

Buck 变换器输入/输出滤波相关研究^{*}

陈 鸣¹, 李舒然¹, 陈方林²

(1. 中山大学太阳能系统研究所//广东省光伏技术重点实验室, 广东 广州 510006;

2. 广东易事特电源股份有限公司, 广东 东莞 523803)

摘 要: 论述了中大功率 Buck 变换中, 输入电容滤波的电流纹波计算问题和输出的 LC 滤波器存在的谐振电压问题。在输入电容方面, 通过仿真、计算推导了纹波电流的较为确切的公式, 指出其最大纹波电流发生之处; 通过结合 Buck 实验电路的 LC 滤波器的各项参数, 如电感的等效电阻, 以及电容的等效串联电阻等, 对实验出现的谐振电压问题的进行理论分析, 同时进行 Matlab 仿真, 观察其输出响应, 并通过加入阻尼的方法进行消除震荡, 此法简单效果明显, 通过软件仿真和实验进行了验证。

关键词: Buck 电路; 输入电容; LC 滤波器; Matlab 仿真; 谐振电压

中图分类号: TM464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2016) 01-0075-05

The input and output filtering of Buck converter

CHEN Ming¹, LI Shurang¹, CHEN Fanglin²

(1. Solar Energy System Institute//Guangdong Province Key Lab of Photovoltaics Technologies,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong East Power Limited Company, Dongguan 523803, China)

Abstract: The calculation of ripple current in input capacitor and the resonant voltage of output LC filter in high power buck converter is described. In regard to input capacitor, an accurate formula of calculating ripple current is derived through simulation and deduction, and the maximum ripple current point is stated. Theoretical analysis of the resonant voltage problem occurring in experiments is conducted using certain parameters in a LC filter model, such as inductor equivalent resistance and capacitor ESR. Also a Matlab simulation is conducted to observe its output response characteristics and a damper is added to eliminate resonance. This simple and effective method is verified by simulation and experiment.

Key words: Buck converter; input capacitor; LC filter; Matlab simulation; resonant voltage

在变换器的拓扑结构发展过程中, Buck 和 Boost 电路是组成变换器两种最的拓扑结构, 其他电路拓扑等都可以由 Buck 或 Boost 两种基本拓扑结构转换而来^[1-2], 因而 Buck 变换是开关电源应用中最为基础的电路拓扑结构, 其实际应用更是极其普通。实际上, 其他正激式开关电源拓扑结构, 也可以认为是基于 Buck 变换, 常用的全桥拓扑结

构同样可以视为 Buck 结构^[3-4]。因而研究 Buck 电路的一些特性是十分必要的, 同时 Buck 变换多采用电压控制型 PWM 控制方案, 被控制量是输出电压, 电流的大小取决于负载大小。文献 [5] 对电解电容器等效串联电阻特性进行了讨论, LC 滤波器是 Buck 电路必要的一个环节^[6], 文献 [7] 对 Buck 电路采用附加一级 LC 滤波来改变输出性能进

* 收稿日期: 2014-12-19

基金项目: 广东省科技计划资助项目 (20153000042020545); 珠海市科技计划资助项目 (20143000042070432)

作者简介: 陈鸣 (1960 年生), 男; 研究方向: 电力电子技术及控制; E-mail: chenming@mail.sysu.edu.cn

行了论述。本文着重论述了 Buck 电路的输入输出滤波问题,在 Buck 电路的输入电容纹波电流计算方面^[8-9],通过仿真分析与计算推导,指出了纹波电流的近似公式并说明了其工作条件最为恶劣的状态;而在输出 LC 滤波器方面,特别是在负载较轻的时候,出现电流断续时,LC 滤波器引起的震荡还是比较大的,严重的影响输出的响应特性,本文在对 Buck 电路实验过程出现的谐振电压问题进行理论分析的基础上,使用 Matlab 对其模型进行仿真^[10],并通过加入阻尼的方法进行输出响应的优化,基本上达到了消除震荡的目的。此方法简单实用。并通过实验波形进行了验证。另外,值得一提的是,此方法可以适用于一般的正激式的拓扑结构中输出 LC 滤波器的谐振电压的滤除,减少谐振的好处是不言而喻的,输出电压的特性得到改善,采样电路工作环境得到改善,系统的可靠性也应该得到相应提高。

