

# 低电压应力三绕组耦合电感高增益DC-DC变换器

程诗伟,赵世伟

(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510641)

**摘要:**为应对日益增长的高增益DC-DC转换的需求,如新能源并网、电动汽车应用、航空航天等,利用磁耦合技术设计三绕组耦合电感,结合开关电容结构,提出一种低电压应力三绕组耦合电感高增益DC-DC变换器,其具备电压增益高、元器件电压应力低、多个二极管均具有软开关特性的优点。对该变换器进行模式分析,推导了电压增益公式,获得了各器件的电压和平均电流应力。最后设计了一款120 W的实验样机,实现了386/23.8 V DC-DC的电压转换,验证了理论分析和变换器的可行性。

**关键词:**高增益变换器;DC-DC变换器;三绕组耦合电感;低电压应力

**中图分类号:**TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24303

## A High Step-up DC-DC Converter Based on Three-winding Coupled Inductor with Low Voltage Stress

CHENG Shiwei, ZHAO Shiwei

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

**Abstract:** To cope with the increasing demands of the application of high step-up DC-DC conversion, such as the absorption of renewable energy, electric vehicles and aerospace, a high step-up DC-DC converter based on three-winding coupled inductor with low voltage stress was proposed by utilizing magnetic coupling technology to design three-winding coupled inductor and mixing with switched capacitor structure. The converter has the merits of high voltage gain, low voltage stress of devices and soft switching of all diodes. Each operational mode was analyzed, the voltage conversion gain was deduced, the voltage and average current stresses of all devices were obtained. Finally, a prototype in the condition of 120 W was produced to achieve voltage conversion of 386/23.8 V DC-DC and verify the theoretical analysis and the feasibility of the proposed converter.

**Key words:** high step-up converter; DC-DC converter; three-winding coupled inductor; low voltage stress

随着能源需求不断扩大,而传统的化石能源不可再生,使得能源短缺问题和环境污染问题日益突出,风力发电、光伏发电等新型可再生能源的发展成为主流。然而,新能源发电的输出一般具有低压性,与现代电网的电压相差甚远,这种不匹配一定程度上限制了其发展。因此,一种高电压增益、高效率的电力转换方法成为应用新能源不可或缺的关键环节,促使大量学者研究高增益DC-DC转换技术,并诞生了一系列的高电压增益DC-DC变换器。

现阶段实现DC-DC高电压增益转换的技术主要通过包括变换器级联<sup>[1-3]</sup>、高频隔离变压器<sup>[4-6]</sup>、开关电容<sup>[7-9]</sup>、开关电感<sup>[10-12]</sup>、准Z-源结

构<sup>[13-14]</sup>、耦合电感等,具体如下:1)级联:级联是提升电压最简单的思路,可以有效提升整体增益,但直接级联效率较低。二次型Boost变换器可以节省一个开关管,但代价是开关管电流应力的提升。2)高频隔离变压器:变压器可通过增大匝比提升变换器电压增益,并且提供了电气隔离,但变压器磁性元件体积一般较大,不利于功率密度的提升。3)开关电容:开关电容可以有效减小器件电压应力,并提升增益,但电容之间容易产生电流尖峰,可靠性较低,不仅增加器件损耗,还可能引起严重的电磁干扰。4)开关电感:开关电感变换器具有很好的可靠性和可拓展性,但磁性元件的增多使得变换器的体积庞大,不利于变换器

基金项目:广东省自然科学基金(2018A0303130221)

作者简介:程诗伟(1997—),男,硕士研究生,Email:852157774@qq.com

通讯作者:赵世伟(1977—),男,博士,副教授,Email:epszwzhao@scut.edu.cn

功率密度的提升。5)准Z-源结构:准Z-源结构变换器电压增益较大,但器件电压应力一般很大,且占空比有可行域的限制。6)耦合电感:引入了匝比调节电压增益,不仅有磁的耦合,而且还有电的直接联系,因此一般来说提升增益的能力比变压器要高。通过磁耦合,还可以衍生多绕组耦合电感变换器。但其漏感不可忽略,为开关管带来较高的电压尖峰。

