

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518952

基于三绕组耦合电感的高增益三端口变换器^{*}

郭庆明^{1,2} 毛玉蓉¹ 陈文辉² 杨居朋² 周翔³(1.长江大学地球物理与石油资源学院 武汉 430100;2.中国石油测井公司测井技术研究院 西安 710077;
3.西安交通大学电气工程学院 西安 710049)

摘要:在可再生能源系统中,采用高增益三端口变换器将光伏组件与储能系统集成至高压直流母线是能够有效提升功率密度和效率,受到广泛的关注。针对传统三端口变换器电压增益有限、难以实现软开关、半导体器件电压应力高等问题,本文提出一种基于三绕组耦合电感的新型超高电压增益三端口变换器拓扑。该拓扑仅采用单一磁芯结构,可有效提升变换器的功率密度。变换器中半导体器件具有远低于直流母线的电压应力,能够选用导通损耗更低的器件规格,且能够实现软开关运行,从而降低系统损耗并提升效率。进一步设计一种变换器的端口功率流控制方法,基于端口功率关系,所提变换器可实现不同工作模式间的平滑切换。本文详细分析了该拓扑结构及工作原理,进而对端口电压关系、电压/电流应力及控制方法进行深入分析以指导参数设计。最后,构建了光伏输入电压20~40 V、储能电池电压48 V、输出电压400 V、额定功率400 W的仿真模型和实验样机,验证了所提高增益三端口变换器及其控制方法的有效性。

关键词:高电压增益;三端口变换器;耦合电感;光伏-储能系统

中图分类号: TM462; TN86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

High gain three-port converter based on three-winding coupled inductor

Guo Qingming^{1,2} Mao Yurong¹ Chen Wenhui² Yang Jupeng² Zhou Xiang³(1. College of Geophysics and Petroleum Resources, Yangtze University, Wuhan 430100, China;
2. Logging Technology Research Institute, China National Logging Corporation, Xi'an 710077, China;
3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: It is a desired solution to integrate photovoltaics (PV) and battery into the high-voltage dc bus using high-gain three-port converters in renewable energy systems. Aiming at the limitations of conventional three-port converters—including restricted voltage gain, difficulty in achieving soft switching, and high voltage stress on semiconductor devices—this paper proposes a novel ultra-high voltage gain three-port converter topology based on a three-winding coupled inductor. Only one magnetic core is used so that the power density of the converter is effectively improved. The lower voltage stress and soft switching performance of semiconductor devices enable specifications with lower conduction losses to be selected, which can reduce system losses and improve efficiency. Based on the port power relationship, the proposed converter can achieve smooth switching between different operating modes. The topology and operating principles of the converter are analyzed in detail, and then the port voltage relationship, voltage/current stress, and control methods are analyzed in detail to guide parameter design. Finally, both simulation models and experimental prototypes were developed with PV input voltages ranging from 20 V to 40 V, a battery voltage of 48 V, an output voltage of 400 V, and a rated power of 400 W, validating the effectiveness of the proposed high-gain three-port converter and its control strategy.

Keywords: high voltage gain; three-port converter; coupled inductor; PV-battery system

0 引言

随着环境污染和能源危机问题的日益突出,清洁无污

染的可再生能源作为替代化石能源的重要选择被广泛关注,其在电力系统一次能源中的占比持续提升^[1-3]。以光伏发电为例,其输出功率随光照强度、温度等环境条件变化,

收稿日期:2025-05-27

* 基金项目:中国石油天然气集团测井有限公司《测井应用基础与前沿储备技术研究》开放基金(CNLC2022-9C06, WBS: F-D60024K6.1, FW-202409-00021)项目资助

呈现出间歇性和波动性的功率特性。因此,光伏发电系统必须配置储能装置以保证供电的稳定可靠,即形成光伏-储能系统^[4-6]。

通常情况下,光伏组件和储能系统的端口电压较低,而负载和逆变器的输入端口需要较高的直流母线电压。因此,需要采用高增益直流变换器来实现光伏组件、储能系统与高压直流母线的接口连接。传统方案光储系统采用多个独立的高增益两端口变换器分别连接光伏组件和储能系统。这种架构虽在直流微电网系统中广泛应用,但存在系统成本高、控制分散、功率多级转换及效率低下等缺点^[7-9]。比传统多变换器结构更具竞争力的解决方案是采用高增益三端口变换器将光伏组件和储能系统集成至高压直流母线。现有研究表明,与多个独立高增益变换器相比,高增益三端口变换器具有以下优势:单级功率转换、更高电能变换效率、更低器件成本以及无需额外通信系统的统一功率管理^[10-12]。

传统 Boost 变换器由于电压增益有限且受寄生参数影响,往往难以实现数十倍的升压需求。为提升变换器电压增益,目前已学者已经提出多种高增益拓扑构建技术,包括开关电容、开关电感、耦合电感及阻抗源网络等。文献[13]提出了一种适用于高增益应用的光伏-蓄电池功率整合型三端口变换器,该变换器采用 5 个功率开关、2 个耦合电感和两个有源钳位电路,虽能实现部分开关管的软开关、高增益和低电压应力,但因开关器件和磁性元件数量较多,在成本和体积方面存在不足。文献[14]所提变换器通过耦合电感与倍压电路的组合实现高输出电压增益,但未对软开关特性进行充分分析与验证。文献[15]和[16]针对混合能源系统提出了两种基于耦合电感的非隔离型高压三端口变换器,均采用双有源钳位电路实现高增益和软开关。文献[17]提出的高增益三端口变换器结合了输入端口电流源输入与输出端口倍压整流技术,具有开关器件少、可实现软开关等优势,适合可再生能源系统应用。

值得注意的是,文献[15-17]所提变换器均包含两个及

以上磁性元件,不利于实现小型化和高功率密度。为此,文献[18]和[19]提出了采用单一磁性元件的高增益三端口变换器。文献[18]通过耦合电感与二极管电容单元的组合实现足够高的电压增益,但未考虑软开关特性;文献[19]则采用多端口共享的单个耦合电感同时实现高增益与软开关,显著减小了体积并提高了功率密度。文献[20-22]分别提出了 3 种非隔离型高增益三端口变换器,其通过在传统三端口变换器中引入阻抗源网络、开关电容单元、耦合电感等方式实现高输出电压增益,但均存在器件数量多、难以实现软开关等问题。

针对上述高增益三端口变换器系统中存在的问题,本文提出了一种基于三绕组耦合电感的超高增益三端口变换器,用于在光伏储能系统中实现源与高压直流母线的集成单级功率变换。该变换器具有以下优势:1) 超高电压增益使得系统可在有限占空比条件下实现光伏、蓄电池向高压直流母线的功率变换;2) 单一磁性元件有助于提高功率密度并减小体积;3) 半导体器件电压应力较低,可选用导通损耗更小的器件以提高系统效率;4) 能根据端口功率关系平滑切换工作模式,确保系统在宽范围内稳定运行。

本文结构安排如下:第 2 节阐述所提变换器及其工作模式;第 3 节详细分析包括电压增益、电压/电流应力及控制方法在内的稳态特性;第 4 节通过仿真模型验证所提变换器及控制方法的有效性;最后第 5 节总结全文。

1 提出的变换器及其工作原理

如前所述,在光伏/储能系统中采用如图 1(a)所示的多变换器结构存在成本高、控制分散、功率多级转换及效率低下等缺点。采用如图 1(b)所示的高增益三端口变换器实现光伏单元、储能系统与高压直流母线之间的集成单机功率变换能够有效解决传统多变换器系统存在的问题。下面详细描述本文提出的基于三绕组耦合电感的高增益三端口变换器结构及其工作原理。

