

PWM 型降压式 DC-DC 变换器中分岔与混沌的研究

张金波, 李 威, 解大琴, 郑雪峰

(河海大学 计算机及信息工程学院 江苏 常州 213022)

摘 要: 对连续工作模式下的 PWM 型 Buck 变换器进行了研究。通过仿真和实验, 证实了 DC-DC 变换器是一个强非线性系统, 随着输入电压 V_i 的变化, 会出现倍周期分岔和混沌现象。

关键词: Buck 变换器; 倍周期分岔; 混沌; PWM

中图分类号: TP368.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-373X (2003) 22-092-04

Study of Bifurcation and Chaos in PWM Buck DC-DC Converter

ZHANG Jinbo, LI Wei, XIE Daqin, ZHENG Xuefeng

(College of Computer & Information Engineering, Hehai University, Changzhou, 213022, China)

Abstract: This paper studies the PWM buck DC-DC converter in continuous conduction mode. It has been proved experimentally that the DC-DC converter is a non linear system. The double-period bifurcation and chaos phenomena are investigated with input voltage V_i as bifurcation parameters.

Keywords: buck DC-DC converter; double-period bifurcation; chaos; PWM

1 引言

近年来, 随着对功率电子系统中非线性行为研究的逐步深入, 研究人员发现开关式 DC-DC 变换器是一个强非线性时变动力学系统, 具有丰富的非线性行为——分岔与混沌。工作在混沌状态的 DC-DC 变换器, 输出特性发生了明显的变化, 主要表现为变换器的输出纹波中高次谐波分量的增加, 峰峰值加大, 以及开关管上的尖峰脉冲幅值的大幅度增加现象。因此, 对功率变换器分岔和混沌现象的研究, 对于避免、消除和利用混沌具有重要的指导意义。

2 理论基础

以电压控制型 Buck 变换器为例对倍周期分岔和混沌进行研究。图 1 所示是电压控制型 Buck 变换器的原理图。

在连续工作模式(CCM)下, 由于线性放大器 OA1 的增益为 A, 有:

$$V_{con} = A(V_0 - V_{ref})$$

其中: V_{con} 为控制电压; V_0 为输出电压; V_{ref} 为参考电压。

当控制电压小于斜坡电压时, 功率开关开通, 二极管截止(S_1 阶段); 反之, 当控制电压大于斜坡电压时, 功率开关关断, 二极管导通(S_2 阶段)。

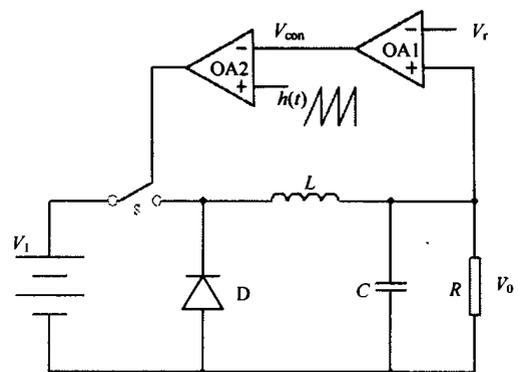


图 1 电压控制型 Buck 变换器的原理图

令 $x = [i_L, v_C]^T$ 为状态变量, i_L 为电感电流, v_C 为电容电压, v_i 为输入电压, v_o 为输出电压, 则 Buck 变换器可由下列 2 个动力学方程来表示。

S_1 阶段的动力学方程为:

$$\dot{x} = A_1 x + B_1 v_i, \quad v_o = C_1 x + D_1 v_i$$

$$\text{其中: } A_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}; \quad B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$C_1 = [0 \quad 1]; \quad D_1 = 0.$$

S_2 阶段的动力学方程为:

$$\dot{x} = A_2x + B_2v_i; \quad v_o = C_2x + D_2v_i$$

其中: $A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}; B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix};$
 $C_2 = [0 \ 1]; D_2 = 0.$

