

一种高增益DC-DC变换器实验分析

王攀攀,段森,卢俊结,王书欢,王明金,陈锴

(中国矿业大学 电气与动力工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:针对传统Boost升压电路受到电路元件寄生参数的影响无法实现高升压比的问题,提出了一种基于三绕组双倍压单元的新型高增益直流变换器。变换器利用二极管、电容和耦合电感构成的双倍压单元扩大电压增益,并利用无源无损吸收电路来吸收漏感能量,抑制漏感带来的尖峰电压。通过对新型变换器工作的各个模态进行详细分析,推导了电压增益及元器件电压电流应力;实验表明该新型变换器能够有效提高电压增益、降低功率开关管的电压应力。

关键词:直流变换器;高增益;耦合电感;无源无损吸收电路;双倍压单元

中图分类号:TM46 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19624

Experimental Analysis of a High Gain DC-DC Converter

WANG Panpan, DUAN Sen, LU Junjie, WANG Shuhuan, WANG Mingjin, CHEN Kai

(School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional Boost circuit cannot achieve high boost ratio due to the parasitic parameters of circuit components, a new high gain DC-DC converter based on three-winding two voltage-doubler unit was proposed. The voltage gain of the converter was expanded by using two voltage-doubler cells which composed of diode, capacitor, and coupled inductor. The passive lossless snubber circuit was used to absorb the leakage inductance energy and suppress the peak voltage caused by the leakage inductance. Through detailed analysis for the various operation modes of the new converter, the voltage gain, component voltage and current stress were derived. Experiments show that the new converter can effectively increase the voltage gain while reducing the voltage stress of the power switch tube.

Key words: DC-DC converter; high gain; coupled inductor; passive lossless snubber circuit; two voltage-doubler cells

随着对煤炭、石油等不可再生资源的持续开采,全球能源危机与环境危机日趋严重,发展光伏、燃料电池等清洁能源来减少对传统能源的消耗已成当前世界发展的必然趋势^[1]。然而,太阳能电池板、燃料电池的输出电压一般低于50V^[2],在并网发电系统中,为满足逆变器输入侧所需电压等级的要求,传统Boost电路需要工作在极限占空比状态,元件承受的电压应力较大且效率较低,因此具有开关器件电压应力低、效率高、升压能力强等优点的高增益DC-DC变换器不可或缺。

近年来非隔离升压变换器受到广泛关注^[3-6]。文献[7-8]提出了带开关电容网络的变换器,但

是由于电容充、放电带来了尖峰电流问题,且随着增益的提高电路结构变得复杂;文献[9]提出了新型三电平升压变换器,在仅使用一个开关管的情况下获得了较高的增益,但功率器件的电压应力大;文献[10]提出将耦合电感加入到DC-DC变换器拓扑中,可以通过改变绕组的匝数来改变升压比,此种变换器电路拓扑简单、易于控制,具有一定的优势。

本文在文献[10]提出的拓扑结构上进行改进,设计出一种基于三绕组双倍压单元的高增益DC-DC变换器。详细分析了所提变换器的工作原理及工作特性,并通过实验验证了理论分析的正确性。

基金项目:国家自然科学基金(61703404);中国矿业大学研究生教育教学改革研究与实践项目(YJSJG-2018-038)

作者简介:王攀攀(1982-),男,博士,讲师,Email:105550697@qq.com

1 电路拓扑

基于三绕组双倍压单元的高增益直流变换器拓扑如图1a所示, C_1, C_2 为倍压电容, D_1, D_2 为续流二极管, 倍压电容、续流二极管与耦合电感副边共同构成了双倍压单元; 二极管 D_c 和电容 C_c 构成无源无损吸收电路; Q 为开关管, D_0 为输出二极管; 耦合电感 T 等效为励磁电感与理想变压器并联再串联一个漏感, 其等效电路如图1b所示, 图中给出了电压电流参考方向。