1 Buck 变换器的原理图及主要技术指标

Buck 变换器的原理图如图 1 所示。

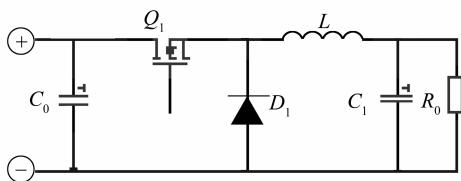


图 1 Buck 变换器的原理图

Fig. 1 Principle diagram of the Buck converter

由于需要对 Buck 电路的 LC 滤波进行输出响应的分析,因参数的匹配缘故,首先给出实验电路的相关参数指标:标称 48 V 输出;额定输出 50 A 电流;负载电阻 $R_0 = 0.96 \Omega$;输入电压范围:60 ~ 120 V (额定 78 V);输出电压纹波 50 mV;开关频率为 24 kHz;电感 $L = 4 \text{ mH}$; $R_L = 0.01 \Omega$;输出电容 $C_1 = 6\,000 \mu\text{F}$, $R_{\text{esr}} = 0.25 \times 0.067 \Omega$ (四个并联)。

2 输入电容滤波的纹波电流计算

Buck 电路拓扑极为简单,也是其应用很广的一个原因所在。虽然输入电源是直流,可由于采用 PWM 进行斩波调压,因而输入电容的工作状态一般最糟糕,其纹波电流一般很大,引起输入电容功耗增加,热点温度升高,致使寿命缩短^[11-12],这

是输入滤波不能忽视问题,在选择输入电容时应该加以关注。

论文使用 Matlab 仿真给出在开关频率为 24 kHz 情况下的输入电容的电流波形图如图 2 所示。

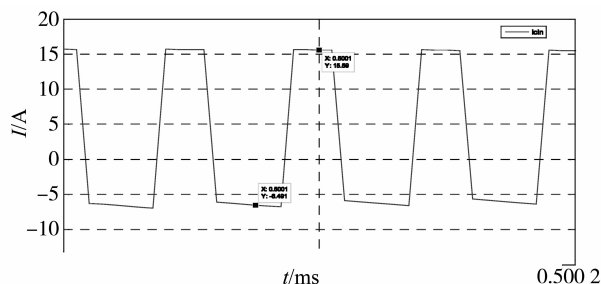


图 2 Buck 输入滤波电容电流波形

Fig. 2 Buck input filter capacitor current waveform

从图形看,输入电容的电流波形基本可以视为方波,功率器件关断期间,电路输入电流被电容吸收充电,电流值为 $D \times I_0$;功率器件开通期间,电路输入电流加上电容放电电流一起对负载提供电流,此期间的电流值略为 $(I_0 - D \times I_0)$,因此,对其有效值计算有:

$$I_{\text{cripp}} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\int_0^{DT} (I_0 - D \times I_0) dt + \int_{DT}^T D \times I_0 dt \right]} = I_0 \sqrt{1 - D} \quad (1)$$

从关系式可以得到,纹波电流极值点是在占空比 D 为 0.5 时,此时,纹波电流的有效值达到输出电流有效值 I_0 的一半,因电容的等效串联电阻的影响^[13],这个电流会在输入电容内部产生热量,缩短它们的工作寿命。

3 Buck 变换器中 LC 滤波器的响应

电路的 LC 滤波器的等效电路图如图 3 所示。

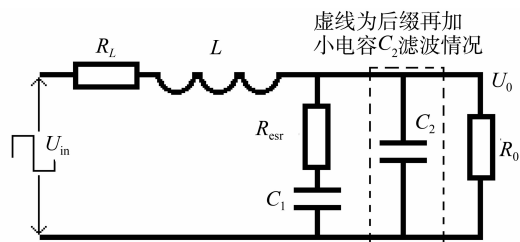


图 3 LC 滤波器等效电路图

Fig. 3 LC filter equivalent circuit diagram

图 3 中的电容 C_2 是加入阻尼后的图,当不加入 C_2 时,可得其输入输出传递函数如下:

$$\frac{U_0}{U_{in}} = \frac{R_0(R_{esr} + 1/sc1)/(R_0 + R_{esr} + 1/sc1)}{R_L + sL + \frac{R_0(R_{esr} + 1/sc1)}{R_0 + R_{esr} + 1/sc1}} \quad (2)$$

式中的 L 、 C_1 、 R_L 、 R_{esr} 、 R_0 分别为电感的等效电感值, 电解电容值, 串联电阻, 电容等效串联电阻和负载电阻。

对 (2) 式推导可得到 LC 滤波器等效电路的输入输出传递函数为:

$$\frac{U_0}{U_{in}} = R_0(R_{esr}C_1s + 1)/\{(R_0 + R_{esr})LC_1s^2 + [R_L(R_0 + R_{esr})C_1 + R_0R_{esr}C_1 + L]s + R_0 + R_L\} \quad (3)$$