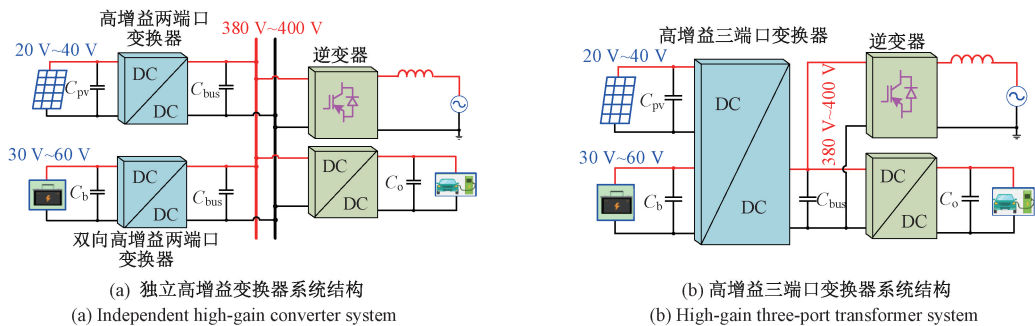


图 1 基于高增益变换器的光伏储能系统基本架构

Fig. 1 The basic architecture of photovoltaic energy storage system based on high-gain converter

1.1 变换器结构

本文所提出的高增益三端口变换器的结构如图 2 所示。该变换器采用一个三绕组耦合电感 L 来提升输出端

口的电压增益,该耦合电感的第 1 绕组 N_p 、第 2 绕组 N_s 和第 3 绕组 N_t 构成,其匝比分别为 $n_1 = N_s/N_p$ 和 $n_2 = N_t/N_p$ 。为更清晰地阐明变换器工作原理,图 3 给出了所

提高增益三端口变换器的等效电路模型,其中耦合电感 L 被建模为一个理想三绕组自耦变压器并联一个励磁电感 L_m ,再串联一个漏感 L_k 的结构。

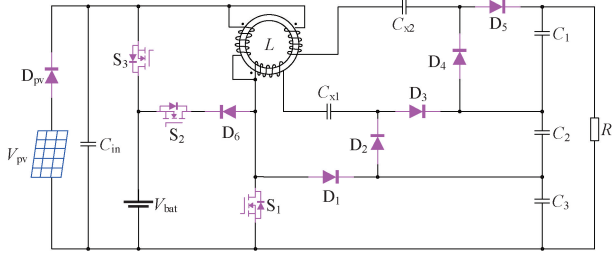


图2 提出的基于三绕组耦合电感的高增益三端口变换器
Fig. 2 The proposed high-gain three-port converter based on three-winding coupled inductors

如图3所示,该变换器包含3个功率端口:光伏输入端口、具备双向功率流动能力的储能端口以及高压直流母线端口,其中, V_{pv} 和 I_{pv} 分别表示光伏输入端口的电压和电流;二极管 D_{pv} 串联于光伏输入端口,用于防止能量反向流动至光伏组件。耦合电感 L 的三个绕组电流分别为 i_{Lk} 、 i_s 和 i_t ,其方向如图3中所示。储能端口的电压和电流分别是 V_{bat} 和 i_{bat} ;高压直流母线端口的电压和电流分别是 V_o 和 I_o 。二极管 D_{pv} 串联至光伏输入端口防止反向电流注入光伏电池。

根据光伏组件发电功率与负载需求功率之间的关系,本文所提出的高增益三端口变换器可工作在3种不同模式:当光伏输入功率大于负载 R 所需功率时,开关管 S_3 关

断,变换器工作于单输入双输出(single-input dual-output, SIDO)模式,蓄电池吸收剩余功率进行充电;当光伏输入功率小于负载 R 需求功率时,开关管 S_2 关断,系统运行于双输入单输出(dual-input single-output, DISO)模式,蓄电池放电以补充功率差额;当光伏输入功率为零时(该工况常发生在夜间或阴雨天条件下),仅由蓄电池向负载供电,此时变换器工作于单输入单输出(single-input single-output, SISO)模式。鉴于 SISO 模式实质上是 SIDO 和 DISO 模式的特例,下文将重点分析 SIDO 与 DISO 两种工作模式。

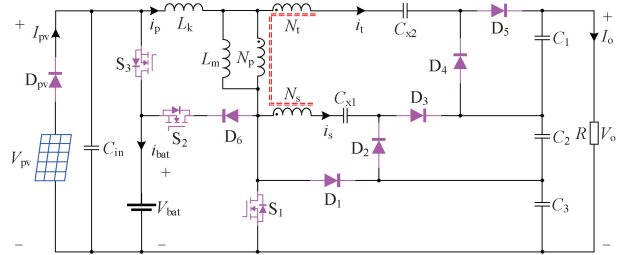


图3 所提高增益三端口变换器的等效电路

Fig. 3 The equivalent circuit of the high-gain three-port converter

1.2 变换器在 SIDO 模式的工作原理分析

为简化分析,现作如下假设:1) 所有开关管均为理想器件,忽略寄生参数;2) 所有电容容值足够大,可忽略电压纹波,其端电压保持恒定。

图4(a)和图5分别给出了所提高增益三端口变换器在 SIDO 模式下的稳态关键波形和等效电路。该变换器在一个开关周期内包含7个开关模式,具体分析如下:

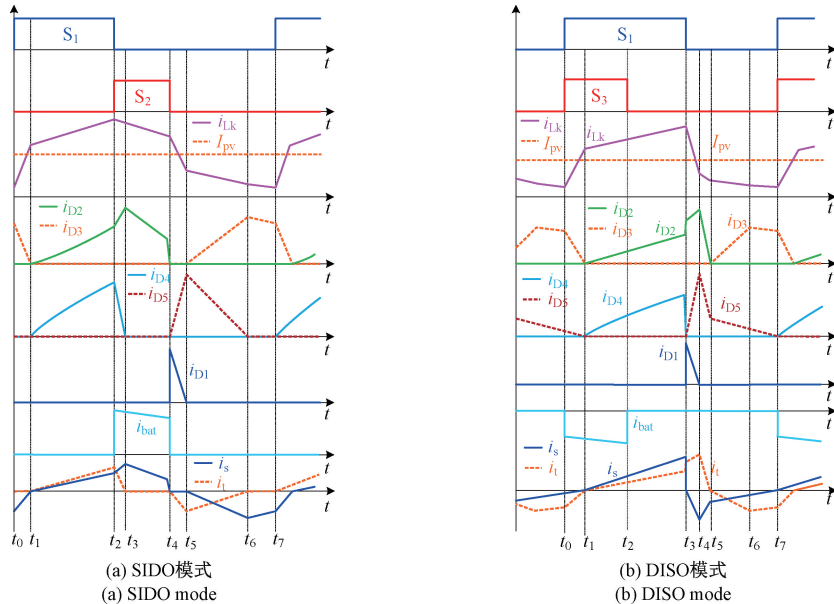


图4 所提高增益三端口变换器在不同工作模式的理论波形图

Fig. 4 The theoretical waveform of the high-gain three-port converter in different operating modes