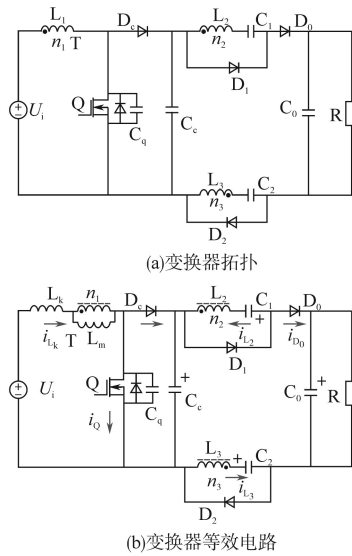


图1 变换器拓扑及其等效电路

Fig.1 Topology of the converter and its equivalent circuit

2 工作原理

在对变换器的每个工作过程分析前, 首先假定: 1) 功率开关管和钳位、续流、输出二极管均为理想元件; 2) 倍压电容 C_1, C_2 和钳位电容 C_c 以及输出电容 C_0 上电压恒定。新型 DC-DC 变换器稳态工作时, 其主要波形可以用图2表示。

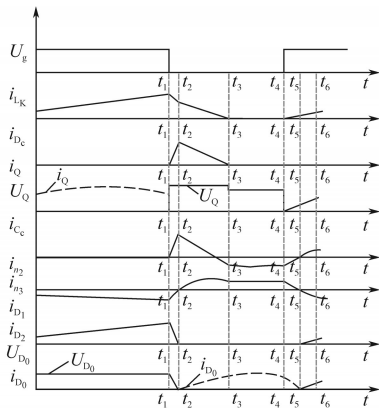


图2 变换器的主要波形

Fig.2 Main waveforms of the converter

图2中, U_g 为开关管栅极驱动电压, 各模式等效电路如图3所示。

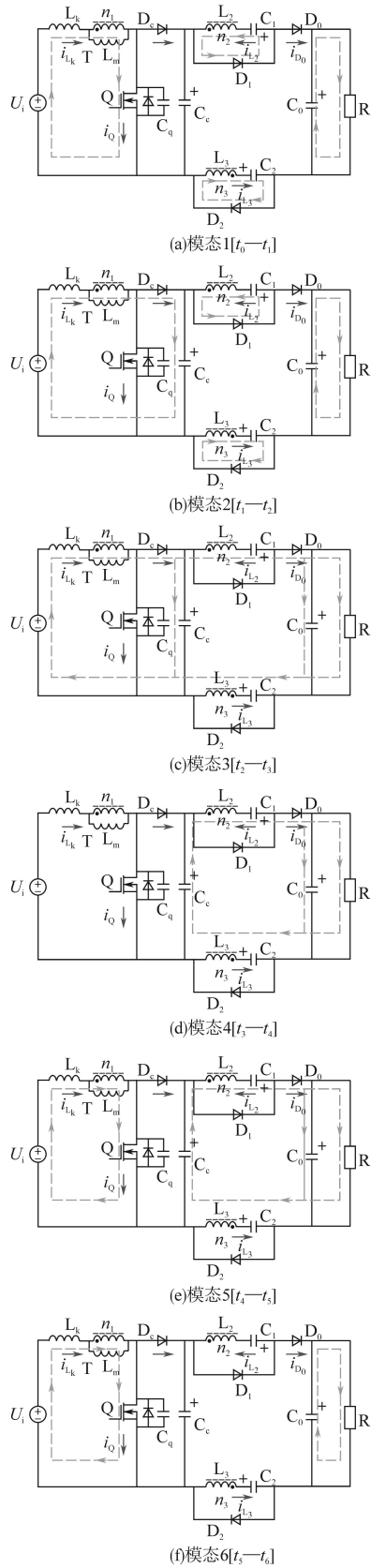


图3 工作模式等效电路

Fig.3 Equivalent circuits of the operation modes

图3中,实线深色箭头为电流参考方向,虚线框为实际回路电流。

工作模式具体过程如下所述:

