

文章编号:1007-6735(2013)02-0175-04

基于整流源的 Buck 变换器混沌现象研究

金爱娟¹, 王鸣翔¹, 夏震¹, 李少龙²

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 上海现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

摘要: 在供电电源为带谐波的整流源而非理想直流电源的情况下,研究了电流模式控制 Buck 变换器的分岔和混沌现象. 首先给出 Buck 变换器在连续导通模式下的数学模型,然后对理想直流电源供电和 3 种模拟的含不同电压幅值谐波分量的整流源供电的情况,在改变电压平均值的情况下,通过计算机仿真得到不同的分岔和混沌现象,并进行比较分析,最后给出典型的含 10% 直流电压幅值谐波的纹波电压对应的电流和电压波形图,并进行比较分析.

关键词: 混沌; 分岔; Buck 变换器; 非线性; 整流源
中图分类号: TM 46; N 945.13 **文献标志码:** A

Chaos in Buck Converter with A Rectified DC Source

JIN Aijuan¹, WANG Mingxiang¹, XIA Zhen¹, LI Shaolong²

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Key Lab of Modern Optical System, Shanghai 200093, China)

Abstract: The bifurcation and chaos phenomena in a current-mode controlled buck converter were explored, with the rectified output voltage as the input of the converter instead of a regulated ideal DC power supply. The mathematical model was developed under the continuous conduction mode. Considering the average value of DC input voltage as a variable, a set of bifurcation and chaos diagrams were given through computer simulation, when the converter is equipped with regulated DC power supply and three rectified DC sources with different ripple content. The diagrams about inductive current and capacitor voltage were given and analyzed when the input comes from a rectified DC source with 10% ripple content.

Key words: chaos; bifurcation; Buck converter; nonlinear; rectifier

电力电子电路的本质是典型的非线性系统,存在分岔、混沌等动力学行为,影响了系统的稳定性^[1-2]. 在工程实践中往往很难发现电路偏离正常状态而进入分岔和混沌现象的具体原因,而这个问题通过计算机仿真和计算比较容易发现产生问题的

原因. 在不同类型的电力电子电路中,DC-DC 变换器是研究得最多的. 一般的文献都假设 DC-DC 变换器的输入端是直流稳压电源^[3-4],但通常的实际情况并非如此. 大多数情况下,DC-DC 变换器的输入端是经滤波后的整流源(整流后的直流电源),直流

收稿日期: 2012-02-14
基金项目: 上海市教委科研创新资助项目(09YZ214);国家自然科学基金资助项目(61074016)
第一作者: 金爱娟(1972-),女,副教授. 研究方向: 电力电子非线性及其控制等. E-mail: ajjin@126.com

电压中将包含谐波,这种情况下所产生的分岔和混沌现象与理想直流电源供电状态下的有所不同.本文通过对模拟控制的 Buck 变换器在含不同电压幅值谐波分量的整流源供电下的非线性现象进行探讨,揭示其非线性动力学行为.

1 系统数学模型的建立

电流模式控制 Buck 变换器的原理图如图 1 所示. RS 触发器的时钟脉冲信号频率固定,电感电流与参考电流相互比较后输入到触发器的 R 端.在每个时钟周期的起始时刻,开关处于导通状态,当电感电流达到参考电流值时,开关关断.

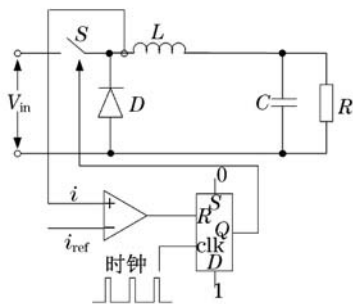


图 1 电流模式控制 Buck 变换器的原理图

Fig.1 Schematic diagram of a current-mode controlled buck converter

电感电流 i 和电容电压 v_c 设定为系统的状态变量.假设 V_m 是交流电经过整流器整流滤波后的纹波,令 V_{dc} 为平均直流分量, V_m 为输入电压中所含谐波的电压幅值, n 为纹波电压中谐波的阶次. ω 为交流电源基波频率, θ 为 Buck 变换器的初始开关瞬间与谐波电压分量过零瞬间的相位差.在导通和关断期间状态变量的关系可以通过线性微分方程组来描述.

