

文章编号:1671-251X(2017)04-0068-04 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.04.016
房绪鹏,马伯龙,董召龙,等.一种准Z源升压型DC-DC变换器[J].工矿自动化,2017,43(4):68-71.

一种准Z源升压型DC-DC变换器

房绪鹏, 马伯龙, 董召龙, 郭久红, 高冠中

(山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:针对传统升压变换器存在升压能力有限、电容电压应力大等问题,提出了一种采用2个准Z源网络级联的升压型DC-DC变换器,分析了该变换器的工作原理,推导了该变换器升压比、电容电压应力的表达式。与传统Z源升压变换器相比,该变换器可在占空比小的情况下实现更大的升压比,且在升压比相同的情况下具有更小的电容电压应力。仿真和实验结果验证了理论分析的正确性。

关键词:DC-DC变换器;升压变换器;准Z源网络;级联;升压比;电容电压应力

中图分类号:TD611 文献标志码:A 网络出版时间:2017-03-28 17:33

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20170328.1733.016.html>

A quasi-Z-source boost DC-DC converter

FANG Xupeng, MA Bolong, DONG Zhaolong, GUO Jiuhong, GAO Guanzhong

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of
Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract:For problems of traditional boost converter including limited boost ability and high capacitor voltage stress, a boost DC-DC converter was proposed which used two quasi-Z-source networks in cascade. Working process of the converter was analyzed, and expressions of step-up ratio and capacitor voltage stress were derived. Compared with traditional Z-source boost converter, the quasi-Z-source converter can realize larger step-up ratio with small duty cycle, and has lower capacitor voltage stress under the same step-up ratio. The simulation and experimental results verify validity of the theoretical analysis.

Key words: DC-DC converter; boost converter; quasi-Z-source; cascade; step-up ratio; capacitor voltage stress

0 引言

蓄电池机车是煤矿井下的主要动力设备^[1],具有自备电源,且无架线复杂的供电系统,具有适应性强、机动性能好、成本低等优点,特别适合于井下人员、物料运输。蓄电池机车一般由车载高压蓄电池供电,电源经逆变电路、高频变压电路和整流电路降压后,可为机车上的照明装置、电笛、通信装置、检测保护装置、控制装置等低压用电设备供电^[2]。当机

车停电或发生故障时,低压用电设备也会断电,给井下生产造成不便。为避免该情况,在蓄电池机车中加入低压备用电源给低压用电设备单独供电,如图1所示。低压备用电源经DC-DC变换器升压后,可直接给机车低压直流设备供电,也可经逆变电路转换成交流电给机车低压交流设备供电。

Boost变换器是最常用的DC-DC变换器拓扑结构,但其输出电压有限,当开关管占空比非常接近1时,Boost变换器才能达到较大的升压比^[3]。鉴于

收稿日期:2016-12-10;修回日期:2017-03-10;责任编辑:盛男。

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2009FM017);中国博士后科学基金资助项目(20090461254);山东科技大学研究生教育创新计划资助项目(2014BK023)。

作者简介:房绪鹏(1971—),男,山东汶上人,副教授,博士,主要研究方向为阻抗源变换器及其应用、现代电力电子技术在电气传动和新能源利用方面的应用,E-mail:xpfang69@163.com。

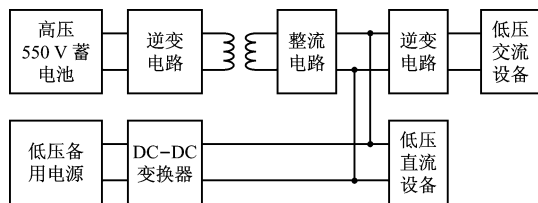


图1 井下蓄电池机车供电结构

Boost 变换器的缺点,文献[4-6]提出了Z源升压变换器,该变换器用一个特殊的Z源网络将输入电源和负载进行耦合,通过控制主开关管占空比实现升压,在占空比小于0.5的情况下就可达到升压效果,但电容电压应力较大。文献[7]在Z源网络结构的基础上提出了准Z源网络结构,减小了Z源升压变换器中电容电压应力,但升压能力依然有限^[8-9]。本文提出了一种准Z源升压型DC-DC变换器,该变换器在输入端将2个准Z源网络进行级联,可进一步提高升压能力,降低电容电压应力。

