

文章编号:1005-0523(2012)04-0035-05

基于GUI的Buck变换器仿真研究

许智榜,石晓璞

(华东交通大学电气与工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:分析同步Buck变换器工作模式,构造了非理想情况下Buck变换器的通用仿真模型,依据小信号模型,采用频域分析法设计了补偿网络,并在Matlab/GUI环境下开发了与Simulink交互的仿真系统调试平台。通过仿真实验,验证了通用模型的正确性,补偿网络设计的合理性。采用所设计的交互式仿真平台,有助于补偿网络参数的整定、仿真实验结果的对比,对于开发和研究Buck变换器有着十分重要的意义。

关键词:Buck变换器;小信号模型;补偿网络;回调函数

中图分类号:TM461.5

文献标志码:A

同步Buck变换器具有效率高、体积小、结构简单等特点,在通信、IT、航天以及日常生活中得到广泛应用,其控制技术研究也渐渐成为热点之一^[1]。为达到较好的设计要求,传统的研究方式是进行各种试验,这种方式存在耗时耗财以及开发周期长等缺点。为此,仿真技术越来越多地应用在开发设计中,通过仿真进行参数选择和电路测试,为实际电路设计提供了可行性论证依据。

Matlab软件的GUI工具,支持面向对象技术,编程简洁而高效^[2]。本文在Matlab/GUI环境下对同步Buck变换器进行建模与仿真,建立了Buck变换器设计仿真平台,根据控制要求来选择电路参数,设计补偿控制,以实现电路较高的转换效率,为进一步研究同步Buck变换器的控制技术提供了仿真平台。

1 同步Buck变换器

为了适应大电流、低输出电压的要求,同步Buck变换器选用了导通内阻很小的POWER MOSFET构成续流回路,它能够大幅度降低续流回路的损耗,提高变换器的效率。CCM同步Buck变换器系统如图1所示,其中 $H(s)$ 为反馈网络传递函数, $G_c(s)$ 为补偿网络传递函数, U_{ref} 为参考电压。为减小与实际应用的误差,不再把变换器中的开关管、电感电容看作理想元器件,考虑开关管导通电阻 R_{on} 、电感的等效串联电阻 R_L 、电容的等效串联电阻 R_C ,建立Buck变换器在非理想因素条件下的精确数学模型^[3-4]。

1.1 暂态分析

开关管 Q_1 闭合,续流管 Q_2 断开电感充电模式如图2(a)所示。

开关管 Q_1 导通时间 T_{on} 为 dT_{sw} ,其中 d 为占空比, T_{sw} 为开关周期。文中 i, u, d 分别表示电流,电压和占空比的瞬时值, I, U, D 分别表示电流,电压和占空比的平均值。分析电路可知:

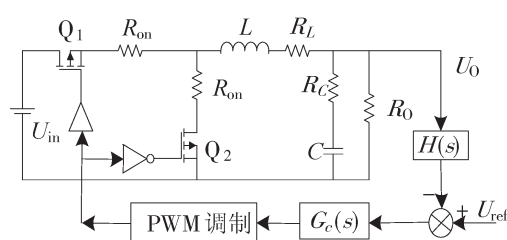


图1 同步Buck变换器系统
Fig.1 Synchronous Buck converter system

收稿日期:2012-03-01

作者简介:许智榜(1971—),男,副教授,研究方向为电力电子、电气控制。

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_L(t)}{dt} &= u_{in}(t) - \left[R_{on} + R_L + \frac{R_O R_C}{R_O + R_C} \right] i_L(t) - \frac{R_O}{R_O + R_C} u_C(t) \\ C \frac{du_C(t)}{dt} &= \frac{R_O}{R_O + R_C} i_L(t) - \frac{1}{R_O + R_C} u_C(t) \\ i_{in}(t) &= i_L(t) \\ u_O(t) &= \frac{R_O R_C}{R_O + R_C} i_L(t) + \frac{R_O}{R_O + R_C} u_C(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

开关管 Q_1 断开, 续流管 Q_2 闭合电感放电模式如图 1(b) 所示。 Q_1 关断时间为 $(1-d)T_{sw}$, 由电路可知:

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_L(t)}{dt} &= - \left[R_{on} + R_L + \frac{R_O R_C}{R_O + R_C} \right] i_L(t) - \frac{R_O}{R_O + R_C} u_C(t) \\ C \frac{du_C(t)}{dt} &= \frac{R_O}{R_O + R_C} i_L(t) - \frac{1}{R_O + R_C} u_C(t) \\ i_{in}(t) &= 0 \\ u_O(t) &= \frac{R_O R_C}{R_O + R_C} i_L(t) + \frac{R_O}{R_O + R_C} u_C(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

