DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.2.71 **中图分类号**：TM4 **文献标志码**：A

具有2种可选拓扑的柔性DC-DC变换器研究

赵 猛[1]，付 明[2]，李亚飞[1]，马千里[1]，朱 庆[3]，刘 乙[1]
(1.国网江苏省电力公司苏州供电公司，苏州 215004；2.国电南瑞科技股份有限公司，南京 210096；
3.国网电力科学研究院有限公司，南京 210037)

摘要：本文提出一种具有4个输出端子的柔性DC-DC变换器。根据输出端子之间不同的连接方式，该变换器可在三电平Boost和图腾柱Boost这2种拓扑之间切换。分析2种拓扑的工作模态和稳态特性，讨论各自适合的应用场景以及切换的条件和实现方式。分析并验证图腾柱Boost拓扑具有大升压比的特点。在PSIM仿真环境搭建电路模型,设计元件参数并给出相关仿真结果。对1台峰值效率为98.5%的640 W硬件样机进行测试，并给出部分关键波形。仿真和硬件实验结果表明，该柔性DC-DC变换器具有应用灵活、电路结构较为简单以及效率较高的特点。

关键词：柔性变换器；三电平Boost；图腾柱Boost；大升压比

Research on Flexible DC-DC Converter with Two Selectable Topologies

ZHAO Meng[1], FU Ming[2], LI Yafei[1], MA Qianli[1], ZHU Qing[3], LIU Yi[1]
(1. Suzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suzhou 215004, China; 2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210096, China; 3. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210037, China)

Abstract: A flexible DC-DC converter with four output connectors is proposed, which can freely switch between a three-level Boost topology and a totem-pole Boost topology according to different connections of output connectors. The operation modes and steady-state performance of these two topologies are analyzed, along with the corresponding application scenarioof each topology. In addition, the topology switching condition and practical implementation are also discussed. It is found and verified that the totem-pole Boost topology features a large step-up ratio. A circuit model is built in the PSIM simulation environment, the component parameters are designed, and the related simulation results are given. A 640 W hardware prototype with a peak efficiency of 98.5% was tested, and part of the key waveforms were plotted. Simulation and experimental results show that this flexible DC-DC converter has characteristics of application flexibility, a simpler circuit structure and a higher efficiency.

Keywords: Flexible converter; three-level Boost; totem-pole Boost; large step-up ratio

近年来随着“双碳”目标的提出和实施，以并网型或独立型可再生能源发电为代表的绿色能源生产方式得到越来越多的研究和应用[1-2]。功率变换器作为桥接可再生能源和电网(或本地负载)的能量接口，在实际应用中面临多种电气规格需求[3]。对于特定的功率变换器拓扑而言，通常只能在一种或少数几种电气规格下才能发挥最佳性能。柔性变换器针对不同的应用场景能够切换电路架构，以更适合的拓扑和更佳的性能来适配特定应用，从而实现系统性能最优。因此，研究拓扑可选高集成度柔性变换器具有重大的现实意义，并

收稿日期：2023-04-04；**修回日期**：2023-05-24，2023-07-22；
录用日期：2023-09-02；**网络首发日期**：2024-04-25
基金项目：国家电网公司科技项目(SGTYHT/21-JS-223)
This work is supported by the Science & Technology Project of State Grid Corporation of China under the grant SGTYHT/21-JS-223

且，学术界已有不少关于柔性变换器应用于各种不同场景的研究。文献[4]将 LLC 谐振拓扑与 LCL-Tx 谐振拓扑集成在一个电池充电器中，从而能够适配多种电池电压范围，扩展其在电动汽车充电领域的应用范围，并使用功率继电器来对 2 种拓扑进行切换，使得该电池充电器具有柔性架构；文献[5]研究了一种用于光伏微逆变器的柔性架构，可以实现全桥电路和改善型双管正激电路的灵活切换，从而提升微逆变器的加权效率；文献[6]提出了一种基于飞跃电容单元的多电平负载点 DC-DC 变换器，可以根据实际应用场景和工作条件改变电路拓扑结构，以获得更高的变换效率和功率密度，具有柔性变换器的特征；文献[7]探讨应用在户用光伏发电系统中的全桥 LLC 变换器。为解决轻载工况下变换器输出稳定调节和动态情况下母线电压控制的问题，通过驱动信号的灵活控制，使得全桥 LLC 变换器工作在半桥 LLC 拓扑，从而较好地解决了相关问题。综上可知，柔性变换器应对不同工况时，能够灵活切换拓扑结构，使得变换器在特定工况下发挥出最佳性能。

