

# 一种准 Z-源 DC-DC 变流器的研究\*

刘胜杰, 吴苓芝

(青岛理工大学 自动化工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:** 准 Z-源变流器可以利用开关管导通与关断的状态在单一的拓扑结构中实现 Buck 与 Boost 的性能。理论上这种准 Z-源变流器的输出电压可以为任意值, 而实际中由于电路器件非理想特性和控制方法的限制, 使得输出电压并不能达到任意值。详细分析了准 Z-源变流器结构及相应的工作原理。首先使用 Saber 软件对准 Z-源拓扑结构建立相应的模型并进行了电路开环仿真, 然后通过具体的电路实现了这一新型拓扑。该电路具有良好的稳态和动态响应, 且电路简单, 调试方便。

**关键词:** 准 Z-源拓扑; DC-DC 变流器; Buck/Boost 电路

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)17-0033-04

## Research of a novel Quasi-Z-source DC-DC converter

Liu Shengjie, Wu Lingzhi

(College of Automation Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** This new type of Quasi-Z-source converter with the state of switch tube conduction and shut off can realize the buck and boost performance in a single topology structure. The output voltage of this kind of Quasi-Z-source converter can be any value in theory. But virtually owing to the limit of the real characteristics of circuit devices and control method, the output voltage can not be any value. This paper analyzes the structure of Quasi-Z-source converter and the corresponding operating principle in detail. At first, it uses the Saber software on the structure of Quasi-Z-source topology to set up a corresponding model and make an open loop simulation. Then, this new type of topology is realized by the specific circuit. The experiment result shows that the converter has excellent static and dynamic response, which has advantages of simple circuit and convenient debug.

**Key words:** Quasi-Z-source topology; DC-DC converter; Buck/Boost circuit

随着科学技术的高速发展, 开关电源由于具有低成本、小型化、高效率、高可靠性和稳压范围宽等优点, 在自动控制、航空航天及新能源等众多领域得到了广泛使用。传统的拓扑结构是 Buck 型或 Boost 型电路结构, 虽然它们发展了多年, 且控制技术也已经非常成熟, 但是却摆脱不了只能是单一结构这一固有缺点, 从而使得传统的电路拓扑结构在一些复杂的应用场合受到了挑战<sup>[1]</sup>。为了克服上述理论缺陷, 参考文献[1]提出了一种新型的拓扑—Z-源网络, 为功率变换提供了一种新的思路 and 理论。与常规的拓扑结构相比, Z-源拓扑无需前级的 boost 或者 buck 电路, 增加了一个包含电感  $L_1$ 、 $L_2$  和电容器  $C_1$ 、 $C_2$  的 Z-源网络。Z-源拓扑由于采用了独特的 X 型 Z-源网络电路而获得了升/降压、安全性能高、效率

高(单级电路)等特点。Z-源网络的加入对系统的动态性能有一定的影响, 在开关电源的实际应用场合, 体积、重量、动态响应和对负载的适应性都是至关重要的因素。针对 Z-源拓扑的一些不足, 参考文献[1]在常规 Z-源拓扑的基础上又提出了一种新型结构——准 Z-源拓扑。准 Z-源拓扑和 Z-源拓扑的基本原理大致相同。理论上来说, 对于 Z-源拓扑的各种控制方法和应用都可以推广到准 Z-源拓扑上来。准 Z-源拓扑作为一种全新的电力电子拓扑和理论, 是对传统意义上 DC-DC 拓扑的一个突破, 是变流器研究的一个创新。

本文是在准 Z-源逆变器的结构上提出的, 研究了这种拓扑结构在 DC-DC 方面的应用, 并通过搭建实验样机来进行了验证。这种准 Z-源拓扑电路无须调整, 加电即可工作, 可以提供更宽的输出电压范围, 输出电压

\* 基金项目: 山东教育厅基金项目 (J10LG07)

质量高、结构简单、性能稳定、反应灵敏且调压精度高。

### 1 准Z-源变流器的结构和工作原理

#### 1.1 准Z-源变流器的原理图

准Z-源变流器由独特的X型Z-源网络构成,其主电路如图1所示。其中的Z-源网络由两个相同的电感 $L_1$ 、 $L_2$ 和相同的电容 $C_1$ 、 $C_2$ 构成,准Z-源拓扑通过开关管的导通和闭合实现电压的改变,这为主电路根据需要升压或降压提供了一种新的机理。

