

文章编号: 1001-0920(2009)07-1117-04

## BUCK 变换器带恒功率负载反馈精确线性化控制

高朝晖<sup>1</sup>, 张晓斌<sup>1</sup>, 林 辉<sup>1</sup>, 石红霞<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学 自动化学院, 西安 710072; 2. 陕西重型机械制造有限公司 铆焊分厂, 西安 710032)

**摘 要:** 对 BUCK 变换器带恒功率负载系统的非线性控制进行了研究. 根据恒功率负载的非线性特性, 推导出 BUCK 变换器带恒功率负载的精确线性化反馈控制规律, 设计了系统非线性控制器. 用 SABER 软件对控制律进行了仿真, 结果表明反馈精确线性化技术可以实现对 BUCK 变换器带恒功率负载的控制, 在电源及负载大范围变化时, 保证系统的稳定运行, 具有大信号稳定特性.

**关键词:** BUCK 变换器; 恒功率负载; 反馈精确线性化

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

### Exact feedback linearization control to BUCK converter with constant power loads

GAO Zhao hui<sup>1</sup>, ZHANG Xiao bin<sup>1</sup>, LIN Hui<sup>1</sup>, SHI Hong-xia<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi 'an 710072, China; 2. Riveting and Welding Branch Factory, Shaanxi Heavy Mechanical Manufacture Co Ltd, Xi 'an 710032, China. Correspondent: GAO Zhao hui, E-mail: holly @nwpu. edu. cn)

**Abstract:** The nonlinear control of a BUCK converter with constant power loads is studied. According to the nonlinear characteristic of constant power loads, a nonlinear stabilizing controller based on exact feedback linearization technique is proposed. The SABER is used to simulate the control law. The simulation results show that exact feedback linearization technique can be used to control a DC/DC converter supplying constant power loads. During large disturbances in the power supply and the loads, the nonlinear controller can make the system operation steadily, and has a large-signal stability characteristic.

**Key words:** BUCK converter; Constant power loads; Exact feedback linearization

### 1 引 言

恒功率负载,是指在系统运行期间从电源吸收的功率基本保持不变这样一类负载.随着电力电子技术的发展,恒功率负载在电力系统中所占的比重越来越大.恒功率负载具有负阻抗特性,会引起电力系统的不稳定运行<sup>[1]</sup>.DC/DC 电力变换器作为独立电力系统中一类重要的二次电源,对其带恒功率负载的控制进行研究,具有重要的现实意义.

对于 DC/DC 变换器带恒功率负载的非线性系统,传统的控制方法是在系统平衡点进行线性化处理,得到系统线性模型,采用线性控制理论来设计系统控制律.这样处理,在系统出现小扰动干扰时,控制效果可以满足工程需要.但是,在分析其大干扰稳

定性和动态品质时,控制效果不令人满意.文献[2]采用反馈线性化技术对 BUCK 变换器带恒功率负载系统进行控制,文中的线性化过程是采用构造李亚普诺夫函数的方法实现的,对于一般非线性系统构造李亚普诺夫函数不能形成通用方法,因此上述设计存在一定的局限性.

状态反馈精确线性化控制是在一定条件下,通过适当坐标变换,将原非线性系统转化为线性系统布鲁诺夫斯基标准型.这种线性化的方法和结果都与传统局部线性化的近似方法迥然不同,在线性化过程中没有忽略掉任何高阶非线性项,因此这种线性化不仅是精确的,而且在全局意义下对变换有定义的整个区间都适用<sup>[3]</sup>.状态反馈精确线性化在电

收稿日期: 2008-07-02; 修回日期: 2008-11-13.

基金项目: 航空基金项目(2007ZC53038).

作者简介: 高朝晖(1971—),女,西安人,讲师,从事飞机电气系统仿真与控制研究; 张晓斌(1963—),男,山东淄博人,教授,从事电力电子技术和飞机电气系统等研究.

力变换器的控制中已得到应用<sup>[4,5]</sup>,但对于变换器带恒功率负载的应用在国内外还不多见。

本文应用状态反馈精确线性化理论设计出BUCK变换器带恒功率负载系统的非线性控制器,用SABER软件对推导出的控制律进行仿真,验证了该控制方法的正确性。

### 2 状态反馈精确线性化控制基本思想

一个单输入单输出的仿射非线性系统可表示为如下的标准形式:

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X) + g(X)u, \\ y = h(X). \end{cases} \quad (1)$$

状态反馈精确线性化控制的基本思想是在一定条件下,通过如下的坐标变换:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(X) \\ L_f h(X) \\ \dots \\ L_f^{n-1} h(X) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