断,开关管 S_1 导通,其电流从零开始上升。二极管 D_3 保持导通且电

流持续衰减。至 t_1 时刻, D_3 实现零电流关断(zero current switching, ZCS)。

开关状态 II($t_1 \sim t_2$) [对应图 5(b)]: t_1 时刻 D_3 完成 ZCS 关断后, 二极管 D_2 与 D_4 电流从零开始上升。该阶段结束于 S_1 关断时刻。

开关状态 III($t_2 \sim t_3$) [对应图 5(c)]: 此阶段开关管 S_2 导通为蓄电池充电, D_2 与 D_4 持续导通直至 t_3 时刻电流降为零。

开关状态 IV($t_3 \sim t_4$) [对应图 5(d)]: D_2 继续导通直至 t_4 时刻电流归零。

开关状态 V($t_4 \sim t_5$) [对应图 5(e)]: t_4 时刻 S_2 关断,

二极管 D_1 导通为漏感 L_k 提供续流通路。

开关状态 VI($t_5 \sim t_6$) [对应图 5(f)]: t_5 时刻 D_1 电流以 ZCS 方式降为零, 同时 D_3 电流开始上升。该阶段终止于 D_5 电流降为零的时刻。

开关状态 VII($t_6 \sim t_7$) [对应图 5(g)]: t_6 时刻 D_5 实现 ZCS 关断, 电路其他状态与前一开关周期相同, 此阶段结束于 S_1 再次导通时刻。

从上述分析可以看出, 在 SIDO 模式下, 变换器中储能端口吸收能量, 电池处于充电状态。

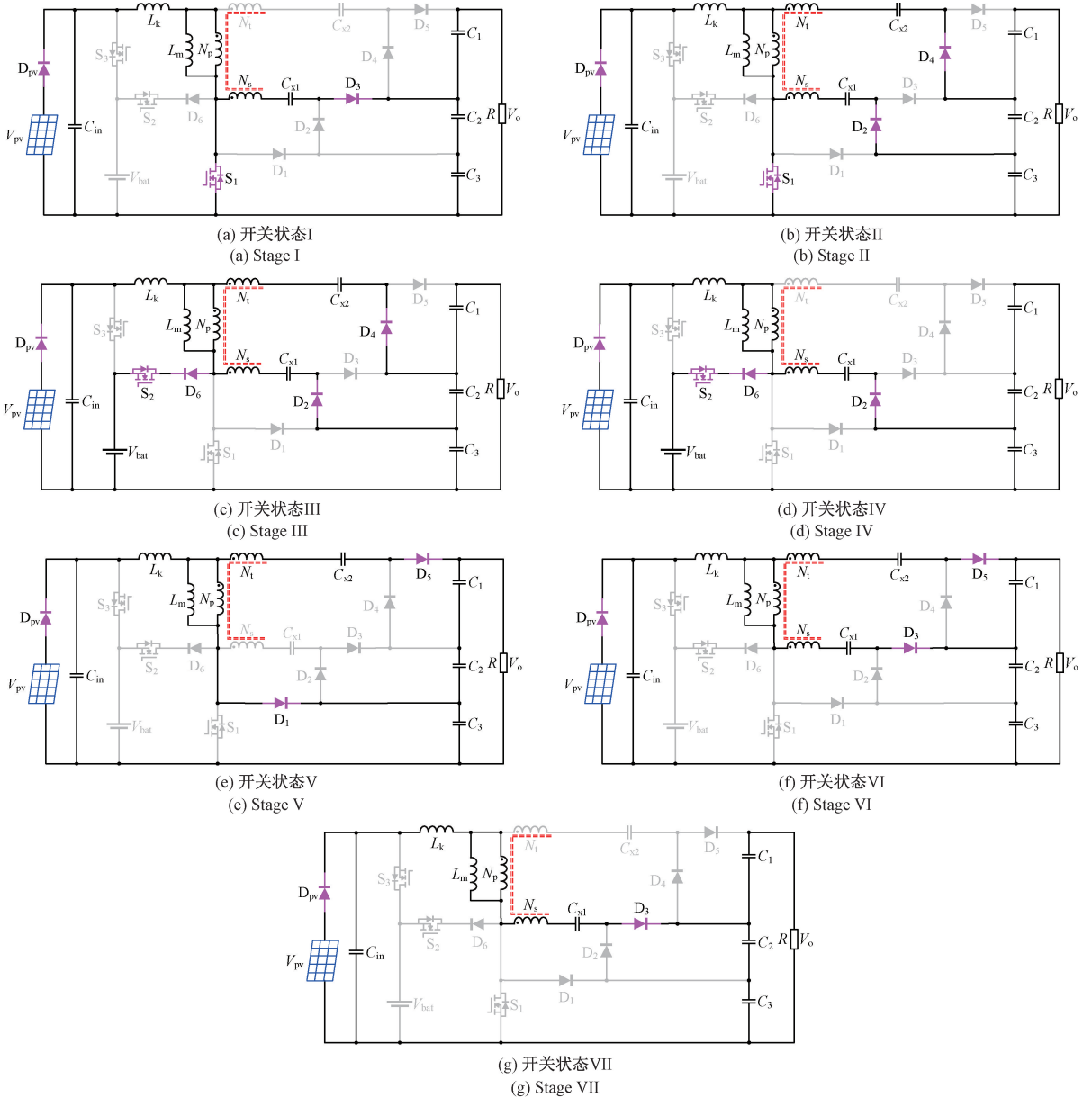


图 5 所提高增益三端口变换器在 SIDO 模式下一个开关周期内的开关模式等效电路

Fig. 5 The equivalent circuit of the high-gain three-port converter in the SIDO mode during one switching cycle

1.3 变换器在 DISO 模式的工作原理分析

所提高增益三端口变换器在 DISO 模式下的稳态关键

波形和等效电路分别如图 4(b) 和图 6 所示。该变换器在一个开关周期内包含 7 个工作阶段, 具体分析如下:

开关模式 I ($t_0 \sim t_1$) [对应图 6(a)]: t_0 时刻开关管 S_1 和 S_3 导通, 蓄电池 V_{bat} 放电为耦合电感 L 励磁。二极管 D_3 电流逐渐减小, 并于 t_1 时刻实现 ZCS 关断。

开关模式 II ($t_1 \sim t_2$) [对应图 6(b)]: t_1 时刻 D_3 完成 ZCS 关断后, 二极管 D_2 和 D_4 电流从零开始上升。该阶段终止于 S_3 关断时刻。

开关模式 III ($t_2 \sim t_3$) [对应图 6(c)]: 此阶段仅 S_1 保持导通, D_4 持续导通直至 t_3 时刻电流降为零。

开关模式 IV ($t_3 \sim t_4$) [对应图 6(d)]: t_3 时刻 S_2 关断, 二极管 D_1 导通为漏感 L_k 提供续流通路。

开关模式 V ($t_4 \sim t_5$) [对应图 6(e)]: t_4 时刻 D_1 电流以 ZCS 方式降为零, 该阶段结束于 D_2 电流归零时刻。

开关模式 VI ($t_5 \sim t_6$) [对应图 6(f)]: t_5 时刻 D_2 实现 ZCS 关断, 同时 D_3 开始导通且电流从零上升。

开关模式 VII ($t_6 \sim t_7$) [对应图 6(g)]: t_6 时刻 D_5 完成 ZCS 关断, 电路其他状态与前一开关周期相同, 此阶段终止于 S_1 和 S_3 再次导通时刻。

