

Study of Quadratic Converter with Wide Output Voltage Range

GAO Xuejun, YE Wei

The College of Electrical Engineering and Information Technology, Three Gorges University, Yichang, China

Abstract: A quadratic converter with wide output voltage range is researched in this paper. This converter consists of two basic buck converters connected in series, and includes only one switch, which can provide a voltage conversion ratio by. By introducing the principle of quadratic converter, the paper especially analyses the model of each work state. The advantage of this converter is analysed by comparing with conventional buck converter. Finally, the feasibility of quadratic converter is confirmed by the simulink in matlab.

Keywords: quadratic converter; voltage conversion ratio; work states; simulink

实现宽范围电压输出的平方型变换器的研究

高学军, 叶炜

三峡大学电气信息学院, 宜昌, 中国, 443002

摘 要: 本文研究了一种可实现宽范围电压输出的平方型变换器。该变换器由两个基本 Buck 变换器串联而成, 只包含一个开关管, 其电压转换比 M 为占空比 D 的平方。本文在介绍该变换器工作原理的基础上, 重点分析了该变换器拓扑的各种工作模式。通过与传统 Buck 电路作比较, 分析了该变换器的优越性。最后, 通过 matlab 仿真, 验证了平方型变换器的可行性。

关键词: 平方型变换器; 电压转换比; 工作模式; 仿真

1 引言

DC/DC 转换装置中, 通常需要适应宽范围的输入电压或是满足宽范围的输出电压。对于输出电压较低的情况, 传统的 Buck 变换器必须工作在相当低的占空比下才能满足要求。由于开关功率元器件导通时间短, 因而承受正向阻断电压应力时间长, 电压应力较大, 减少了开关功率元器件的使用寿命。同时由于受开关管最小开通时间的限制, 使变换器只能工作在较低的工作频率, 降低了变换器的效率。

本文分析了一种可实现宽范围电压输出的平方型变换器, 其电压转换比 M 是占空比 D 的平方。要获得相同的电压转换率, 较传统的 Buck 变换器而言, 该变换器可以工作于较大的占空比和较高的工作频率, 降低了开关功率元器件的电压应力, 提高了变换器转换效率, 同时实现了宽范围电压的转换。

2 平方型变换器原理

图 1 描述了由 n 个基本的 Buck 电路串联的拓扑结构。开关管 S_1 、 S_2 ...、 S_n 由同一个调制信号控制。

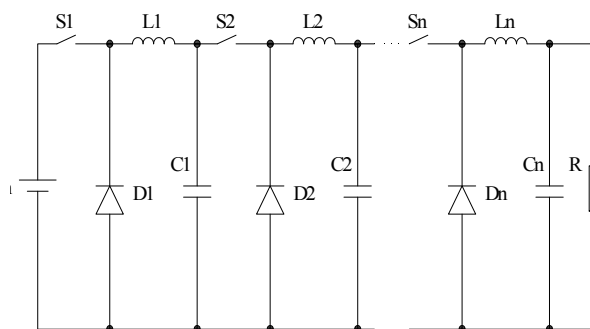


Figure 1. Cascade of n Buck converters

图 1. n 个 Buck 电路串联

假设滤波电感和输出滤波电容足够大, 忽略电路内部损耗, 该电路的电压转换率为^[1]:

$$M = \frac{U_{out}}{U_{in}} = D^n \quad (1)$$

其中, D 为开关管的占空比, n 为串联的级数。由上述公式可知, 只要改变占空比和串联的级数, 就能很容易的进行宽范围电压调节。

图 2 (a) 由两个基本 Buck 变换器直接串联而成, 包含两个功率开关管, 电压转换率为 D^2 。这种直接串

联电路可以简化为图 2 (b) 所示的形式——平方型变换器^{[2][3]}。该变换器是由两个基本 Buck 变换器串联而成, 其中包含两个 LC 滤波器, 一个开关管, 和三个二极管。相对于两个 Buck 电路直接串联, 该电路主要的好处在于, 获得同样 D^2 的电压转换率, 只需要一个功率开关管, 从而简化了控制及其驱动电路。图 2 (a) 和 (b) 如下图所示。