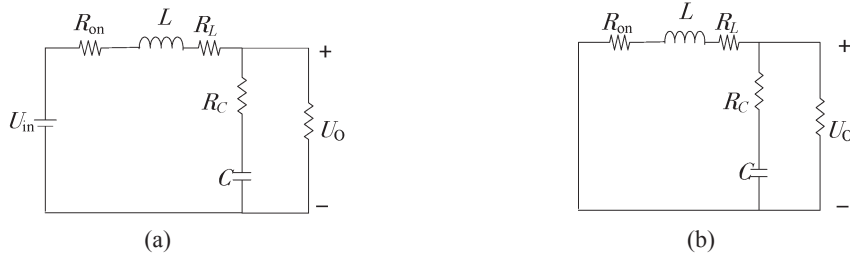


图2 同步 Buck 变换器工作模式

Fig.2 Operating modes of synchronous Buck converter

1.2 稳态分析

当电路达到稳态时, 根据电感电压的伏秒平衡原理和电容电荷平衡原理可知, 电感电压的平均值和电容电流的平均值等于零, 由式(1)、(2)得到 CCM Buck 变换器稳态方程为

$$\left. \begin{aligned} - \left[R_{on} + R_L + \frac{R_O R_C}{R_O + R_C} \right] I_L - \frac{R_O}{R_O + R_C} U_C + D U_{in} &= 0 \\ \frac{R_O}{R_O + R_C} I_L - \frac{1}{R_O + R_C} U_C &= 0 \\ I_{in} &= D I_L \\ U_O &= \frac{R_O R_C}{R_O + R_C} I_L + \frac{R_O}{R_O + R_C} U_C \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

可以求出

$$D = (U_O / U_{in})(R_O + R_L + R_{on}) / R_O \quad (4)$$

$$I_{in} = D^2 U_{in} / (R_O + R_L + R_{on}) \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{U_O I_O}{U_{in} I_{in}} = R_O / (R_O + R_L + R_{on}) \quad (6)$$

一般要求变换器输出电压 U_O 纹波很小, 即 I_O 纹波很小。所以要求滤波电感 L 和电容 C 的值都足够大, 使得 i_L 在一个工作周期内变化很小, i_L 的平均值 I_L 等于 I_O 。

由 Q_1 导通时电感电压的表示形式 $U_L = L \frac{di_L}{dt} = U_{in} - U_O$, 可知电感电流纹波值 ΔL 为

$$\Delta I_L = (U_{in} - U_O)DT_{sw}/L \quad (7)$$

输出电压纹波与电感电流纹波有关,其直流分量直接通过负载电阻,而其交流分量则要通过 RC 并联支路,为了减小输出电压纹波应使 RC 支路阻抗远远小于负载电阻,即

$$\sqrt{R_C^2 + 1/\omega^2 C^2} \ll R_O, \text{ 或 } C \gg 1/(\omega \sqrt{R_O^2 - R_C^2}) \quad (8)$$

式中: ω 为纹波角频率,用 f_{sw} 表示开关频率,则输出电压纹波 ΔU 大小为

$$\Delta U = \Delta I_L R_C + \frac{\Delta I_L}{8Cf_{sw}} \quad (9)$$

1.3 小信号模型

运用小信号近似,假设 $u_{in}(t)$, $d(t)$, $i_L(t)$, $u_c(t)$, $u_o(t)$ 为一个直流信号与一个小信号叠加得到^[5]。利用平均近似则有 CCM Buck 变换器电路小信号模型为

$$\left. \begin{aligned} L \frac{d\hat{i}_L(t)}{dt} &= - \left[R_{on} + R_L + \frac{R_O R_C}{R_O + R_C} \right] \hat{i}_L(t) - \frac{R_O}{R_O + R_C} \hat{u}_c(t) + D \hat{u}_{in}(t) + U_{in} \hat{d} \\ C \frac{d\hat{u}_c(t)}{dt} &= \frac{R_O}{R_O + R_C} \hat{i}_L(t) - \frac{1}{R_O + R_C} \hat{u}_c(t) \\ \hat{i}_{in}(t) &= D \hat{i}_L(t) + I_L \hat{d} \\ \hat{u}_o(t) &= \frac{R_O R_C}{R_O + R_C} \hat{i}_L(t) + \frac{R_O}{R_O + R_C} \hat{u}_c(t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

