

一种新型降压谐振开关电容变换器

杨莉¹, 吴天强², 梁勇³, 唐标¹

(1. 云南电网电力科学研究院, 云南 昆明 650200;

2. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

3. 北京智芯微电子科技有限公司, 北京 102200)

摘要:针对开关电容与二次型 Buck 变换器相结合形成的二次型开关电容 Buck 变换器(SC-QBC)存在开关管电压应力大、效率低的问题,提出了一种新型降压谐振开关电容变换器。该变换器是在 SC-QBC 的基础上,通过增加谐振电感、二极管和电容元件得到。与 SC-QBC 相比较,在降压特性变化不大的情况下,新型变换器的开关管的电压应力变小;增加的谐振电感通过与开关电容谐振,使第 2 级实现了开关管的零电流关断(ZCS),减小了开关损耗,提高了开关管的工作频率,有利于变换器的重量和尺寸的减小;同时,谐振回路上的二极管都能实现零电流关断,减小了二极管的反向恢复损耗。这些优点有利于器件的选择和效率的提高。最后,通过实验验证了理论分析的正确性。

关键词:降压变换器;低应力;谐振开关电容;零电流关断

中图分类号: TM46 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21727

A New Step-down Resonant Switched Capacitor Converter

YANG Li¹, WU Tianqiang², LIANG Yong³, TANG Biao¹

(1. Yunnan Power Grid Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Kunming 650200, Yunnan, China;

2. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University,

Chengdu 610065, Sichuan, China; 3. Beijing Smart-chip Microelectronics

Technology Company Limited, Beijing 102200, China)

Abstract: The step-down converter (switched-capacitor quadratic Buck converter, SC-QBC), which is composed of switched capacitor and quadratic Buck converter, has the problems of high voltage stress and low efficiency. In order to solve these problems, a new step-down resonant switched capacitor converter was proposed. Based on the SC-QBC, the converter was obtained by adding a resonant inductor, a diode and a capacitor. Compared with the SC-QBC, the voltage stress of the switch was reduced with little change on the conversion ratio. By adding a resonant inductance resonates with the switched capacitor, the zero current switching (ZCS) of the switching was realized in the second stage and the switching loss was reduced, the working frequency of the switch which is helpful to reduce the weight and size of the converter was improved. At the same time, all diodes on the resonant circuit could be switched off with zero current, alleviated the reverse-recovery losses of the diodes. These advantages make component selection for the proposed converter much easier and the efficiency improved. Finally, the experiment was built to verify the theoretical analysis.

Key words: step-down converter; low-stress; resonant switched capacitor(RSC); zero current switching (ZCS)

随着经济的飞速发展,带来了以煤炭、石油、天然气等为代表的化石能源不能满足各国的能源消耗需求问题和其燃烧所造成的环境污染问题^[1-2]。以可再生能源为主的分布式发电技术,因

为其环保可再生的优点成为大力发展的新型发电技术。目前,分布式电源在电力系统中已经得到了广泛应用^[3-11]。图 1 是分布式电源系统的结构框图。从图中可以看出分布式电源系统有 3

基金项目:四川省科技计划支持项目(2016GZ0145)

作者简介:杨莉(1986—),女,硕士,三级助理技术专家,Email:281914244@qq.com

级,第1级将输入的交流电转换成48 V的直流母线电压,第2级运用降压变换器将48 V的直流母线电压转换成12 V的直流母线电压,第3级将12 V电压降到负载所需的电压等级。传统的Buck变换器受到极限占空比的影响,不能满足降压的需要。文献[12]提出的将二次型Buck电路和开关电容串并联单元相结合得到的二次型开关电容Buck变换器(SC-QBC)具有高降压特性,但是开关管的电压应力很高^[13],需要高压等级的开关管,增加了变换器成本,并且高压开关管的导通电阻高,会导致导通损耗增加;另一方面,由于变换器的开关是硬开关,将导致开关损耗增加,使开关管的工作频率提高受到限制,不利于变换器的小型化、轻量化^[14]。