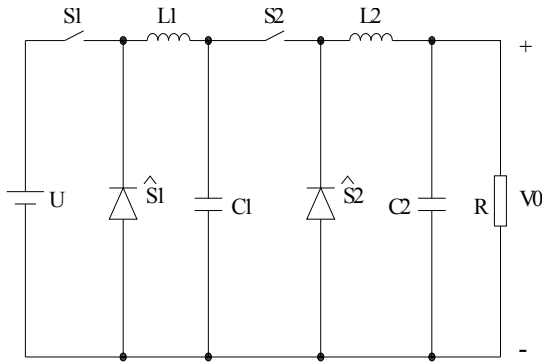


Figure 2(a). 3 Cascade of two Buck converters

图 2(a). 两个 Buck 电路直接串联

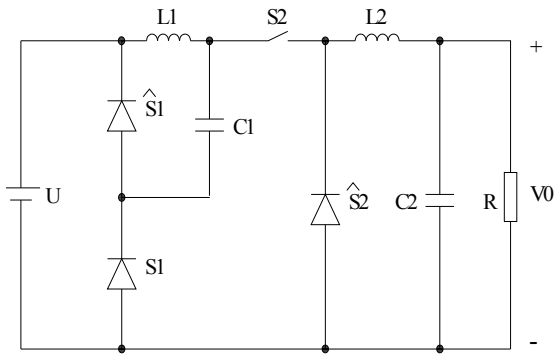


Figure 2(b). Quadratic buck converter

图 2(b) 平方型变换器主电路

3 平方型变换器拓扑的工作模式

首先, 为了简化分析, 作以下假设:

(1) 电路中所有器件均无惯性, 开关状态的转换均在瞬间完成;

(2) 输出滤波电感和滤波电容足够大, 电容和电感中的交流纹波可以忽略。

3.1 电流连续模式 (CCM)

在电流连续模式下, 二极管 S_1 与开关管 S_2 同步, 即 S_2 导通时, S_1 也导通, S_2 截止时, S_1 也截止。

令 $t = 0$ 时, S_2 、 S_1 导通, $\hat{S}_1$ 、 $\hat{S}_2$ 因反向电压而截止。 S_2 导通期间, 电感 L_1 、 L_2 为蓄能状态, 通过它们的电流线性增加, 电感和电流得斜率分别为:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{U - V_C}{L_1} \quad (2)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{V_C - V_O}{L_2} \quad (3)$$

当 $t = T_{on}$ 时, i_{L1} 、 i_{L2} 均达到最大值。

等效电路如图 3 (a) 所示

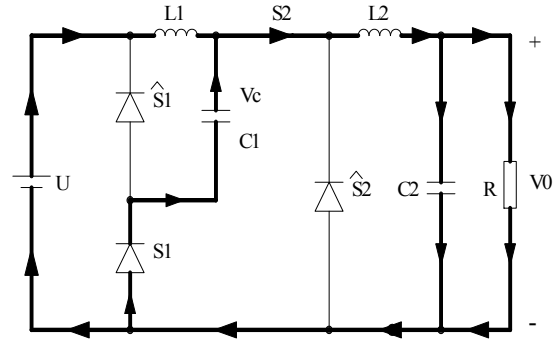


Figure 3(a). Equivalent circuit at S2-on

图 3(a). S_2 导通状态等效电路

当 $t \geq T_{on}$ 时, S_2 、 S_1 截止, 等效电路如图 3 (b) 所示。

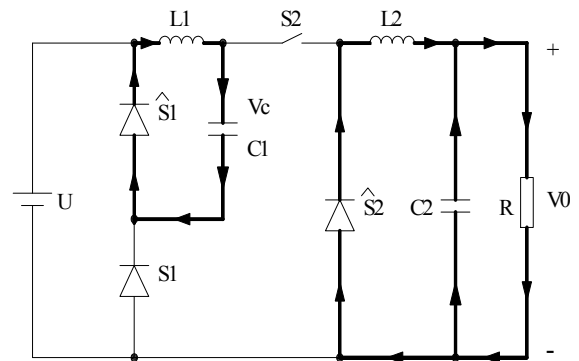


Figure 3(b). Equivalent circuit at S2-off

图 3(b) S_2 截止状态等效电路

S_2 截止期间, 由于楞次定律, 电感形成电流源对电容充电, $\hat{S}_1$ 、 $\hat{S}_2$ 因正向电压而导通。电感 L_2 与输出滤波电容 C_2 上的储能通过二极管 $\hat{S}_2$ 形成回路而传递能量给负载。通过 L_1 、 L_2 的电流线性减小, 电感电流斜率分别为:

$$\frac{di_{L1}}{dt} = -\frac{V_C}{L_1} \quad (4)$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = -\frac{V_O}{L_2} \quad (5)$$