在光伏发电应用中，通常需要升压 DC-DC 变换器将光伏阵列的宽范围输出电压变换为稳定的直流母线电压。为了提升光伏发电系统的整体能效，光伏阵列的电压等级持续升高。最新的组串型光伏发电系统，其光伏阵列电压等级已升至 1.5 kV[8]。传统 Boost 变换器具有输入电流连续、结构简单、成本低和易于控制的特点，但是在高压大功率应用场合存在电感体积大、开关器件电压应力高等问题[9]。将 2 组或多组 Boost 电路进行交错并联，能够缩小电感尺寸和减小输入电流纹波，但是需要额外增加较多电路器件，且交错的方式增加了控制难度和均流要求，同时开关器件的电压应力依旧较高[10-12]。三电平 Boost 变换器不仅能够大幅缩减电感尺寸，同时也能将开关器件应力降低至输出电压的一半。因此在高压大功率场合具有较高的效率和功率密度，近年来在组串型光伏逆变器等产品中得到应用[13-15]。从升压比的角度来看，在相同占空比情况下，三电平 Boost 变换器的电压增益是传统 Boost 变换器的 2 倍，具有更强的升压能力。对于图腾柱 Boost 变换器，由于在电感充磁阶段，电感电压为输入电压和输出电压之和，电感储存的能量较大，因此其升压比在一定占空比范围内高于三电平 Boost 变换器。文献[16-18]研究了一种基于辅助二极管和辅助电感或辅助电容网络的高增益 Boost 变换器，具有较高的升压比。但是电路结构相对比较复杂，电路中元器件相对较多，并且该 Boost 变换器的共模电压高频跳变，对变换器实际设计和通过电磁干扰 EMI(electromagnetic interference)测试带来较大挑战。

针对光伏发电应用场合，本文结合三电平 Boost 变换器和图腾柱 Boost 变换器的拓扑结构特点，得到一种柔性升压 DC-DC 变换器。根据光伏阵列输出电压所处区间，该柔性 DC-DC 变换器可工作在不同的电路拓扑，以发挥其最佳电气性能。根据输出端子的不同连接方式，能够实现 2 种拓扑结构的自由切换。输出端子之间的连接可以采用手动接线方式，也可以采用双刀双掷型继电器方式。

1 电路结构和工作模态

1.1 电路结构

柔性 DC-DC 变换器电路结构如图 1 所示。本文所研究的柔性 DC-DC 变换器电路结构如图 1(a)所示，包含电感 L、开关 S_1 和 S_2、二极管 D_1 和 D_2、电容 C_1 和 C_2 以及输出端子 O_1~O_4。当 O_2 和 O_3 连接、O_1 和 O_4 分别作为输出正端和负端时，柔性 DC-DC 变换器转变为三电平 Boost 拓扑，如图 1(b)所示；当 O_1 和 O_3 连接并作为输出正端、O_2 和 O_4 连接并作为输出负端时，柔性 DC-DC 变换器转变为图腾柱 Boost 拓扑，如图 1(c)所示。

相同输出功率下，当输出电压较高时，选择三电平 Boost 拓扑。此时，由于输出电流相对较小，1 组输出端子 O_1 和 O_4 用来承担输出电流。当输出电压较低时，选择图腾柱 Boost 拓扑。此时，由于输出电流相对较大，2 组输出端子 O_1、O_3 和 O_2、O_4 并联共同承担输出电流。

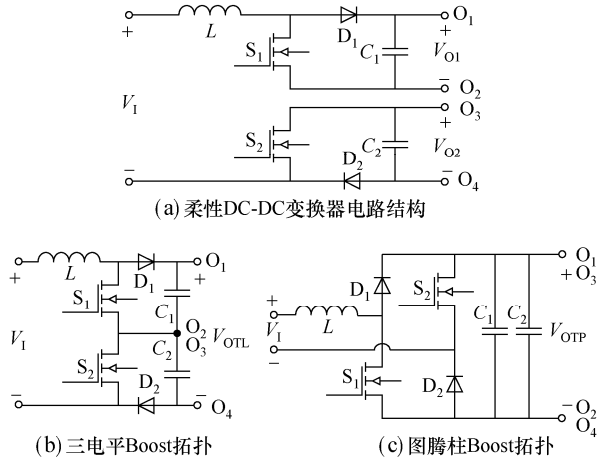


图 1　柔性 DC-DC 变换器电路结构

Fig. 1 Circuit structure of flexible DC-DC converter

1.2 工作模态

1.2.1　三电平 Boost 电路

当输出端子 O_2 与 O_3 相连时，柔性 DC-DC 变换器工作在三电平 Boost 电路状态。根据输入电压 V_I 与输出电压 V_{OTL} 的关系，三电平 Boost 电路的工作模态分为 2 种情况。