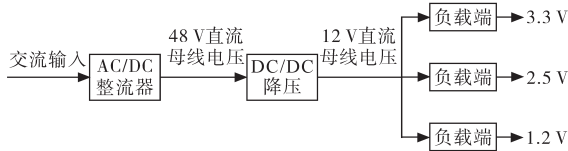


图1 分布式电源系统框图

Fig.1 Block diagram of distributed power system

针对SC-QBC变换器存在的问题。文章提出了一种新型降压谐振开关电容变换器。在CCM模式下进行理论分析可知,开关管的电压应力变小,开关电容谐振放电,谐振回路上的开关管和二极管都实现了零电流关断(ZCS),降低了损耗,提高了开关频率。最后搭建了一台48 V转12 V的实验样机,验证了理论分析的正确性。

1 新型变换器的工作原理分析

为了简化分析,本文以二阶开关电容串并联单元为例,介绍变换器的工作原理。二阶谐振开关电容降压变换器的主拓扑如图2所示。可见,变换器是在SC-QBC变换器的基础上增加了谐振电感 L_r 、二极管 D_3 、电容 C_2 得到。在进行电路分析时,电压电流小写(例如 u_{L1})代表瞬时值,大写(例如 U_{L1})代表平均值。

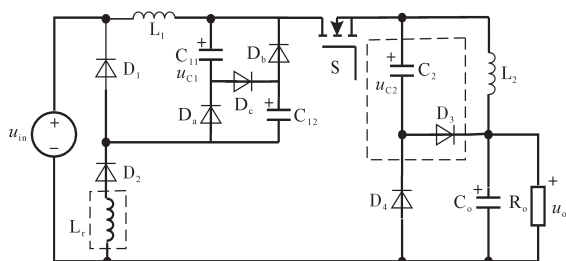


图2 二阶降压谐振开关电容变换器

Fig.2 2-stage step-down RSC converter

由于电路中两个电容 $C_{1i}(i=1,2)$ 并联放电时,分别和 L_i 串联谐振放电,会引起二极管 D_2, D_a, D_b 的零电流关断,与SC-QBC拓扑相比,增加了一个模式,所以新拓扑工作在三种模式下,不同模式下的等效电路如图3所示,其主要工作波形如图4所示。串联谐振放电的时间为 D_0T ,开关管S受到周期为 T 、占空比为 D 的脉冲信号 u_g 驱动。