3 Buck 变换器中分岔与混沌的仿真和实验

3.1 Buck 变换器中分岔与混沌的仿真

在这里采用“逆向”分析法来对仿真模型进行分析,即:假设已知Buck变换器的输出特性,“逆向”推出在不同周期解(如周期-1解,周期-2解,...,混沌解等)的状态下所对应的电路参数空间,从而达到研究Buck变换器中混沌特性的目的。

从理论角度上讲,任何一个电路参数都可以用作分岔参数来进行讨论,在这里只对输入电压 V_i 进行改

变,从而观察 Buck 变换器的分岔与混沌现象。

对图1使用 Matlab 中的 Simulink 进行仿真,将 V_i 从 16 V 增至 34 V (其他参数如下: $L = 20 \text{ mH}, C = 47 \mu\text{F}, R = 22 \Omega, A = 8.4, V_{rd} = 11.3 \text{ V}, V_1 = 3.8 \text{ V}, V_u = 8.2 \text{ V}, T = 400 \mu\text{s}$)。在此过程中, Buck 变换器经历了周期-1, 周期-2, 直至混沌。经仿真发现, Buck 变换器的周期轨道稳定性变化如下:

当 $V_i = 23.765 \text{ V}$ 时, 发生第 1 次倍周期分岔;

当 $V_i = 27.025 \text{ V}$ 时, 发生第 2 次倍周期分岔。

对于更高的输入电压 V_i , 变换器将经历不断的倍周期分岔直至混沌。

当 $V_i = 32.59 \text{ V}$ 时, Buck 变换器将进入混沌状态。

图 2, 图 3, 图 4 分别为 Buck 变换器在周期-1、周期-2 及混沌的波形。其中 (a) 为输出电压、(b) 为电感电流、(c) 为输出电压/电感电流相空间图。

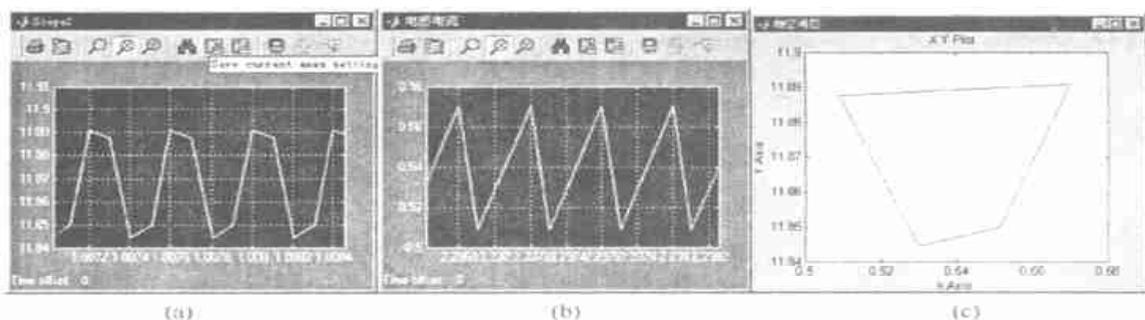


图 2 Buck 变换器在周期-1 的波形 ($V_i = 16 \text{ V}$)

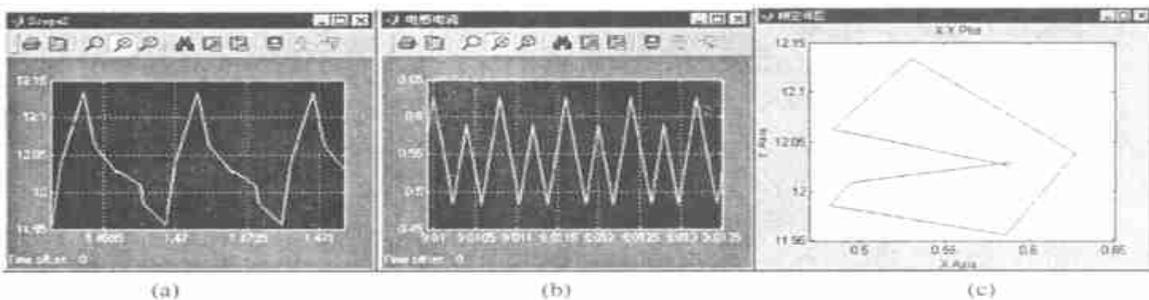


图 3 Buck 变换器在周期-2 的波形 ($V_i = 25 \text{ V}$)