从上述分析可以看出, 在 DISO 模式下, 变换器中储能端口口释放能量, 电池处于放电状态。

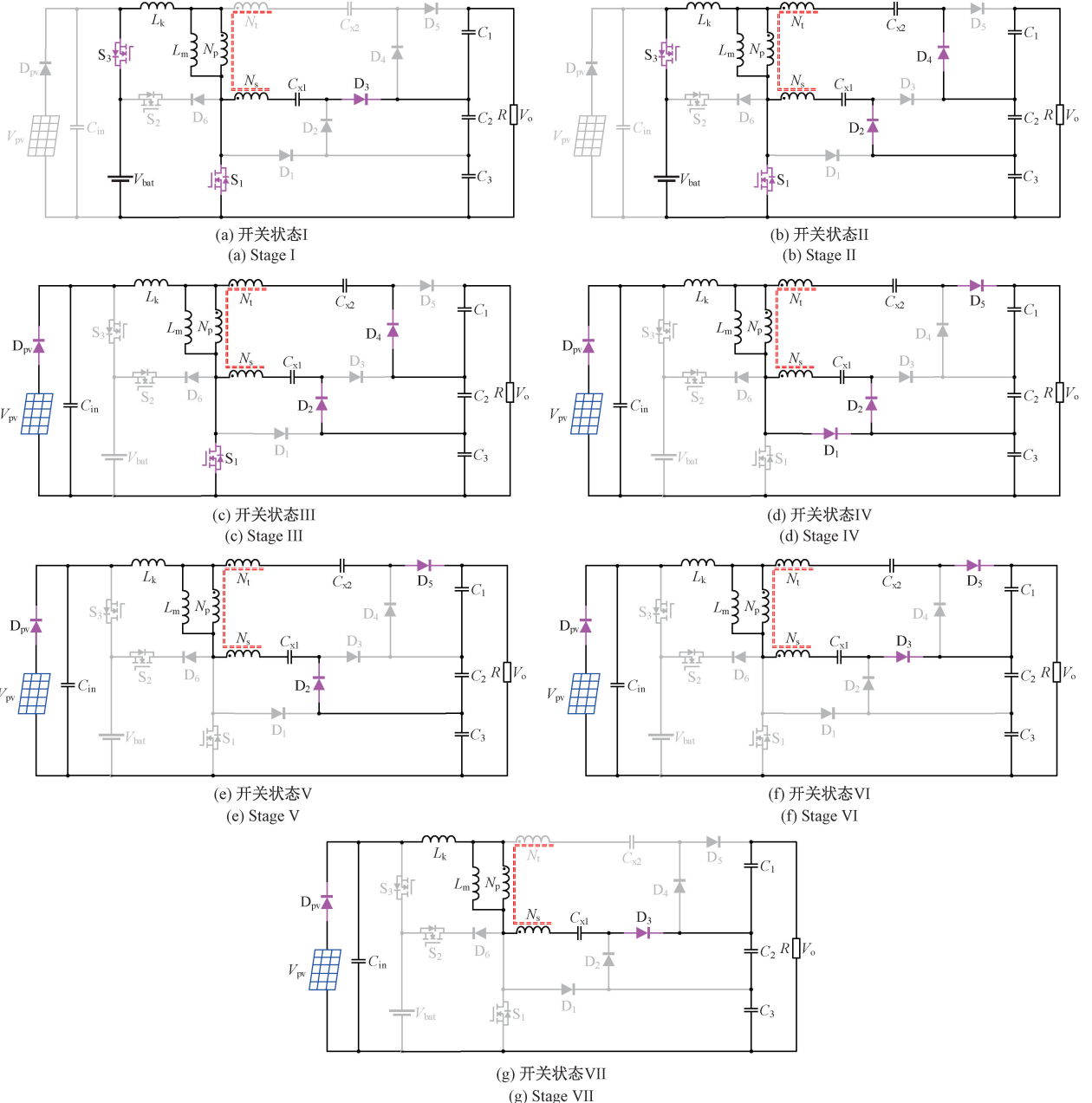


图 6 所提高增益三端口变换器在 DISO 模式下一个开关周期内的开关模式等效电路

Fig. 6 The equivalent circuit of the high-gain three-port converter in the DISO mode during one switching cycle

需要说明的是,当变换器工作在 SISO 模式时,仅由蓄电池为负载供电,该模式实为 SIDO 和 DISO 模式的特例。SISO 模式的工作原理可参照上述方法进行分析,本文不再赘述。从上述工作原理分析也能够看出,变换器中所有二极管在所有工作模式下均能够实现 ZCS,这得益于耦合电感中漏感的存在使得电流的上升和下降斜率均较慢。为了降低储能端口的电流纹波,从而增加电池使用寿命,实际应用中需要再储能端口增加适当的滤波电路来吸收储能端口的开关纹波。

2 变换器的稳态特性分析

本节对所提高增益三端口变换器的稳态特性进行分析,包括变换器的端口电压关系及电容稳态电压、半导体器件的电压应力和电流应力、变换器的全工况多模式控制方法等。为了简化分析,忽略电路中的寄生参数和耦合电感的漏感,忽略变换器工作原理中较短的开关模式,仅考虑主要开关状态。

2.1 端口电压关系分析

为推导所提变换器的端口电压关系,现对耦合电感的励磁电感 L_m 应用伏秒平衡原理,并结合耦合电感中 3 个绕组的电压关系列写等式。当变换器工作在 SIDO 模式时,可得到电压关系式如式(1)所示。

$$\begin{cases} V_{pv}D_1 + (V_{pv} - V_{bat})D_2 + (V_{pv} - V_{C3})(1 - D_1 - D_2) = 0 \\ n_1V_{pv} + V_{C3} = 0 \\ n_2V_{pv} + V_{C2} + V_{C3} = V_{pv} \\ n_1(V_{pv} - V_{C3}) + V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} - V_{pv} + (V_{pv} - V_{C3}) = 0 \\ n_2(V_{pv} - V_{C3}) + V_{C2} + V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} = V_{pv} \end{cases} \quad (1)$$

根据上述等式,可以求解出电容的稳态电压与输入输出电压之间的关系为:

$$\begin{cases} V_{C3} = \frac{V_{pv} - V_{bat}D_2}{(1 - D_1 - D_2)} \\ V_{C2} = (1 + n_1)V_{C3} = (1 + n_1) \frac{V_{pv} - V_{bat}D_2}{(1 - D_1 - D_2)} \\ V_{C1} = n_2V_{C3} = n_2 \frac{V_{pv} - V_{bat}D_2}{(1 - D_1 - D_2)} \end{cases} \quad (2)$$

因此,可以推导出提出的变换器在 SIDO 模式下高压输出端口的稳态电压与光伏、储能端口电压之间的关系为:

$$V_o = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} = (2 + n_1 + n_2) \frac{V_{pv} - V_{bat}D_2}{(1 - D_1 - D_2)} \quad (3)$$

基于相似的工作原理和推导过程,可以解出当变换器工作在 DISO 模式时,其稳态电容电压与光伏端口电压、电池端口电压的关系为:

$$\begin{cases} V_{C3} = \frac{V_{pv}(1 - D_3) + V_{bat}D_3}{(1 - D_1)} \\ V_{C2} = (1 + n_1)V_{C3} = (1 + n_1) \frac{V_{pv}(1 - D_3) + V_{bat}D_3}{(1 - D_1)} \\ V_{C1} = n_2V_{C3} = n_2 \frac{V_{pv}(1 - D_3) + V_{bat}D_3}{(1 - D_1)} \end{cases} \quad (4)$$

$$V_o = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} = (2 + n_1 + n_2) \frac{V_{pv}(1 - D_3) + V_{bat}D_3}{(1 - D_1)} \quad (5)$$