从 (3) 式可以看出这是一个二阶系统, 并且电容的等效串联电阻导致传递函数存在一个零点, 由输出电容的等效串联电阻引起的零点频率:

$$f_{esr} = \frac{1}{2\pi R_{esr}C_1} = 1\,584\text{ Hz} \quad (4)$$

同时滤波器的一个极点位置由负载电阻确定:

$$f_p = \frac{1}{2\pi C_1R_0} = 27.6\text{ Hz} \quad (5)$$

因为电容等效串联电阻的数值较小, 所以由此产生的零点相对极点距原点较远, 由自动控制原理知, 极点改变函数的振荡频率, 零点改变函数的相应幅值和相位, 零点对系统过渡过程的超调有影响^[14]。利用 MATLAB 对 Buck 电路的 LC 滤波输出进行动态响应的分析, 其对应的选择的 LC 滤波器参数为 $L = 4\text{ mH}$, $C_1 = 6\,000\text{ }\mu\text{F}$, 电感、电容的等效电阻参数分别是: $R_L = 0.01\text{ }\Omega$, $R_{esr} = 0.25 \times 0.067\text{ }\Omega$ (四个并联), 负载电阻 $R_0 = 0.96\text{ }\Omega$ 。通过仿真计算得到上述传递函数阶跃响应、伯德曲线, 如图 4 和图 5。

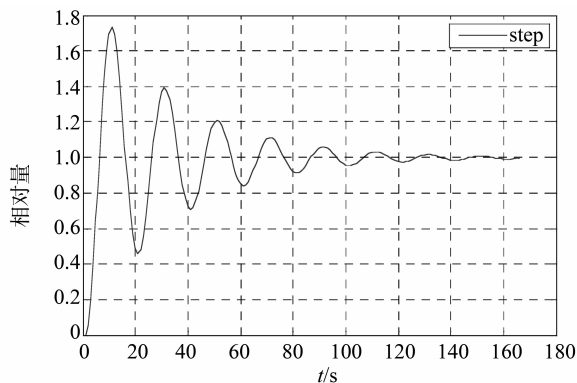


图 4 LC 滤波器的阶跃响应

Fig. 4 Step response of LC filter

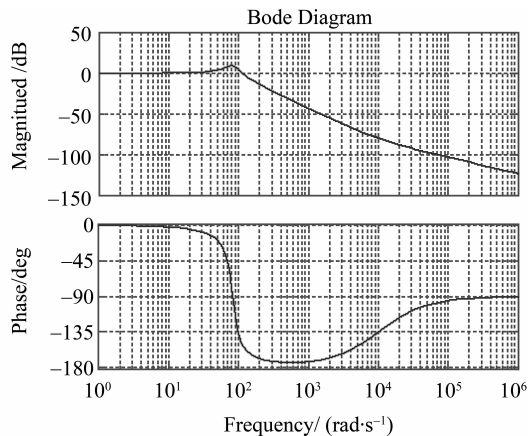


图 5 LC 滤波器的 bode 图

Fig. 5 LC filter bode plot

从图 4 可以看出系统在以上参数下出现了较大的震荡, 说明 LC 滤波器的相对阻尼系数较小, 其调节时间较长, 超调量较大, 表现出 LC 滤波器的滤波效果较差, 并且从图 5 看出对数幅频特性存在谐振现象, 同时相角裕度小于 35° , 系统不够稳定, 实际 Buck 电路工作的输出电压波形如图 6 所示, 在输出电压上出现波动现象, 小图是波动现象的展开图, 其高频震荡刚好与 Buck 电路的开关周期同步, 基本与仿真的情况基本符合。

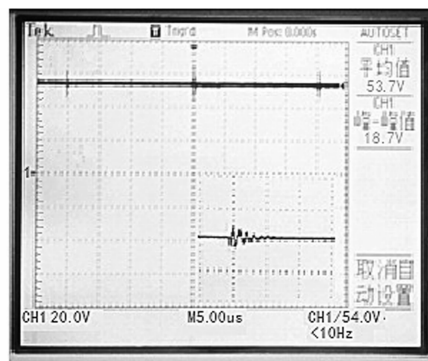


图 6 Buck 电路的输出电压

Fig. 6 Output voltage of Buck circuit

当不加入 C_2 时, 滤波器是一个二阶系统, 系统在以上参数下出现了较大的震荡, 是由于相位裕度低于 35° , 可以通过改变极点位置, 或用一个极点来衰减高频分量, 以抵消输出滤波电容的等效电阻引起的零点作用。如在后级增加一个 RC 网络, 或者简单的电容 C , 进行滤波消除高频的震荡, 也是可以使用两级 LC 滤波器。本文实际上为了成本以及简单考虑, 加入无源 RC 滤波基本即可满足要求。这里简化电阻为零, 只加入电容 C_2 , 加入后系