本文结合耦合电感和开关电容技术的优点,提出了低电压应力三绕组耦合电感高增益DC-DC变换器,能够实现较高的直流电压转换,并且所有元器件电压应力均很低,多个二极管具备软开关特性,有效提升效率。

## 1 变换器拓扑及模态分析

### 1.1 变换器拓扑

图1所示为本文所提变换器,由一个有源开关管S,1个三绕组耦合电感 $L_1/L_2/L_3$ ,6个二极管 $D_1\sim D_5$ 和 $D_6$ ,6个电容 $C_1\sim C_5$ 和 $C_6$ 组成。

在分析模态时需要如图2所示的寄生参数等效电路,其中耦合电感 $L_1/L_2/L_3$ 分别等效为漏感 $L_{k1}$ ,一次绕组 $W_p$ 和励磁电感 $L_m$ ;漏感 $L_{k2}$ ,二次绕组 $W_s$ ;漏感 $L_{k3}$ ,三次绕组 $W_t$ 。

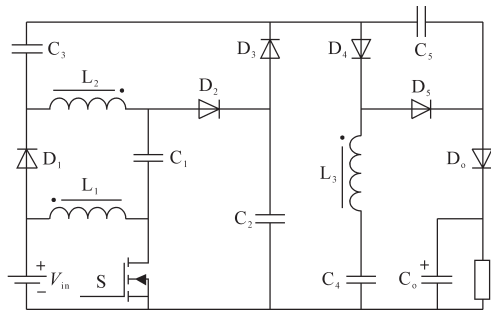


图1 低电压应力三绕组耦合电感高增益DC-DC变换器

Fig.1 A high step-up DC-DC converter based on three-winding coupled inductor with low voltage stress

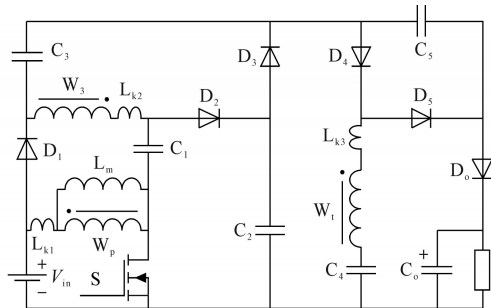


图2 所提变换器的寄生等效电路

Fig.2 The parasitic-equivalent circuit of the proposed converter

### 1.2 模态分析

为方便分析,作出如下假设:1)开关管S和所

有二极管均视为理想器件;2)所有电容容值足够大,因此电容两端电压维持不变。所提变换器在一个开关周期中最多可有7个模态,分别为Mode I~Mode VII。变换器主要元器件工作波形如图3所示。各个模态的等效电路如图4所示。