当变换器工作于 SISO 模式时,开关 S3 始终导通,开关 S2 始终关断,取等式(3)和(5)的特殊情况,可以得到 SISO 模式下变换器的输出电压增益为:

$$G = \frac{V_o}{V_{bat}} = \frac{(2 + n_1 + n_2)}{(1 - D_1)} \quad (6)$$

为更直观地展示所提变换器的高增益特性,图 7 给出了电压增益与占空比及匝比的关系曲线。其中,图 7(a)和图 7(b)分别对应 $V_{pv} = 40 \text{ V}$ 、 $V_{bat} = 48 \text{ V}$ 时的 SIDO 和 DISO 工作模式,图 7(c)则为 SISO 模式下的特性曲线(其中 M 表示电压增益, $M = V_o/V_{bat}$)。分析可知,所提高增益三端口变换器能在有限占空比范围内实现极高的输出电压,使其适合作为光储系统与高压直流母线之间的接口变换器。

2.2 器件的电压应力/电流应力分析

半导体器件的电压应力和电流应力是器件选型的关键参数。器件承受的电压应力越小,则可以选择更低导通电阻的器件规格型号,从而提升系统效率。根据变换器的工作原理,各半导体器件的电压应力可表述为:

$$\begin{cases} V_{S1} = V_{bat} \\ V_{S2} = V_{bat} - V_{pv} \\ V_{S5} = V_o / (2 + n_1 + n_2) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} V_{D1} = V_o / (2 + n_1 + n_2) \\ V_{D2} = (1 + n_1)V_o / (2 + n_1 + n_2) \\ V_{D3} = (1 + n_1)V_o / (2 + n_1 + n_2) \\ V_{D4} = n_2V_o / (2 + n_1 + n_2) \\ V_{D5} = n_2V_o / (2 + n_1 + n_2) \end{cases} \quad (8)$$

根据上述分析结果可知,所提变换器中所有半导体器件的电压应力均远小于输出电压 V_o 。因此,在实际的工程应用中可选用导通损耗较低的器件规格,从而有效提升变换器效率。此外,由工作原理分析可得,由于电容在一个开关周期内的平均电流等于 0,二极管 $D_1 \sim D_5$ 的平均电流均等于变换器的输出电流,可以表示为:

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I_{D4} = I_{D5} = I_o \quad (9)$$

基于上述分析结论和计算结果可以在考虑一定裕量的条件下选择半导体器件的型号和规格。

2.3 能量管理与控制方法

当所提变换器用于光伏组件与储能系统同直流母线的单级功率变换时,需同时实现光伏端口的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制与直流母线的恒压控制。经分析可知,文献[23]提出的控制策略同样适用于本文高增益三端口变换器,其控制框图如图 8 和图 9 所示。详细的控制原理和模式切换原理描述如下:

在图 8 中,能量管理与控制系统包括 4 个调节器,分别为:输入电压调节器(input voltage regulator, IVR)实现

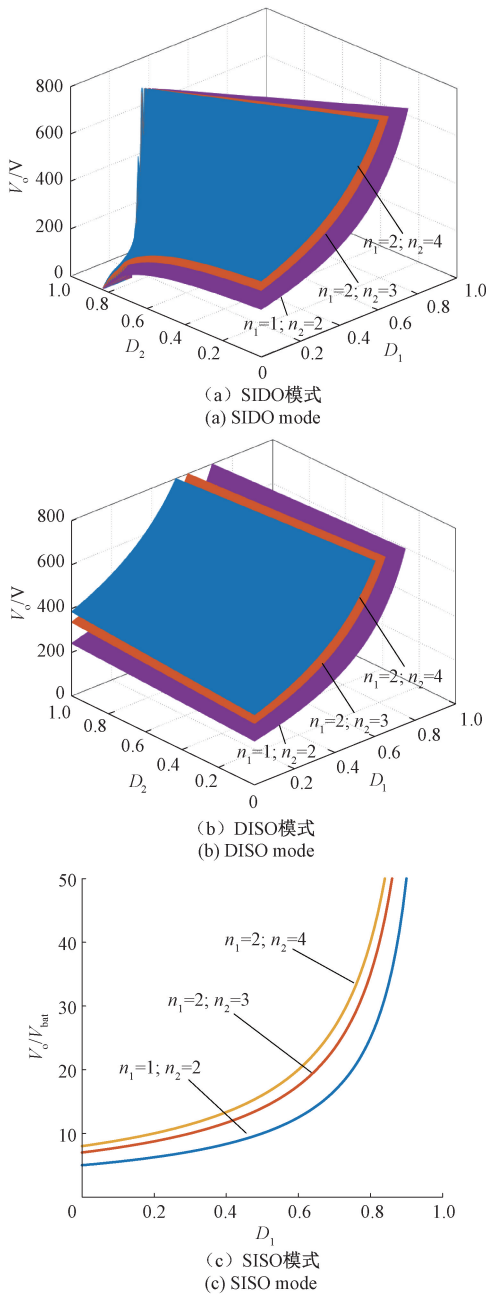


图7 所提高增益三端口变换器在不同工作模式下的电压增益与占空比、耦合电感匝比之间的关系

Fig. 7 The relationship among the voltage gain, the duty cycle, and the turns ratio of the coupling inductor under different operating modes

对光伏端口的MPPT控制、电池电压调节器(battery voltage regulator, BVR)和电池电流调节器(battery current regulator, BCR)分别实现储能系统的电压和电流控制,输出电压调节器(output voltage regulator, OVR)实现对高压直流母线的控制;图中 v_{e_IVR} 、 v_{e_BVR} 、 v_{e_BCR} 、 v_{e_OVR} 分别为IVR、BVR、BCR、OVR的输出, I_{bat_ref} 、 V_{bat_ref} 、 V_{o_ref} 分别为储能系统电流、储能系统电压和双极性输出电压的参考值。图8中的模式选择模块和PWM调制模块的具体

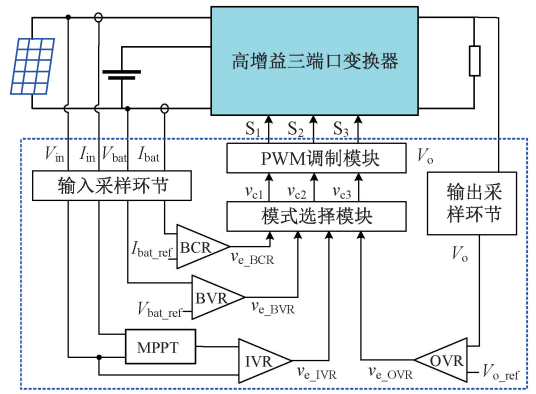


图8 高增益三端口变换器的能量管理与控制方法
Fig. 8 The energy management and control method of a high-gain three-port converter