统变为三阶系统，负载电阻不变，其开环传递函数可写为

$$\frac{U_D}{U_{in}} = \frac{\text{num}}{\text{den}} \tag{6}$$

其中

$$\begin{aligned} \text{num} &= R_0(R_{\text{esr}}C_1s + 1), \\ \text{den} &= R_0R_{\text{esr}}LC_1C_2(R_0 + R_{\text{esr}})s^2 + \\ &\quad [LC_1(R_0 + R_{\text{esr}}) + R_LR_{\text{esr}}R_0C_2 + LR_0C_2]s^2 + \\ &\quad [R_L(R_0 + R_{\text{esr}}) + R_0R_{\text{esr}}C_1 + L]s + (R_0 + R_L) \end{aligned}$$

由于电容 C_2 的等效串联电阻为零，所以取值为 3 300 pF，其上述传递函数阶跃响应使用 Matlab 仿真计算可得如图 7，其对数频率特性曲线如图 8。

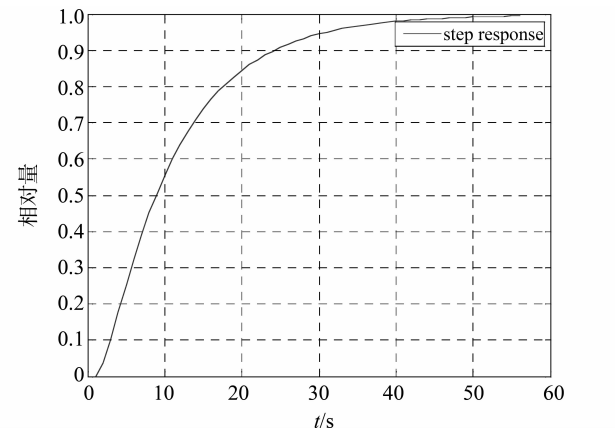


图 7 增加电容环节后 LC 滤波器的阶跃响应
Fig. 7 Step response of LC filter after increasing capacitance

从图 7 可以发现，在阶跃信号作用下，响应输出没有出现振荡，并且响应速度明显加快，改善了滤波环节的动态性能，加入第二级滤波后，基本可以等效成一个惯性环节。并且从图 8 看出对数幅频特性曲线不存在谐振现象，同时相角裕度大于 35° ，系统稳定性大大提高。图 9 是在滤波电路增加了惯性环节后的实际 Buck 电路工作的输出电压波形实验调试结果，图中没有出现与 Buck 电路的开关周期同步的振荡现象，提高了电路的输出性能。

4 结 语

Buck 电路的输入滤波电容工作状况是比较糟糕的，其纹波电流一般可能会很大，尤其是低压大电流输出场合，已推导证明占空比为 0.5 时，纹波电流最大。这就要求输入电容的等效串联电阻小，纹波电流的额定值大。Buck 电路的输出 LC 滤波器由于实际参数选取问题可能出现谐振电压，这个电

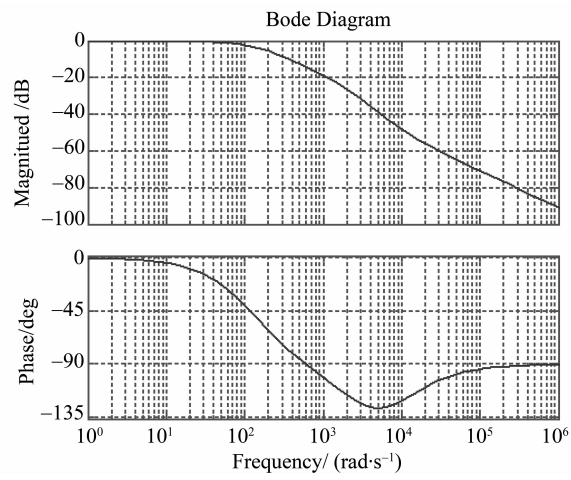


图 8 增加电容环节后 LC 滤波器的 bode 图
Fig. 8 LC filter after increasing capacitance bode plot

