

# 建模和仿真在开关变换器电路辅助教学中的应用

朱琴跃, 袁登科, 张文豪, 徐 虹  
(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘 要:** 为帮助高校电气工程及相关专业学生在电力电子等相关课程学习中更好地理解 and 掌握核心专业知识, 在教学过程中, 以实际 Buck 变换器为研究对象, 引入理论建模和仿真分析的方法, 以期能更准确地展示开关变换器实际电路工作特性。在计及各类非理想因素影响的基础上, 建立了非理想 Buck 变换器等效电路, 通过数学模型分析其输出特性, 仿真分析并验证了输出结果。所建模型以及基于 Matlab/Simulink 的仿真过程为学生学习抽象的专业理论知识提供了辅助教学手段, 提高了学生的学习兴趣。

**关键词:** 非理想 Buck 变换器; 状态空间平均法; 小信号模型; 辅助教学

中图分类号: TM 46 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1672-4305.2020.05.022

## Application of modeling and simulation for switching converter auxiliary teaching

ZHU Qinyue, YUAN Dengke, ZHANG Wenhao, XU Hong

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In order to help college students majoring in electrical engineering and its related majors master professional knowledge in related courses such as power electronics, the Buck converter characteristics is studied during the daily teaching. As the research object, the methods of theoretical modeling and simulation analysis are introduced, so as to exactly reflect the actual performance of switching converters. Considering the effect of various non-ideal factors, the equivalent circuit of the non-ideal Buck converter is established. This paper analyzes the output characteristics through the mathematical model and verifies the validity of the output by simulation. The model and its process of Matlab/Simulink simulation not only provide auxiliary teaching means for students to learn abstract theoretical knowledge but also arouse their interests in learning.

**Key words:** non-ideal Buck converter; status space average method; small-signal model; auxiliary teaching means

在电力电子技术应用过程中, 对开关变换器进行实际电路设计前, 一般会采用相关方法对其进行建模与性能分析, 评估变换器的效率、控制精度等指标, 以对应用提供指导。由于在建模过程中可供使用的方法较多, 同时为方便起见, 所建模型通常都是基于较为理想的假设前提, 忽略了实际元件及电路

寄生参数的影响, 这在一定程度上影响了模型的准确性。因此, 本文以 Buck 变换器为例, 在分析其基本工作原理的基础上, 考虑非理想因素的影响, 建立其工作在连续导电模式 (Continuous Conduction Mode, CCM) 下的交流小信号等效电路模型, 基于此分析其输出特性, 最后通过 Matlab 软件建立仿真模型, 分析和验证了输出结果的有效性。本文所提的建模及其仿真过程也为高校电气工程专业学生学习开关电源专业知识提供了很好的仿真与实践手段, 同时提高了学习效果<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2020-06-03 修改日期: 2020-08-06

作者简介: 朱琴跃, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子变流技术。

Email: zqymelisa@tongji.edu.cn

基金项目: 上海市重点课程建设项目 (项目编号: 201706); 2019 年上海一流研究生教育引领计划项目 (项目编号: ZD19040102); 同济大学 2019-2020 教学改革研究项目 (项目编号: 201905)。

### 1 Buck 变换器基本工作原理

如图 1 所示, Buck 变换器可将直流输入电压转

换后降低一定倍数直流输出。假设电路中各个开关元件的参数和开关特性均满足理想条件,且变换器电路自身不产生任何功耗,由此,可对其工作原理简要分析如下<sup>[3]</sup>。

假设如图 1 所示电路中  $u_i$  为输入电压,  $u_o$  为变换后输出电压,通过对开关管 VT 施加 PWM 驱动信号  $u_G$  进行高频周期性的通断控制,便可实现电源变换功能。电路工作时,在  $T_{on}$  期间,  $u_G(t) > 0$ , 开关管 VT 导通;在  $T_{off}$  期间,  $u_G(t) = 0$ , 开关管 VT 关断;开关周期  $T_s = T_{on} + T_{off}$ , 开关频率  $f = 1/T_s$ 。若定义占空比  $D = T_{on}/T_s$ , 便可得在一个周期  $T_s$  中电路输出电压的平均值为  $U_o = (U_i/T_s) \times T_{on} = DU_i$ 。