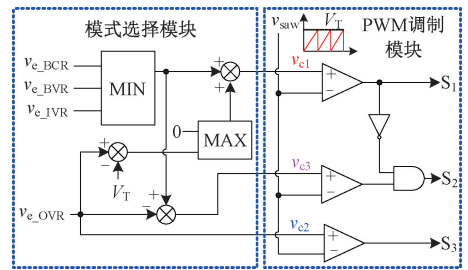


图9 模式选择和PWM的基本原理图

Fig. 9 The schematic diagram of mode selection and PWM

实现电路如图9所示,其中 V_T 是锯齿波 v_{saw} 的峰值。

在SIDO模式下, $v_{e_OVR} < 0$, 意味着直流母线的电压较高, 导致多余的能量向输出电容充电; 同时, 负载需求功率小于光伏提供的输入功率。由于在大多数情况下电池的充电状态是合理的, 所以 $v_{c1} = v_{e_IVR}$, 开关管 S_1 由 v_{c1} 控制来实现MPPT控制。开关管 S_2 由 v_{c3} 控制, 且 $v_{c3} = (v_{e_IVR} - v_{e_OVR}) > v_{c1}$, 实现对直流母线电压的控制; 由于 $v_{c2} = v_{e_OVR} < 0$, 开关管 S_3 始终关断。当储能端口电压达到 V_{bat_ref} 或储能系统充电电流达到 I_{bat_ref} 时, 则在模式选择单元中 v_{c1} 等于 v_{e_BVR} 或 v_{e_BCR} , 控制器通过控制 S_1 的占空比来调节储能系统的电压或充电电流。

在DISO模式下, 控制量满足 $0 < v_{e_OVR} < V_T$, 即由于输出电容能量不足, 导致输出电压过低。由于 $v_{c3} = (v_{c1} - v_{e_OVR}) < v_{c1}$, 开关管 S_2 处于关断状态。开关管 S_1 由 v_{c1} 控制, 以实现新能源的MPPT运行; 开关管 S_3 由 v_{c3} 控制, 以实现输出电压的调节。

在SIDO模式下, 控制量满足 $v_{e_OVR} > V_T$, 意味着光伏输入功率为0。开关管 S_1 由 $v_{c1} = (v_{e_OVR} - V_T)$ 控制, 调节输出电压。 $v_{c2} > V_T$, 以至于开关管 S_3 恒导通, 储能系统为双极性负载独立供电。

3 仿真结果

为验证所提变换器的有效性, 基于PSIM软件仿真平

台搭建了基于耦合电感的高增益三端口变换器仿真模型,其中直流母线电压设定为 400 V,电池电压设定为 48 V,额定功率设为 400 W。仿真软件版本为 PSIM Professional 2024.0.0.2471,仿真软件的运行环境为 Microsoft Windows 11 操作系统,硬件平台为配备 Intel(R) Core (TM) Ultra 7 155H 处理器和 32 GB DDR5 RAM 的笔记本电脑,仿真步长设置为 100 ns。仿真所用具体参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型中的电路参数

Table 1 Circuit parameters in the simulation model

参数	取值	参数	取值
输出电压 V_o	400 V	匝比 n_1/n_2	2.0/3.0
光伏电压 V_{pv}	20~40 V	输入电容 C_{in}	220 μ F
钳位电容 C_{x1} 和 C_{x2}	47 μ F	漏感 L_k	10 μ H
滤波电容 $C_1 \sim C_3$	470 μ F	开关频率	100 kHz
电池电压 V_{bat}	48 V	励磁电感	300 μ H

3.1 稳态仿真验证

在 SIDO 模式下,仿真测试条件设定为光伏输入电压 40 V、输入电流 10 A、负载功率 200 W 时的稳态仿真波形如图 10(a)所示。类似地,DISO 模式下设置光伏输入功率为 100 W,保持负载功率 200 W,其稳态仿真结果如图 10(b)所示。可以看出,变换器的仿真结果与理论分析完全吻合。当变换器工作在 SISO 模式时,设定光伏输入功率为 0,变换器负载功率为 400 W,采用相同方法进行仿真验证,结果如图 10(c)所示。

从图 10 所示的仿真结果还可看出,由于漏感对电流下降斜率的抑制作用,所有二极管均能实现 ZCS 关断。仿

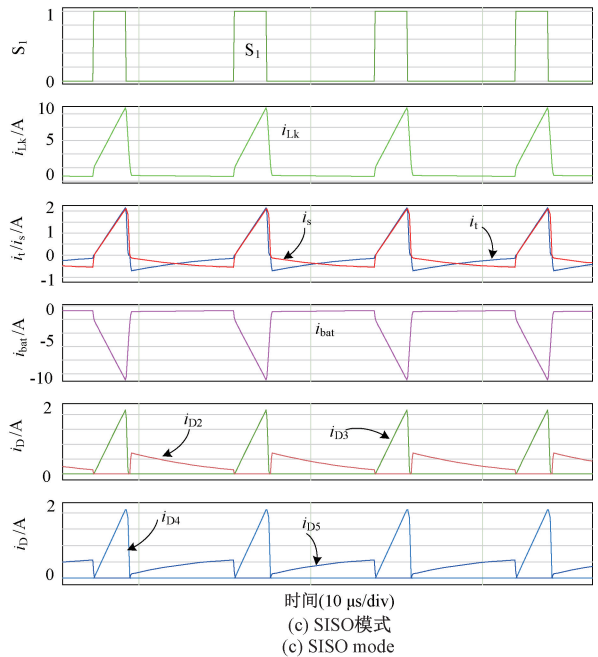
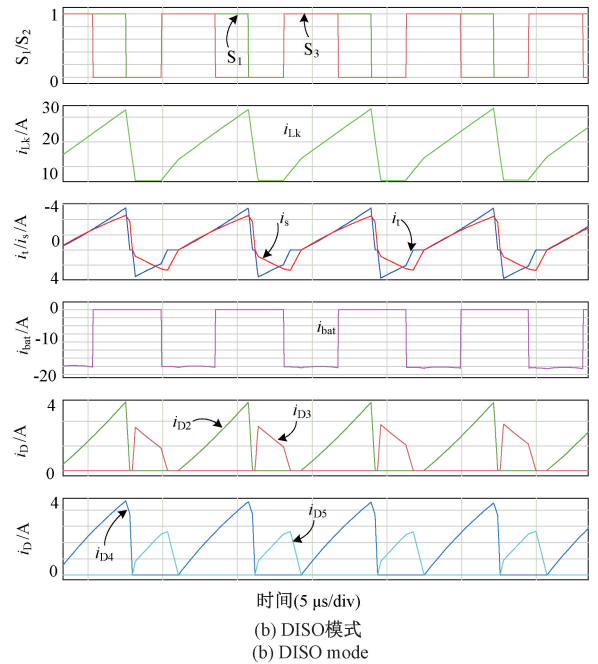
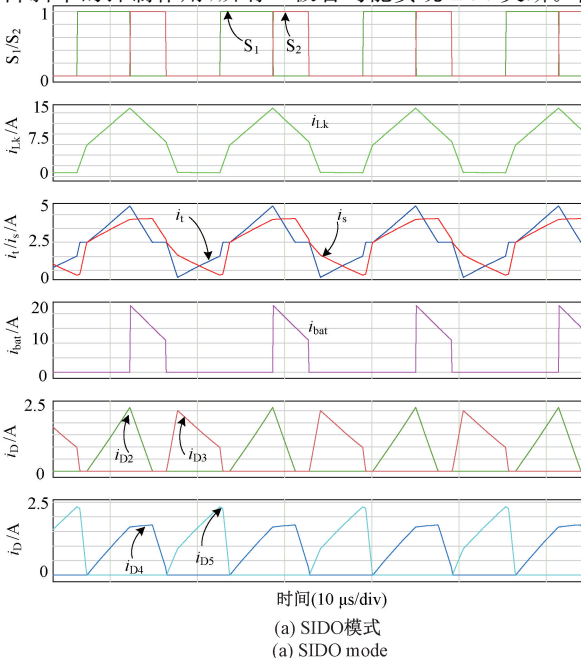