(1)当 $V_I<V_{OTL}/2$ 时，其工作模态和每个模态下对应的等效电路如图 2 所示。具体描述如下。

$t_0<t<t_1$：S_1、S_2 导通，D_1、D_2 关断。V_I 给 L 充磁，负载由 C_1 和 C_2 共同供电。

$t_1<t<t_2$：S_1、D_2 导通，S_2、D_1 关断。L 将储存的能量转移到 C_2，负载由 C_1 供电。

$t_2<t<t_3$：S_1、S_2 导通，D_1、D_2 关断。V_I 给 L 充磁，负载由 C_1 和 C_2 共同供电。

$t_3<t<t_4$：S_2、D_1 导通，S_1、D_2 关断。L 将储存的能量转移到 C_1，负载由 C_2 供电。

(2)当 $V_I>V_{OTL}/2$ 时，其工作模态和每个模态下的对应等效电路如图 3 所示。具体描述如下。

$t_0<t<t_1$：S_1、D_2 导通，S_1、D_1 关断。V_I 与 $V_{OTL}/2$ 的压差给 L 充磁，负载由 C_1 供电。

$t_1<t<t_2$：D_1、D_2 导通，S_1、S_2 关断。L 将储存的能量转移到 C_1、C_2 和负载。

$t_2<t<t_3$：S_2、D_1 导通，S_1、D_2 关断。V_I 与 $V_{OTL}/2$ 的压差给 L 充磁，负载由 C_2 供电。

$t_3<t<t_4$：D_1、D_2 导通，S_1、S_2 关断。L 将储存的能量转移到 C_1、C_2 和负载。

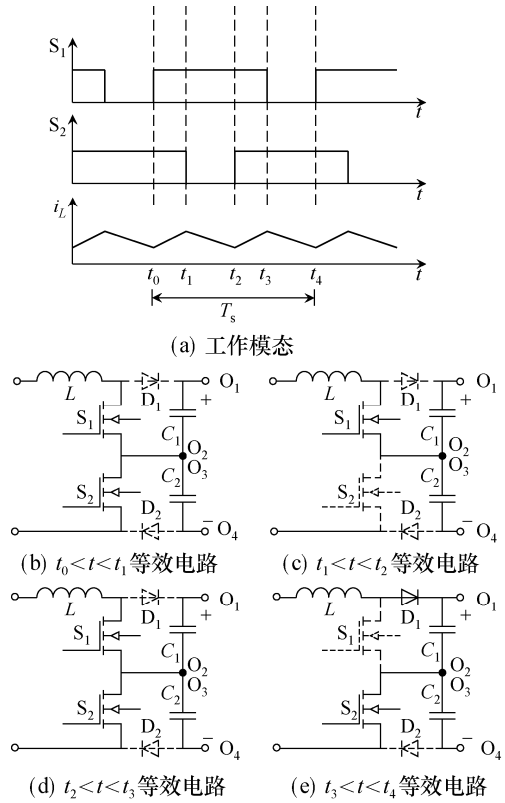


图 2　$V_I<V_{OTL}/2$ 时三电平 Boost 电路工作模态及等效电路

Fig. 2 Operation modes and equivalent circuits of three-level Boost circuit when $V_I<V_{OTL}/2$

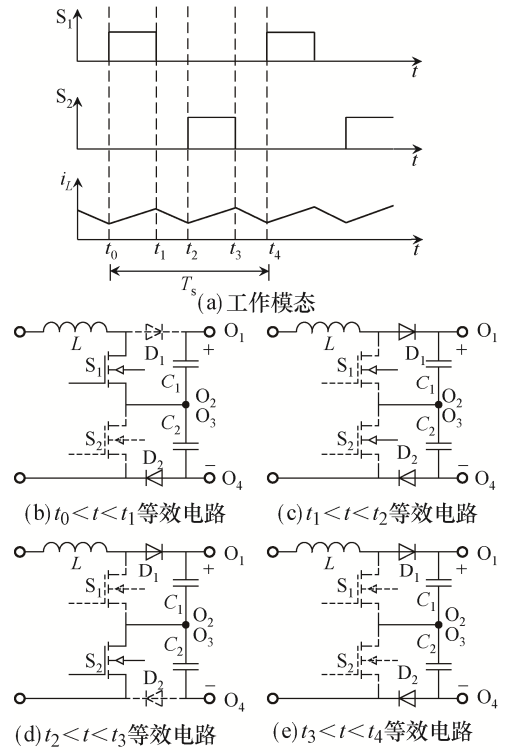


图 3　$V_I>V_{OTL}/2$ 时三电平 Boost 电路工作模态及等效电路

Fig. 3 Operation modes and equivalent circuits of three-level Boost circuit when $V_I>V_{OTL}/2$

1.2.2 图腾柱 Boost 电路

当输出端子 O_1 与 O_3 相连并且 O_2 与 O_4 相连时，柔性 DC-DC 变换器工作在图腾柱 Boost 电路状态。图腾柱 Boost 电路的工作模态和每个模态下的对应等效电路如图 4 所示。S_1 和 S_2 同步动作，D_1 和 D_2 同步动作，并且 S_1、S_2 与 D_1、D_2 互补动作。具体工作模态如下。