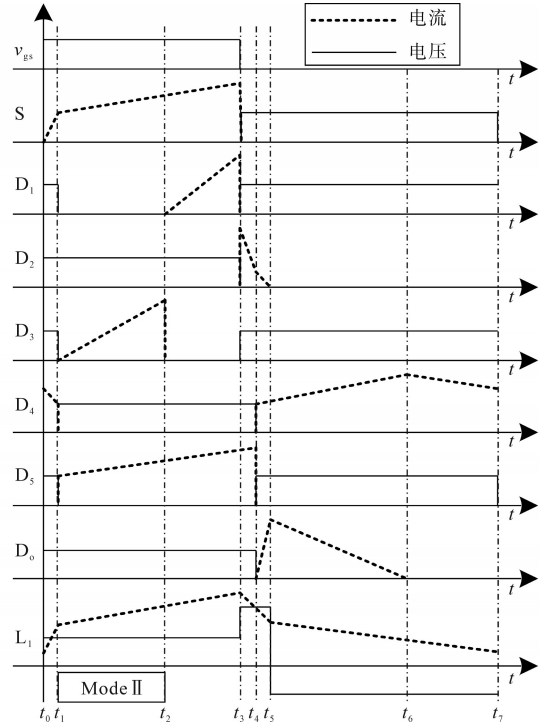


图3 变换器主要器件电压电流波形

Fig.3 The voltage and current waveforms of the main devices

1) Mode I ( $t_0-t_1$ ): 模态 I 开始于  $t_0$  时刻,如图 4a 所示。在  $t_0$  时刻,开关管 S 驱动信号到来, S 开始导通,  $L_1$  承受正压  $V_{in}$  充磁, 电流上升; 由于  $L_{k2}$  和  $L_{k3}$  的存在, 其电流不能突变,  $i_{Lk2}$  和  $i_{Lk3}$  仍保持上一模态的方向, 二极管  $D_4$  导通, 其余二极管均截止; 电容  $C_1, C_3$  联合  $L_2, L_3$  为  $C_4$  充电,  $C_2, C_5$  保持不变。

2) Mode II ( $t_1-t_2$ ): 模态 II 开始于  $t_1$  时刻, 其等效电路图及电流方向如图 4b 所示。在  $t_1$  时刻,  $i_{Lk2}, i_{Lk3}$  反向, 因此  $D_4$  截止,  $D_5$  导通;  $D_3$  所受反压已在  $t_1$  时刻下降至 0, 实现零电压导通 (zero voltage switching-ON, ZVS ON), 其余二极管截止; 电容  $C_2$  联合  $L_2$  为  $C_1$  和  $C_3$  充电;  $C_4$  联合  $L_3$  为  $C_5$  充电。

3) Mode III ( $t_2-t_3$ ): 模态 III 开始于  $t_2$  时刻, 其等效电路图及电流方向如图 4c 所示。在  $t_2$  时刻,  $D_3$  电流下降至 0 截止,  $D_1$  电流由 0 开始导通, 此时仍有  $V_{D3}=0$ , 因此  $D_3$  实现零电流关断 (zero current switching-OFF, ZCS OFF);  $V_{D1}=0$ ,  $D_1$  实现 ZVS ON;  $C_1$  在  $L_2$  和  $V_{in}$  作用下充电。

4) Mode IV ( $t_3-t_4$ ): 模态 IV 开始于  $t_3$  时刻, 其等效电路图及电流方向如图 4d 所示。在  $t_3$  时刻,

