_1 = N_2 - N_3$, 且阻抗网络绕组系数 $K = N_2 / N_3$ 。

设开关 S_{2x} 和 S_{3x} 在 1 个周期 T 的导通时间为 T_{on} , 则电路的直通占空比 $D = T_{\text{on}} / T$ 。由电感的伏秒平衡原理可得

$$DV_L + (1-D)V'_L = 0 \quad (11)$$

$$DV_{L_1} + (1-D)V'_{L_1} = 0 \quad (12)$$

联立式(11)、式(12)并结合式(1)、式(2)、式(4)、式(6)、式(7)可得

$$V_L = \frac{D-1}{D}V'_L = \frac{(K-1)(1-D)}{(K+1)D-1}V_{in} \quad (13)$$

$$V_{C_1} = \frac{1-D}{1-(K+1)D}V_{in} \quad (14)$$

$$V_{C_2} = \frac{KD}{1-(K+1)D}V_{in} \quad (15)$$

整理式(13)~式(15)并结合式(5)、式(9)、式(10)可得输入、输出电压关系式为

$$V_o = -\frac{n(K-1)(1-D)}{1-(K+1)D}V_{in} \quad (16)$$

由式(16)可知, 当 $1-(K+1)D < 0$, 即 $1/(K+1) < D < 1$ 时, 输入输出为同相; 当 $1-(K+1)D > 0$, 即 $0 < D < 1/(K+1)$ 时, 输入输出为反相。假设 $n=1$, 当 $1/(K+1) < D < 1/2$ 且 $K > 1$ 时, 变压器工作于同相升压状态; 当 $D > 1/2$ 时, 变压器工作于同相降压状态; 当 $0 < D < (1-K)/2$ 且 $1 < K < 2$ 时, 变压器工作于反相降压状态; 当 $(1-K)/2 < D < 1/(K+1)$ 时, 变压器工作于反相升压状态。

本文所提 Δ 源变换器的电压增益 G 与占空比 D 的关系曲线如图 4 所示, 可见, Δ 源变换器的电压增益不仅与占空比 D 有关, 还与绕组系数 K 有关, 电路设计更加灵活。

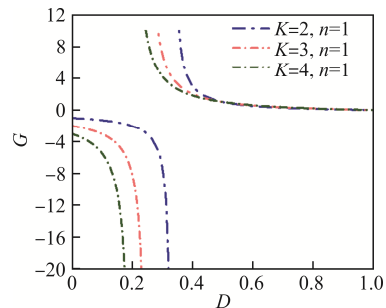


图 4 Δ 源变换器的电压增益 G 与占空比 D 的关系曲线
Fig. 4 Curves of relationship between voltage gain G and duty cycle D for Δ -source converter

1.3 与传统变换器对比

为体现变换器的稳态性能, 将本文所提高频隔

离型 Δ 源(HFTI Δ S)变换器与传统非隔离 Z 源(ZS)变换器及隔离型准 Z 源(HFTI qZS)变换器进行对比, 各项性能参数见表 1。

由表 1 可知, 高频隔离型 Δ 源变换器承袭了 2 种传统变换器的诸多优点, 如变压能力灵活、输入电流连续等。当 $1 < K < 2$ 时, 该变换器具有 4 种变

压能力: 同相升压、同相降压、反相升压、反相降压。因为耦合电感的加入, 各电容和开关管的电压应力增添了 1 个影响因子 K , 除开关管 S_2 的电压应力有明显降低之外, 其余大部分器件的电压应力与传统变换器保持一致。3 种拓扑的开关通断关系相同, 因此可以采用相同的开关控制策略。

