

文章编号: 1004-4353(2016)04-0347-04

基于 Simulink 建模的升压式开关 变换器工作状态分析

罗艳, 徐红梅*

(延边大学工学院 电子信息通信学科, 吉林 延吉 133002)

摘要: 基于能量转换理论,建立了电压控制升压式开关变换器 Boost 状态方程,运用 Simulink 搭建了 Boost 开关变换器电路模型,并通过调整电感、电容和频率参数,获得了 Boost 开关变换器输出特性及其典型工作状态对应的参数取值. 本文研究结果丰富了开关变换器非线性运行机理,可为开关变换器的设计提供参考.

关键词: Boost 变换器; 建模; Simulink 仿真

中图分类号: TN914.42

文献标识码: A

Operating states analysis of Boost converter based on Simulink

LUO Yan, XU Hongmei*

(*Department of Electronic and Communication Engineering, College of Engineering,
Yanbian University, Yanji 133002, China*)

Abstract: Boost converter state equation is established based on the theory of energy conversion. Boost converter circuit model is build by Simulink. The output characteristic and typical working condition corresponding parameter selection of Boost converter are obtained through adjusting parameters of inductance, capacitance and frequency. The results enriche the switching converter running mechanism and provide the basis for the design of the switching converter.

Keywords: Boost converter; modeling; Simulink simulation

开关变换器是电源的核心部分,主要由三极管、二极管、电感、电容等非线性元器件组成,且采用 PWM 等非线性控制方式进行工作,因此表现出强烈的非线性特性^[1]. 研究表明,开关变换器中存在倍周期^[2]、切分岔^[3]、低频振荡^[4]、混沌^[5]等非线性现象,且这些现象的产生与能量转换密切相关. 开关变换器内部储存和释放能量主要取决于电感和电容的工作状态,开关变换器经历一个完整周期必须包括吸收和释放能量的过程^[6],储存能量的开关模式总会在一个开关周期中优先出现,而后才会出现释放能量的开关模式. 在以往对开关变换器的研究中,大多是基于数值计算和电路

实验的研究^[7-8],而对于开关变换器 Simulink 进行建模的研究较少;鉴于此,本文结合能量转换原理和 Simulink 建模方式,以电压控制升压式开关变换器为例,研究电路参数变化与开关管工作状态之间的关系及其所反映的动力学特性.

1 开关变换器离散建模

升压式开关变换器是一类将较低幅值直流输入电压转换为满足工程需要的较高幅值输出电压的电路结构,其组成原理如图 1 所示. 开关管的切换由电压运算放大器的输出电压 V_e 和锯齿波信号 V_{ramp} 决定:若 $V_e > V_{ramp}$,比较器输出高电平,

开关管 S 导通;若 $V_e < V_{\text{ramp}}$, 比较器输出低电平, 功率开关管截止. 锯齿波信号 V_{ramp} 的数学表达式为 $V_{\text{ramp}} = V_L + (V_H - V_L)(t/T \bmod 1)$, 其中 V_L 为锯齿波的下限, V_H 为锯齿波的上限, $V_m = V_H - V_L$ 为锯齿波的峰峰值, T 为锯齿波的周期, $f = 1/T$ 为锯齿波频率. 开关变换器中含有一个开关管 S 和一个二极管 D, 共有 $2^2 = 4$ 种开关模式: $(S, D) = (1, 1); (S, D) = (1, 0); (S, D) = (0, 1); (S, D) = (0, 0)$; 其中“0”和“1”分别代表开关器件的导通和关断. 在实际工作过程中, 开关变换器的 2 个开关器件不能同时导通, 所以不存在组合模式 $(S, D) = (1, 1)$, 具体工作状态如图 2 所示.