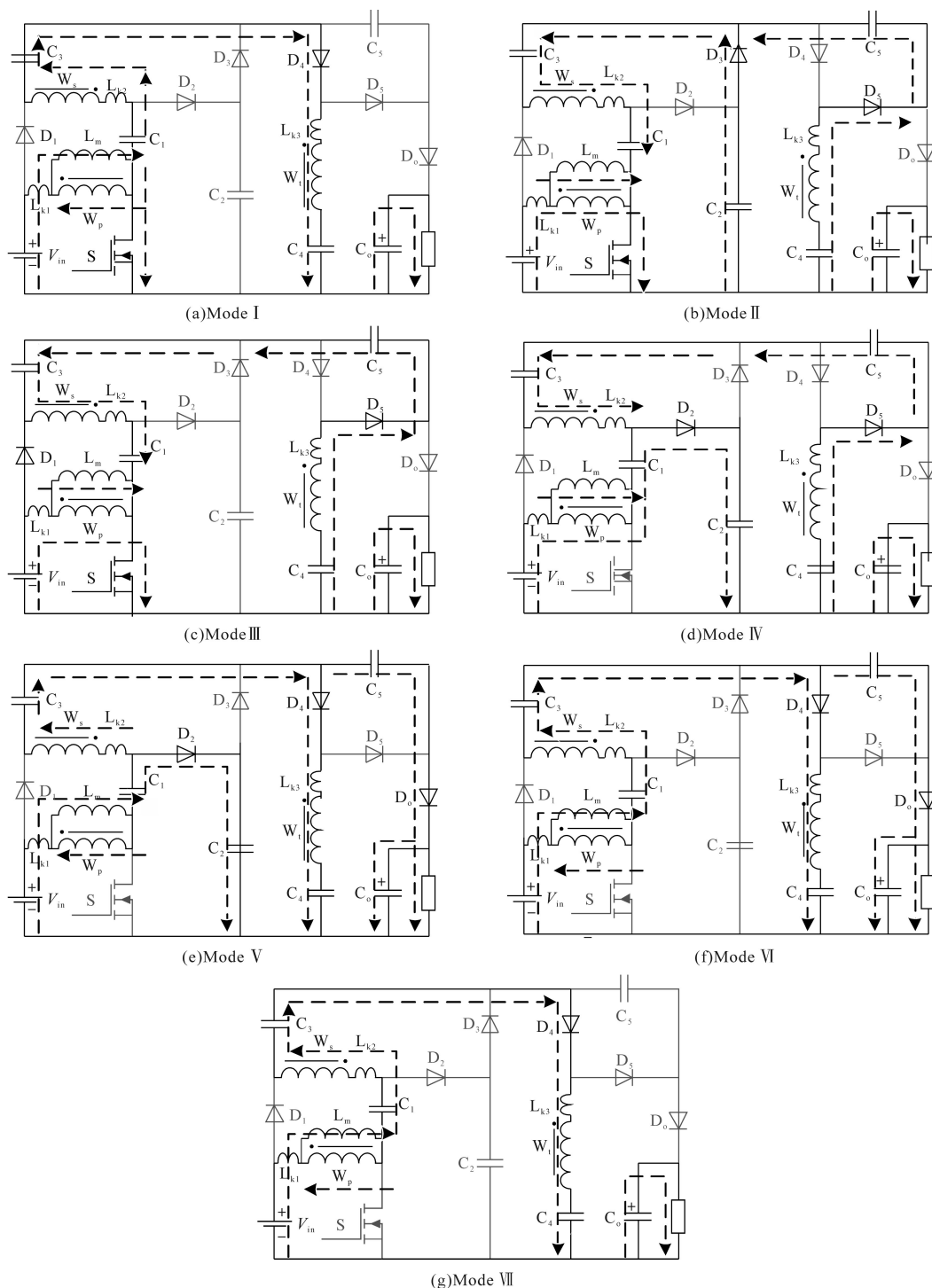


图4 所提变换器各模式等效电路

Fig.4 The equivalent circuits of the proposed converter in each mode

开关管S的驱动信号消失,S关断,使钳位二极管 $D_2$ 导通, $D_1$ 截止;由于 $L_2$ 和 $L_3$ 存在漏感 $L_{k2}$ 和 $L_{k3}$ , $i_{Lk2}$ 和 $i_{Lk3}$ 不能突变,因此 $D_5$ 继续导通,电流下降。

5) Mode V ( $t_4-t_5$ ): 模式V开始于 $t_4$ 时刻,其等效电路图及电流方向如图4e所示。在 $t_4$ 时刻, $i_{Lk2}$ 和 $i_{Lk3}$ 反向,因此 $D_4$ 导通, $D_5$ 截止。 $D_0$ 所受反压已在 $t_4$ 时刻下降至0, $D_0$ 实现了ZVS ON,前级电路

开始为输出端电容充电。

6) Mode VI ( $t_5-t_6$ ): 模式VI开始于 $t_5$ 时刻,其等效电路图及电流方向如图4f所示。在 $t_5$ 时刻, $D_2$ 提前截止,反向电压 $V_{D2}$ 仍为0,实现ZCS OFF。

7) Mode VII ( $t_6-t_7$ ): 模式VII开始于 $t_6$ 时刻,其等效电路图及电流方向如图4g所示。在 $t_6$ 时刻, $D_0$ 提前截止,反向电压 $V_{D0}$ 仍为0,实现ZCS OFF。

## 2 稳态性能分析

### 2.1 变换器电压增益

推导变换器电压增益时,仅考虑其理想工作模式,即 Mode II, Mode III, Mode V 和 Mode VI,可求得变换器在连续导通模式(CCM)下的电压增益公式。