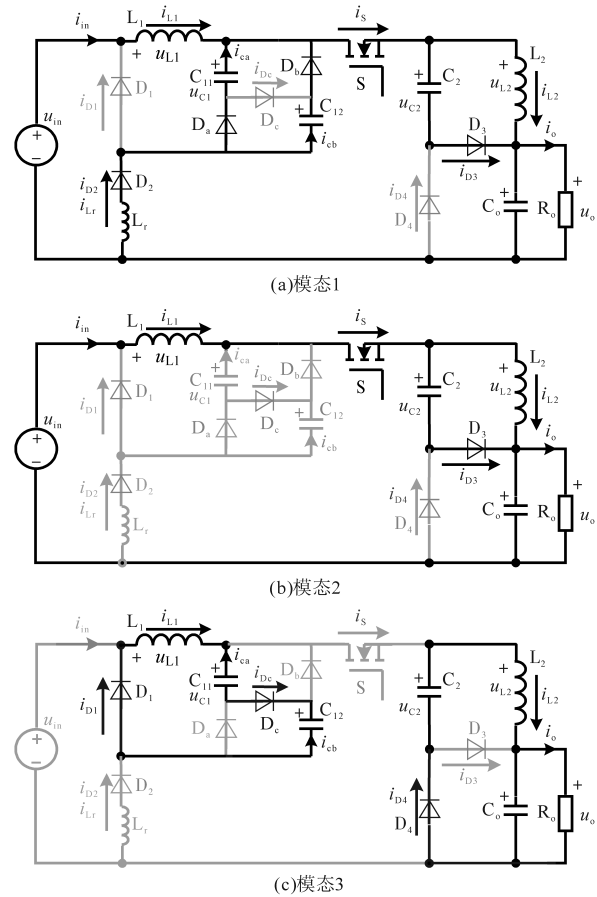


图3 变换器在三种工作模式下的等效电路

Fig.3 The equivalent circuit of the converter in three operating modes

1)模式1: $NT < t < (N+D_0)T$ 。

模式1的等效电路如图3a所示。在 $t=NT$ 时,开关管S、二极管 D_2, D_3, D_a, D_b 导通, D_1, D_4, D_c 承受反向电压关断,两个电容 C_{1i} 并联放电,电感 L_1 通过电源 u_{in} 充电,电感 L_2 和电容 C_2 通过电源 u_{in} 和 C_{1i} 充电,其中 C_{1i} 和 L_r 串联谐振放电,在 $t=(N+D_0)T$ 时,二极管 D_2 零电流关断,谐振结束,此时 C_{1i} 停止放电,该模式结束。该模式下电压关系如下式:

$$u_{L1} = u_{in} - u_{C2} - u_o = u_{in} - u_{C1i} - u_{Lr} \quad (1)$$

$$u_{L2} = u_{C1i} + u_{Lr} - u_o = u_{C2} \quad (2)$$

模式1的持续时间为 $D_0T = \pi \sqrt{2L_r C_{1i}}$ 。二极

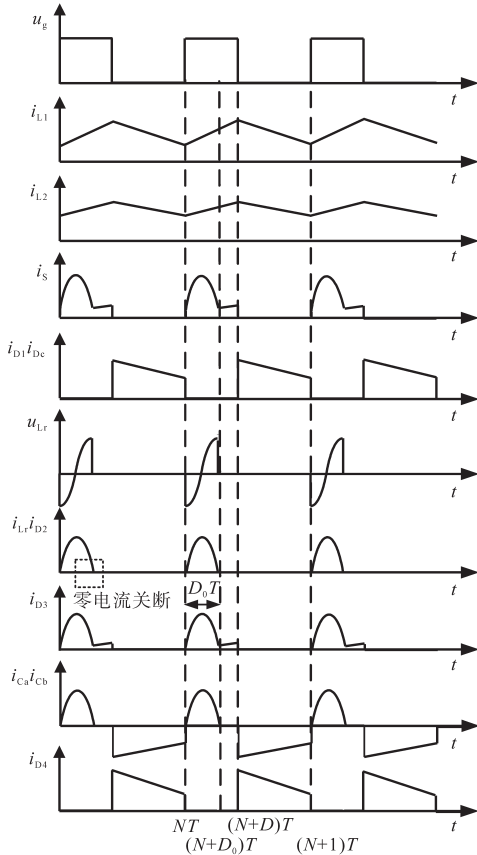


图4 电路主要工作波形

Fig.4 The main waveforms of circuit

管 D_2, D_a, D_b 零电流关断,减小了高反向电流和长恢复时间带来的关断损耗。

2) 模式 2: $(N+D_0)T < t < (N+D)T$ 。

模式 2 的等效电路如图 2b 所示。在 $t=(N+D_0)T$ 时,开关管 S、二极管 D_3 仍导通, $D_1, D_4, D_2, D_a, D_b, D_c$ 关断, u_{in} 通过开关对电感和电容充电,在 $t=(N+D)T$ 时,开关管 S 关断,该模式结束。该模式下电压关系如下式:

$$u_{L1} = u_{in} - u_{C2} - u_o \quad (3)$$

$$u_{L2} = u_{C2} \quad (4)$$

在开关管关断时刻,流过 D_2 的电流为 0,此时开关管 S 中流过的电流 $i_s = i_{L1}$ 。第 2 级实现了开关管的零电流关断,减小了开关损耗。

3) 模式 3: $(N+D)T < t < (N+1)T$ 。

模式 3 的等效电路如图 3c 所示。在 $t=(N+D)T$ 时,开关管 S 关断,二极管 D_2, D_3, D_a, D_b 承受反向电压关断, D_1, D_4, D_c 导通,两个电容串联充电,电感 L_1 通过 D_1, D_c 对 C_1 充电,电感 L_2 通过 C_2, D_4, R_o, C_o 续流,电容 C_2 放电,在 $t=(N+1)T$ 时,开关管导通,该模式结束。该模式下电压关系如下式:

$$u_{L1} = -2u_{C1i} \quad (5)$$

$$u_{L2} = u_{C2} - u_o \quad (6)$$

2 变换器稳态工作性能分析

2.1 稳态电压增益

对新型拓扑进行稳态分析,在 1 个周期 T 内,由 L_1 的伏秒平衡可以得到:

$$(U_{C2} + U_o - U_{C1i})D_0 = 0 \quad (7)$$

所以有:

$$U_{C2} + U_o - U_{C1i} = 0 \quad (8)$$

由 L_1, L_2 的伏秒平衡^[10]可以得到:

$$(U_{in} - U_o - U_{C2})D - 2U_{C1i}(1 - D) = 0 \quad (9)$$

$$U_{C2}D + (U_{C2} - U_o)(1 - D) = 0 \quad (10)$$

联立式(8)~式(10),求解得到:

$$U_{C1i} = U_{in}D/(2 - D) \quad (11)$$

$$U_{C2} = U_o(1 - D) \quad (12)$$

令

$$M = U_o/U_{in} = D/(2 - D)^2 \quad (13)$$

式中: M 为变换器的电压转换比。

在变换器处于模式 3 时,通过 KVL 可以计算出开关管电压应力为

$$U_s = U_{in}(4 - D)/(2 - D)^2 \quad (14)$$

2.2 和 SC-QBC 变换器比较

表 1 是新型拓扑与 SC-QBC 拓扑的比较,表中列出了两个拓扑的电压转换比、开关管电压应力与输入电压的比值。

表 1 SC-QBC 拓扑和新型拓扑比较

Tab.1 Comparison between SC-QBC topology and new topology

拓扑	U_o/U_{in}	U_s/U_{in}
新型	$D/(2-D)^2$	$(4-D)/(2-D)^2$
SC-QBC	$D^2/(2-D)$	$(2+D)/(2-D)$

图 5 和图 6 分别是 SC-QBC 拓扑与新型拓扑占空比和电压转换比的关系曲线以及占空比和开关管电压应力与输入电压的比值关系曲线。

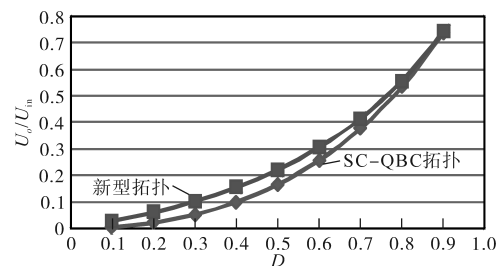


图5 占空比和电压转换比关系曲线

Fig.5 Relation of duty cycle and voltage conversion ratio

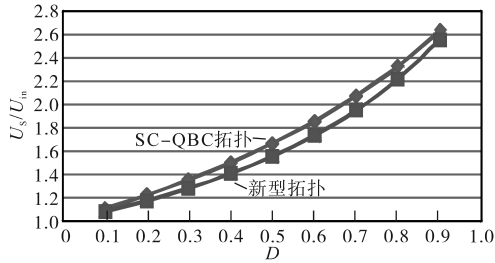


图6 占空比和开关管电压应力与输入电压的比值关系曲线

Fig.6 Relation of duty cycle and the ratio of switching voltage stress and input voltage

通过图5可以看出,新型拓扑和SC-QBC拓扑的电压转换比相比,变化不大,同样具有高降压特性。通过图6可以直观地看到,新型拓扑开关管的电压应力变小了,有利于减小开关管的损耗。