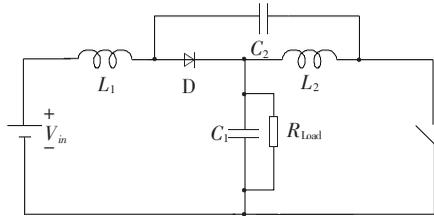


图1 准Z-源变流器的原理图

#### 1.2 准Z-源变流器的等效电路

为了便于分析,假设准Z-源网络为对称网络,即 $L_1=L_2, C_1=C_2$ 。当准Z-源网络工作在开关管导通状态时,电容放电供给负载,电源和电容同时为电感充电,续流二极管承受反向电压而截止,其等效电路如图2(a)所示。当准Z-源网络工作在开关管关断状态时,电感放电,电源和电感同时为负载和电容供电,续流二极管正向导通,其等效电路如图2(b)所示,负载可以根据升降压的需要,并联在 $C_1$ 或 $C_2$ 两端。图2所示的电路表示了只加一种负载的情况。

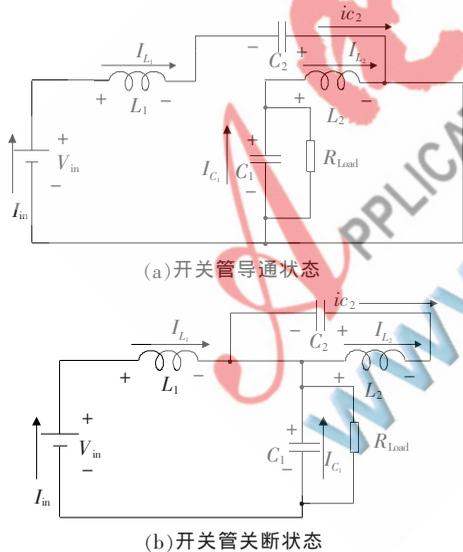


图2 准Z-源变流器的等效电路图

#### 1.3 准Z-源变流器占空比的推导

假定在一个开关周期 $T$ 中,开关管导通状态区间为 $T_0$ ,而开关管关断状态区间为 $T_1$ ,则有 $T=T_0+T_1$ ,导通状态的占空比为 $D=T_0/T$

当开关管处于导通状态 $T_0$ 期间,由基尔霍夫电压定律和图2(a)可以得到电感 $L_1$ 、 $L_2$ 在此状态下的电压:

$$V_{L_1} = V_{C_2} + V_{in} V_{L_2} = V_{C_1} \quad (1)$$

其中, $V_{in}$ 为Z-源网络电源电压, $V_{L_1}$ 、 $V_{L_2}$ 为在导通状态下Z-源网络电感的电压, $V_{C_1}$ 、 $V_{C_2}$ 为在导通状态下Z-源网络电容的电压。

当开关管处于关断状态 $T_1$ 期间,由基尔霍夫电压定律和图2(b)可以得到电感 $L_1$ 、 $L_2$ 在此状态下的电压:

$$V_{L_1} = V_{in} - V_{C_1}, V_{L_2} = V_{C_2} \quad (2)$$

其中, $V_{in}$ 为Z-源网络电源电压, $V_{L_1}$ 、 $V_{L_2}$ 为在关断状态下Z-源网络电感的电压, $V_{C_1}$ 、 $V_{C_2}$ 为在关断状态下Z-源网络电容的电压。

在稳态工作状态下,开关电源的电感在一个周期中平均电压为0<sup>[2]</sup>,由式(1)、(2)可得:

$$V_{L_1} = \frac{T_0(V_{C_2} + V_{in}) + T_1(V_{in} - V_{C_1})}{T} = 0 \quad (3)$$

$$V_{L_2} = \frac{T_0(V_{C_1}) + T_1(V_{C_2})}{T} = 0 \quad (4)$$

由式(3)、(4)进一步推导可得:

$$V_{C_1} = \frac{T_1}{T_1 - T_0} V_{in} \quad (5)$$

$$V_{C_2} = \frac{T_0}{T_1 - T_0} V_{in} \quad (6)$$

式(5)、(6)的分子分母同时除以周期 $T$ 可得:

$$V_{out1} = \frac{1-D}{1-2D} V_{in} \quad (7)$$

$$V_{out2} = \frac{D}{1-2D} V_{in} \quad (8)$$

其中, $V_{out1}$ 、 $V_{out2}$ 为并联在 $C_1$ 、 $C_2$ 两端负载的电压。

### 2 准Z-源变流器主电路设计

#### 2.1 实验样机主电路原理图

准Z-源变流器主电路原理图如图3所示。

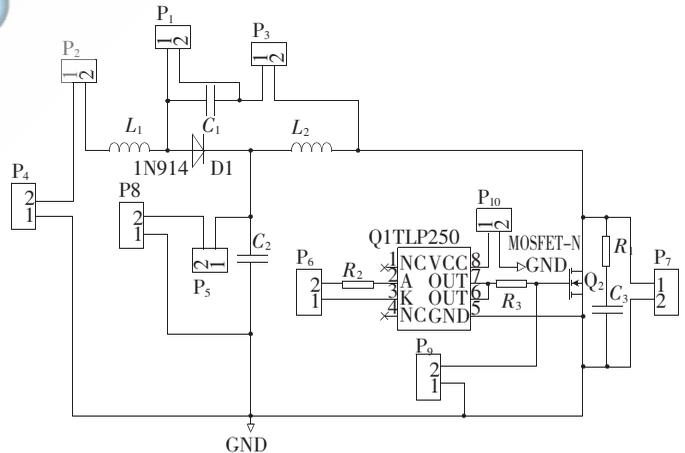


图3 准Z-源变流器主电路原理图

主电路是准Z-源变流器电源能量的转换电路,实现了从输入电源侧到最终负载侧上直流电压的形式的变换<sup>[2]</sup>。为了更加灵活地与控制电路、辅助电路相连接,设计主电路时留了很多端口。这些端口的功能是: $P_1$ 、 $P_8$

为电压测量端口或负载接入端口;  $P_2$  为电压源侧输出电压测量端口;  $P_3$ 、 $P_5$  为负载电流测量端口;  $P_4$  为电源电压输入端口, 可以接直流稳压源或经交流电整流滤波后的直流电压源;  $P_6$  为占空比可调的 PWM 波输入端口;  $P_7$  为功率 MOSFET 管源漏极波形测量端口;  $P_9$  为光耦输出波形测量端口;  $P_{10}$  为给光耦提供直流电压源。  $R_1$  和  $C_3$  并联在功率开关管两端构成 RC 箝位吸收电路对其进行保护,  $R_2$  和  $R_3$  都为保护电阻。

## 2.2 电感参数的设计

准 Z-源网络的电感在开关管导通状态中储能, 而在开关管关断状态中释放电能。如果准 Z-源网络电感的电感量太小, 储能不够, 就会出现关断状态下的断续电流模式, 使得准 Z-源变流器从原有的连续状态进入断续状态, 增加了系统控制的复杂度, 而且这种断续电流模式也使输出电压产生畸变, 从而影响到输出电压的质量。考虑到准 Z-源网络的电感是直流电感, 因此在设计时对直流电感上的电流纹波加以控制也是必要的。因此, 从可靠、安全和抑制 Z-源网络电感电流纹波等因素考虑, 应选择足够大的电感。但是, 从工程设计的角度出发, 电感的增大会导致损耗、体积和重量的增加<sup>[3]</sup>。因此, 设计 Z-源网络电感的原则为在满足运行特性及稳定性的基础上尽量减小 Z-源电感的取值。

电感值越大, 纹波电流越小, 线路的损耗就会减小, 但电感损耗和体积都会增大。通常电感上的纹波电流选择为额定电流的 15%~25%, 本文取值为 20%。根据电感电流纹波设计的电感值的计算公式有:

$$L = \frac{\Delta I}{\Delta I} V_L \quad (9)$$

$$\Delta I = I_{AVG} \times r \quad (10)$$

$$\Delta I = \frac{D}{f} \quad (11)$$

其中,  $D$  为占空比,  $f$  为频率,  $I_{AVG}$  为稳态下电感电流的平均值。

开关管的工作频率  $f=20$  kHz, 占空比  $D=0.2$ ,  $I_{AVG}=1.59$  A,  $r=0.2$ , 以准 Z-源网络的降压情况  $V_L=8$  V 为例, 根据以上公式可得  $L_1=L_2=251.12$   $\mu$ H。