在 Mode II, Mode III 中,耦合电感  $L_1/L_2/L_3$  的电压如下式所示:

$$v_{L1}^{II,III} = \frac{v_{L2}^{II,III}}{n_s} = \frac{v_{L3}^{II,III}}{n_t} = V_{in} \quad (1)$$

式中:  $n_s, n_t$  分别为耦合电感二次、三次绕组对于一次绕组的匝比。

在 Mode V, Mode VI 中,根据 Boost 变换器的伏秒平衡原理,可得耦合电感  $L_1/L_2/L_3$  的电压如下式所示:

$$v_{L1}^{V,VI} = \frac{v_{L2}^{V,VI}}{n_s} = \frac{v_{L3}^{V,VI}}{n_t} = -\frac{D}{1-D} V_{in} \quad (2)$$

式中:  $D$  为占空比。

在 Mode II 中,根据基尔霍夫电压定律(KVL),可得:

$$V_{C5} = V_{C4} - V_{C2} + v_{L3}^{II,III} \quad (3)$$

$$V_{C3} = V_{C2} - V_{C1} + v_{L2}^{II,III} \quad (4)$$

在 Mode III 中,根据 KVL,可得:

$$V_{C1} = v_{L2}^{II,III} + V_{in} \quad (5)$$

在 Mode V 中,根据 KVL,可得:

$$V_{C2} = V_{C1} + V_{in} - v_{L1}^{V,VI} \quad (6)$$

$$V_{C4} = V_{C3} + V_{C2} - v_{L2}^{V,VI} - v_{L3}^{V,VI} \quad (7)$$

$$V_o = V_{C5} + V_{C4} + v_{L3}^{V,VI} \quad (8)$$

联立式(1)~式(8),可得各电容电压以及变换器电压增益  $M$ :

$$V_{C1} = (n_s + 1)V_{in} \quad (9)$$

$$V_{C2} = [n_s + 1 + 1/(1-D)]V_{in} \quad (10)$$

$$V_{C3} = [n_s + 1/(1-D)]V_{in} \quad (11)$$

$$V_{C4} = [1 + 2n_s + \frac{2 + D(n_s + n_t)}{1-D}]V_{in} \quad (12)$$

$$V_{C5} = (1 + n_s + n_t)V_{in}/(1-D) \quad (13)$$

$$M = V_o/V_{in} = 1 + 2n_s + \frac{3 + n_s + n_t + Dn_s}{1-D} \quad (14)$$

根据式(14),绘制变换器在不同的匝比条件下电压增益与占空比的关系曲线,如图5所示。

### 2.2 半导体器件电压应力

在 Mode V 中,开关管  $S$ ,二极管  $D_1, D_3, D_5$  承受最大反压,在 Mode II 中,二极管  $D_2, D_4, D_6$  承受

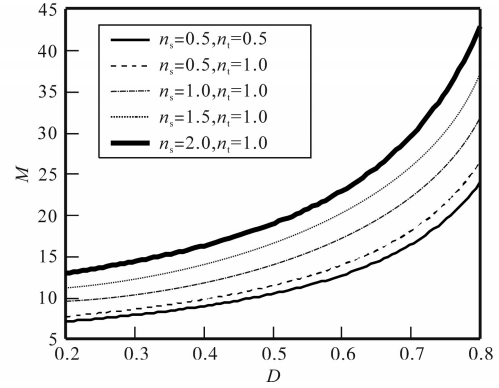


图5 所提变换器在不同占空比、匝比下的电压增益曲线

Fig.5 The voltage gain curves under different duty cycle and turns ratio of the proposed converter