表 1 3 种拓扑参数对比

Tab. 1 Comparison of parameters among three topologies

参数	ZS	HFTI qZS	HFTI Δ S
电压增益	$\frac{1-D}{1-2D}$	$\frac{n(1-D)}{1-2D}$	$-\frac{n(K-1)(1-D)}{1-(K+1)D}$
控制变量	D	D	D, K
输入电流	不连续	连续	连续
输入输出	非隔离	隔离	隔离
电容电压	$V_{C_1} = V_{C_2} = V_{C_f} = V_o$	$V_{C_f} = V_o = nV_{C_1}$ $V_{C_2} = \frac{V_o D}{n(1-D)}$	$V_{C_f} = V_o = -n(K-1)V_{C_1}$ $V_{C_2} = \frac{V_o K D}{n(K-1)(1-D)}$
开关管电压应力	$V_{S_1} = V_{S_2} = \frac{-V_{in}}{1-2D}$	$V_{S_1} = V_{S_2} = \frac{V_{in}}{1-2D}$ $V_{S_3} = \frac{nV_{in}}{1-2D}$	$V_{S_1} = \frac{-K}{1-(K+1)D} V_{in}$ $V_{S_2} = \frac{1}{1-(K+1)D} V_{in}, V_{S_3} = \frac{-n(K-1)}{1-(K+1)D} V_{in}$
效率($D=0.6$)/%	82.73	81.50	81.94

在结构上, HFTI qZS 变换器在 ZS 变换器的基础上, 用高频变压器替换 2 个电感, 并添加 1 个双向开关。本文所提 HFTI Δ S 变换器与 HFTI qZS 变换器相比, 既具有相同的电气隔离和安全性, 又节省了 2 个电容 C_p 、 C_s 和 2 个电感 L_2 、 L_f , 因此本文所提交流变换器具有更低的成本和更小的体积, 更高的功率密度和更低的损耗。

2 主要参数设计

2.1 电感参数设计

本文所提变换器高频变压器的磁化电感 L_m 和电感 L_l 的取值, 由变换器的允许电流纹波 Δi_L 和磁通密度波动 ΔB 决定。

对于高频变压器, 电流处理能力取决于其磁化电流 i_m , 即一次绕组电流 i_{N_1} 与二次绕组电流 i_{L_s} 之差。由图 2(b)可知, $i_{L_s} = 0$ 、 $i_m = i_{N_1}$ 。由安秒平衡可得

$$i_m = i_{N_1} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (17)$$

电感电流纹波 Δi_L 和磁通密度波动 ΔB 可分别表示为

$$\Delta i_L = \frac{V_L}{L} \Delta t \quad (18)$$

$$\Delta B = \frac{V_L}{NA_c} \Delta t \quad (19)$$

式中: L 为电感; N 为匝数; A_c 为磁芯截面积。

高频变压器的磁化电感电流纹波 Δi_m 和磁通密度波动 ΔB 可分别表示为

$$\Delta i_m = \frac{V_{in}(K-1)(1-D)}{L_m[(K+1)D-1]} DT \quad (20)$$

$$\Delta B = \frac{V_{in}(K-1)(1-D)}{NA_c[(K+1)D-1]} DT \quad (21)$$

由式(20)可得在允许电流纹波 Δi_m 下磁化电感 L_m 的取值; 由式(21)可得截面积为 A_c 的磁芯, 根

据 ΔB 的允许值确定匝数 N 。

由图 1 可见, 流过电感 L_1 的电流与输入电流相同。 DT 期间, 一次绕组两端施加的电压为 $V_L = V_{in} + V_{C_2} - V_{L_1}$ 。将上述值代入式(18)和式(19)可得 L_1 的电感电流纹波 Δi_{L_1} 和磁通密度波动 ΔB 的表达式分别为

$$\Delta i_{L_1} = \frac{V_{in} K(1-D)}{L_1 [1-(K+1)D]} DT \quad (22)$$

$$\Delta B = \frac{V_{in} K(1-D)}{NA_c [1-(K+1)D]} DT \quad (23)$$

由式(22)可得在允许电流纹波 Δi_{L_1} 下磁化电感 L_1 的取值; 由式(23)可得截面积为 A_c 的磁芯, 根据 ΔB 的允许值确定匝数 N 。

2.2 电容参数设计

本文所提变换器中, 电容 C_1 、 C_2 的电压应力可分别由式(14)、式(15)求得。电容电压纹波的计算公式为

$$\Delta V_C = \frac{i_C}{C} \Delta t \quad (24)$$

式中: i_C 为在 Δt 期间流经电容的电流; C 为电容。

DT 期间, 流过电容 C_1 、 C_2 的电流分别为 $i_{C_1} = (1-D)i_{in}/D$ 、 $i_{C_2} = i_{in}$, i_{in} 为输入电流。将其代入式(24)可得 C_1 、 C_2 电压纹波的表达式分别为