对小信号状态方程进行拉氏变换,得到 Buck 变换器控制-输出的开环传递函数为

$$G_d(s) = \frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{d}(s)} \Big|_{\hat{u}_{in}(s)=0, \hat{i}_L(s)=0} = \frac{U_O}{D} \frac{1 + sCR_C}{1 + s \left[\frac{L}{R_O + R_{on} + R_L} + \frac{CR_O(R_{on} + R_L)}{R_O + R_{on} + R_L} + CR_C \right] + s^2 LC \frac{R_O + R_C}{R_O + R_{on} + R_L}} \quad (11)$$

2 Buck 变换器补偿网络设计

在图1所示的 Buck 变换器系统图中,反馈网络传递函数 $H(s) = 1$, PWM 调制器的模型为 $G_m(s) = 1/U_m$, 其中 U_m 为载波三角波或锯齿波的幅值。则未加入补偿网络时的原始回路开环增益函数为

$$G_o(s) = H(s)G_m(s)G_d(s) = \frac{1}{U_m} \frac{U_O}{D} \frac{1 + sCR_C}{1 + s \left[\frac{L}{R_O + R_{on} + R_L} + \frac{R_O C(R_{on} + R_L)}{R_O + R_{on} + R_L} + R_C C \right] + s^2 LC \frac{R_O + R_C}{R_O + R_{on} + R_L}} \quad (12)$$

为使系统满足稳定性要求,可以通过外加补偿网络,使系统的幅频特性在增益转折频率 ω_c (一般取小于 $1/5$ 开关角频率 ω_{sw}) 处的斜率为 $-20 \text{ dB} \cdot \text{dec}^{-1}$, 并通常选择相位裕量在 45° 左右,增益裕量在 10 dB 左右。常见的补偿网络有单极点补偿、具有带宽增益限制的单极点补偿、极点-零点补偿、双极点-双零点补偿(类3补偿)^[6-7]。双极点-双零点补偿网络的基本结构形式为

$$G_c(s) = K \frac{(s + \omega_{z1})(s + \omega_{z2})}{s(s + \omega_{p1})(s + \omega_{p2})} \quad (13)$$

补偿网络零极点取值一般为

$$\omega_{z1} = 0.5\omega_{p1,p2}, \omega_{z2} = \omega_{p1,p2}, \omega_{p1} = \omega_{zrc}, \omega_{p2} = 0.5\omega_{sw} \quad (14)$$

式中: ω_{z1} , ω_{z2} 分别为补偿网络两零点角频率; ω_{p1} , ω_{p2} 分别为补偿网络两极点角频率; $\omega_{p1,p2}$ 为原始回路函数主极点角频率; ω_{zrc} 为滤波电容等效串联电阻引起的零点角频率; K 值由补偿后回路函数在 ω_c 处增益为 0 dB 得到。

3 基于GUI的仿真平台设计

为了实现友好的人机交互功能,利用Matlab的图形用户界面(GUI)设计了Buck变换器仿真平台,由人机界面及相关的回调函数组成。Buck变换器仿真平台可以直观地对比各仿真结果,判断调节器参数的合理性,有助于调试规律的总结。此外,仿真平台还设置了有助于学习理解Buck变换器控制的帮助功能。

其中人机界面包含Buck变换器参数,补偿网络参数设置,以及原始回路,补偿网络和补偿后系统波特图按钮。而回调函数编写则利用了Matlab的Simulink仿真、数值计算和数据可视化功能。通过该仿真平台,可以根据设计要求计算电路参数,也可调整电路参数,绘制波特图,对仿真过程进行控制。

3.1 Buck变换器仿真模型

基于Matlab GUI的系统仿真平台,首先在Simulink环境下建立Buck变换器的通用模型^[4,8]。Buck变换器仿真平台中设置相应的参数:Buck变换器输入电压5 V,开关频率为300 kHz,开关导通电阻为 $1 \times 10^{-3} \Omega$,输出电容990 μF ,电容等效电阻为 $5 \times 10^{-3} \Omega$,输出电感900 nH,电阻 $3 \times 10^{-3} \Omega$,锯齿波的幅值 U_m 为1.5 V,输出电压3.3 V,负载电阻为1 Ω 。则由式(12)可得原始回路增益函数为

$$G_o(s) = \frac{3.3201(1 + 4.95 \times 10^{-6}s)}{8.9189 \times 10^{-10}s^2 + 9.7906 \times 10^{-6}s + 1} \quad (15)$$

3.2 Buck变换器补偿网络

系统幅频图低频段为幅值约为10 dB的水平线,高频段为频率为 $-40 \text{ dB} \cdot \text{dec}^{-1}$ 穿越0 dB的折线,转折频率 $\omega_{p1,p2} \approx 1/\sqrt{LC} \approx 34 \times 10^3 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由电容等效串联电阻引起的零点频率 ω_{zc} 约为 $2.2 \times 10^5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$;增益穿越频率 $\omega_c = 2\pi f_c$, $f_c \approx 11 \text{ kHz}$,相位裕量约为 31° 。