最大反压,各半导体器件的电压应力如下所示:

$$V_s = V_{D2} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (15)$$

$$V_{D1} = V_{D3} = V_{D6} = \frac{(1 + n_s)V_{in}}{1-D} \quad (16)$$

$$V_{D4} = V_{D5} = \frac{(1 + n_s + n_t)V_{in}}{1-D} \quad (17)$$

## 3 样机与实验

设计了一款实验样机,实物如图6所示,样机主要设计指标、电气参数如下:输出/输入电压  $V_o/V_{in}=387\text{ V}/23.8\text{ V}$ ,额定功率  $P_o=120\text{ W}$ ,开关频率  $f_{sw}=50\text{ kHz}$ ,耦合电感原边感值  $L_1(L_m)=60.07\text{ }\mu\text{H}$ ,漏感  $L_{k1}/L_{k2}/L_{k3}=0.552\text{ }\mu\text{H}/3.060\text{ }\mu\text{H}/2.494\text{ }\mu\text{H}$ ,匝数比  $n_p:n_s:n_t=12:24:12$ ,占空比  $D=45\%$ ,电容  $C_1=47\text{ }\mu\text{F}$ ,电容  $C_2=C_3=C_5=20\text{ }\mu\text{F}$ ,电容  $C_4=10\text{ }\mu\text{F}$ ,电容  $C_6=220\text{ }\mu\text{F}$ ,开关管型号为 IRFP260N,二极管型号为 MBR30200PT。实验中,输入电压源采用 ITECH IT6512C,控制芯片采用 STM32F103RCT6,驱动芯片采用 IR2110S。

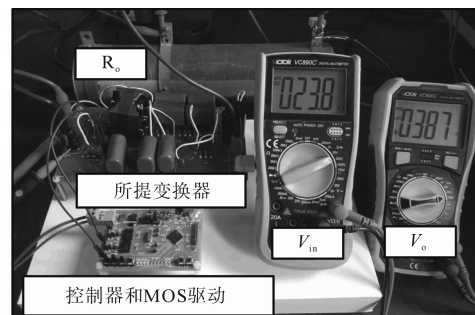


图6 实验样机

Fig.6 The photo of the prototype

实验样机输入电压为  $23.8\text{ V}$ ,占空比在  $0.45$ 、匝比为  $1:2:1$ 、开关频率为  $50\text{ kHz}$  的情况下,理论输出电压为  $417.58\text{ V}$ ,实际输出电压达到  $387\text{ V}$



(理论增益为17.545,实际增益为16.261),效率则达到了95.1%。图7为示波器实际输出波形图,所有波形图的时间分度均为4  $\mu\text{s}$ /格。其中,图7a为开关管S的电压和电流波形图;图7b~图7g分别为二极管 $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6$ 的电压、电流波形

图;图7h为耦合电感 $L_1$ 的电压、电流波形图。图8为所提变换器在不同负载下的效率曲线。从实验结果可知,理论分析波形与实际波形基本一致。在考虑实际损耗和寄生参数的情况下,电压增益也达到了16.261,基本符合理论分析。