$$\Delta V_{C_1} = \frac{i_{in}}{C_1} (1-D) T \quad (25)$$

$$\Delta V_{C_2} = \frac{i_{in}}{C_2} DT \mu \quad (26)$$

由式(25)和式(26)可得在允许电压纹波下电容 C_1 、 C_2 的取值。

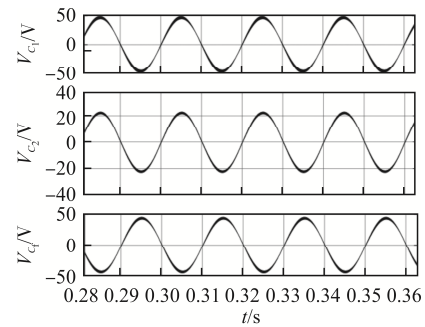
3 仿真与实验

3.1 仿真分析

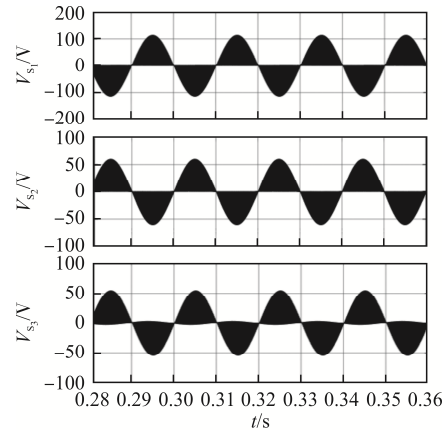
基于上述理论分析, 本文在 MATLAB/Simulink 软件平台搭建了新型 Δ 源变换器的仿真模型, 进行仿真分析, 参数见表 2。当占空比 $D=0.2$ 、 $D=0.6$ 时, 电路各器件电压仿真波形分别如图 5 和图 6 所示。

表 2 仿真与实验参数

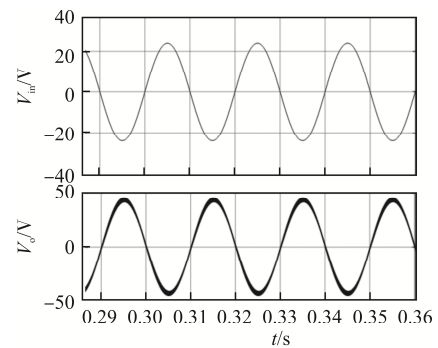
参数	数值
输入电压/V	24
开关频率 f /kHz	10
占空比 D	0.2, 0.6
线圈匝数比 $N_1:N_2:N_3:N_4$	20:40:20:20
电容 C_1 、 C_2 、 C_7 / μ F	10
电感 L_1 、 L_8 /mH	1
负载电阻 R/Ω	80