1)开关模式1 $[t_0-t_1]$ 。在此模式中,开关管Q为导通状态, U_i-L_m-Q 构成回路,励磁电感 L_m 储能,漏感电流 i_{L_k} 上升,同时 D_1, D_2 导通, D_0, D_c 关断, $L_2-D_1-C_1, L_3-C_2-D_2$ 分别构成回路。

$$i_{L_m} = \frac{U_i}{L_m}(t-t_0) \quad (1)$$

式中: U_i 为输入电压; i_{L_m} 为励磁电感电流,其它以此类推。

2)开关模式2 $[t_1-t_2]$ 。在 t_1 时刻,开关管Q被关断,此时吸收电路中的二极管 D_c 开始导通,漏感 L_k 中的能量通过 D_c 向电容 C_c 释放,同时开关管电压被钳位在电容 C_c 上的电压,从而避免了漏感带来的电压尖峰,降低了开关管的电压应力。输出二极管 D_0 仍然关断,漏感电流 i_{L_k} 下降, i_{L_2}, i_{L_3} 反向增大,在 t_2 时刻,耦合电感副边电流下降到零, D_0 准备导通。

$$i_{L_k} = I_{L_k}(t_1) - \frac{U_{C_c}}{L_k}(t-t_1) \quad (2)$$

式中: I_{L_k} 为 t_1 时刻流经漏感 L_k 的电流; U_{C_c} 为电容 C_c 上的电压。

3)开关模式3 $[t_2-t_3]$ 。在 t_2 时刻, D_0, D_c 为导通状态, D_1, D_2 和开关管Q为关断状态,励磁电感与倍压电容串联向负载侧供电。此模式中 i_{D_c}, i_{D_0} 下降。

4)开关模式4 $[t_3-t_4]$ 。在 t_3 时刻, i_{L_k} 下降到零, D_c 关断, L_m 中储存的能量继续向负载转移, i_{L_2}, i_{L_3} 下降,此过程中开关管Q上电压有所波动,这是由于耦合电感的漏感与Q的结电容发生了谐振。

5)开关模式5 $[t_4-t_5]$ 。在 t_4 时刻,开关管Q驱动信号再一次来临,Q导通, i_{L_k} 从零开始增加,这样使开关管Q实现了零电流导通(ZCS),降低了开通损耗,同时,副边电感电流变化率受到漏感的控制, i_{L_2}, i_{L_3} 继续下降,也在一定程度上抑制了输出二极管 D_0 的反向恢复问题。

6)开关模式6 $[t_5-t_6]$ 。在 t_5 时刻,副边绕组电流下降到零, D_0 关断, t_6 时刻, D_1, D_2 开始导通,在电源的作用下励磁电感又开始充电,副边绕组又开始给倍压电容充电,此后进入下一周期。

3 性能分析

3.1 电压增益分析

为简化分析,在计算电压增益时忽略损耗,不计漏感和二极管结电容等电路本身寄生参数的影响,并假设耦合电感变比为 $1:N:N$,则变换器工作过程可进一步简化为2个过程,即开关管导通和关断2种状态。开关管Q导通时:

$$\begin{cases} U_{L_m} = U_i \\ U_{C_1} = U_{C_2} = U_{L_2} = NU_{L_m} \end{cases} \quad (3)$$

开关管Q关断时:

$$U_{L_m} = U_o - U_i - U_{C_1} - U_{C_2} \quad (4)$$

根据伏秒平衡原理得到:

$$\frac{U_o - U_i}{4N} t_{\text{off}} = U_i t_{\text{on}} \quad (5)$$

式中: t_{off} 为开关管关断时间; t_{on} 为导通时间; U_o 为输出电压。

故电压增益 M 为

$$M = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1 + (4N-1)D}{1-D} \quad (6)$$

式中: D 为占空比。

图4为DC-DC变换器升压比与耦合电感匝比以及占空比之间的关系图,由图4可以看出,通过合理的设计耦合电感匝比能够使变换器在较小占空比下获得10倍左右的电压增益,避免了在极限占空比下才能获得高增益的问题。

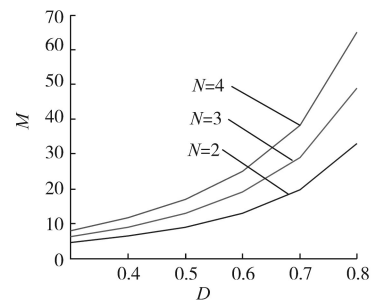


图4 变换器的增益曲线

Fig.4 Gain curves of the proposed converter

3.2 电压电流应力分析

一般来讲,漏感电感量远远小于励磁电感量,故而在计算开关管和二极管的电压应力时不计漏感上压降的影响。

功率开关管Q电压应力为

$$U_{Q,\text{stress}} = U_i/(1-D) \quad (7)$$

二极管的电压应力为

$$U_{D_c,\text{stress}} = U_i/(1-D) \quad (8)$$

$$U_{D_1, stress} = U_{D_2, stress} = \frac{(4N-1)D}{2 \cdot (1-D)} U_i \quad (9)$$