1 准Z源升压型变换器拓扑结构

准Z源升压型DC-DC变换器将传统Boost变换器的输入电感用准Z源级联网络代替^[10],并将级联网络中的二极管替换成双向导通的开关管,其拓扑结构如图2所示,其中虚线框内为准Z源级联网络,由3个相同电感(L_1, L_2, L_3)和4个相同电容(C_1, C_2, C_3, C_4)组成,开关管 S_1, S_2, S_3 采用IGBT^[11]。直流电源电压 U_i 经级联网络升压后给负载R供电,其中滤波电容 C_f 可减小输出电压 U_0 纹波,辅助开关管 S_2 和 S_3 可使电感 L_2 和 L_3 中的电流反向流动,这样可在主开关管 S_1 导通前将其寄生电容上的多余电荷抽走,使得 S_1 漏源极两端电压为0。

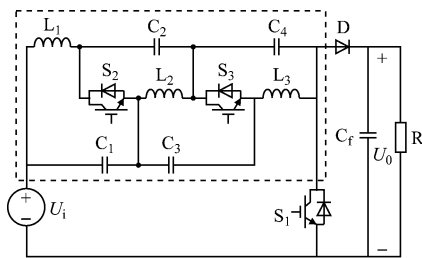


图2 准Z源升压型DC-DC变换器拓扑结构

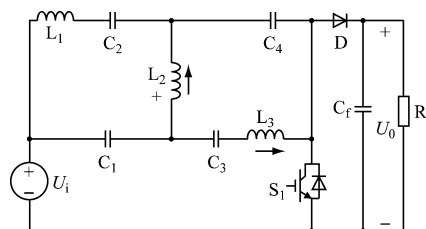
2 准Z源升压型变换器工作原理

由于 $L_1=L_2=L_3, C_1=C_2=C_3=C_4$,准Z源级联网络具有对称性,根据电路的等效性和对称性可得^[12-13]

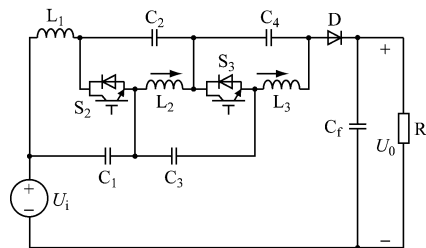
$$\begin{cases} U_{L1} = U_{L2} = U_{L3} \\ U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U_{L1}-U_{L3}$ 分别为电感 L_1-L_3 两端电压; $U_{C1}-U_{C4}$ 分别为电容 C_1-C_4 两端电压。

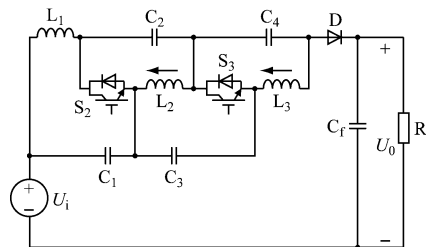
准Z源升压型DC-DC变换器用互补的PWM脉冲作为控制信号, S_2 和 S_3 同步导通和关断,1个开关周期内 $S_2(S_3)$ 和 S_1 互补导通。在1个开关周期内根据电流方向不同,变换器有4种工作状态,如图3所示。



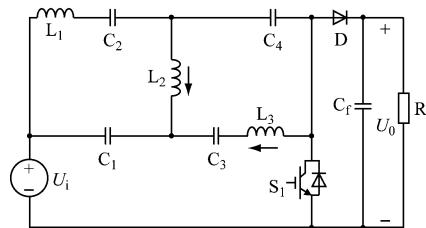
(a) 工作状态1



(b) 工作状态2



(c) 工作状态3



(d) 工作状态4

图3 准Z源升压型DC-DC变换器等效电路

工作状态1; S_2 和 S_3 同时关断, S_1 导通,电源和准Z源级联网络中电容 C_1-C_4 向电感 L_1-L_3 充电,使电感中电流上升, L_2 和 L_3 两端电压均大于0,等效电路如图3(a)所示。 S_2 和 S_3 各自反并联的二极管均承受反向电压而截止。根据基尔霍夫电压定律可得

$$\begin{cases} U_{L1} = U_{C2} + U_i + U_{C4} \\ U_{L2} = U_{C1} + U_{C4} + U_i \\ U_{L3} = U_{C1} + U_{C3} + U_i \\ U_0 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

工作状态 2: S_2 和 S_3 同时导通, S_1 关断, 准 Z 源级联网络中电感 L_1 — L_3 放电, 电感电流降低, L_2 和 L_3 两端电压小于 0, 此时电源和 L_1 — L_3 同时向电容 C_1 — C_4 充电及给负载供电, 等效电路如图 3(b) 所示。根据基尔霍夫电压定律可得

$$\begin{cases} U_{L1} = -U_{C1} \\ U_{L2} = -U_{C2} = -U_{C3} \\ U_{L3} = -U_{C4} \\ U_0 = U_{C1} + U_{C3} + U_{C4} + U_i \end{cases} \quad (3)$$