(a) 电容波形



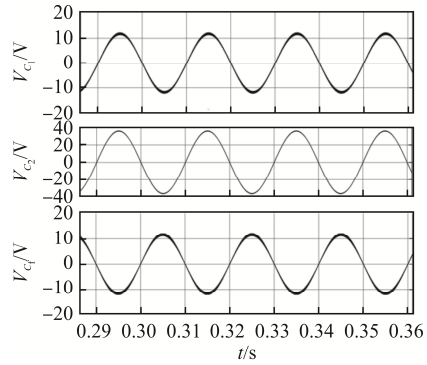
(b) 开关管波形



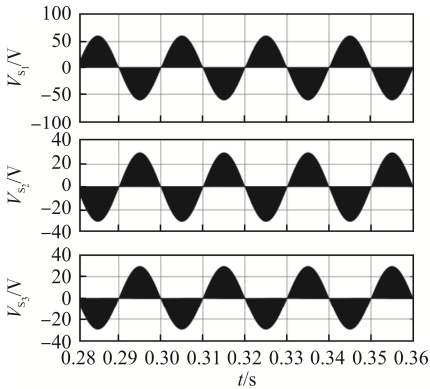
(c) 输入、输出波形

图 5 $D=0.2$ 时的电压仿真波形

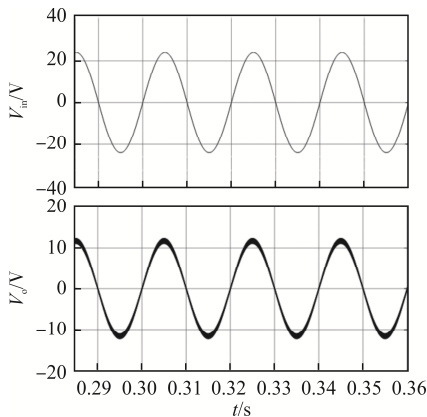
Fig. 5 Simulation waveforms when D is equal to 0.2



(a) 电容波形



(b) 开关管波形



(c) 输入、输出波形

图 6 $D=0.6$ 时的电压仿真波形Fig. 6 Simulation waveforms when D is equal to 0.6

$D=0.2$ 、 $D=0.6$ 的输出电压计算值分别为

$$V_{o1} = -\frac{1-0.2}{1-3 \times 0.2} \times 24 = -48 \text{ V} \quad (27)$$

$$V_{o2} = -\frac{1-0.6}{1-3 \times 0.6} \times 24 = 12 \text{ V} \quad (28)$$

由各仿真波形可知,各器件在不同占空比下的仿真结果与理论计算值一致,证明当系统电压发生电压跌落等故障时,电路可以通过灵活的升降压能

力来保持稳定的输出电压。

3.2 实验

为进一步验证新型 Δ 源变换器的性能,搭建了如图 7 所示的实验样机。由 TMS320F28335 产生控制信号,并通过北京落木源公司生产的 DA962D 驱动电路进行驱动,实验参数与仿真参数相同。

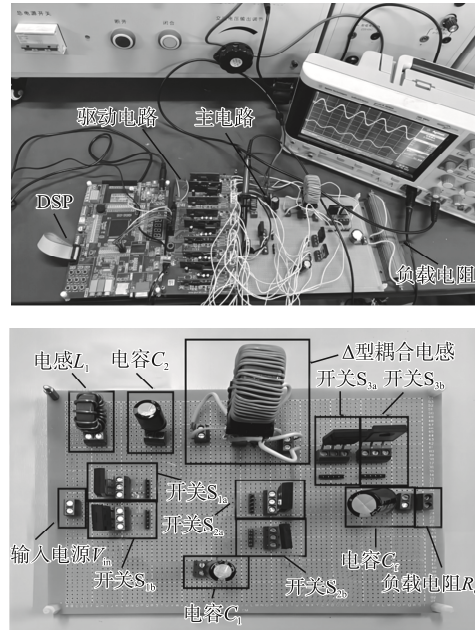
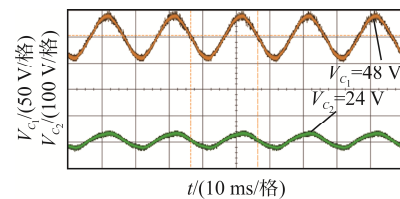
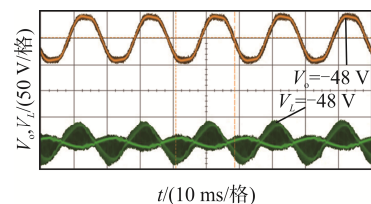


图 7 实验装置

Fig. 7 Experimental equipment

图 8 为 $D=0.2$ 时变压器工作于升压模式的电容、电感、输出端及开关管的电压测量波形,图 9 为 $D=0.6$ 时变换器工作于降压模式的电容、电感、输出端及开关管的电压测量波形,图中数值为峰值。对比发现,各波形形状与理论及仿真波形基本匹配,