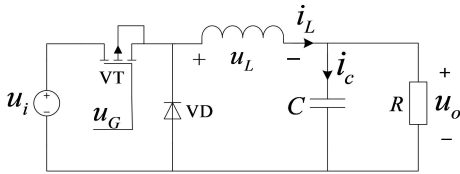


图 1 Buck 变换器主电路结构

## 2 非理想 Buck 变换器建模与输出特性分析

### 2.1 非理想 Buck 变换器等效电路

图 2 所示为非理想 Buck 变换器等效电路。其中图 1 中的开关管 VT 在此等效为开关元件  $S$  和导通电阻  $R_s$  的串联;二极管 VD 等效为开关  $S_D$ 、正向压降  $V_d$  和导通电阻  $R_D$  的串联;  $R_L$ 、 $R_C$  分别为滤波电感  $L$ 、滤波电容  $C$  的等效串联电阻。

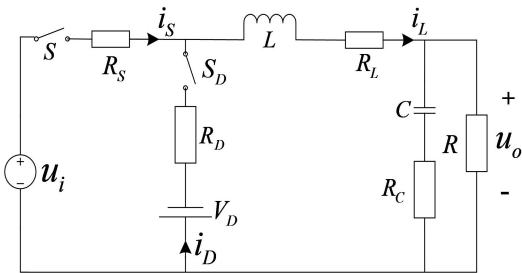


图 2 计及寄生参数的非理想 Buck 变换器等效电路

### 2.2 非理想 Buck 变换器建模

对 CCM 模式下的非理想 Buck 变换器而言,根据能量守恒原理<sup>[4-6]</sup>将变换器电感  $L$ 、二极管  $VD$  的寄生参数和电感电流纹波  $\Delta i_L$  等效为电感支路,由此可得总等效电阻为

$$R_E = [R_L + DR_s + (1 - D)R_D] \left( 1 + \frac{\Delta i_L^2}{3I_L^2} \right) \quad (1)$$

式中:  $D$  为占空比,  $I_L$  为电感电流。

根据状态空间平均法<sup>[7-9]</sup>,用受控电压源和受控电流源代替二极管和功率开关元件,然后对电路

进行小信号扰动分离。假设  $u_i = U_i + \hat{u}_i$ ,  $i_L = I_L + \hat{i}_L$ ,  $u_o = U_o + \hat{u}_o$ ,  $d = D + \hat{d}$ , 其中  $\hat{u}_i$ 、 $\hat{i}_L$ 、 $\hat{u}_o$ 、 $\hat{d}$  分别是对应的小信号分量。因此,忽略二阶交流项,去除直流分量,由此而得的交流小信号等效电路如图 3 所示。

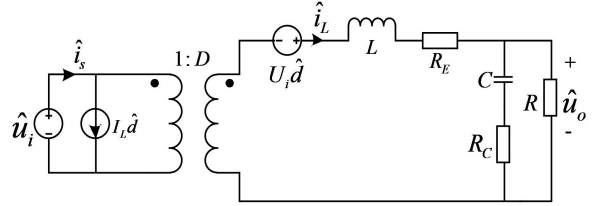


图 3 非理想 Buck 变换器的交流小信号等效电路

根据图 3 可得,输出电压  $\hat{u}_o(s)$  对控制变量  $\hat{d}(s)$  的传递函数为:

$$\begin{aligned} G_{ud}(s) &= \frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{d}(s)} \Big|_{\hat{u}_i(s)=0} \\ &= \frac{RU_i}{R_E + R} \cdot \frac{1 + s/\omega_{z1}}{1 + 2\xi \frac{s}{\omega_o} + \left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2} \\ &= \frac{RU_i}{R_E + R} \cdot \frac{1 + s/\omega_{z1}}{1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\omega_o = \sqrt{\frac{R + R_E}{(R + R_C)LC}}$ ,  $\omega_{z1} = \frac{1}{R_C C}$ ,