将非线性系统(1)转化为如下线性系统:

$$\dot{Z} = AZ + Bv. \quad (3)$$

式(3)称为布鲁诺夫斯基标准型, Z为变换后系统的状态向量, v为控制变量. 其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1]^T.$$

式(2)中,  $L_f h(X)$  表示输出函数  $h(X)$  对向量场  $f$  求李导数. 原非线性系统(1)的控制变量  $u$  和变换后线性系统(3)的控制变量  $v$  之间有如下关系:

$$u = -\frac{g(X)}{f(X)} + \frac{1}{f(X)}v, \quad (4)$$

其中

$$f(X) = L_f^n h(X), \quad g(X) = L_g L_f^{n-1} h(X).$$

求解式(3)所示线性系统控制量  $v$  的方法很多,本文中运用具有二次型性能指标的线性最优控制方法进行求解;然后根据式(4)即可求出原非线性系统的控制量  $u$ .

### 3 BUCK变换器带恒功率负载的状态反馈精确线性化控制

#### 3.1 BUCK变换器带恒功率负载系统模型

BUCK变换器同时带恒功率负载和电阻性负载的电路如图1所示. 图中: R代表电阻性负载, P代表恒功率负载, u代表占空比.

运用状态空间平均法<sup>[6]</sup>可以得到图1所示系统的状态方程如下:

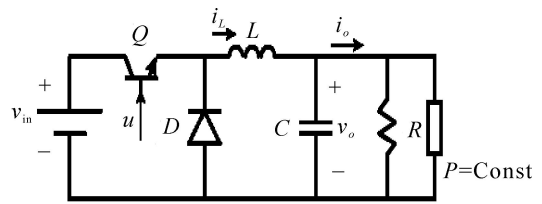


图1 带恒功率负载和电阻性负载的BUCK变换器

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{1}{L}(uV_{in} - v_o), \\ \frac{dv_o}{dt} &= \frac{1}{C}(i_L - \frac{v_o}{R} - \frac{P}{v_o}). \end{aligned} \quad (5)$$

电路中输入电压  $V_{in}$  不具可控性,因而不作为系统的控制变量,令占空比  $u$  作为系统的控制变量.

对照式(1)和(5)可以发现,带恒功率负载的BUCK变换器即属于典型的单输入单输出仿射非线性系统,其中

$$f(X) = \begin{bmatrix} -\frac{x_2}{L} \\ \frac{x_1}{C} - \frac{x_2}{RC} - \frac{P}{Cx_2} \end{bmatrix}, \quad g(X) = \begin{bmatrix} \frac{V_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中状态变量  $x_1$  和  $x_2$  分别为  $i_L$  和  $v_o$ . 定义系统的输出函数  $h(X)$  为

$$y = h(X) = x_2 - v_{ref}, \quad (7)$$

式中  $v_{ref}$  为输出电压参考值.

#### 3.2 反馈精确线性化条件

仿射非线性系统,如果以下两个条件成立:

1) 矩阵  $[g(X) \ ad_f g(X) \ \dots \ ad_f^{n-2} g(X) \ ad_f^{n-1} g(X)]$ , 对于在  $X^0$  附近的所有  $X$ , 其秩不变且等于  $n$ ;

2) 向量场集合  $D = \{g(X), ad_f g(X), \dots, ad_f^{n-2} g(X)\}$ , 在  $X = X^0$  处是对合的.

$ad_f g(X)$  表示向量场  $g(X)$  对另一向量场  $f(X)$  的李括号. 则必然存在一个函数  $\phi(X)$ , 使得在  $X = X^0$  处该系统的关系度  $r$  等于系统的阶数  $n$ , 即所给系统可在  $X = X^0$  的一个开集上被精确线性化为一个可控的线性系统布鲁诺夫斯基标准型.

下面对带恒功率负载的BUCK变换器系统进行反馈精确线性化条件的验证.

$$ad_f g(X) = \frac{\partial g(X)}{\partial X} f(X) - \frac{\partial f(X)}{\partial X} g(X) =$$

$$0 - \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} + \frac{P}{Cx_2^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{V_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{V_{in}}{LC} \end{bmatrix}.$$

由此可知,矩阵

$$[g(X) \ ad_f h(X)] = \begin{bmatrix} V_{in}/L & 0 \\ 0 & -V_{in}/LC \end{bmatrix}$$

的秩为 2, 等于系统的阶数  $n$ , 因此精确线性化条件 1) 满足. 由于本系统  $n = 2$ , 向量场  $D = \{g(X)\}$  是对合的, 精确线性化条件 2) 也满足. 因此带恒功率负载的 BUCK 变换器系统可以实现状态反馈精确线性化控制.