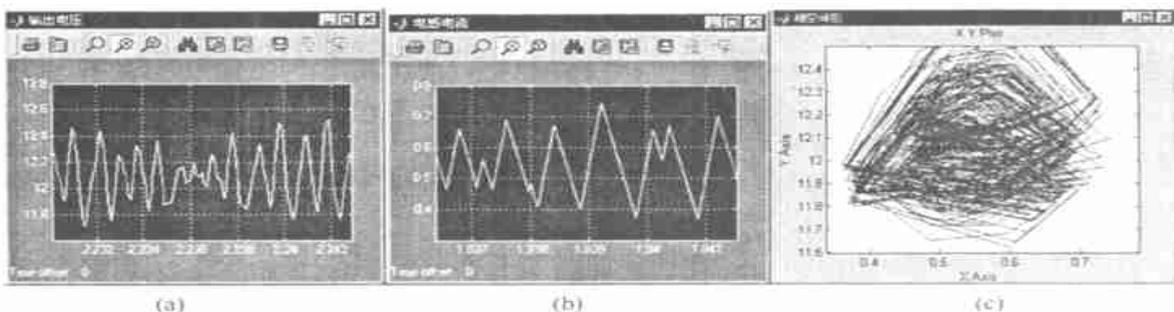


图 4 Buck 变换器混沌的波形 ($V_i = 33 \text{ V}$)

3.2 Buck 变换器中分岔与混沌的实验

为了验证计算机仿真的正确性, 设计了一个电压控制型 Buck 变换器, 以输入电压 V_i 作为分岔参数进行实验研究, 观察到了变换器的输出电压 V_o 。随着输入电压 V_i 的变化从周期-1 的稳态经历倍周期分岔进入混沌的波形。

图 5 是电压控制型 Buck 变换器的实验电路图。

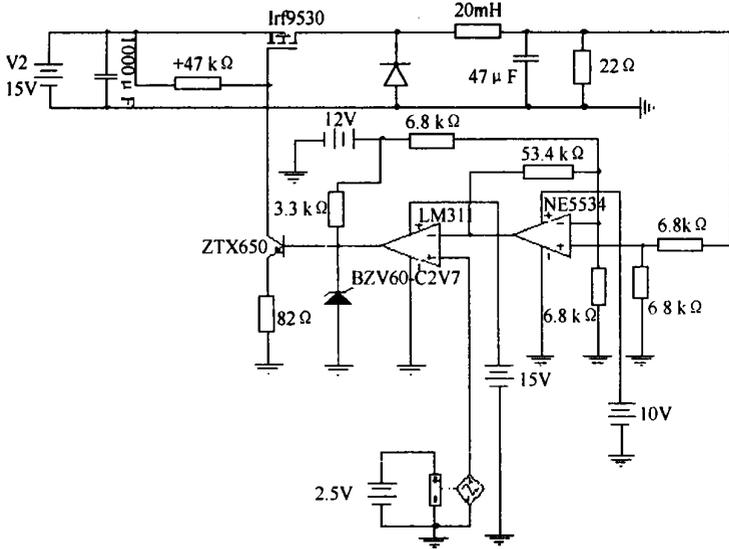


图 5 电压控制型 Buck 变换器的实验电路

图 5 中 IRF9530-P 沟道的 MOSFET 作为功率开关管, NE5534 作为误差放大器, LM311 作为电压比较器, 斜坡信号发生器由 555 定时器产生。电路的工作过程如下: 变换器经过电阻分压器将输出电压送至误差放大器的同相输入端, 与参考电压经过比较放大之后, 得到误差电压并送至电压比较器的反向输入端, 与斜坡电压进行比较。当误差电压大于斜坡电压时, 电压比较器的输出为 0, ZTX650 截止, IRF9530 关断, 迫使输出电压减小; 当误差电压小于斜坡电压时, 电压比较器的输出被 BZV60-C2V7 限制在 2.7 V, ZTX650 导通, IRF9530 闭合, 迫使输出电压增加。变换器就是这样不断地跟踪输出电压的变化, 调节功率开关管的导通与截止的时间, 从而达到稳定输出电压的目的。对于此电路, 以输入电压 V_i 作为分岔参数, 令