当 $t = T$ 时, i_{L1} 、 i_{L2} 均达到最小值。当 $t \geq T$ 时, S_2 又导通, 进入下一个开关周期。

整个开关周期中,电感电流波形如图4所示。

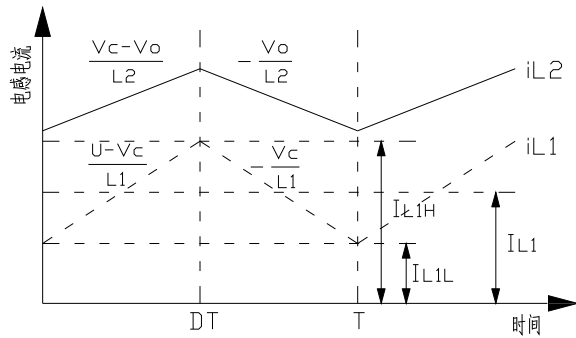


Figure 4. Waveforms of inductors Current
图 4. 电感电流波形

由图可知,

$$I_{L1L} = I_{L1} - \frac{\Delta I_{L1}}{2} \quad I_{L1H} = I_{L1} + \frac{\Delta I_{L1}}{2} \quad (6)$$

$$I_{L2L} = I_{L2} - \frac{\Delta I_{L2}}{2} \quad I_{L2H} = I_{L2} + \frac{\Delta I_{L2}}{2} \quad (7)$$

在 $0 < t < DT$ 中,

$$\Delta I_{L1} = \frac{U - V_c}{L_1} DT = \frac{V_c}{L_1 f} (1 - D) = \frac{V_o}{L_1 f} \cdot \frac{1 - D}{D} \quad (8)$$

$$\Delta I_{L2} = \frac{V_c - V_o}{L_2} DT = \frac{V_o}{L_2 f} (1 - D) \quad (9)$$

在 CCM 模式下, $I_{L1L} > 0$, $I_{L2L} > 0$, 又 $I_{L1} = \frac{D^3 U}{R}$, $I_{L2} = \frac{D^2 U}{R} = \frac{V_o}{R}$, 即 $I_{L1} = DI_{L2}$, 则

$$\frac{DV_o}{R} - \frac{V_o(1-D)}{2DL_1 f} > 0 \quad (10)$$

$$\frac{V_o}{R} - \frac{V_o(1-D)}{2DL_1 f} > 0 \quad (11)$$

由式 (10)、(11) 得:

$$\frac{2L_1 f}{R} > \frac{1-D}{D^2} \quad (12)$$

$$\frac{2L_2 f}{R} > 1-D \quad (13)$$

同时, 在 CCM 模式下, 二极管 S_1 与开关管 S_2 同步, $i_{S1} = i_{L2} - i_{L1} > 0$, 即 $i_{L2} > i_{L1}$, 该式可等效于:

$$I_{L2} - \frac{\Delta I_{L2}}{2} > I_{L1} - \frac{\Delta I_{L1}}{2} \quad (14)$$

$$I_{L2} + \frac{\Delta I_{L2}}{2} > I_{L1} + \frac{\Delta I_{L1}}{2} \quad (15)$$

由 (14)、(15) 可得:

$$\left| \frac{R}{2L_2 f} - \frac{R}{2DL_1 f} \right| < 1 \quad (16)$$

3.2 电流断续模式(DCM)

在电流断续模式下, 二极管 S_1 与开关管 S_2 不同步, 即 S_2 导通时, S_1 已经截止, 此时, $i_{L2} \leq i_{L1}$ 。在不同步工作模式中, 电压转换率不仅与占空比 D 有关, 还与负载 R 有关, 且不同步工作模式下的电压转换率要大于同步工作模式下的转换率。对于降压转换器, 与其衍生型的转换器而言, 系统工作在连续电流模式下能得到较佳的输出特性。为了得到宽范围输出电压及其良好的输出特性, 一般通过选择合适的参数使系统工作在连续电流模式^[3]。对于平方型变换器, 可根据式(12)、(13)、(16)选择合适的参数使其工作在电流连续模式。

4 平方型变换器的 simulink 仿真

工频三相交流电经整流都可达到 540V, 下面以 540V 直流电压为输入电压, 拟输出 50V 的直流电压, 则 $D = \sqrt{\frac{V_o}{V_i}} = \sqrt{\frac{50V}{540V}} = 0.3$ 。通过 matlab 中的 simulink 仿真工具, 开关管转换周期 $T=0.0001s$, 占空比 $D=0.3$, $L_1=L_2=10mH$, $R=5\Omega$, 系统工作在电流连续模式。仿真波形如图 5—图 7。

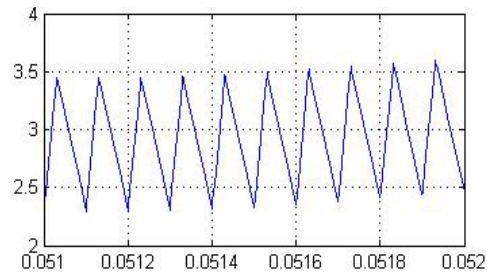


Figure 5(a). Waveform of inductor L_1 current
图 5(a) 通过电感 L_1 的电流

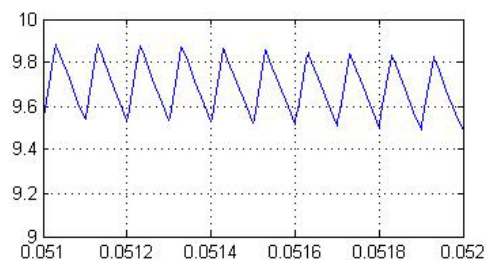


Figure 5(b). Waveform of inductor L_2 current
图 5(b). 通过电感 L_2 的电流

图 5 为通过电感 L_1 、 L_2 的电流波形。在开关管导通期间, 电感电流 i_{L1} 和 i_{L2} 线性增加, 在开关管截止期间, 电感电流 i_{L1} 和 i_{L2} 线性减小。由上图可以看出 $i_{L2} > i_{L1}$, 即在电流连续模式下, 二极管 s_1 与开关管 s_2 同步。