## 2.3 电容参数的设计

准 Z-源网络电容的作用主要是吸收电流纹波和平滑电压。选取时应该在满足耐压和电压纹波的同时, 选取耐温升、ESR 小的电容。电容值不能太小, 否则需要更大的电感来满足衰减的需要<sup>[3]</sup>。电容  $C$  可以通过下式计算:

$$C = \frac{\Delta I}{\Delta V_C} I_C \quad (12)$$

当准 Z-源变流器工作在通路状态时,  $I_C=I_L$ ; 工作在开关管关断状态时,  $I_C=I_N-I_L$ 。假设准 Z-源网络的电感较大, 电感上的电流纹波较小, 且在系统开关频率足够高时, 电感电流可近似认为恒定为  $I_{AVG}$ 。如果采用简单控制, 准 Z-源网络中的电容电压的高次谐波的脉动的频率为开关频率的 2 倍, 即  $\Delta t = \frac{D}{2f}$ , 可得:

$$C = \frac{DI_L}{2fV_C} \quad (13)$$

由式(13)和实验室现有元件, 可取容量为 470  $\mu$ F、耐压为 50 V 的铝电解电容, 得出纹波电压  $r$  为 16.91 mV, 满足铝电解电容纹波电压一般在 10 mV~100 mV 之间的要求。

## 3 仿真及实验结果分析

首先使用 Saber 软件仿真所提出的准 Z-源变流器, 然后通过具体的实验样机实现这一拓扑, 以进一步验证它的正确性。

### 3.1 准 Z-源变流器的仿真

根据准 Z-源拓扑结构构建仿真电路, 假设电源电压为 24 V, 电感  $L_1=L_2=250$   $\mu$ H, 电容  $C_1=C_2=470$   $\mu$ F, 开关管的工作频率  $f=20$  kHz, 占空比  $D=0.2$ , 并联在  $C_1$  和  $C_2$  两端的负载  $R_1=10$   $\Omega$ ,  $R_2=50$   $\Omega$ 。仿真电路如图 4 所示。

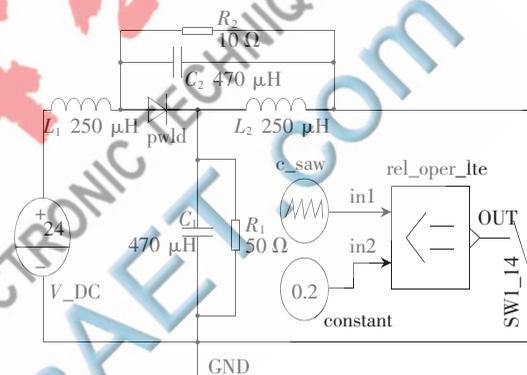


图4 准 Z-源变流器的仿真电路

图 5(d) 所示为占空比可调的 PWM 波, 控制 MOSFET 管的导通与关断。通过改变图 4 中 constant 值可以得到电路所需的占空比, 进行不同情况的转换。由式(7)、(8)计算可得输出电压的理论值, 降压达到 8 V 时其仿真结果如图 5(a) 所示, 升压达到 32 V 其仿真结果如图 5(b) 所示。