$t_0<t<t_1$：S_1、S_2 导通，D_1、D_2 关断。V_I 与 V_{OTP} 之和给 L 充磁，负载由 C_1、C_2 供电。

$t_1<t<t_2$：D_1、D_2 导通，S_1、S_2 关断。L 将储存的能量转移到 C_1、C_2 和负载。

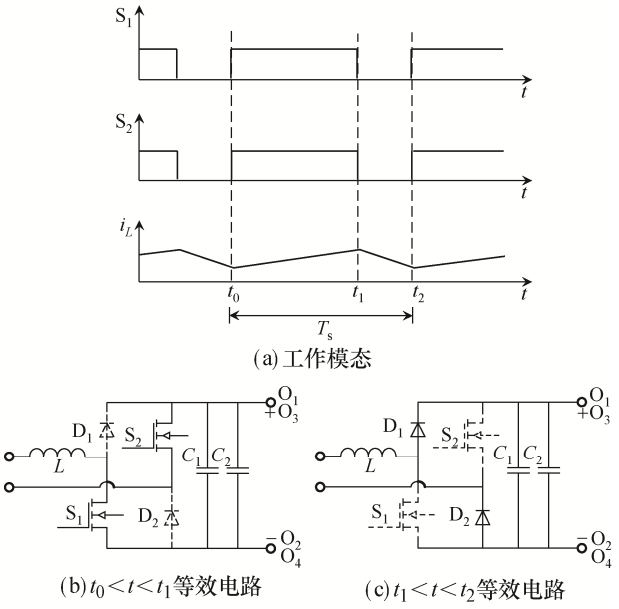


图 4 图腾柱 Boost 电路工作模态及等效电路

Fig. 4 Operation modes and equivalent circuits of totem-pole Boost circuit

2 稳态特性分析

2.1 三电平 Boost 电路

2.1.1 电压增益

分别分析 $V_I<V_{OTL}/2$ 和 $V_I>V_{OTL}/2$ 这 2 种情况下三电平 Boost 电路的电压增益。

当 $V_I<V_{OTL}/2$ 时，电感 L 在 1 个开关周期内的伏秒平衡关系为

$$\frac{1}{2}V_I D_{TL}T_s=\frac{1}{2}(V_{OTL}/2-V_I)(1-D_{TL})T_s \tag{1}$$

式中：T_s 为开关周期；D_{TL} 为半个开关周期内的稳态占空比。对式(1)进行整理，可得此时的电压增益 G_1 为

$$G_1=\frac{2}{1-D_{TL}} \tag{2}$$

当 $V_I>V_{OTL}/2$ 时，电感 L 在 1 个开关周期内的伏秒平衡关系为

$$\frac{1}{2}(V_I-V_{OTL}/2)D_{TL}T_s=\frac{1}{2}(V_{OTL}-V_I)(1-D_{TL})T_s \tag{3}$$

对式(3)进行整理，可得此时的电压增益 G_2 为

$$G_2=\frac{2}{2-D_{TL}} \tag{4}$$

可见，在这 2 种情况下三电平 Boost 电路的电压增益不同。

2.1.2 器件应力

根据三电平 Boost 电路的工作模态可知，电路中的开关器件和输出侧电容的电压应力均为输出电压的一半，即 $V_{OTL}/2$。记负载电流为 I_{OTL}，在 2 种情况 $V_I<V_{OTL}/2$ 和 $V_I>V_{OTL}/2$ 下分析器件电流应力。

当 $V_I<V_{OTL}/2$ 时，电感 L 的峰值电流 $i_{L\max1}$ 为

$$i_{L\max1}=\frac{V_{OTL}(1-D_{TL})D_{TL}T_s}{4L}+\frac{2I_{OTL}}{1-D_{TL}} \tag{5}$$

当 $V_I>V_{OTL}/2$ 时，电感 L 的峰值电流 $i_{L\max2}$ 为

$$i_{L\max2}=\frac{V_{OTL}(2-D_{TL})D_{TL}T_s}{4L}+\frac{2I_{OTL}}{2-D_{TL}} \tag{6}$$

因此，S_1、S_2 和 D_1、D_2 的电流应力为式(5)、式(6)中的较大者，即 $\max(i_{L\max1},i_{L\max2})$。

2.2 图腾柱 Boost 电路

2.2.1 电压增益

当柔性 DC-DC 变换器切换到图腾柱 Boost 电路时，工作模态变得相对简单。依据前文对图腾柱 Boost 电路工作模态的分析结果可知，电感 L 在 1 个开关周期内的伏秒平衡关系为

$$(V_I+V_{OTP})D_{TP}T_s=(V_{OTP}-V_I)(1-D_{TP})T_s \tag{7}$$

式中：V_{OTP} 为输出电压；D_{TP} 为 1 个开关周期内的稳态占空比。

对式(7)进行整理，可得电压增益 G_3 为

$$G_3=\frac{1}{1-2D_{\mathrm{TP}}} \tag{8}$$

2.2.2　器件应力

根据图腾柱 Boost 电路的工作模态可知，电路中的开关器件和输出侧电容的电压应力均为输出电压 V_{OTP}。记负载电流为 I_{OTP}，电感 L 的峰值电流 $i_{L\max 3}$ 为

$$i_{L\max 3}=\frac{2D_{\mathrm{TP}}(1-D_{\mathrm{TP}})V_{\mathrm{OTP}}T_{\mathrm{s}}}{L}+\frac{I_{\mathrm{OTP}}}{1-2D_{\mathrm{TP}}} \tag{9}$$

因此，S_1、S_2 和 D_1、D_2 的电流应力即为 $i_{L\max 3}$。

2.3 升压比比较分析

本文所研究柔性 DC-DC 变换器的升压能力是一个重要的评估指标。根据前文分析，当变换器在不同的拓扑结构之间切换时，升压比存在差异。图 5 分别给出了三电平 Boost 电路和图腾柱 Boost 电路的升压比随占空比的变化情况。