$$U_{D_0, stress} = \frac{(4N-1)D}{1-D} U_i \quad (10)$$

根据式(7)~式(10),可以看出开关管Q、二极管D₁、D₂、D₀的电压应力随着占空比的增大而减小;二极管D₁、D₂、D₀的电压应力随着占空比的增大而增大,因此占空比的取值不宜过大或过小,同时考虑电压增益的要求,在匝比N为2的情况下,取占空比D为0.5即可。

假设变换器的效率为100%,则输入电流的平均值为

$$I_{m, av} = \frac{1 + (4N-1)D}{1-D} I_0 \quad (11)$$

式中: I₀ 为输出电流。

假设电感电流线性变化,则电流增量与电流平均值的关系为 $\frac{\Delta I}{2} = I_{av}$, 因此功率开关管Q的电流峰值可表示为

$$I_{Q, peak} = 3 \cdot \frac{(4N-1)D + 1}{1-D} I_0 \quad (12)$$

根据电容电流平衡原理,续流二极管D₁、D₂以及输出二极管D₀的电流平均值与输出电流相同,因此

$$I_{D_1} = I_{D_2} = I_{D_0} = I_0 \quad (13)$$

3.3 软开关实现

当开关器件处于导通状态时,其电阻值几近于零,其压降也近于零,这时关断开关管,由于功率开关管两端并联电容C_q的存在,使得其两端的电压不能突变,实现了开关管的零电压关断。由波形图可知,实现零电流开通的条件是在功率开关管Q的下一个驱动信号来临使之导通之前,漏感电流已经下降为零。

$$\frac{U_{c_c} - U_i}{L_k} (t_3 - t_2) = 2I_{L_k, av} \quad (14)$$

这就要求占空比不宜过大,否则漏感储能时间长,释放能量时间短,导致能量不能全部释放,其电流还没有下降到零就又被重新充电。

3.4 性能比较

2种变换器开关管Q所受电压应力情况可由图5所示。

从图5中曲线可以清楚的看到,文中所提新型DC-DC升压变换器大大降低了功率开关管Q两端承受的电压应力,从而为选择低功耗的MOS管提供条件,并有利于降低拓扑成本。

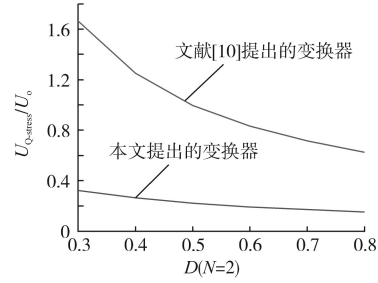


图5 2种变换器开关管电压应力对比曲线
Fig.5 Comparison of switch voltage stress versus duty cycle for two types of converters

4 实验验证及分析

为了验证以上理论分析的正确性,本文制作了一台10 V/80 V的三绕组双倍压高增益DC-DC变换器的实验样机。实验参数如下:U_i=10 V, U_o=80 V, MOSFET型号为IRFP4668, f_s=50 kHz, 倍压电容C₁=C₂=100 μF, 吸收电容C_c=100 μF, 励磁电感L_m=100 μH, 漏感L_k=2 μH, D=0.5。实验波形如图6所示。

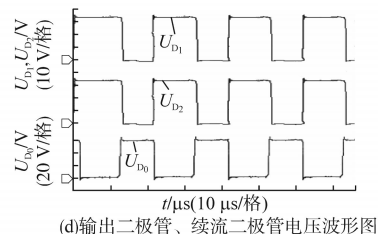
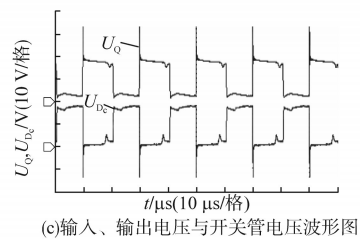
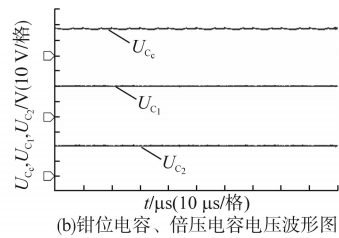
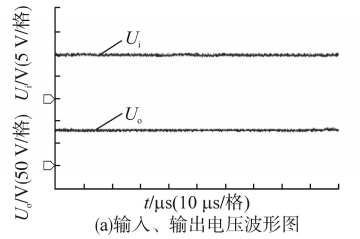