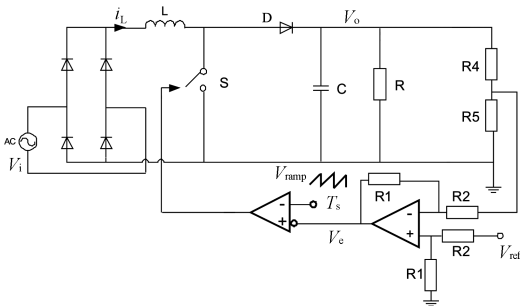


图 1 Boost 变换器原理图

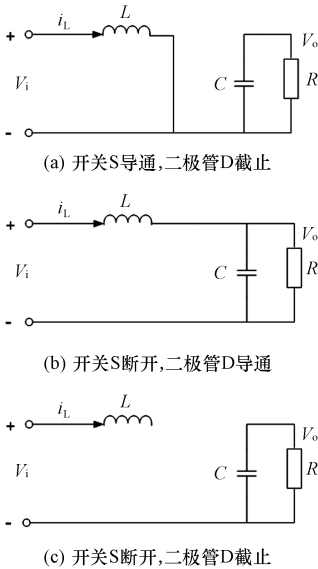


图 2 Boost 变换器的 3 种工作状态

设 i_L 、 V_o 为状态变量, 则 Boost 开关变换器 3 种工作状态对应的状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{V_i}{L}, \\ \dot{V}_o = -\frac{V_o}{RC}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{i}_L = \frac{V_i}{L} - \frac{V_o}{L}, \\ \dot{V}_o = \frac{i_L}{C} - \frac{V_o}{RC}, \end{cases} \quad (2)$$
$$\begin{cases} \dot{i}_L = 0, \\ \dot{V}_o = -\frac{V_o}{RC}. \end{cases} \quad (3)$$

搭建 Boost 开关变换器的 Simulink 系统模块图, 内部连接如图 3 所示. 图 3 中 i_L 、 V_o 为输出变量, V_i 、 L 、 R 、 C 、 f 为参数. 考虑到电路中的寄生电阻, S 函数代码中含有 r_l 和 r_c 两项参数, 不需要时可以将它们设为零.

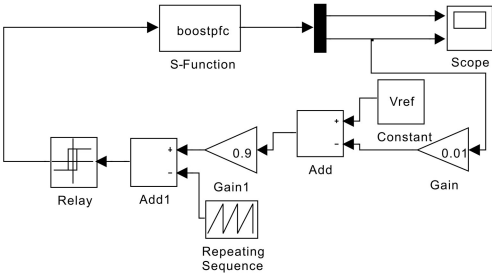


图 3 Boost 变换器的 Simulink 模块图

2 电路参数变化对变换器工作方式的影响

为了讨论电压控制升压式 Boost 变换器工作特性, 参数选取如下: 输入电压为 5 V, 参考电压为 3 V, 电阻为 300 Ω , 最大步长为 $T_s/10$, 时间 T_s 取 0.05 s.

2.1 典型电路工作状态的参数取值

升压式 Boost 开关变换器的工作参数取值见表 1. 电容、电感和频率变化时得到的典型电路工作状态如图 4 所示. 由图 4 可以得出: 1) 当电感 $L = 30 \mu\text{H}$, 电容 $C = 30 \mu\text{F}$, 频率 $f = 150 \text{ Hz}$ 时, 电感电流连续, 输出电压稳定, 开关变换器处于连续工作状态; 2) 当电感 $L = 30 \mu\text{H}$, 电容 $C = 30 \mu\text{F}$, 频率 $f = 400 \text{ Hz}$ 时, 电感电流处于临界工作状态, 开关变换器仍可得到稳定的输出电压; 3) 当电感 $L = 30 \mu\text{H}$, 电容 $C = 30 \mu\text{F}$, 频率 $f = 100 \text{ Hz}$ 时, 开关变换器输出电压变化范围增大, 电感电流处于断续工作状态.