阻尼比为:  $\xi = \frac{R_E R_C + RR_C C + R_E R_C C + L}{2\sqrt{(R + R_E)(R + R_C)LC}}$ ,

品质因数为:

$$Q = \frac{1}{2\xi} = \frac{\sqrt{(R + R_E)(R + R_C)LC}}{R_E R_C + RR_C C + R_E R_C C + L}$$

令  $s = 0$ , 得到小信号特性的低频渐近线:

$$G_{ud}(0) = \frac{RU_i}{R_E + R}。可见,小信号特性的低频渐近线$$

与电感支路中总的等效串联电阻  $R_E$  有关。

上式(2)反映了 Buck 变换器电路中寄生参数及电感电流波动对输出电压性能的影响。

## 3 仿真分析

本文基于 Matlab/Simulink 软件分别搭建了非理想和理想 Buck 变换器仿真模型<sup>[10]</sup>,以此来比较、分析并验证 CCM 模式下非理想 Buck 变换器建模方法的有效性。图 4 所示为非理想 Buck 变换器小信号仿真模型,相应仿真参数设置为:  $U_i = 22.6V$ ,  $U_o = 11.3V$ ,  $D = 0.5$ ,  $R = 5.2\Omega$ ,  $L = 68.4\mu H$ ,  $R_L = 13M\Omega$ ,  $C = 366\mu F$ ,  $R_C = 26.5M\Omega$ ,

$R_D = 137\text{M}\Omega$ ,  $R_S = 25\text{M}\Omega$ ,  $V_D = 0.85\text{V}$ ,  $I_L = 2.16\text{A}$ ,  $\Delta i_L = 0.43\text{A}$ 。图5所示为非理想和理想两种模型仿真输出对比波形。

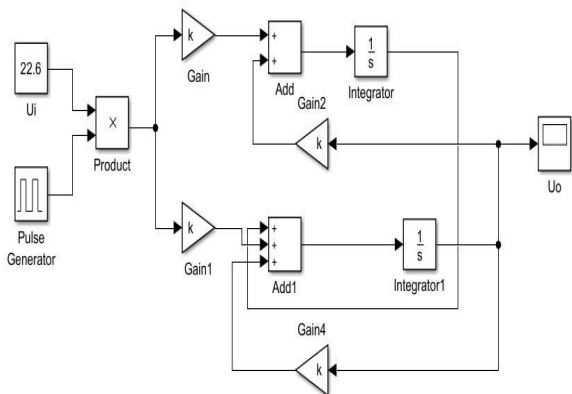


图4 非理想 Buck 变换器仿真模型

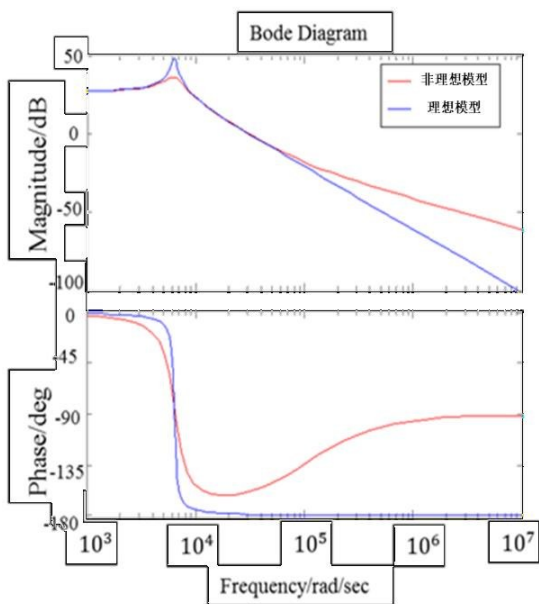


图5 CCM 模式下 Buck 变换器输出频率特性图

由图5可知,非理想 Buck 变换器模型的仿真结果与理论分析基本吻合。同时,由于非理想模型的  $G_{vd}(s)$  有两个低频极点和一个由  $R_c$  引入的零点,故其与理想模型相比大幅减小了谐振频率处的增益峰值,且频率特性曲线在谐振频率附近过渡较为平缓,