图6 实验波形

Fig.6 Experimental waveforms

图6a为输入、输出电压实验波形,从图中可知 U_i 为10 V, U_o 为80 V,可见在占空比仅为0.5的情况下就获得了较高的电压增益,实现了在较小占空比下实现更高增益的目标。图6b为电容 C_1 , C_2 及 C_c 的电压波形,可知电容 C_1 , C_2 , C_c 电压均为20 V,与理论计算值一致;图6c为吸收二极管 D_c 和开关管Q的电压波形,可见Q和 D_c 两端电压应力均为20 V,分别与式(7)、式(9)结果相符,且远远小于输出电压。图6d为输出二极管 D_o 和续流二极管 D_1 , D_2 的电压波形,可以看出 D_1 , D_2 承受的电压应力为35 V, D_o 承受的电压应力为60 V,分别与式(8)、式(10)结果相符。

变换器效率 η 与输出功率 P_o 之间的关系如图7所示,可以看出本文所提变换器与传统耦合电感Boost变换器相比具有更高的效率,且在输出功率为100 W时,效率高达96.5%。

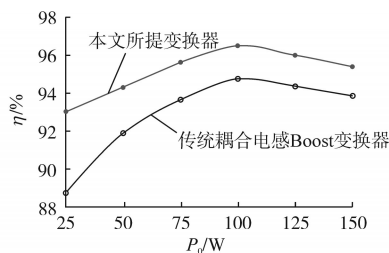


图7 效率曲线

Fig.7 Efficiency curves

5 结论

本文提出了一种新型三绕组双倍压高增益直流变换器,并且对该变换器的工作原理、工作性能进行了详细的分析,同时通过实验样机验证了理论分析的正确性。分析实验结果可知该变换器具有如下优点:1)通过加入双倍压单元使变换器可以在较小的占空比下实现较高的电压增益;2)开关管和各二极管电压应力均远低于输出电压,为选择低电压等级的器件提供了条件,从而降低了成本,提高了效率;3)该直流变换器拓

扑结构简单,且只使用一个开关管,易于实现,降低了电路成本。基于以上特点,本文所提出的新型DC-DC变换器可以应用在光伏、燃料电池等需要高增益直流变换器的新能源场合。

参考文献

- [1] 杨杰,于东升,朱虹,等. 双耦合电感零输入纹波高增益QBC-VMU集成变换器[J]. 中国电机工程学报, 2016(23):200-209,316.
- [2] 高伟,罗全明,吕星宇,等. 一种三绕组零纹波高增益DC/DC变换器[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(1):232-241,360.
- [3] Tang Y, Wang T, He Y. A Switched-capacitor-based Active-network Converter with High Voltage Gain[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6):2959-2968.
- [4] Tseng K C, Huang C C, Shih W Y. A High Step-up Converter with a Voltage Multiplier Module for a Photovoltaic System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(6):3047-3057.
- [5] Hwu K I, Yau Y T. High Step-up Converter Based on Charge Pump and Boost Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5):2484-2494.
- [6] Hsieh Y P, Chen J F, Liang T J P, et al. Novel High Step-up DC-DC Converter with Coupled-inductor and Switched-capacitor Techniques for a Sustainable Energy System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12):3481-3490.
- [7] Gitau M N, Kala-Konga C L. Multilevel Switched-capacitor DC-DC Converter with Reduced Capacitor Bank[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2010.
- [8] Rosascaro J C, Ramirez J M, Peng F Z, et al. A DC-DC Multilevel Boost Converter[J]. Power Electronics Let, 2010, 3(1):129-137.
- [9] 曹太强,刘威,郭筱瑛,等. 双耦合电感二次型高升压增益DC-DC变换器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8):104-112.
- [10] Zhao Q, Lee F C. High-efficiency, High Step-up DC-DC Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(1):65-73.

收稿日期:2018-10-19

修改稿日期:2019-01-15