3 n阶降压谐振开关电容变换器

图7是新型n阶降压谐振开关电容变换器的拓扑图。

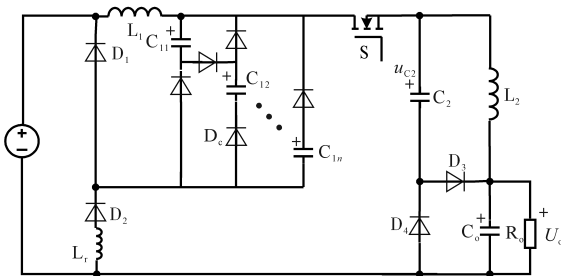


图7 n阶降压谐振开关电容变换器

Fig.7 A n-stage step-down RSC converter

通过推导可以得到:

$$M = U_o/U_{in} = D/(2 - D)(n + D - nD) \quad (15)$$

$$U_s = U_{in}(2n + D - nD)/(2 - D)(n + D - nD) \quad (16)$$

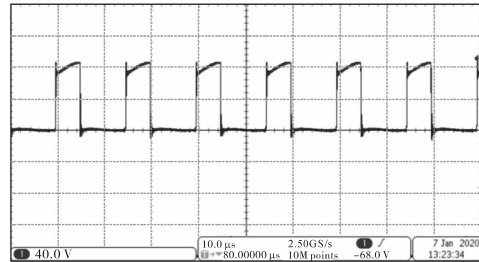
4 实验验证

4.1 实验参数选择

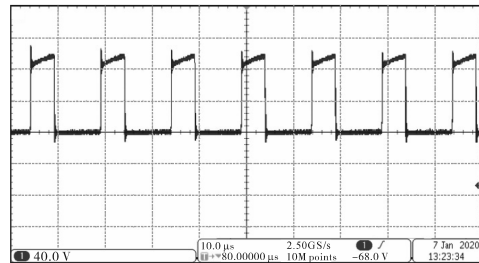
为了验证新型变换器的可行性,以及和SC-QBC变换器相比,新型变换器具有开关管电压应力减小、第2级实现了零电流关断(ZCS)的特点,对新型降压变换器搭载了实验样机,并搭载了SC-QBC变换器样机,作对比实验,电路参数选择为: $L_1=150 \mu\text{H}$, $L_2=200 \mu\text{H}$, $L_r=4.7 \mu\text{H}$, $f_s=67 \text{ kHz}$, $C_{11}=0.68 \mu\text{F}$, $C_2=10 \mu\text{F}$, $C_0=100 \mu\text{F}$, $U_{in}=48 \text{ V}$, $R_0=6 \Omega$, U_o 的理论值为12 V。开关管采用IRF100B202;二极管 D_1, D_4 采用MBRS3200; D_2, D_3 采用SR3100。

4.2 实验结果

图8a和图8b分别是新型拓扑和SC-QBC拓扑开关管两端的电压应力。可见新型拓扑的开关管两端的电压应力较小,从图中还能看出,两个拓扑的开关管的PWM驱动波形的占空比相差不大,也就是两个拓扑的电压增益相差不大。



(a)新型拓扑

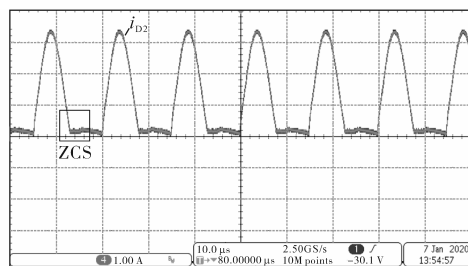


(b)SC-QBC拓扑

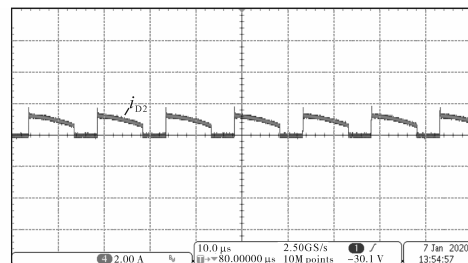
图8 开关管的电压应力

Fig.8 The voltage stress on switch

图9a和图9b分别是新型拓扑和SC-QBC拓扑二极管 D_2 的电流波形。可见新拓扑的电容 C_{11} 和 L_r 谐振放电,第2级实现了开关管的零电流关断,同时二极管 D_2, D_a, D_b 实现了零电流关断,降低了损耗。