开关导通期间

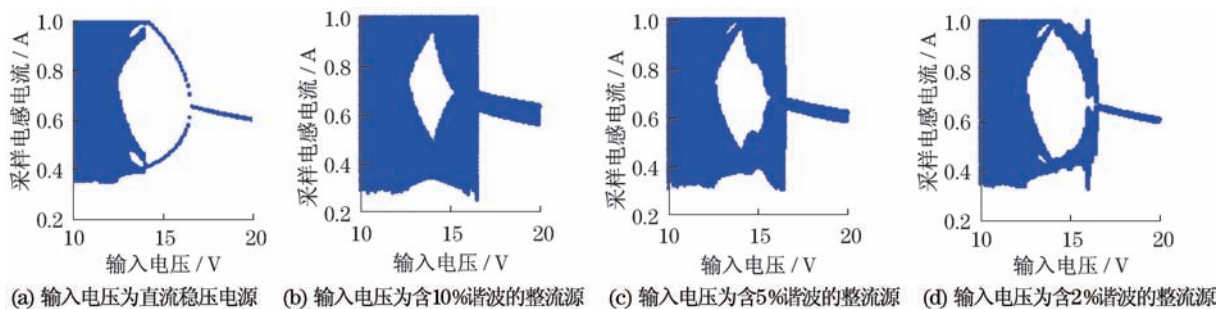


图 2 以输入电压平均值为变量的混沌图

Fig.2 Chaos diagrams with average DC input voltage as a variable

$$L \frac{di}{dt} = V_{dc} + V_m \sin(n\omega t + \theta) - v_c,$$

$$i = C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \quad (1)$$

式中, L 为电感; C 为电容; R 为电阻.

开关关断期间,在连续电流模式下

$$L \frac{di}{dt} + v_c = 0, \quad i = C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} \quad (2)$$

2 仿真结果

根据图 1 搭建 MATLAB 电路仿真模型,参数取值为:参考电流 $i_{ref} = 1$ A,电阻值 $R = 10 \Omega$,电感值 $L = 0.4$ mH,电容值 $C = 1$ mF,时钟频率为 30 kHz,输入电压直流分量的变化范围为 10~20 V.假设输入电压由一个单相全波整流器提供,含有幅值为直流电压分量的 10%、频率为 100 Hz 的谐波分量.因此,取 $n = 2$, $V_m = 0.1 V_{dc}$, $\omega = 314$ rad/s,且 $\theta = 0$.

文献[5]提到,虽然仿真计算的算法精度能够达到要求,但是,这个精度引起的计算误差仍然导致仿真出来的分岔图和庞加莱截面图出现了异常的数据点.在文献[3]中提到,由于 Buck 变换器工作模式的复杂性,它的分岔和混沌建模一直是一个困难的问题,由于系统对参数初始值的敏感性可能导致分析结果截然不同,结论的真实性也受到了质疑.为了减少误差,提高计算的准确度,本文在仿真计算中将精度提高到 10^{-13} ,对仿真波形图进行分析,没有出现异常的数据点.在分岔混沌图中,分岔变量的步长取为 0.1 V,图 2 中的数据均是在电路状态稳定以后取出最后 500 个数据点所形成的.

图 2 显示了以输入电压平均值作为变量的混沌图.为了观察输入电压谐波幅值的影响,在图 2 中,分别对含不同幅值谐波的整流源进行对比分析,在图 2(b)、2(c)和 2(d)中,仅仅改变其谐波幅值,其它参数不变.随着谐波幅值的升高,分岔结构没有

本质的改变,只是状态空间的循环将变得更紧密,直到最后,它们会连接起来.对于其它参数的研究,只对 10% 的谐波含量进行研究,其它情况的分析和结论可以依此类推.

对于图 2(a)以直流稳压电源作为输入的情况,一个标准的倍周期发生在 16.5 V 处,其次是在 13 V 和 14 V 处发生边界碰撞,导致系统从分岔向混沌状态的过渡.对于整流源供电的情况,混沌图如图 2(b)、2(c)和 2(d)所示.与图 2(a)的混沌图不同的是,这里不能明显地看到过渡过程.

图 2(b)的混沌图显示了某些区域内数据点的密集程度,当变换器的输入由整流器提供时,这个输入电压在每个周期内都有变化.因此,值得注意的是,如果适当地选择其它参数,分岔现象会发生在每一个输入电压周期内.由于在每一个纹波周期内存在固有的分岔,可以看到分岔图中数据点在某些区域里分布的密集程度不同,如在 $V_{dc} = 15$ V 处.