图 10 所提高增益三端口变换器在不同工作模式的稳态仿真结果

Fig. 10 Steady-state simulation results of the enhanced gain three-port converter under different operating modes

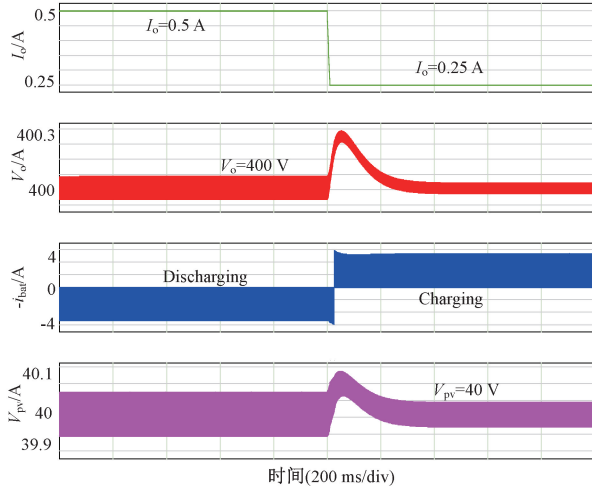
真结果与图 4 所示的理论分析完全相同,验证了理论分析的正确性。

3.2 瞬态仿真验证

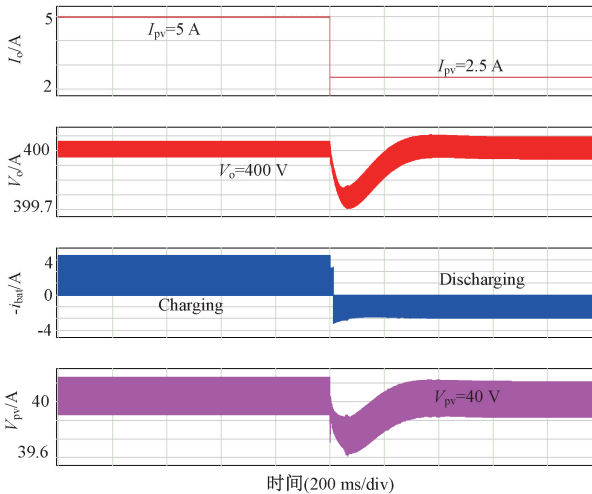
为了验证提出的能量管理与控制方法的有效性,通过改变变换器的光伏功率和负载功率测试其瞬态性能。图 11(a)展示了所提高增益三端口变换器的负载瞬态响应波形,实验条件为:当光伏输入功率恒定在 150 W 时,总负

载功率由 200 W 阶跃降至 100 W。

图 11(b)所示为变换器的输入瞬态响应波形,测试工况为:在负载功率保持 150 W 不变情况下,光伏输入功率从 100 W 阶跃升至 200 W。



时间(200 ms/div)
(a) 负载瞬态
(a) Load transient



时间(200 ms/div)
(b) 输入瞬态
(b) Input transient

图 11 所提高增益三端口变换器的瞬态仿真结果
Fig. 11 Transient simulation results of the three-port converter

从上述仿真结果可以看出,变换器能够在输入功率和负载功率发生突变时仍然保持光伏端口的 MPPT 控制和负载端口的恒压控制,电池端口能够根据端口功率关系平滑实现充电状态和放电状态的平滑模式切换,验证了提出的控制方法的有效性。

4 实验结果

为了验证提出的高增益三端口变换器的性能,搭建了一条实验样机并进行了稳态和瞬态的实验验证,其中输入端口采用型号为 Chroma 62150H 的光伏模拟器,负载端口采用型号为 Chroma 63206A 的电子负载,电路中的开关管

型号为 NTH4L025N065SC1,二极管型号为 STTH60R04,控制器采用 TMS320F280049,其它电路参数与表 1 中的仿真参数一致。

图 12 给出了变换器在 SISO 模式下的稳态波形,从图中可以看出,提出的变换器能够将光伏输入端口的 30 V 电压升压至直流母线所需的 400 V,实现高电压增益,且实验波形与理论分析一致。

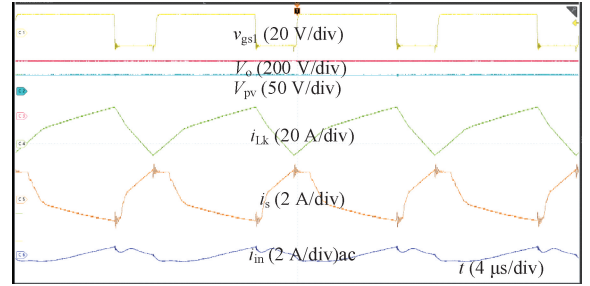
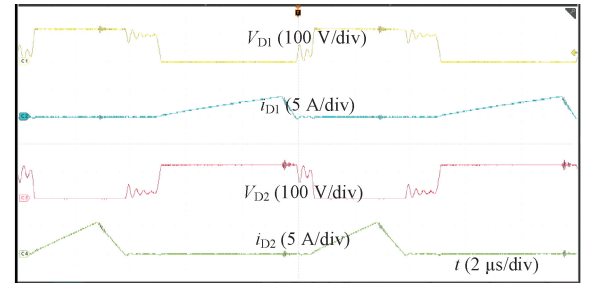


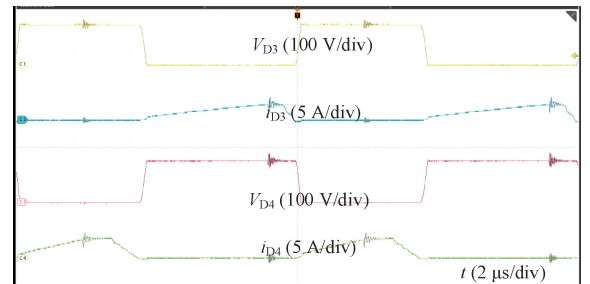
图 12 所提高增益三端口变换器的稳态实验结果

Fig. 12 The steady-state experimental results of the three-port converter

图 13 给出了所提变换器中,二极管的软开关测试结果,从图中可以看出,所有的二极管均能够实现 ZCS。因此,提出的变换器有效减小了半导体器件的开关损耗,同时避免了二极管的反向恢复问题,实验结果与前面的理论分析一致。



(a) D₁和D₂
(a) D₁ and D₂



(b) D₃和D₄
(b) D₃ and D₄

图 13 所提高增益三端口变换器的软开关特性验证
Fig. 13 Verification of the soft-switching characteristics of the three-port converter

图 14 给出了变换器的负载瞬态响应波形,在起始时刻,光伏输入功率为 300 W,负载功率为 200 W,当负载功

率跳变至 400 W,且光伏输入功率保持不变时,可以看到输出电压始终保持 400 V 恒定,且光伏输入端口始终能够实现 MPPT 控制,验证了提出变换器及其控制方法的有效性。

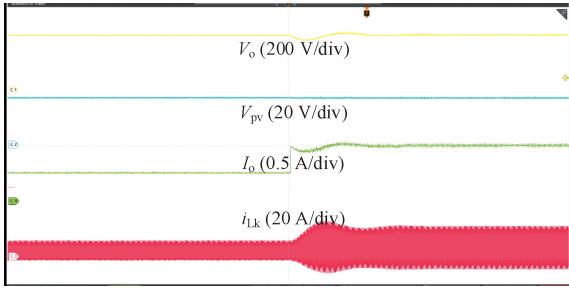


图 14 所提高增益三端口变换器的负载瞬态实验结果
Fig. 14 Experimental results of the load transient response of the three-port converter