(a)新型拓扑



(b)SC-QBC拓扑

图9 二极管 D_2 的电流

Fig.9 The current of diode D_2

图10是输出功率变化时新型拓扑和SC-QBC拓扑效率变化图,由图10可知,新型拓扑的效率更高,最高达到了86%。

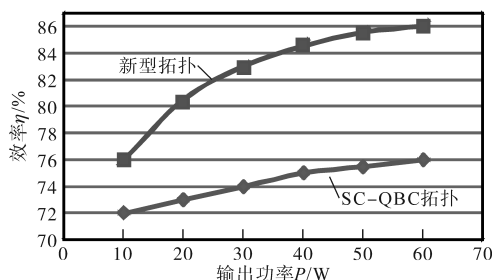


图10 效率曲线

Fig.10 Efficiency curves

综上所述,实验结果和理论分析基本一致,故可以确定该新型降压变换器理论正确。

5 结论

本文通过对SC-QBC变换器进行改进,提出了一种新型降压谐振开关电容变换器。理论分析了其在稳态下的工作原理、降压特性、开关管的电压应力。实验结果表明新型变换器具有以下特征:

1)有高降压特性,SC-QBC变换器适用的场所,它同样能够适用。

2)新变换器的开关管的电压应力变小,解决了开关管高电压应力问题。

3)第2级通过添加的谐振电感实现了零电流关断(ZCS),减小了开关损耗,提高了工作频率和工作效率,有利于变换器的小型化,如果使用同步整流技术,效率将进一步得到提升。

4)在第2级谐振放电的同时,二极管 D_2, D_a, D_b 零电流关断,其反向恢复问题得到解决,降低了损耗。

参考文献

- [1] 吴浩,孟艳.浅谈全球石油危机与能源战争[J].化工管理,2017(24):169-169.
- [2] 东童童,邓世成,晏琪.中国能源消费结构与雾霾污染的关系——基于中国省域空间数据的分析与预测[J].资源与产业,2019,21(6):69-81.
- [3] 李娜,李永刚,李建文.含分布式电源的配电网扩展规划研究[J].电测与仪表,2014,51(8):32-37.
- [4] Bidram A, Davoudi A, Lewis F L, et al. Distributed adaptive voltage control of inverter-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4):862-872.
- [5] 董军刚,王丽荣.一种分布式电源的自适应虚拟同步控制策略研究[J].电气传动,2019,49(7):78-81,89.
- [6] 李争,孙甜甜,高培峰.分布式发电系统用垂直轴风力发电机特性的仿真分析[J].电气传动,2016,46(5):89-92.
- [7] 张洪阳,张志锋,时振堂,等.分布式发电中的储能变换器暂态电流控制研究[J].电气传动,2020,50(3):56-60.
- [8] 王新生,张华强.微电网分布式协同控制策略研究[J].电气传动,2016,46(5):66-69.
- [9] 周鹏.含分布式电源并网特性的配电网重构策略[J].电测与仪表,2019,56(15):34-40.
- [10] 王玉梅,吴志明.分布式电源接入配电网的最佳位置和容量研究[J].电测与仪表,2016,53(21):65-70.
- [11] 杨昶宇,周步祥,林虹江,等.一种分布式电源优化配置方法[J].电测与仪表,2015,52(8):109-114.
- [12] Reyes-Malanche Josue Augusto, Vázquez Nimrod, Leyva-Ramos Jesus. Switched-capacitor quadratic Buck converter for wider conversion ratios[J]. Power Electronics IET, 2015, 8(12): 2370-2376.
- [13] Maksimovic D, Cuk S. Switching converters with wide DC conversion range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1991, 6(1):151-157.
- [14] 张占松,蔡宣三.开关电源的原理与设计[M].北京:电子工业出版社,1998.

收稿日期:2020-04-07

修改稿日期:2020-04-27