表 1 3 种典型工作状态电路参数

	V_i/V	V_{ref}/V	R/Ω	$L/\mu\text{H}$	$C/\mu\text{F}$	f/Hz	i_L/mA	V_c/V
连续状态	5	3	300	30	30	150	2	18
临界状态	5	3	300	30	30	400	2	18
断续状态	5	3	300	30	30	100	2	18

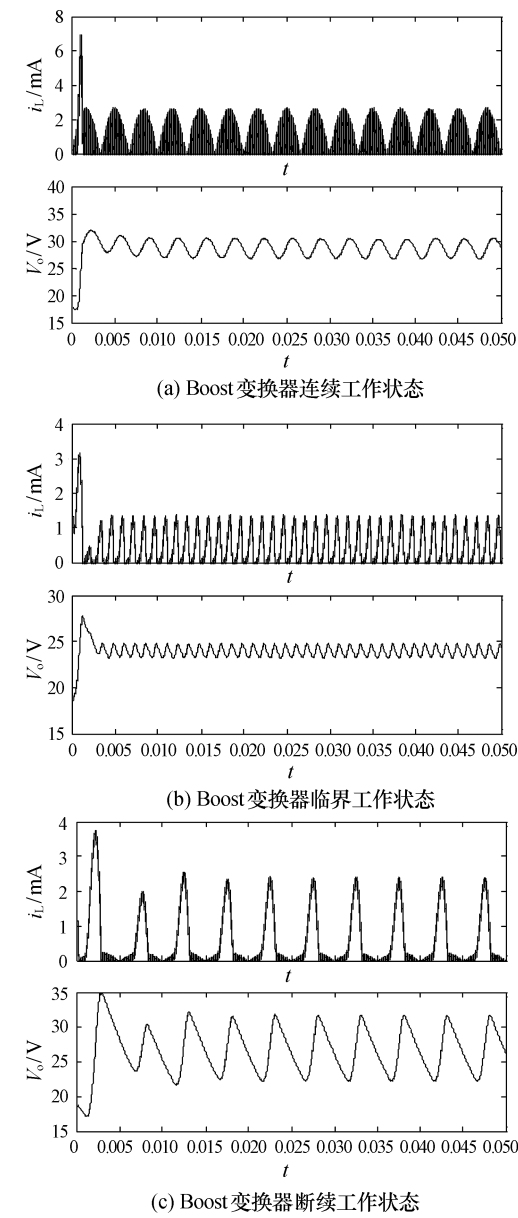


图 4 电容数值固定时变换器的 3 种工作状态

2.2 电感对电路特性的影响

电容和频率取固定参数值,通过改变电感数值(见表 2)得出 3 种工作状态波形图,如图 5 所示. 由图 5 可以看出: 1) 当电感 $L = 300\ \mu\text{H}$, 电容 $C = 30\ \mu\text{F}$, 频率 $f = 200\ \text{Hz}$ 时, 电感电流连续, 输出电压稳定, 开关变换器处于连续工作状态; 2) 电容和频率参数保持不变, 减小电感数值, 当电感 $L = 200\ \mu\text{H}$ 时, 电感电流处于临界工作状态, 虽然电流幅值和输出电压幅值下降, 但仍能得到稳定的输出电压; 3) 电容和频率参数保持不变, 进一步减小电感数值, 当电感 $L = 100\ \mu\text{H}$ 时, 电感电流处于断续工作状态.

	V_i/V	V_{ref}/V	R/Ω	$L/\mu\text{H}$	$C/\mu\text{F}$	f/Hz	i_L/mA	V_c/V
连续状态	5	3	300	300	30	200	2	18
临界状态	5	3	300	200	30	200	2	18
断续状态	5	3	300	100	30	200	2	18