$G_o(s)$ 在期望的穿越频率 ω_c (常取开关频率的1/5,本文取90 kHz)处增益约为-30 dB,为使补偿后回路函数在 ω_c 处增益为0 dB,故 $G_c(s)$ 在 ω_c 处的增益必须等于30 dB。

选择式(13)所示的双极点-双零点补偿网络对回路进行补偿,求得补偿网络的参数,在Buck变换器仿真平台中通过观察幅频特性曲线,可以不断对补偿网络参数进行微调。

3.3 仿真结果

图3显示了Buck变换器仿真平台,输入调整后的一组参数及相应的加入补偿网络后的开环系统波特图。从图中可看出,穿越频率处的斜率为 $-20 \text{ dB} \cdot \text{dec}^{-1}$,频率约为566 kHz(即90 kHz),相位裕量为 55° ,系统稳定。输出电压在3.281~3.322 V间波动,波形稳定,纹波小于2%。

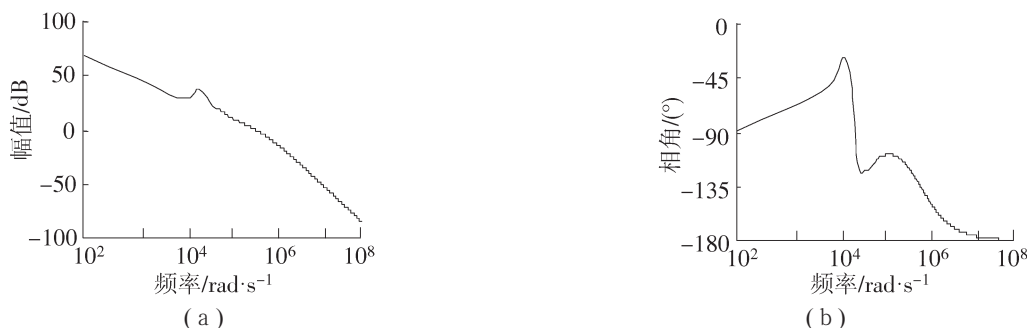


图3 补偿后回路函数波特图

Fig.3 Function bode diagram after the compensation

4 结束语

对非理想情况下同步Buck变换器进行分析,在Simulink环境下建立同步Buck变换器的通用模型,采用频率设计法设计补偿网络。利用Matlab的GUI工具设计与Simulink交互的仿真平台。通过该仿真平台可完成Buck变换器滤波参数、补偿网络参数设定、仿真控制和仿真结果保存、图形显示等操作,可以反复

修改调节器参数进行仿真并能直观地比较各仿真结果,有助于仿真实验结果的对比,判断试验结果的合理性,有利于学习、开发和研究Buck变换器。

参考文献:

- [1] NAGARAJA H N, PATRA A, KASTHA D. Design and analysis of four-phase synchronous buck converter for VRM applications[C]//India Annual Conference, India: Proceedings of the IEEE INDICON, 2004: 575-580.
- [2] 施晓红,周佳.精通GUI图形界面编程[M].北京:北京大学出版社,2003:163-193.
- [3] 马红波,冯全源. BUCK型开关变换器最优PID控制器设计[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(6): 639-643.
- [4] 葛茂艳,谢利理,吴喜华,等. 非理想Buck变换器的建模及仿真[J]. 计算机仿真, 2010, 27(4): 333-336.
- [5] 徐静平,陈亮亮,程姊娜,等. BUCK/BOOST转换器小信号建模与稳定性分析[J]. 华中科技大学学报, 2009, 37(6): 97-100.
- [6] 王旭峰,陈维荣,彭飞,等. Buck型变换器数字PID控制器设计方法研究[J]. 通信电源技术, 2010, 27(4): 1-3.
- [7] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2005: 95-110.
- [8] 叶满园. 预测平均电流控制PFC Boost变换电路[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(2): 24-28.

Simulation Study of Buck Converters Based on MATLAB/GUI

Xu Zhibang, Shi Xiaoying

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The paper analyzes the operating mode of synchronous Buck converters, then constructs a general simulation model of Buck converters under non-ideal circumstances. According to the small-signal model, the compensation network is designed based on the frequency domain analysis method, and the simulation debugging platform which interacts with Simulink in Matlab/GUI environment is developed. The simulation results verify that the general model is effective, and the design of compensation network is reasonable. The paper maintains that the interactive simulation platform would help compensate network parameter setting and the comparison of simulation result is of great significance for the development and research of Buck converters.

Key words: Buck converter; small-signal model; compensation network; GUI; callback function