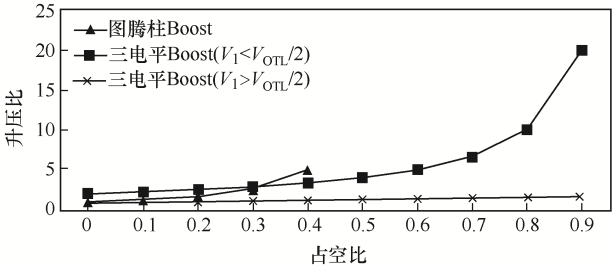


图 5　升压比比较分析

Fig. 5 Comparative analysis of step-up ratio

由图 5 可得，在三电平 Boost 电路中，当 $V_{\mathrm{I}}>V_{\mathrm{OTL}}/2$ 时，升压比不超过 2 倍；当 $V_{\mathrm{I}}<V_{\mathrm{OTL}}/2$，尤其是当占空比大于 0.5 时，升压能力较强。对于图腾柱 Boost 电路而言，由于电感的充磁电压是输入电压与输出电压之和，因此在充磁阶段储存的能量较高，具备较高的升压能力。通过图 5 可以看出，当占空比处于 0.3~0.5 区间时，图腾柱 Boost 电路具有最高的升压比。

2.4 拓扑切换考虑因素及实现方式

实际应用中柔性 DC-DC 变换器的功率器件规格是固定不变的。因此，根据具体应用中的电气参数来灵活选择电路拓扑。由前文分析可知，三电平 Boost 电路中功率开关的电压应力为图腾柱 Boost 电路的一半。因此，当柔性 DC-DC 变换器的输出电压较高时，可选择三电平 Boost 拓扑；当实际应用中的输出电压较低时，可选择图腾柱 Boost 拓扑。拓扑的切换边界条件为

$$V_{\mathrm{SW}}=\frac{V_{\mathrm{OTL}}}{2} \tag{10}$$

式中：V_{SW} 为分界阈值；V_{OTL} 为变换器工作在三电平 Boost 电路时的输出电压。

柔性 DC-DC 变换器的拓扑切换可用功率继电器来实现，如图 6 所示。双刀双掷开关的 4 个端口分别连接 O_1~O_4，另外 2 个端口直接相连。通过控制信号对继电器线圈进行远程控制，即可实现电路拓扑的自动切换。

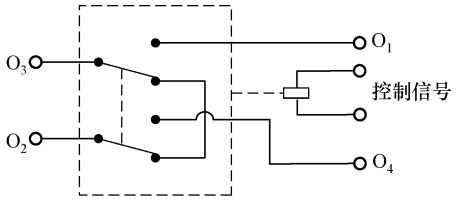


图 6　拓扑自动切换的实现

Fig. 6 Implementation of automatic switching between topologies

3　仿真与实验

通过软件仿真与硬件测试的方法对本文所提柔性 DC-DC 变换器的理论分析结果进行验证。

3.1 电路仿真

首先，基于 POWERSIM 公司的 PSIM 仿真环境对本文研究的柔性 DC-DC 变换器进行电路模拟分析。PSIM 软件具有界面简洁易用、器件模型丰富、收敛速度快等优点，非常适合电力电子电路的原理性验证工作。仿真过程中所用电路器件均为理想模型，并且为了便于实验设计，相关电气规格约为实际光伏发电系统电气规格的 1/10。

柔性 DC-DC 仿真电路模型的主要参数见表 1。仿真电路的满载输出功率为 640 W，根据相关研究经验，设置开关频率为 100 kHz 是一个合理的迭代起始值。电感电流纹波系数设置为 40%，根据式(2)和式(5)计算得到电感为 57 μH；根据式(7)和式(8)

计算得到电感为 100 μH。因此，取最终电感为 100 μH 即可满足 40%纹波系数的要求。对于电容 C_1 和 C_2 的取值，由于三电平拓扑时输出电压较高，因此设置其输出电压纹波系数为±3%，所需最小输出电容的计算式为

$$C_{\min}=\frac{I_{\mathrm{OTL}}D_{\mathrm{TL}}T_{\mathrm{s}}}{\Delta V_{\mathrm{OTL}}} \tag{11}$$

根据式(11)计算得所需最小输出电容为 5 μF。因此，电容 C_1 和 C_2 取值 10 μF。

表 1 主要的仿真参数

Tab. 1 Main simulation parameters

参数	取值
输入电压 V_{I}/V	32
电感 L/μH	100
电容 C_1、C_2/μF	10
输出电压 V_{OTP}/V	80
输出电压 V_{OTL}/V	160
输出电流 I_{OTP}/A	8
输出电流 I_{OTL}/A	4
开关周期 T_{s}/μs	10

研究输出 80 V/8 A 和 160 V/4 A 这 2 种电气规格要求下柔性 DC-DC 变换器的表现。当输出 80 V/8 A 时，切换到图腾柱 Boost 拓扑；当输出 160 V/4 A 时，切换到三电平 Boost 拓扑。图 7 给出了输出 80 V/8 A 满载时，图腾柱 Boost 电路中 L 电流、S_1 电流和 S_1 漏源电压的仿真波形。电感电流纹波峰峰值约为 3 A，S_1 电压应力为输出电压 80 V，S_1 电流应力为 22 A。