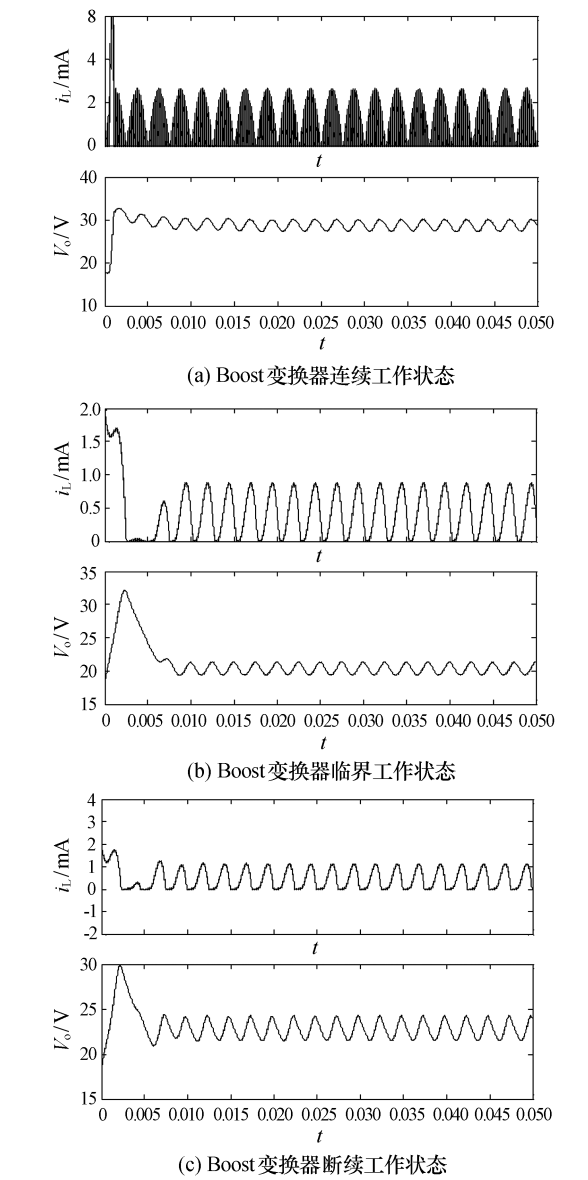


图 5 电容和频率固定、电感不同时的工作状态波形图

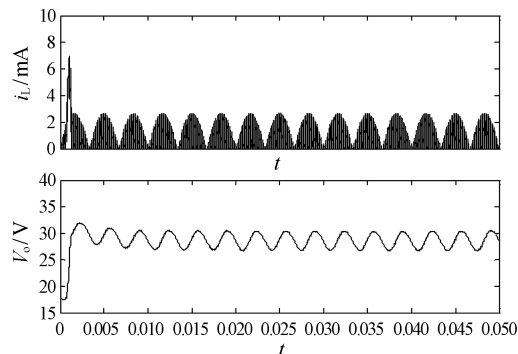
2.3 电容对电路特性的影响

电感和频率取固定参数值,通过改变电容参数值(表 3)得出 3 种工作状态电压波形图,如图 6 所示. 由图 6 可以得出: 1) 电感 $L = 30\ \mu\text{H}$, 电容 $C = 300\ \mu\text{F}$, 频率 $f = 150\ \text{Hz}$ 时, 电感电流处于连续工作状态, 输出电压稳定, 并且输出电压数值较前几种方式明显增大; 2) 电感和频率保持不变, 增加电容数值, 当电容 $C = 9\ \text{mF}$ 时, 电感电流处于临

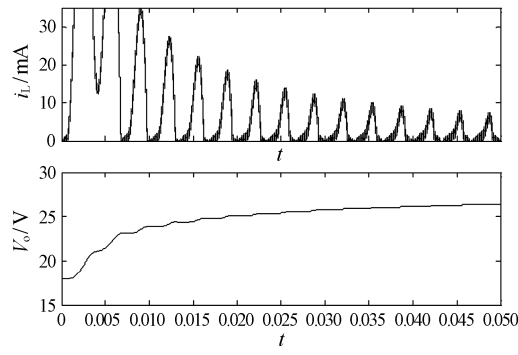
界工作状态,电压幅值出现较大波动后趋于稳定,对应的输出电压逐渐增大后稳定,输出幅值略有下降;3)电感和频率参数保持不变,进一步增大电容数值,当电容 $C=60\text{ mF}$ 时,电感电流处于断续工作状态,输出电压稳定,但幅值进一步下降。