图 3 是在输入电压值为 12 V 且含 10% 谐波时的一系列波形图.在图 3(a)所示的庞加莱截面图中,呈现的是一种杂乱无章的混沌状态;图 3(b)真实地反映出在各个时钟周期开始时刻的电感电流值;在图 3(c)中,输入电压为直流稳压电源时,因为是在工作在混沌状态下,所以电容电压相对于稳定状态来说纹波变大了.这与文献[6]提到的结论是一

致的.在图 3(c)中,输入电压为含 10% 谐波的整流源,电容电压值在稳定以后主要是由直流分量为 7.876 713 369 233 95 V 和接近 10% 幅值的 100 Hz 谐波分量叠加而成的,谐波分量主要是由于输入纹波电压的谐波分量引起的;在图 3(d)中可以看到电感电流在开关切换时刻的值,以及在不同区间开关的工作状态,上升曲线是开关导通阶段,下降曲线是开关关断的电流连续阶段,没有出现电流不连续阶段,它与图 3(b)最大的区别就是反映出电感电流等于参考电流值的时刻.图 3(a)和 3(c)都是由离散的数据点构成的,而在图 3(b)和 3(d)中,为了清楚地显示各个状态的时间关系,将各个数据点用直线进行连接.实际上,电感电流波形的时域图与图 3(d)是基本一致的,所以,没有重复给出.

图 4 是在输入电压值为 14 V 且含 10% 谐波时的一系列波形图.在图 4(a)中,电感电流和电容电压的庞加莱截面图是两个形状相似的环形结构.系统处于混沌状态时出现的相图环形或其它结构的性质有可能完全相同,也有可能不同,这取决于系统参数的变化.环形或其它结构的数量以及其所包含的离散数据点的数量,由系统周期性以及开关频率和谐波频率的比例决定.图 4(c)的电容电压在过渡过程中存在超调量,电容电压值在稳定以后主要是由直流分量为 7.14752991112792V 和接近

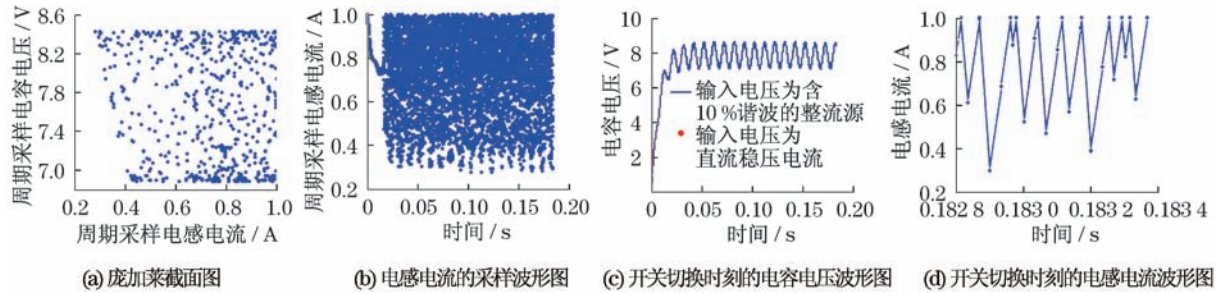


图 3 电压值为 12 V 且含 10% 谐波时的波形图

Fig.3 Diagrams for 12 V input DC source with 10% ripple content

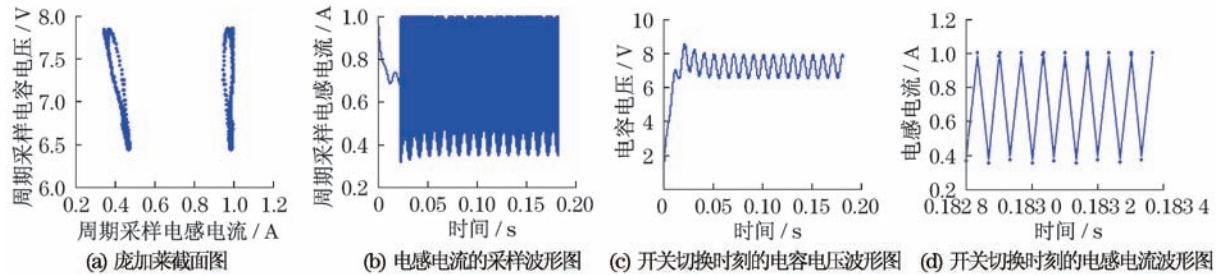


图 4 电压值为 14 V 且含 10% 谐波时的波形图

Fig.4 Diagrams for 14 V input DC source with 10% ripple content

10%幅值的 100 Hz 谐波分量叠加而成的,它比图 3(c)的直流分量略小.由图 3(b)、3(d)结合图 2(b)可以看到,电感电流的采样值分布在上下两个局部范围内,在中间部分是空缺的.