(a) 电容 C_1 、 C_2 的电压(b) 输出电压和一次绕组 N_1 的电压

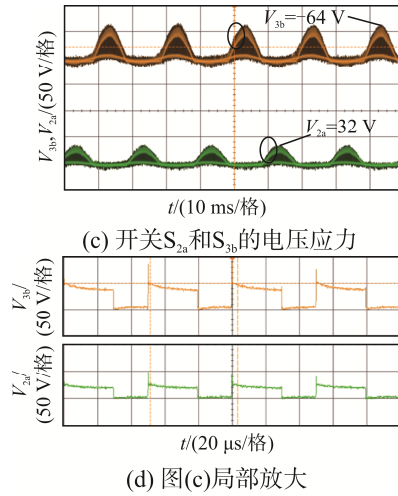


图 8 $D=0.2$ 时电容、输出电压、电感、开关管波形
Fig. 8 Waveforms of capacitor, output voltage, inductor and switch tube when D is equal to 0.2

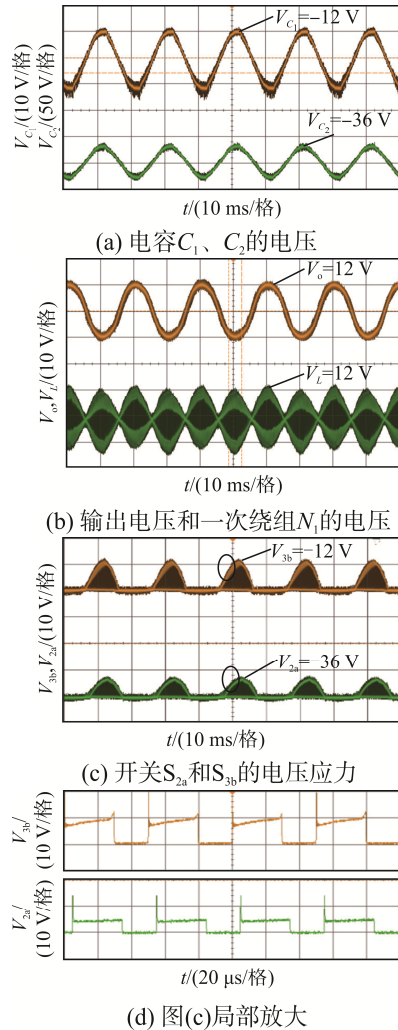


图 9 $D=0.6$ 时电容、输出电压、电感、开关管波形
Fig. 9 Waveforms of capacitor, output voltage, inductor and switch tube when D is equal to 0.6

实验结果与理论分析吻合较好, 验证了所提新型 Δ 源变换器的优越性能。

4 结语

本文提出 1 种新型高频隔离单相 Δ 源 AC-AC 变换器, 该变换器具有传统非隔离变换器的诸多优点, 例如具有降压-升压能力, 可以抑制涌流、降低谐波电流, 具备高可靠性。同时, 该变换器具有高频隔离功能, 当变换器用作 DVR 时, 不需要额外添加为输入侧和输出侧之间提供电气隔离的变压器, 缩小了体积, 降低了成本。此外, Δ 源阻抗网络使变换器的升降压能力得到显著提升, 拥有 4 种工作模式, 适用范围更加广泛。通过模拟仿真验证了变换器的优越性与可行性, 由仿真输出波形可知, 变换器能够提供高质量电压且效率保持在较高水平。最后, 通过搭建该变换器的实验样机, 进行了输入电压为 24 Vrms/50 Hz 的实验, 验证了该变换器工作性能的优越性。

参考文献:

- [1] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771. Tang Guangfu, Pang Hui, He Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771. (in Chinese)
- [2] Ryoo H J, Kim J S, Rim G H, et al. A study on the series compensated AC voltage regulator using AC chopper with auxiliary transformer [C]// IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Roanoke, VA, USA, 2004: 2628-2633.
- [3] Sri Vidhya D, Venkatesan T. Quasi-Z-source indirect matrix converter fed induction motor drive for flow control of dye in paper mill [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1476-1486.
- [4] Vijayagopal M, Zanchetta P, Empringham L, et al. Control of a direct matrix converter with modulated model-predictive control [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2342-2349.