V_i 从 13 V 增至 20 V, 步长为 1 V, 实验结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出, 输入电压 V_i 在 14 ~ 18 V 时变换器稳定在周期-1, 当 $V_i=19$ V 时变换器发生第 1 次倍周期分岔, 当 $V_i=20$ V 时变换器发生第 2 次倍周期分岔, 当 $V_i=13$ V 时变换器产生混沌现象,

仿真结果与实验结果基本一致, Buck 变换器随着输入电压的增长, 经历若干次倍周期分岔直至混沌的规律从实验结果中已经得到了体现。

图 6 是输入电压 V_i 为 16 V 时输出电压的周期-1 波形, 周期为 400 μ s, 纹波幅值约为 65 mV。图 7 是输入电压 V_i 为 19 V 时输出电压的周期-2 波形, 周期为 800 μ s, 纹波幅值约为 712 mV。图 8 是输入电压 V_i 为 13 V 时输出电压的混沌波形。

表 1 电压控制型 Buck 变换器的实验结果

V_s	V_o (幅值)	周期
13 V	混沌波形	
14 V	11.782 ~ 11.823 V	周期-1
15 V	11.803 ~ 11.855 V	周期-1
16 V	11.820 ~ 11.885 V	周期-1
17 V	11.836 ~ 11.913 V	周期-1
18 V	11.852 ~ 11.939 V	周期-1
19 V	11.526 ~ 12.238 V	周期-2
20 V	10.981 ~ 12.634 V	周期-4

下面, 对 Buck 变换器在输入电压为 13 V 时控制电压与斜坡电压波形做简要分析。从图 9 中, 可以观察到一个奇怪现象: 周期跳跃, 即在某一个开关周期里, 控制电压与斜坡电压没有交点, 似乎“错过”了一个开关周期 (如图中第 5 个开关周期)。

综上所述, 当输入电压 V_i 远离分岔点时, Buck 变换器处于正常工作状态, 输出电压的纹波是周期-1 的稳态波形, 幅值仅为几十 mV。当发生倍周期分岔时, Buck 变换器的输出特性恶化, 主要表现在:

- (1) 输出电压的纹波幅值增加, 有原来的几十 mV 增加到几百 mV;
- (2) 输出电压的周期-1 稳态丧失, 出现了一个稳定的周期-2 轨道。随着分岔参数的继续增大, 输出电压将会发生一系列的倍周期分岔, 直至出现混沌;
- (3) 处于混沌状态的变换器, 功率开关在一个开关周期内的通断次数明显增加, 导致变换器的损耗增加, 同时还伴随着周期跳跃现象。