(上接第82页)

- [3] 杨宏,张喜成,普奕,等. 桌面虚拟化技术在高校机房管理中的应用[J]. 软件导刊,2015(9):184-185.
- [4] 唐浩祥,徐燃柏. 桌面虚拟化技术在高校公共机房升级改造中的应用[J]. 顺德职业技术学院学报,2015(3):34-36.
- [5] 陈丽燕,吕光金,何士产,等. 桌面虚拟化技术在高校机房中的应用研究[J]. 中国教育信息化,2015(1):75-77.
- [6] 张晓德,王述红. “双一流”背景下实验室资源整合与优化

由此表明考虑寄生参数的电路状态空间平均法建模能更精确地反映 Buck 变换器的输出控制特性。

## 4 结语

本文在考虑各元件等效寄生参数以及电感电流波动影响的基础上,建立了非理想变换器等效电路,通过数学模型分析其输出特性,通过 Matlab 软件平台仿真分析并验证了输出结果。从而表明,所建非理想模型和相关方法对电路参数理论分析计算和设计都具有一定的实际指导意义。

由此可见,在开关电源设计等相关课程教学中,教师可通过引入 Matlab/Simulink 软件来有效辅助相关建模过程的教学与实践,帮助学生理解和掌握核心专业知识,同时通过展示仿真结果进一步提高学生的学习兴趣。

## 参考文献(References):

- [1] 刘海波,朱艺锋,艾永乐. 基于 Matlab 的电力电子技术实验演示系统设计[J]. 实验室科学,2017,20(3):68-71.
- [2] 云中华,李勇峰. 基于 Simulink 的变流技术仿真实验研究[J]. 实验室研究与探索,2018,31(1):85-88,103.
- [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,2006.
- [4] 解光军,徐慧芳. 峰值电流模式控制非理想 Buck 变换器系统建模[J]. 中国电机工程学报,2012,32(24):52-58.
- [5] 宣传,徐慧芳,解光军. CCM 模式下非理想 Buck 变换器的建模与仿真[J]. 电子器件,2012,35(1):70-74.
- [6] 古龙瑞,刘彦呈,张勤进,等. 非理想 Buck 变换器的分析与设计[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(12):126-129.
- [7] 马幼捷,马玲,周雪松. 基于状态空间平均法的非理想 buck 变换器 CCM 模态建模与仿真[J]. 天津理工大学学报,2014,30(5):13-16.
- [8] Espinosa C A L. State Variable Model for Considering the Parasitic Inductor Resistance on the Open Loop Performance of DC to DC Converters[J]. Journal of Computer & Communications, 2017, 2(13):41-48.
- [9] 史晓鸣,张恒. 考虑寄生参数的 Buck 变换器建模仿真[J]. 能源工程,2017(5):26-30.
- [10] (英) Marty Brown. 开关电源设计指南[M]. 原书2版. 徐德鸿,沈旭,杨成林,等译. 北京:机械工业出版社,2004:54-149.

[J]. 科教文汇,2019(3):68-69.

- [7] 曾光. 虚拟化技术在高等院校计算机实验室管理中的应用研究[J]. 信息系统工程,2018(10):87-88.
- [8] 刘芬. 探析虚拟化技术在高校计算机实验室中的应用[J]. 福建电脑,2017(7):149-150.
- [9] 陈华东,陆娇. 桌面虚拟化技术在计算机实验室管理中的应用研究[J]. 计算机工程应用技术,2016(1):235-236.