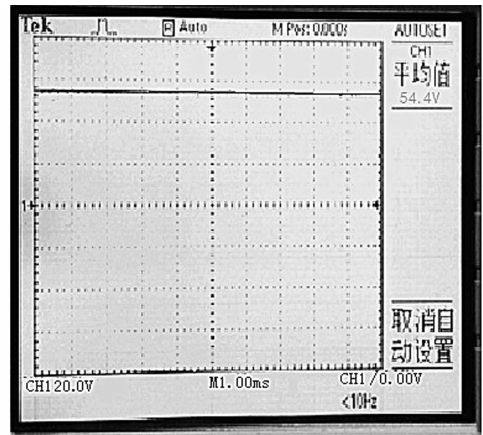


图 9 增加电容环节后 Buck 电路的输出电压
Fig. 9 Output voltage of Buck circuit after increasing capacitance

压尤其是在轻载下表现的更为明显，通过再加一级 RC 网络，电容 C 可以有效的消除单级 LC 滤波器带来的谐振电压问题。同样该方法可以应用于其他正激式开关电源拓扑结构中，消除一些高频的干扰。

参考文献：

[1] 杨旭,裴云庆,王兆安. 开关电源技术[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[2] 张先进,龚春英. 一种 SPWM 控制双 Buck 半桥逆变器研究[J]. 电气传动, 2009,39(2):48 – 51.

[3] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京:电子工业出版社,2005.

[4] 袁佑新,李波,辛华强. 基于 PWM 控制器 KA7500B 的逆变电源设计[J]. 通信电源技术,2006,23(2):13 – 15.

[5] 杨柏禄,关晴予,陈永真. 电解电容器等效串联电阻特性及其对应用的影响[J]. 电源世界,2008,10:66-69.

[6] 林维明, SEBASTIÁN J, FERNANDEZ A. 满足新版 IEC1000-3-2 标准规定(2000 版)的单相 LC 滤波整流器的设计[J]. 电工电能新技术,2002,21(2):1-4.

[7] 李艳,张菁. 采用 LC 滤波的大功率本安 Buck 开关变换器[J]. 现代电子技术,2012,35(12):137-138.

[8] 徐立刚,陈乾宏,朱祥,等. 单相整流滤波电容纹波电流的数学模型与分析[J]. 电力电子技术,2009,43(3):51-53.

[9] 张飞翔,王津,朱绪飞,等. 开关电源 105_高纹波系列铝电解电容器[J]. 电子元件与材料,1999,18(3):28-29.

[10] 黄忠霖. 自动控制原理的 MATLAB 实现[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

[11] 曹婉真. 开关电源用铝电解电容器[J]. 电子元器件应用,2000,2(10):31-33.

[12] 王书堂,陈永真,关晴予. 开关电源中液态铝电解电容器失效分析[J]. 电子设计应用,2009,5:95-97.

[13] 闫晓金,潘艳,陈永真. 开关电源对电解电容器性能的基本要求[J]. 电源世界,2008,4:63-65.

[14] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 5 版. 北京:科学出版社,2007.



(上接第 74 页)

[43] HE J, LIN T H, FENG J, et al. Mobile product search with bag of hash bits [C] // Proceedings of the 19th ACM International Conference. Multimedia, ACM, 2011: 839-840.

[44] ZHANG Q, LI Z, DU Y, et al. A Novel Progressive Transmission in Mobile Visual Search[C] // Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC), 2014 IEEE 12th International Conference. IEEE, 2014: 259-264.

[45] XIA J, GAO K, ZHANG D, et al. Geometric context-preserving progressive transmission in mobile visual search[C] // Proceedings of the 20th ACM International Conference. Multimedia, ACM, 2012: 953-956.

[46] TORRALBA A, FERGUS R, WEISS Y. Small codes and large image databases for recognition[C] // Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference. IEEE, 2008: 1-8.

[47] SU Y C, CHIU T H, CHEN Y Y, et al. Enabling low bitrate mobile visual recognition: a performance versus bandwidth evaluation [C] // Proceedings of the 21st ACM International Conference. Multimedia, ACM, 2013: 73-82.

[48] QI H, STOJMENOVIC M, LI K, et al. A low transmission overhead framework of mobile visual search based on vocabulary decomposition[J]. Multimedia, IEEE Transactions. 2014, 16(7): 1963-1972.

[49] HE J, FENG J, LIU X, et al. Mobile product search with bag of hash bits and boundary reranking [C] // Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012: 3005-3012.