### 3.3 反馈精确线性化控制规律

根据式(7)所定义的输出函数  $h(X)$  求解出系统关系度  $r = 2$ , 满足关系度  $r = n$ , 因此可利用式(7)所定义的输出函数  $h(X)$  进行坐标变换, 即

$$\begin{cases} z_1 = h(X) = x_2 - V_{ref}, \\ z_2 = L_f h(X) = \frac{x_1}{C} - \frac{x_2}{RC} - \frac{P}{Cx_2}, \end{cases} \quad (8)$$

得到以新的状态变量  $Z$  描述的系统如下:

$$\dot{Z} = AZ + Bv = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} v. \quad (9)$$

下面用二次型性能指标的最优控制方法来求解式(9)所描述线性系统的控制变量  $v$ .

选取如下形式的二次型性能指标:

$$J = \int_0^{\infty} (Z^T(t)QZ(t) + v^2(t)) dt. \quad (10)$$

根据最优控制理论可知二次型性能指标的最优控制解  $v$  是状态变量的线性反馈<sup>[7]</sup>, 即

$$v = -KZ(t) = -[k_1 \quad k_2] \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

反馈增益矩阵  $K$  可根据选定的权矩阵, 通过求解黎卡堤方程获得.

在本系统中要想系统稳定运行并获得较好的控制效果, 需要将原非线性系统的特性加以考虑来求解矩阵  $K$ , 即尽量保证经过坐标变换后的线性系统的时间常数与原系统的时间常数保持在同一个数量级. 如果两者相差太远, 则原系统有可能成为正反馈系统, 很难达到稳定.

根据式(11), 可以得到式(9)所示线性系统闭环传递函数的特征多项式, 即

$$s^2 + k_2 s + k_1. \quad (12)$$

又知二阶系统闭环传递函数特征多项式最佳形式如下<sup>[8]</sup>:

$$s^2 + 1.4 \omega_n s + \omega_n^2, \quad (13)$$

式中  $\omega_n$  是线性系统无阻尼自然振荡频率. 对比式(12)和(13), 可得

$$k_1 = \omega_n^2, \quad k_2 = 1.4 \omega_n.$$

本文中选取 BUCK 变换器系统的参数如下:  $V_{in} = 20V, R = 20 \Omega, L = 1mH, v_{ref} = 10V, C = 10mF, P = 10W, f = 10kHz$ . 可以计算出原系统的时间常数为

$$T = \sqrt{LC} = \sqrt{10mF * 1mH} = 3.2ms.$$

因此可以选择式(13)中的  $\omega_n$  为

$$\omega_n = 1/T = 1/\sqrt{LC} = 316rad/s.$$

实际控制系统中,  $\omega_n$  选择  $500rad/s$ , 这样便求出了式(9)所示线性系统的控制规律  $v$ , 即

$$v = -500^2 z_1 - 1.4 * 500 * z_2 = -500^2 (x_2 - V_{ref}) - 1.4 * 500 * \left( \frac{x_1}{C} - \frac{x_2}{RC} - \frac{P}{Cx_2} \right). \quad (14)$$

根据式(4)所示  $u$  和  $v$  之间的关系, 计算

$$h(X) = -\frac{1}{RC^2} x_1 + \left( \frac{1}{R^2 C^2} - \frac{1}{LC} \right) x_2 + \frac{Px_1}{C^2 x_2^2} - \frac{P^2}{C^2 x_2^3},$$

$$g(X) = L_g L_f h(X) = \frac{V_{in}}{LC},$$

可得原非线性系统的控制律

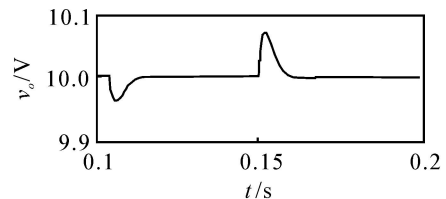
$$u = \frac{-g(X) + v}{g(X)} = \frac{LC}{V_{in}} \left[ \frac{1}{RC^2} x_1 - \left( \frac{1}{R^2 C^2} - \frac{1}{LC} \right) x_2 - \frac{Px_1}{C^2 x_2^2} + \frac{P^2}{C^2 x_2^3} + v \right]. \quad (15)$$

可以看出, 最终得到的控制规律是状态向量  $X$  的一个较为复杂的非线性函数.