工作状态 3: L_2 和 L_3 电流降至 0 后, S_1 不动作, S_2 和 S_3 继续导通很短的一段时间, L_2 和 L_3 电流分别由 C_2 和 C_4 提供, 且反向增大, 等效电路如图 3(c) 所示。各电压关系如式(3)所示。

工作状态 4: L_2 和 L_3 反向充电一段时间后, S_2 和 S_3 同时关断, L_2 和 L_3 电流方向不变, 等效电路如图 3(d) 所示。各电压关系如式(2)所示。当 S_1 两端电压降至 0 时, S_1 进入下一个循环周期的工作状态 1。

设在 1 个开关周期 T 内, S_1 占空比为 D , 则 S_1 导通时间为 DT , S_1 关断时间为 $(1-D)T$ 。电感 L_1 — L_3 在 1 个开关周期内伏秒平衡^[14-15], 则

$$\begin{cases} DT(U_{C2} + U_{C4} + U_i) + (1-D)T(-U_{C1}) = 0 \\ DT(U_{C1} + U_{C4} + U_i) + (1-D)T(-U_{C2}) = 0 \\ DT(U_{C1} + U_{C3} + U_i) + (1-D)T(-U_{C4}) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可得

$$U_{C1} = U_{C2} = U_{C3} = U_{C4} = \frac{D}{1-3D}U_i \quad (5)$$

将式(5)代入式(3), 得升压比为

$$B = \frac{U_0}{U_i} = \frac{1}{1-3D} \quad (6)$$

3 变换器性能比较

从升压比和电容电压应力 2 个方面对准 Z 源升压型 DC-DC 变换器和传统 Z 源升压变换器进行比较。根据准 Z 源升压型 DC-DC 变换器和传统 Z 源升压变换器的升压比、电容电压应力公式^[5], 利用 Matlab/Figure 绘制 2 种变换器的升压比及电容电压应力 (U_c/U_i , U_c 为电容电压) 曲线, 分别如图 4、图 5 所示。

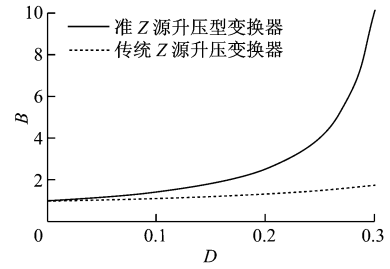


图 4 2 种变换器升压比曲线

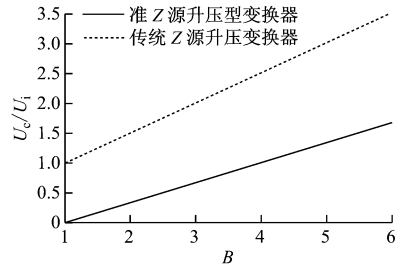


图 5 2 种变换器电容电压应力曲线

从图 4 可看出, 在占空比相同的情况下, 准 Z 源升压型 DC-DC 变换器的升压能力大于传统 Z 源升压变换器, 满足在占空比小的条件下实现大升压比的需求; 当升压比相同时, 准 Z 源升压型 DC-DC 变换器的开关管导通时间小, 有利于开关管散热, 延长开关管使用寿命。从图 5 可看出, 在升压比相同的情况下, 准 Z 源升压型 DC-DC 变换器的电容电压应力小于传统 Z 源升压变换器, 可减小电容的体积与成本。

4 仿真与实验

为验证理论分析的正确性, 根据图 2 在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真电路, 并在实验室搭建小功率硬件电路, 在电流连续工作模式下进行开环仿真和实验。

仿真参数: $L_1 = L_2 = L_3 = 150 \mu\text{H}$, $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 400 \mu\text{F}$, $C_f = 800 \mu\text{F}$, $R = 30 \Omega$, 开关管频率为 20 kHz, $D = 0.25$ 。当 $U_i = 12 \text{ V}$ 时, 输出电压、电容电压的仿真波形分别如图 6、图 7 所示。此时由式(5)、式(6)可计算出输出电压、电容电压的理论值分别为 48, 12 V。