图 15 给出了变换器的输入瞬态响应波形,在起始时刻,光伏输入功率为 100 W,负载功率为 200 W,当光伏输入功率跳变至 300 W,且负载功率保持不变时,可以看到输出电压始终保持 400 V 恒定,且光伏输入端口始终能够实现 MPPT 控制,验证了提出变换器及其控制方法的有效性。

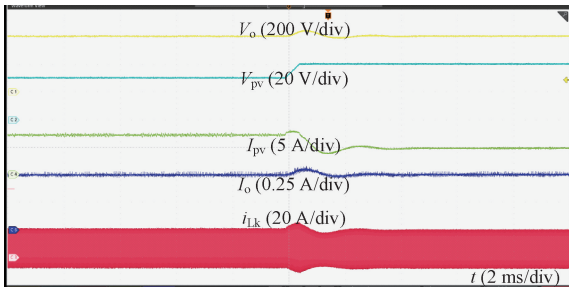


图 15 所提高增益三端口变换器的输入瞬态实验结果
Fig. 15 Experimental results of the input transient response of the three-port converter

上述实验结果表明,提出的高增益三端口变换器能够实现光伏、储能与高压直流母线的集成单级功率变换,具有良好的稳态和瞬态性能,采用提出的控制方法,提出的变换器能够实现光伏、储能和负载端口的有效功率控制。

5 结 论

本文针对具有高压直流母线的可再生能源-储能系统,提出了一种基于三绕组耦合电感的新型高增益三端口 DC/DC 变换器。该变换器具有以下显著优势:1)器件数量少;2)电压增益高;3)开关管电压应力极低;4)所有二极管均可实现零电流关断。通过详细分析电压增益、半导体器件电压/电流应力等关键性能参数,系统阐述了所提变换器的技术优势。基于 40 V 光伏组件、48 V 蓄电池和 400 V 输出电压构建的仿真模型和试验样机,验证了理论

分析的正确性。研究结果表明,该变换器非常适合用于储能系统与可再生能源集成至高压直流母线的应用场景。

参考文献

- [1] 黎博,陈民铀,钟海旺,等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.
LI B, CHEN M Y, ZHONG H W, et al. Review on long-term planning of new power systems with high-penetration renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [2] 刘春喜,徐金荣,刘文强,等. 扩展移相控制的 DAB 变换器双目标优化策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(10): 180-190.
LIU CH X, XU J R, LIU W Q, et al. Dual-objective optimization strategy for DAB converters with extended phase-shift control[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10): 180-190.
- [3] 卢自宝,龚莉,赵传超,等. 直流微电网中 DC-DC 变换器的切换控制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 41(8): 202-209.
LU Z B, GONG L, ZHAO CH CH, et al. Research on switching control method of DC-DC converter in DC microgrid[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 41(8): 202-209.
- [4] PERDANA Y S, MUYEEN S M, AL-DURRA A, et al. Direct connection of supercapacitor-battery hybrid storage system to the grid-tied photovoltaic system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1370-1379.
- [5] 孟润泉,刘家赢,文波,等. 直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2186-2193.
MENG R Q, LIU J Y, WEN B, et al. Hybrid energy storage control and hierarchical coordination strategy for DC microgrid [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2186-2193.
- [6] WANG L, WANG H, FU M, et al. A three-port energy router for grid-tied PV generation systems with optimized control methods[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 1218-1231.
- [7] 庞欣颜,李小双,钱一萱,等. 耦合电感升压变换器箝位谐振回路设计与分析[J]. 电力电子技术, 2025, 59(5): 101-105.
PANG X Y, LI X SH, QIAN Y X, et al. Design and analysis of clamping resonant circuit for coupled-inductor boost converter [J]. Power Electronics Technology, 2025, 59(5): 101-105.

- [8] 郭来欣,王顺利,谢磊,等.一种三绕组耦合电感的交错高增益直流变换器[J].电力电子技术,2024,58(10):106-110.
GUO L X, WANG SH L, XIE L, et al. An interleaved high-gain DC converter with three-winding coupled inductor[J]. Power Electronics Technology, 2024, 58(10): 106-110.
- [9] SHANG M, WANG H, CAO Q. Reconfigurable LLC topology with squeezed frequency span for high-voltage bus-based photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 3688-3692.
- [10] BHATTACHARJEE A K, KUTKUT N, BATARSEH I. Review of multiport converters for solar and energy storage integration[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1431-1445.
- [11] ZHOU G, TIAN Q, WANG L. Soft-switching high gain three-port converter based on coupled inductor for renewable energy system applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 1521-1536.
- [12] MORADISIZKOOHI H, ELSAYAD N, MOHAMMED O A. A family of three port three-level converter based on asymmetrical bidirectional half-bridge topology for fuel cell electric vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11706-11724.
- [13] CHEN Y, HUANG A Q, YU X. A high step-up three-port dc-dc converter for stand-alone PV/battery power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5049-5062.
- [14] CHIEN L, CHEN C, CHEN J, et al. Novel three-port converter with high-voltage gain[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4693-4703.
- [15] FARAJI R, FARZANEHFARD H. Soft-switched nonisolated high step-up three-port dc-dc converter for hybrid energy systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10101-10111.
- [16] FARAJI R, FARZANEHFARD H. Fully soft-switched multiport dc-dc converter with high integration[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 1901-1908.
- [17] DOBAKSHARI S S, FATHI S H, MILIMONFARED J. A new soft-switched three-port dc/dc converter with high voltage gain and reduced number of semiconductors for hybrid energy applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3590-3600.
- [18] QI X, ZHANG D, PAN X, et al. A coupled inductors based high gain non-isolated three-port dc-dc converter[C]. IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition, 2018: 1-6.
- [19] FARAJI R, FARZANEHFARD H, KAMPITSIS G, et al. Fully soft-switched high step-up nonisolated three-port dc/dc converter using GaN HEMTs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(10): 8371-8380.
- [20] 童新,戚志东,于灵芝,等.基于准Z源与开关电容的高增益三端口变换器[J].电力电子技术,2024,58(1):103-106.
TONG X, QI ZH D, YU L ZH, et al. High-gain three-port converter based on quasi-Z-source and switched capacitor[J]. Power Electronics Technology, 2024, 58(1): 103-106.
- [21] 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.
LIU J F, HU R J, ZENG J. Non-isolated three-port converter with high voltage gain capability [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 529-538.
- [22] 林国庆,张俊源,曾威.高增益三端口直流变换器拓扑及控制策略研究[J].太阳能学报,2024,45(12):57-66.
LIN G Q, ZHANG J Y, ZENG W. Topology and control strategy of high-gain three-port DC converter[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(12): 57-66.
- [23] TIAN Q, ZHOU G, LENG M, et al. A nonisolated symmetric bipolar output four-port converter interfacing PV-battery system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11731-11744.

作者简介

郭庆明,博士,高级工程师,主要研究方向为高频开关电源、时域电磁数据处理方法、地球物理测井仪器研发。

E-mail: guoqingming001@163.com

毛玉蓉(通信作者),博士,博士生导师,教授,主要研究方向为信号处理、地球探测与信息技术。

E-mail: 500061@yangtzeu.edu.cn