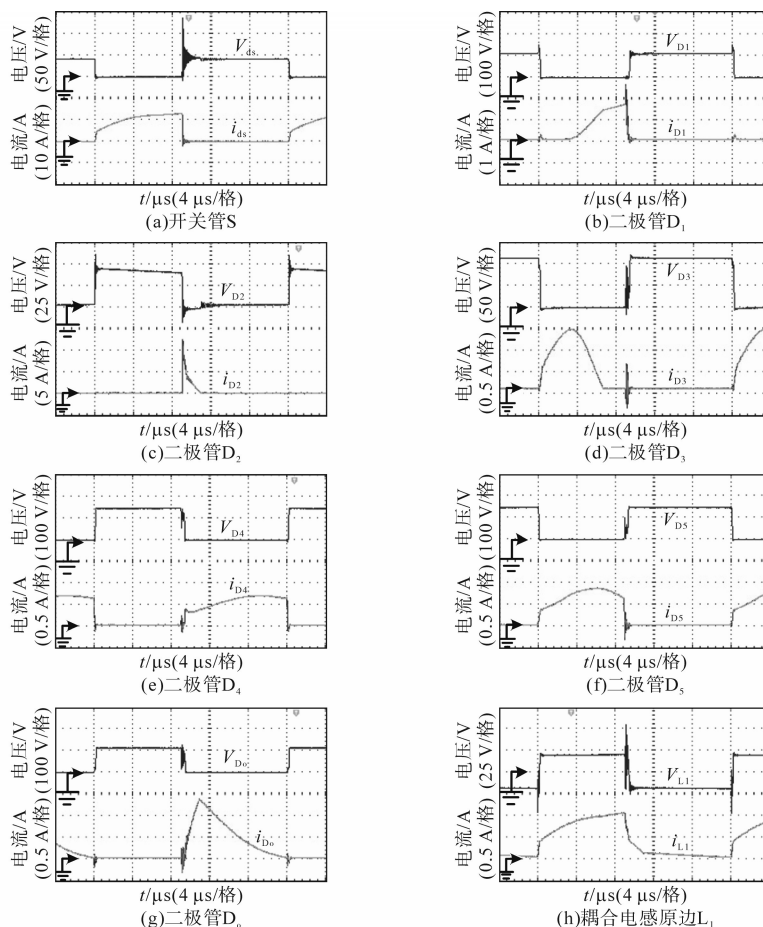


图7 示波器实验波形图

Fig.7 The experimental waveforms from oscilloscope

如图7a所示,开关管S的电压应力不足 $V_o/7$ ,且在漏感 $L_{k1}$ 的影响下有效降低了其开通的电流变化率,但在S关断瞬间,漏感带来的影响比较显著,表现为 $V_{ds}$ 的电压尖峰;从图7b可知, $D_1$ 电压应力不足 $V_o/3$ ,并且在导通之前其两端电压已经下降为0,因此实现了ZVS ON;观察图7c, $D_2$ 的电压应力不足 $V_o/7$ ,并且在截止前电流已经下降至0,因此实现了ZCS OFF;由图7d可知, $D_3$ 在导通之前其两端电压已经下降为0,因此实现了ZVS ON,在截止前电流已经下降至0,因此实现了ZCS OFF;观察图7e和图7f, $D_4$ 和 $D_5$ 互补导通,在漏感 $L_{k2}$ 的作用下均降低了导通和截止时的电流变化率,并且电压应力均不足 $0.4V_o$ ;由图7g可知, $D_6$ 在导通之前其两端电压已经下降为0,因此实现了ZVS ON,在截止前电流已经下降至0,因此

实现了ZCS OFF;由图7h可以看出,耦合电感电流在一个开关周期内表现出不同的电流变化率,是由器件导通截止和漏感引起的模态划分所致,并且漏感导致的电压尖峰较明显。

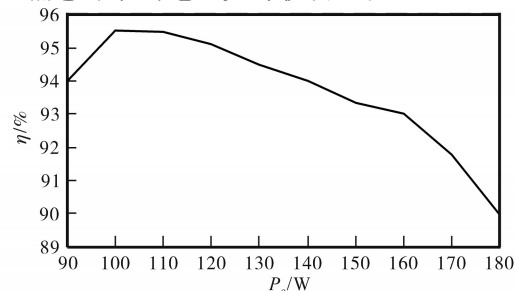


图8 效率曲线

Fig.8 The curve of efficiency

## 4 结论

提出了低电压应力三绕组耦合电感高增益

DC-DC变换器,分析了变换器的基本工作原理,推导了变换器的相关稳态性能,包括电压增益、元器件电压电流应力等。制作了一台120 W的实验样机进行了验证。由理论的分析 and 实验结果可知,变换器具有如下特点:

- 1) 变换器电压增益高,在匝比和占空比不大的情况下,电压增益仍较高;
- 2) 仅使用一个开关管,且其电压应力很低;
- 3) 所有二极管电压应力均很低;
- 4) 多个二极管实现了ZVS ON或ZCS OFF;
- 5) 漏感 $L_k$ 降低了S导通的电流变化率。

因此,所提变换器适用于新能源并网、电动汽车应用等高DC-DC电压增益变换场合。

参考文献

[1] 罗茜,罗春林,舒朝君,等. 基于耦合电感倍压单元的高增益DC/DC变换器[J]. 电气传动,2020,50(12):27-32.  
LUO Xi, LUO Chunlin, SHU Chaojun, et al. High voltage gain DC/DC converter based on coupled inductor voltage-doubler cell[J]. Electric Drive, 2020, 50(12): 27-32.