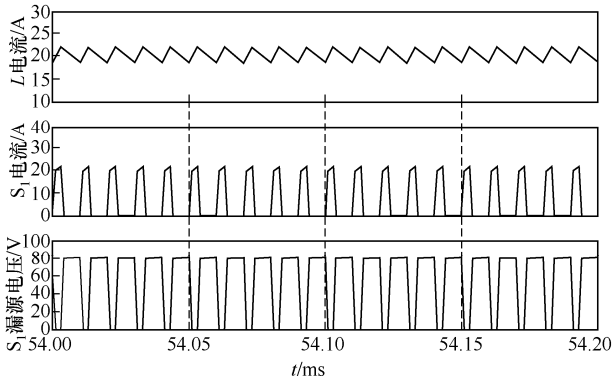


图 7 工作在图腾柱 Boost 拓扑时的 L 电流、S_1 电流和 S_1 漏源电压波形

Fig. 7 Waveforms of L current, S_1 current and S_1 drain-to-source voltage under operation of totem-pole Boost topology

图 8 给出了输出 160 V/4 A 满载时，三电平 Boost 电路中 L 电流、S_1 电流和 S_1、S_2 漏源电压的仿真波形。鉴于三电平 Boost 电路的特性，L 在相同感值的情况下，电流纹波为图腾柱 Boost 电路中电感电流纹波的 1/4，从仿真结果中可得纹波峰峰值约为 0.72 A，符合理论分析结果。S_1 和 S_2 的电压应力均为 80 V，即输出电压的一半。S_1 电流应力为 20.5 A。D_1 和 D_2 的电压应力与电流应力分别与 S_1 和 S_2 一致，这里不再赘述。

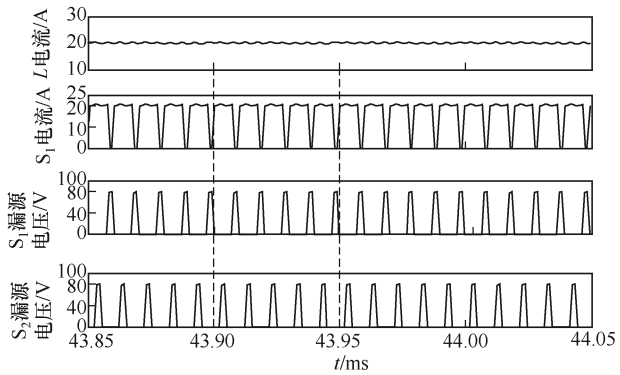


图 8 工作在三电平 Boost 拓扑时的 L 电流、S_1 电流和 S_1、S_2 漏源电压波形

Fig. 8 Waveforms of L current, S_1 current, and S_1 and S_2 drain-to-source voltage under operation of three-level Boost topology

从图 7 和图 8 的仿真结果可见，柔性 DC-DC 变换器在面对 2 种不同的电气规格应用时，开关器件的电压应力一致。对于开关器件电流应力的较小差异，可以考虑以下 2 种方式来应对：一是直接选择额定电流符合实际应用上限值的器件；二是采用多个器件并联的方式。比如，使用多个 MOSFET 并联，根据实际情况控制使用其中的几个。因此，在 2 种不同的应用场合，柔性 DC-DC 变换器可以采用同一套功率器件选型和设计。

3.2 硬件测试

设计 1 台输入电压为 48 V、功率为 640 W 的硬件实验样机，样机主要器件参数与仿真参数一致。功率开关管 S_1 和 S_2 因为承受较高的输出电压，故需要选取门极电荷较低的器件以降低开关损耗。样机采用 Infineon 公司的 120 V 功率 MOSFET IPP147N12N3G，门极电荷仅为 37 nC。二极管 D_1

和 D_2 选择 Vishay 公司的 120 V 肖特基二极管 V10PW125，反向恢复问题几乎可以忽略，从而降低相应开关损耗。

实验平台和测试环境如图 9 所示。其中，输入电源为 Chroma 公司的 62000P 系列可编程直流源；输出负载为 Itech 公司的 IT8902A 系列可编程电子负载，同时可以显示输出功率；功率计和示波器分别来自 Yokogawa 公司的 WT300E 数字功率计和 DLM3000 系列混合信号示波器，用来量测输入功率和观测变换器电路波形。对实验样机进行测试，得到部分实验波形分别如图 10 和图 11 所示。

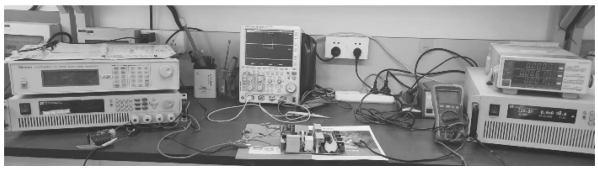


图 9　实验平台和测试环境

Fig. 9 Experimental platform and testing environment

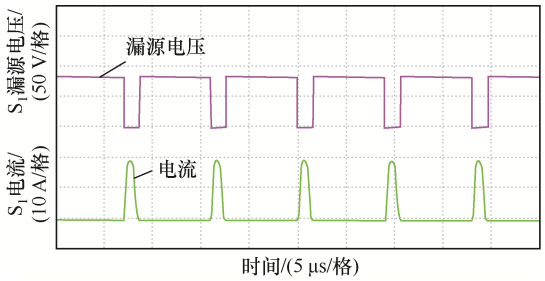


图 10　工作在图腾柱 Boost 拓扑时的 S_1 漏源电压和 S_1 电流实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms of S_1drain-to-source voltage and S_1 current under operation of totem-pole Boost topology