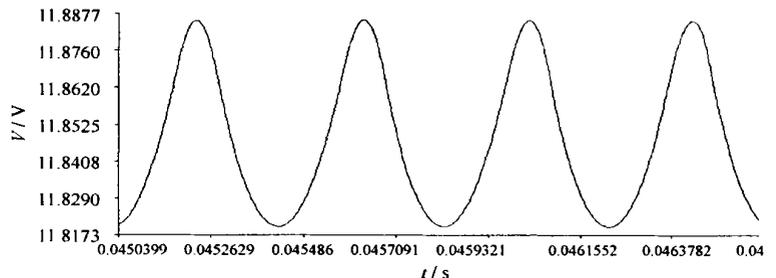
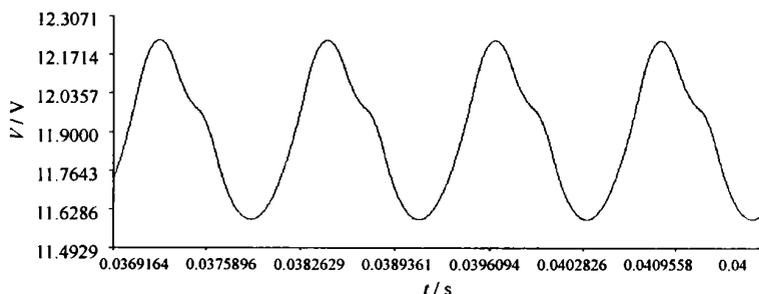
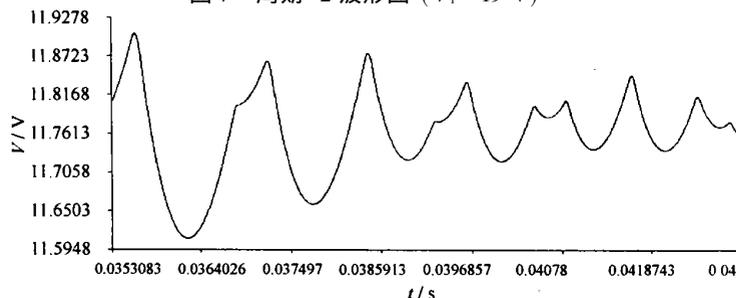
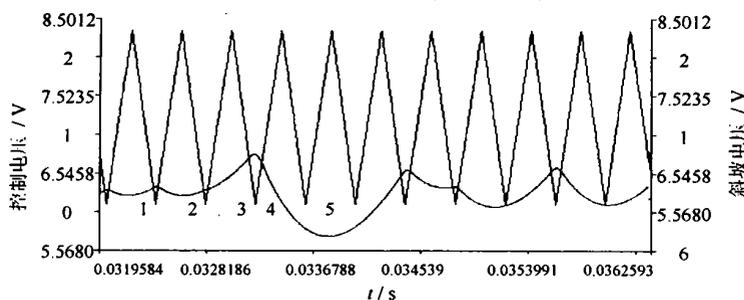


图 6 周期-1 波形图 ($V_i=16$ V)

图7 周期-2 波形图 ($V_i = 19\text{ V}$)图8 混沌波形图 ($V_i = 13\text{ V}$)图9 控制电压与斜坡电压波形图 ($V_i = 13\text{ V}$)

变换器存在着较大范围的非线性行为, 当分岔参数发生变化时, 系统就会沿着倍周期轨迹运动, 并最终进入混沌。当然不仅输入电压可以作为分岔参数, 还有输出的负载电阻参数、电感参数、电容参数、开关管的频率参数等均可作为分岔参数。从以上的分析, 得出了一些启示:

(1) 为了使变换器不会发生混沌或减小混沌发生的可能性, 应该尽量使分岔参数远离分岔点;

(2) 如果能够控制在高输入电压情况下的倍周期分岔, 使变换器的输出电压的纹波始终保持周期-1 稳态, 也就能够提高变换器输入电压的工作范围。

参 考 文 献

- [1] Fang C C, Abed E H. Local bifurcations in PWM DC - DC converters[J]. Tech. Rep. 99 - 5, Institute for Systems Research, University of Maryland, College Park, 1999.
- [2] Fang C C. Sampled - data analysis and control of DC - DC switching converters [J] . Ph. D. thesis, University of Maryland, College Park, 1997.
- [3] 龙运佳. 混沌振动研究方法与实践 [M] . 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [4] 罗建军, 杨琦. 精讲多练 Matlab [M] . 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

4 结 语

基于 Buck 变换器的仿真模型和实验电路, 本文针对输入电压 V_i 这个分岔参数, 分析了 Buck 变换器的倍周期分岔和混沌现象。仿真与实验结果表明, Buck

作者简介 张金波 男, 1967 年出生, 黑龙江双城人, 副教授, 硕士。主要从事电力电子及微机控制方面的教学和科研工作。

欢迎订阅 2004 年 《现代电子技术》(半月刊)

国内邮发代号 52-126

国外发行代号 M3262

6.80 元/期

163.20 元/年 (全年 24 期)