- [5] Zhu Miao, Li Ding, Loh P C, et al. Tapped-inductor Z-source inverters with enhanced voltage Boost inversion abilities [C]// 2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET). Kandy, Sri Lanka, 2010: 1-6.
- [6] 孙瑄璿, 荣德生, 王宁. 具有谐振软开关的高增益耦合电感组合 Boost-Zeta 变换器[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1830-1842.
Sun Xuanjin, Rong Desheng, Wang Ning. High step-up integrated Boost-zeta converter with coupled inductor and resonant soft-switching [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1830-1842. (in Chinese)
- [7] 李少峰, 郭碧翔, 程启明, 等. 基于准 Z 源直接矩阵变换器的新型空间矢量调制策略研究[J]. 电源学报, 2020, 18(3): 151-159.
Li Shaofeng, Guo Bixiang, Cheng Qiming, et al. Research on novel space vector modulation strategy based on quasi-Z source direct matrix converter [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(3): 151-159. (in Chinese)
- [8] 彭方正, 房绪鹏, 顾斌, 等. Z 源变换器[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 47-51.
Peng Fangzheng, Fang Xupeng, Gu Bin, et al. Z-source converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 47-51. (in Chinese)
- [9] Banaei M R, Alizadeh R, Jahanyari N, et al. An AC Z-source converter based on gamma structure with safe-commutation strategy [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1255-1262.
- [10] Nguyen M K, Jung Y G, Lim Y C. Single-phase AC-AC converter based on quasi-Z-source topology [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(8): 2200-2210.
- [11] Hada K, Sharma A K, Tomar P S. Performance analysis of improved q-ZS AC-AC converter with high frequency isolation [C]// 2017 6th International Conference on Computer Applications in Electrical Engineering-Recent Advances (CERA). Roorkee, India, 2017: 427-432.
- [12] 丘恒越, 张桂东, 陈思哲. 基于准 Z 源的低电容电压应力高增益 DC-DC 变换器[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 1-12.
Qiu Hengyue, Zhang Guidong, Chen Sizhe. High-gain DC-DC converter with low voltage stress of capacitor based on quasi-Z-source [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 1-12. (in Chinese)
- [13] 叶佳卓, 陈少林, 黄飞, 等. 一种新型单相高频隔离 Z 源 AC-AC 变换电路[J]. 电力电子技术, 2018, 52(11): 64-67, 87.
Ye Jiazhuo, Chen Shaolin, Huang Fei, et al. A new single-phase high-frequency isolated Z-source AC-AC converter circuit [J]. Power Electronics, 2018, 52(11): 64-67, 87. (in Chinese)
- [14] Ahmed H F, Cha H, Khan A A, et al. A family of high-frequency isolated single-phase Z-source AC-AC converters with safe-commutation strategy [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(11): 7522-7533.
- [15] Hakemi A, Sanatkar-Chayjani M, Monfared M. Δ -source impedance network [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 7842-7851.
- [16] 房绪鹏, 田莹莹, 王明磊. Δ 源逆变器的小信号建模与无源器件参数影响分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 94-103.
Fang Xupeng, Tian Yingying, Wang Minglei. Modeling and analysis of reactive device parameter effect upon performance of Δ -source inverter [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(5): 94-103. (in Chinese)
- [17] 房绪鹏, 薄常辉, 阚兴宸, 等. 一种改进型含吸收回路的准 Δ 源升压变换器[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 17-25.
Fang Xupeng, Bo Changhui, Kan Xingchen, et al. An improved quasi Δ -source Boost converter with absorption circuit [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 17-25. (in Chinese)



房绪鹏

作者简介:

房绪鹏(1971—), 男, 博士后, 教授。研究方向: 阻抗源变流器, 现代电力电子技术在电力系统、电气传动方面的应用。E-mail: xpfang69@163.com。

赵冰冰(1997—), 女, 通信作者, 硕士研究生。研究方向: 电力电子技术及应用。E-mail: 1591351179@qq.com。

王煦超(1996—), 男, 硕士研究生。研究方向: 电力电子技术及应用。E-mail: 915671221@qq.com。

孙翔飞(1995—), 男, 硕士研究生。研究方向: 电力电子技术及应用。E-mail: 965456709@qq.com。

(责任编辑: 耿越)