[2] 马媛,高高,陈超波,等. 基于拓扑组合的开关电感Boost电路[J]. 电气传动,2019,49(8):47-52.  
MA Yuan, GAO Song, CHEN Chaobo, et al. Switching inductor Boost circuit based on topological combination[J]. Electric Drive, 2019, 49(8): 47-52.

[3] WANG Y, QIU Y, BIAN Q, et al. A single switch quadratic Boost high step up DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6): 4387-4397.

[4] CHEN S, LIANG T, YANG L, et al. A cascaded high step-up DC-DC converter with single switch for microsource applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1146-1153.

[5] 苏诗慧,雷勇,罗茜,等. 一种用于可持续能源的隔离型高增益DC-DC变换器[J]. 电气传动,2021,51(18):23-27.  
SU Shihui, LEI Yong, LUO Xi, et al. An isolated high-gain DC-DC converter for sustainable energy[j]. Electric Drive, 2021, 51(18): 23-27.

[6] TSENG K, HUANG C, CHENG C. A high step-up converter with voltage-multiplier modules for sustainable energy applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power

Electronics, 2015, 3(4): 1100-1108.

[7] 周悦,孙孝峰. 带CD单元的两相交错并联高增益Boost直流变换器拓扑分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 5000-5011.  
ZHOU Yue, SUN Xiaofeng. Topology analysis of two-phase interleaved high gain Boost DC converter with CD unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 5000-5011.

[8] 杨晓峰,陶海波,杨帆,等. 谐振式模块化直流变换器的高增益控制[J]. 电源学报,2020,18(1):104-115.  
YANG Xiaofeng, TAO Haibo, YANG Fan, et al. High-gain control for resonant modular DC/DC converter[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(1): 104-115.

[9] 王挺,汤雨,何耀华,等. 多单元开关电感/开关电容有源网络变换器[J]. 中国电机工程学报,2014,34(6):832-838.  
WANG Ting, TANG Yu, HE Yaohua, et al. Multicell switched-inductor/switched-capacitor active-network converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 832-838.

[10] ELLABBAN O, ABU-RUB H, GE B. A quasi-Z-source direct matrix converter feeding a vector controlled induction motor drive[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 339-348.

[11] 李雪梅. 一种基于耦合电感的单开关高增益直流变换器[J]. 电气传动,2018,48(11):15-19.  
LI Xuemei. A single switch high voltage ratio DC-DC converter based on coupled inductor[J]. Electric Drive, 2018, 48(11): 15-19.

[12] DING J, ZHAO S, GAO S, et al. A single-switch high step-up DC-DC converter based on three-winding coupled inductor and pump capacitor unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 3053-3061.

[13] 罗全明,高伟,吕星宇,等. 耦合电感型高增益Boost变换器拓扑分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(24):7266-7275.  
LUO Quanming, GAO Wei, LÜ Xingyu, et al. Topology analysis of high step-up Boost converters with coupled inductors[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7266-7275.

[14] 房绪鹏,王晓丽,林强,等. 一种耦合电感型准开关Boost变换器[J]. 电气传动,2021,51(16):16-20.  
FANG Xupeng, WANG Xiaoli, LIN Qiang, et al. A quasi-switched Boost converter with coupled-inductor[J]. Electric Drive, 2021, 51(16): 16-20.

收稿日期:2022-04-10

修改稿日期:2022-04-19

(上接第6页)

号:GB/T 36571—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.  
State Administration for Market Regulation / Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for measurement and verification of electric energy and power savings for parallel reactive power compensation project: GB/T 36571—2018[S]. Beijing: China Standard Press, 2018.

[5] 广东省电气行业协会. 配用电系统节电装置节电量测量和验

证技术指导:T/GEIA11—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.  
Guangdong Electric Equipment Industry Association. Technical guide for measurement and verification of power savings devices in power distribution system: T/GEIA11—2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021.

收稿日期:2022-10-12

修改稿日期:2022-11-03