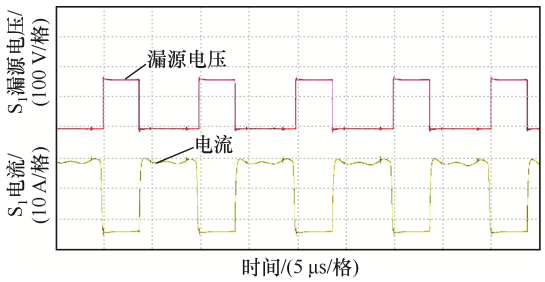


图 11　工作在三电平 Boost 拓扑时的 S_1 漏源电压和 S_1 电流实验波形

Fig. 11 Experimental waveforms of S_1drain-to-source voltage and S_1 current under operation of three-level Boost topology

图 10 展示了柔性 DC-DC 变换器工作在图腾柱 Boost 拓扑时 S_1 漏源电压和 S_1 电流的实验波形。根据式(8)可知，图腾柱 Boost 电路的占空比范围为 $0<D_{TP}<0.5$，图 10 中占空比约为 0.20。图 11 展示了柔性 DC-DC 变换器工作在三电平 Boost 拓扑时 S_1 漏源电压和 S_1 电流的实验波形，从波形中可以看出，此时 S_1 的占空比约为 0.67，与式(2)增益公式的计算结果一致。实验样机的测试结果和仿真分析所得结论一致，验证了仿真模拟和理论分析的正确性。

使用数字功率计和数字万用表分别计量输入功率数据和负载功率数据，对实验样机进行效率测试。分别在 25%、50%、75%和 100%负载 4 种情况下，量测柔性 DC-DC 变换器工作在三电平 Boost 拓扑和图腾柱 Boost 拓扑时的变换效率，所得效率曲线如图 12 所示。

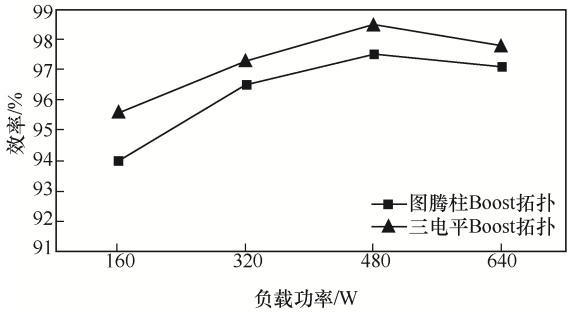


图 12　硬件样机的效率曲线

Fig. 12 Efficiency curves of hardware prototype

由图 12 可以看出，硬件样机在全负载范围内都具有较高的效率，98.5%的峰值效率出现在三电平 Boost 拓扑处于 75%负载工况下。

由于本文主要的工作集中于柔性 DC-DC 变换器的原理和特性分析验证，而关于该变换器的损耗分析和效率优化将在以后的工作中继续进行研究。

4　结论

本文提出了一种具有 2 种可选拓扑结构的柔性 DC-DC 升压变换器。根据 4 个输出端子的不同连接方式，该变换器可工作在三电平 Boost 拓扑和图腾柱 Boost 拓扑。通过分析这 2 种拓扑的电路结构和工作模态，推导了其各自的电压增益和器件应

力特性，并给出拓扑切换的边界条件和自动切换的实现方式。基于 PSIM 软件对主要器件参数进行设计和对理论分析结果进行仿真验证。在 1 台 640 W 硬件实验样机上进行测试，分别展示了在图腾柱 Boost 拓扑和三电平 Boost 拓扑下开关器件 S_1 的漏源电压和电流波形，并分别测试了硬件样机在 2 种拓扑结构下的变换效率。硬件实验结果与仿真和理论分析结论一致，同时验证了本文所提柔性 DC-DC 变换器具有应用灵活、电路结构简单和效率较高的特点。

下一步，将对柔性 DC-DC 变换器的损耗分析和效率优化以及该变换器的控制电路进行研究和设计。

参考文献：

[1] 王群伟, 杜倩, 戴星宇. 面向碳中和的可再生能源发展: 研究综述[J]. 南京航空航天大学学报(社会科学版), 2022, 24(4): 79-89.
Wang Qunwei, Du Qian, Dai Xingyu. Renewable energy development towards carbon neutrality: a research review [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences), 2022, 24(4): 79-89. (in Chinese)

[2] Qazi A, Hussain F, Rahim N A, et al. Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions [J]. IEEE Access, 2019, 7: 63837-63851.

[3] Bose B K. Power electronics, smart grid, and renewable energy systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(11): 2011-2018.

[4] Wei Yuqi, Mantooth A. A flexible resonant converter based battery charger with power relays [C]//2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Vancouver, BC, Canada, 2021: 1675-1680.