当输入电压为 $V_{in} = 540V$, $D = 0.3$ 时, 平方型变换器的输出电压为

$$V_{out} = D^2 \cdot V_{in} = 0.3^2 \times 540V = 48.6V,$$

输出电压波形如图 6 所示。

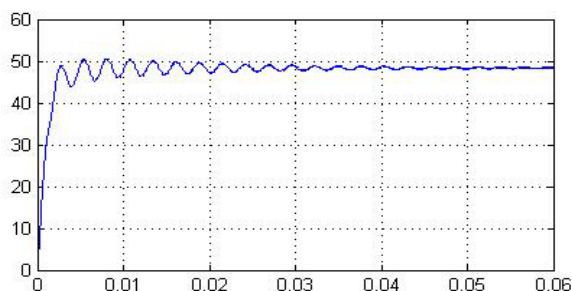


Figure 6. Output voltage waveform at Duty ratio $D=0.3$

图 6. $D=0.3$ 时平方型变换器的输出电压波形

对于传统的 Buck 电路, 要得到一个 50V 左右的电压, $D=50V/540V=0.09$, 其开关管工作非常小的占空比。很明显, 输出一个相同的电压, 平方型变换器提高了开关管工作的占空比, 解决了需要输出较低电压时受开关管最小导通时间限制的问题。

平方型变换器的另一个优点就是降低了开关功率元件的电压应力。图 7 和图 8 分别为输出 48.6V 直

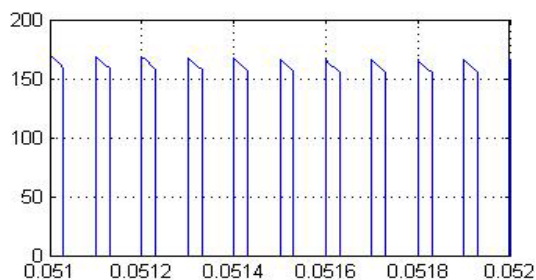


Figure 7. Voltage on Diode D3 in quadratic buck converter

图 7. 平方型变换器电路中二极管 D3 两端的电压

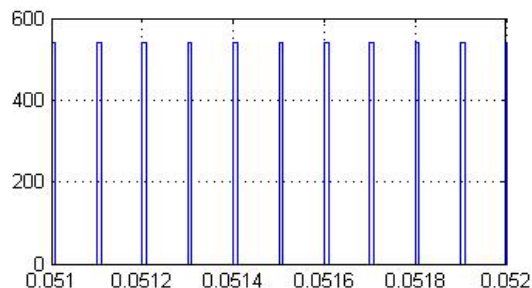


Figure 8. Voltage on Diode D in buck converter

图 8. Buck 电路中二极管 D 两端的电压

流电压时平方型变换器和传统的 Buck 变换器中二极管两端的电压。由图可知, 平方型变换器大大降低了开关管所承受的电压应力, 延长了开关功率元件的使用寿命。图 7 和图 8 如下所示:

5 总结

平方型变换器的电压转换率为占空比的平方, 占空比极小的改变, 就可以较宽范围的改变输出电压。所以该电路具有宽范围的电压转换, 同时还具有提高功率因素的作用^[4]。实验证明, 该变换器集功率因数校正、输出隔离和电压稳定于一体, 降低了开关功率元件所承受的电压应力, 提高了转换效率, 结构简单、效率高, 在电机控制及开关电源中具有较强的应用价值。

References (参考文献)

- [1] H. Matsuo and K. Harada, "The cascade connection of switching regulators", IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. IA-3, no. 2, Mar/Apr. 1976.
- [2] D. Maksimovic and S. Cuk, "General Properties and Synthesis of PWM dc-to-dc Converter", in IEEE PESC Conf. 1989, pp. 515-525.
- [3] D. Maksimovic and S. Cuk, "Switching converters with wide DC conversion range", in IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 6, no. 1, pp. 151-157 Jan. 1991.
- [4] J. Shah and G. Moschopoulos, "A new three-phase single-switch rectifier with stepped down output voltage near unity power factor and extended operating range", in IEEE INTELEC Conf. 2004.