图 5 是在输入电压值为 18 V 且含 10% 谐波时的一系列波形图.在图 5(a)中,电感电流和电容电压的庞加莱截面图是一个椭圆形结构.由图 5(b)、5(d)结合图 2(b)可以看到,电感电流的采样值的直流分量为 0.628 119 363 567 29 A 和约 6% 幅值的 100 Hz 谐波分量叠加而成的.从图 5(b)、图 4(b)、图 3(b)和图 2(b)、2(c)、2(d)上来看,图 5(b)的变化频率与输入电压谐波分量的频率是相同的,与其

说它是一种混沌状态,不如说是输入电压谐波分量在输出采样电流上的反映,而且在图 2(b)、2(c)、2(d)上对应于输入电压 18 V 的输出采样电流的范围是与输入电压谐波分量的幅值成正比例关系的.图 5(c)的电容电压在过渡过程中存在超调量,电容电压值在稳定以后是由直流分量为 8.168 141 045 188 11 V 和接近 10% 幅值的 100 Hz 谐波分量叠加而成的,它比图 3(c)的直流分量略大.所以,电流模式控制 Buck 变换器的负载端电压及其电流都是随着输入电压参数的变化而变化的.然而,输入电压的直流分量不能太低,否则电路无法正常工作.

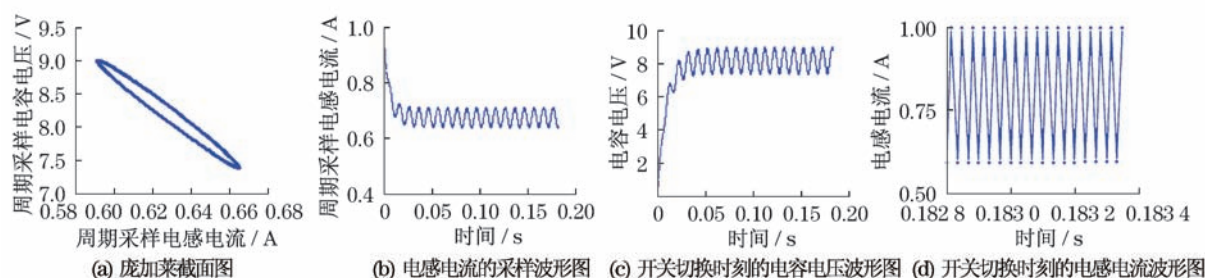


图 5 电压值为 18 V 且含 10% 谐波时的波形图

Fig.5 Diagrams for 18 V input DC source with 10% ripple content

3 结 论

研究了以由整流器供电的纹波电压源替代理想直流电压源的电流模式控制 Buck 变换器的分岔与混沌现象.在这两种输入情况下,所观察到的现象存在明显的区别.以整流源供电时,图表中的分岔过渡并不能很清晰地看出.输入电压中存在的谐波分量导致电容电压和采样电感电流包含了相同频率的谐波分量,电容电压谐波分量的幅值具有与输入电压中谐波分量幅值相当的比例,而采样电感电流谐波分量的幅值与输入电压中谐波分量幅值各自所占的比例不相同,但是,具有正比例关系.而且输入电压中存在的谐波分量还将周期性的轨迹变为锁相轨迹,而庞加莱截面图也由包含点变成了包含环形或某个结构.本文虽然假设整流源的纹波电压仅含有一种特定的谐波分量,但是其它的谐波分量也可以依此类推.

参考文献:

- [1] 王春芳,王开艳,李强. Buck 变换器仿真模型及分岔与混沌研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(24): 5824 - 5826.
- [2] Yao Y, Fassinou F, Hu T. Stability and robust regulation of battery driven boost converter with simple feedback [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(9): 2614 - 2616.
- [3] 张波,曲颖. BUCK DC/DC 变换器分岔和混沌的精确离散模型及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 99 - 103.
- [4] Wang Yuanbin. Research on chaos in switching DC-DC converters[C]// Intelligent Computation Technology and Automation, 2009, 3: 91 - 94.
- [5] 朱雪丰,徐冬亮,舒秀发,等. BUCK 转换器中的分岔与混沌研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(15): 3387 - 3389.
- [6] 卢伟国,周维维,罗全明. 电压模式 BUCK 变换器输出延迟反馈混沌控制[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5648 - 5654.

(编辑:石 瑛)