表 3 电感和频率固定、电容变化时的相关参数

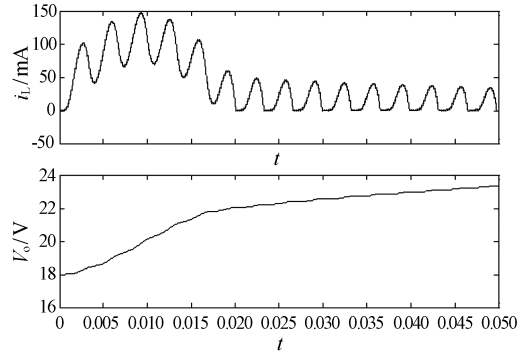
	V_i/V	V_{ref}/V	R/Ω	$L/\mu\text{H}$	C/mF	f/Hz	i_L/mA	V_C/V
连续状态	5	3	300	30	0.3	150	2	18
临界状态	5	3	300	30	9	150	2	18
断续状态	5	3	300	30	60	150	2	18



(a) Boost 变换器连续工作状态



(b) Boost 变换器临界工作状态



(c) Boost 变换器断续工作状态

图 6 电感和频率固定、电容不同时的工作状态波形图

从以上讨论可以看出,电感和电容是开关变换器中的主要能量转换器件,通过选取合适的电感和电容数值,能够保证开关变换器处于稳定连

续工作状态.当增大电感和电容的某一数值时,参与吸收和释放的能量数值随之增加;同时,由于二极管的单向导电性会限制电感电流和输出电压的增大,从而出现临界工作状态,甚至是断续工作状态,进而影响开关变换器输出电压的稳定性。

3 结束语

本文以电压控制 Boost 开关变换器为例,从能量转换角度建立了开关变换器的工作状态方程,讨论了改变电感、电容和频率参数对电路工作状态的影响,并基于 Simulink 建模仿真给出了相应波形图.通过波形图得到了主要电路器件取不同数值时开关变换器对应的工作状态及表现出的动力学特性,本文研究结果可为升压式开关变换器及其他类型开关变换器的设计提供参考.在本文的研究中,没有讨论频率变化对开关变换器的动力学行为的影响,今后将对此进行研究。

参考文献:

[1] 张波,曲颖.电压反馈型 Boost 变换器 DCM 的精确离散映射及其分岔和混沌现象[J].电工技术学报,2006,17(3):43-46.

[2] Wang Xuemei, Zhang Bo, Qiu Dongyuan. The quantitative characterization of symbolic series of a Boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011,26(8):2101-2105.

[3] 谢玲玲,龚仁喜,卓浩泽,等.电压模式控制不连续传导模式 Boost 变换器切分岔研究[J].物理学报,2012,61(5):479-485.

[4] 程为彬,康思民,汪跃龙,等.功率因数校正 Boost 变换器中快时标不稳定的形成与参数动态共振[J].物理学报,2011,60(2):97-104.

[5] 程为彬,郭颖娜,康思民,等.Boost 变换器中参数斜坡共振控制能力研究[J].物理学报,2009,58(7):4439-4448.

[6] 周宇飞,陈军宁.开关变换器中吸引子共存现象的仿真与实验研究[J].中国电机工程学报,2005,21(21):96-101.

[7] 刘树林,刘健,杨银玲,等.Boost 变换器的能量传输模式及输出纹波电压分析[J].中国机电学报,2006,26(5):119-124.

[8] 张波,曲颖.BUCK DC/OC 变换器分岔和混沌的精确离散模型及实验研究[J].中国机电工程学报,2003,23(12):99-103.