[5] Kan Jiarong, Wu Yunya, Yao Zhilei. A flexible topology converter for photovoltaic micro-inverter [C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Sydney, NSW, Australia, 2017: 1-5.

[6] Jain P, Prodić A, Gerfer A. Wide-input high power density flexible converter topology for DC-DC applications [C]//2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA, USA, 2016: 2553-2560.

[7] Zhang S, Wang Y, Chen B, et al. An implementation of flexible topology strategy for an interleaved full-bridge LLC resonant converter in residential photovoltaic power systems[C] //International Power Electronics and Motion Control Conference.2016: 1-7.

[8] Quan Zhongyi, Ding Li, Lu Juncheng, et al. Design considerations of the GaN power stage for a GaN/Si internal parallel multilevel converter based 1 500 V PV string inverter [C] //2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Aalborg, Denmark, 2020: 1-8.

[9] 唐丽, 曾怡达, 谭金练, 等. 新型高效高增益 Boost 变换器的研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(11): 17-19, 23.
Tang Li, Zeng Yida, Tan Jinlian, et al. Research on a novel high efficiency high gain Boost converter [J]. Power Electronics, 2017, 51(11): 17-19, 23. (in Chinese)

[10] 张洋, 乔双, 唐小峰, 等. 适用于光伏发电的新型交错并联 Boost 变换器[J]. 电力电子技术, 2015, 49(2): 69-71.
Zhang Yang, Qiao Shuang, Tang Xiaofeng, et al. Novel interleaved boost converter for the photovoltaic power generation system [J]. Power Electronics, 2015, 49(2): 69-71. (in Chinese)

[11] 朱云智, 冯文博, 高耀, 等. 基于交错并联 Boost 电路的离网光伏发电系统优化研究[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(11): 136-138, 152.
Zhu Yunzhi, Feng Wenbo, Gao Yao, et al. Optimization of off-grid photovoltaic power generation system based on interleaved boost circuits [J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(11): 136-138, 152. (in Chinese)

[12] 高圣伟, 王浩, 王议锋, 等. 多输入交错并联 Boost 变换器功率分配控制策略[J]. 太阳能学报, 2022, 43(12): 62-69.
Gao Shengwei, Wang Hao, Wang Yifeng, et al. Power distribution control strategy of multi-input interleaved parallel boost converter [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(12): 62-69. (in Chinese)

[13] 谢勇, 成刚, 方宇, 等. TL-Boost 光伏系统中两个关键技术的研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(1): 87-90.

Xie Yong, Cheng Gang, Fang Yu, et al. Research on two key technical problems in TL-Boost photovoltaic system [J]. Power Electronics, 2016, 50(1): 87-90. (in Chinese)

[14] 杨培盛, 张润泽, 郝帅, 等. 三电平 Boost 电路动态前馈稳压控制策略研究[J]. 电气传动, 2021, 51(14): 40- 44, 80.
Yang Peisheng, Zhang Runze, Hao Shuai, et al. Research on the dynamic feedforward voltage-stabilized control strategy of three-level Boost circuit [J]. Electric Drive, 2021, 51(14): 40-44, 80. (in Chinese)

[15] 侯飞, 张润泽, 杨培盛, 等. 三电平 Boost 电路两种控制策略的对比研究[J]. 电源技术, 2020, 44(11): 1683-1686.
Hou Fei, Zhang Runze, Yang Peisheng, et al. Research on two control strategies for three-level Boost converter [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(11): 1683-1686. (in Chinese)

[16] 董卓, 张岩, 刘进军, 等. 多单元二极管电容电感网络高增益直流变换器统一模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5527-5537.
Dong Zhuo, Zhang Yan, Liu Jinjun, et al. Unified model of high step-up DC-DC converter with multi-cell diode-capacitor/inductor network [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5527-5537. (in Chinese)

[17] Zhang Yan, Zhang Chaoyi, Liu Jinjun, et al. Comparison of conventional DC-DC converter and a family of diode-assisted DC-DC converter [C] //Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. Harbin, 2012: 1718-1723.

[18] Ahmad A, Singh R K. Active-switched-capacitor based diode assisted and capacitor assisted extended switched boost-Z-source inverters [C]//2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Portland, OR, USA, 2018: 2594-2600.



赵猛

作者简介：

赵猛(1989—)，男，硕士，工程师。研究方向：电力营销、电力电子在智能配电网中应用，综合能源与需求响应。E-mail：zhaomeng2023@126.com。

付明(1986—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：新能源接入与运行控制，综合能源服务。E-mail：fuming@sgepri.sgcc.com.cn。

李亚飞(1991—)，男，博士，工程师。研究方向：电力电子技术，电动汽车与电网供需互动。E-mail：liyafei1991@163.com。

马千里(1980—)，男，本科，工程师。研究方向：新能源接入与运行控制，综合能源服务。E-mail：mql2335@163.com。

朱庆(1981—)，男，博士，副高级工程师。研究方向：电力信息采集与通信，电源储能控制。E-mail：dreamathstat@163.com。

刘乙(1988—)，男，硕士，工程师。研究方向：分布式发电与并网技术，用电信息采集。E-mail：13771726125@163.com。

(责任编辑：陈国珍)