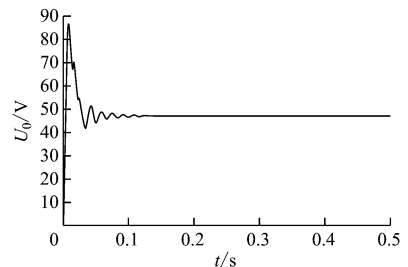


图 6 输出电压仿真波形

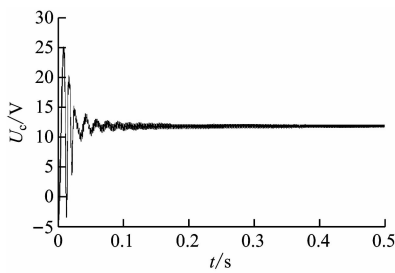


图7 电容电压仿真波形

实验参数与仿真参数一致。开关管选用SGH80N60UF型IGBT,通过TMS320F2812开发板产生互补的控制信号,控制开关管的导通、关断来实现升压功能。当 $U_i=9\text{ V}$ 时,输出电压、电容电压的实验波形分别如图8、图9所示。此时由式(5)、式(6)可计算出输出电压、电容电压的理论值分别为36, 9 V。

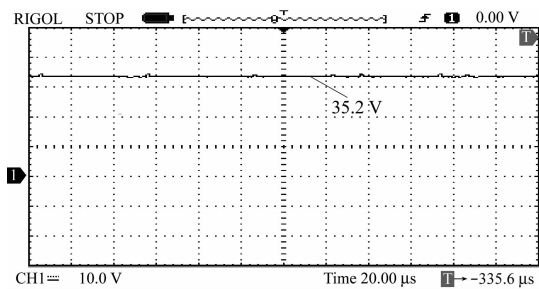


图8 输出电压实验波形

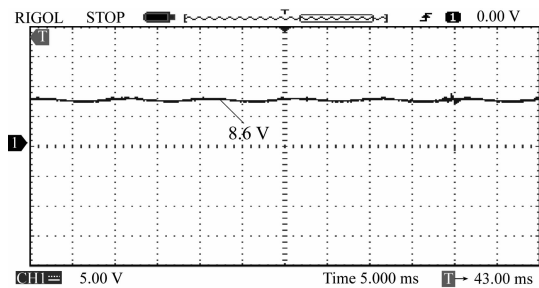


图9 电容电压实验波形

从图6—图9可看出,输出电压和电容电压的仿真值与理论值一致,而实验值与理论值存在一定误差,这是由于实验过程中电路元器件自身存在压降,但误差在合理范围内,验证了理论分析的正确性。

5 结语

将2个准Z源网络级联并引入Boost变换器中,构成了准Z源升压型DC-DC变换器,介绍了该变换器的拓扑结构和工作原理;从升压比和电容电压应力2个方面对准Z源升压型DC-DC变换器和

传统Z源升压变换器进行了比较,准Z源升压型DC-DC变压器可在开关管占空比小的情况下实现更大的升压比,且具有更小的电容电压应力。仿真和实验结果验证了理论分析的正确性。

参考文献:

- [1] 杭俊,黄友锐. 开关磁阻电机在蓄电池电机车上的应用[J]. 电力电子技术,2010,44(9):60-62.
- [2] 房绪鹏,庄见伟,李辉. 一种新型双向DC-DC变换器[J]. 工矿自动化,2016,42(9):52-56.
- [3] 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.
- [4] PENG F Z. Z-source inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2003,39(2):504-510.
- [5] 王利民,钱照明,彭方正. Z源升压变换器[J]. 电气传动,2006,36(1):28-29.
- [6] SHEN M, PENG F Z. Operation modes and characteristics of the Z-source inverter with small inductance or low power factor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008,55(1):89-96.
- [7] ANDERSON J, PENG F Z. Four quasi-Z-source inverters [C]//Power Electronics Specialists Conference,Rhodes,2008:2743-2749.
- [8] 夏鲲,曾彦能,葛越,等. 准Z源升压变换器的软开关技术仿真研究[J]. 系统仿真学报,2015,27(3):656-661.
- [9] 王树文,单硕硕,张洋,等. 改进型准Z源逆变器[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):142-150.
- [10] GAJANAYAKE C J, LUO F L, GOOI H B, et al. Extended-boost Z-source inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(10):2642-2652.
- [11] 周翔,许建平,陈章勇. 高升压增益软开关DC-DC变换器[J]. 电工技术学报,2016,31(14):156-164.
- [12] 汪妍冰,雷勇,李媛,等. 基于准Z源的多电平光伏并网控制系统研究[J]. 高压电器,2016(6):124-129.
- [13] 程志友,程红江,于浩,等. 开关电感型Z源逆变器拓扑结构的设计与仿真[J]. 农业工程学报,2013,29(17):129-136.
- [14] 杜海健,苏谢祖,颜钢锋. 电动汽车新型超级电容能量管理系统设计[J]. 电子技术应用,2011,37(6):77-80.
- [15] 王毅,曹茂永,张刘春,等. 具有Trans-Z源的单相交流变换器设计[J]. 电网技术,2016,40(7):2162-2168.