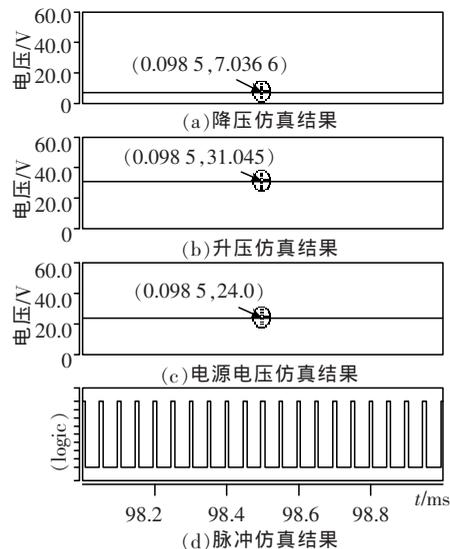


图5 准 Z-源变流器的电压仿真分析波形

## 3.2 准 Z-源变流器的实验样机

控制器是电源控制电路的核心,本文选用 MSP430 作为控制器。MSP430 系列微处理器是美国德州仪器生产的一种 16 bit 超低功耗、具有精简指令集(RISC)的混合信号处理器。它将多个功能不同的模拟电路模块、数字电路模块和微处理器集成在一个芯片上以满足不同的需要。其主要特点有:(1) 超低功耗,电源电压采用 1.8~3.6 V 低电压,在活动模式时耗电 250  $\mu$ A/MIPS,内设低电压监测电路可以关闭暂时不使用的内部功能模块。(2) 丰富的片上外围模块,看门狗(WDT)定时器,模拟比较器 A,定时器 A(Timer\_A3 带 3 个捕获/比较寄存器和 PWM 输出的 16 bit 定时器),定时器 B(Timer\_B7 带 7 个捕获/比较寄存器和 PWM 输出的 16 bit 定时器),定时器内部电路如图 6 所示。

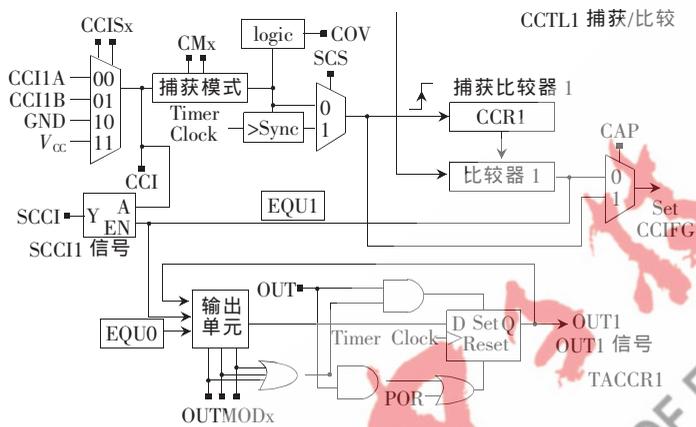


图 6 MSP430 定时器内部结构图

由于 MSP430 的超低功耗和强大的数据处理能力,可以有效地消除电路引起的误差,抑制干扰信号,提高输出电压的质量,控制电流的精度,在同类产品中有较高的性价比,因此本设计选用它作为控制器<sup>[4]</sup>。

在前面理论分析的基础上,设计了一台功率为 50 W

的实验样机,电源电压 24 V 由直流稳压源供给,光耦为 TLP250 驱动开关管,功率 MOSFET 管为 IRF540N,二极管为 SR520,其他采用仿真时的参数。

表 1 实验样机采集的数据

功率 占空比	效率			
	Pin/W	Pout1/W	Pout2/W	$\eta$
D=0.2	28.08	19.83	5.04	88.55%
D=0.25	32.64	11.05	18.12	89.36%

本文提出的准 Z-源 DC-DC 变流器与传统的 Buck 型或 Boost 型 DC-DC 变流器相比具有两大优点:(1) 可以在相同占空比时提供比 Boost 型拓扑更高的输出电压,同时能得到比 Buck 电路更低的输出电压;(2) 准 Z-源网络由于采用独特的 X 型 Z-源网络,把 Buck 型或 Boost 型电路得特点集成到一起,电路设计硬件简单,性能稳定。在保证高精度的前提下成本低、效率高,能够很好的稳定工作,可以适应一些的特殊需要,具有较好的推广应用价值。

## 参考文献

- [1] ANDERSON J, Peng Fangzheng. Four Quasi-Z-source inverters[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'08, 2008:2743-2749.
- [2] MANIKTALA S.精通开关电源设计[M].王志强,等,译.北京:人民邮电出版社,2008.
- [3] 张占松,蔡宣三.开关电源的原理与设计(修订版)[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [4] 何希才.新型开关电源设计与应用(第一版)[M].北京:北京科学出版社,2001:19-34.

(收稿日期:2012-04-12)

## 作者简介:

刘胜杰,男,1986 年生,硕士研究生,主要研究方向:电力电子电路拓扑。