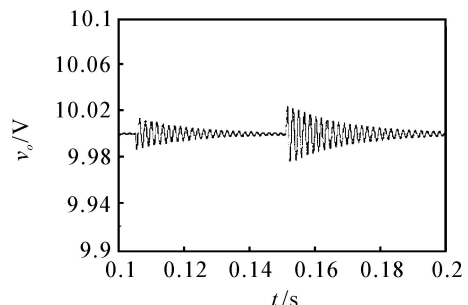
## 4 系统仿真

利用 SABER 软件建立了系统仿真模型以验证求得的控制规律, 控制效果与参考文献[2]进行了对比. 电路参数见 3.3 节, 仿真结果如图 2 和图 3 所示.

从仿真结果可以看出, 当负载在一个较大范围变化时, 精确反馈线性化控制可以保证系统的稳定运行, 此时系统可以向恒电压负载(电阻性负载)提



(a) 本文的仿真结果



(b) 参考文献[2]的仿真结果

图 2  $P = 10W, R$  从 20 跳变至 10 再跳变至 100 时输出电压  $v_o$  的动态响应

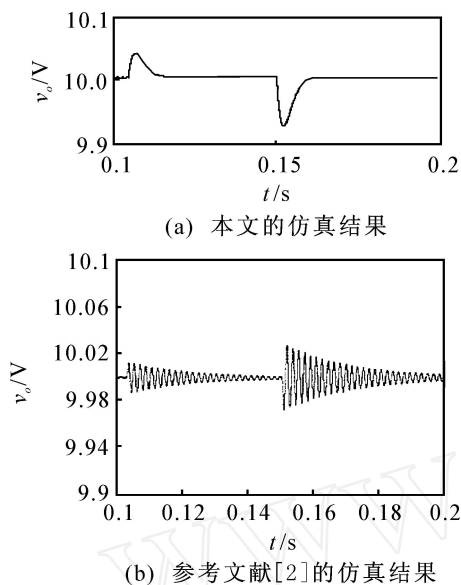


图3  $R = 20$ ,  $P = 10W$ 跳变至  $R = 1000$ ,  $P = 10W$ 再跳变至  $R = 1000$ ,  $P = 20W$ 时,输出电压  $v_o$  的动态响应

供稳定的电压,同时向恒功率负载提供恒定的功率,具有大信号稳定特性.与参考文献[2]对比可以看出,负载变化时,采用本文的控制方法,系统超调量略大于后者,但稳定性和快速性都优于后者.

## 5 结论

本文采用状态反馈精确线性化控制技术设计了BUCK变换器带恒功率负载系统的非线性控制律,用SABER软件对求出的控制律进行了仿真验证.结果表明,采用反馈精确线性化方法可以实现对BUCK变换器带恒功率负载的控制,表现出大信号稳定特性.

## 参考文献(References)

[1] Jusoh Awang Bin. The instability effect of constant

power loads [C]. National Power and Energy Conf. Malaysia, 2004: 175-179.

[2] Ali Emadi, Mehrdad Ehsani. Negative impedance stabilizing controls for PWM DC/DC converters using feedback linearization techniques [C]. 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conf. Las Vegas, 2000: 613-620.

[3] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.

(Lu Q, Sun Y Z. The nonlinear control of power system [M]. Beijing: Science Press, 1993.)

[4] Sir Ramirez H, Silva-Ortigoza R. Control design techniques in power electronics devices [M]. London: Springer, 2006.

[5] 邓卫华, 张波, 胡宗波, 等. CCM BUCK变换器的状态反馈精确线性化的非线性解耦控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 120-125.

(Deng W H, Zhang B, Hu Z B, et al. Research of nonlinear decouple control law using state variable feedback linearization method based on the CCM BUCK converter [J]. Proc of the CSEE, 2004, 24(5): 120-125.)

[6] Erickson Robert W, Maksimovic Dragan. Fundamentals of power electronics [M]. Chapman & Hall, 1997.

[7] 邢继祥, 张春蕊, 徐洪泽. 最优控制应用基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(Xing J X, Zhang C R, Xu H Z. The application basis of the optimal control [M]. Beijing: Science Press, 2003.)

[8] Katsuhiko Ogata. 现代控制工程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

(Katsuhiko Ogata. Modern control engineering [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2007.)

(上接第1116页)

## 参考文献(References)

[1] 程洵. 确良供应链环境下库存管理[J]. 市场周刊, 2008, 4(2): 44-45.

(Cheng X. Inventory management in supply chain environment [J]. Weekly of Market, 2008, 4(2): 44-45.)

[2] 张广霞. 联合库存管理法在供应链库存控制中的应用[J]. 中国市场, 2008, 6(15): 14-15.

(Zhang G X. An application of joint inventory management in supply chain inventory control [J]. Market of China, 2008, 6(15): 14-15.)

[3] 蔡建湖, 黄卫来, 张子刚. 一个考虑回收契约的两级供

应链库存决策模型研究[J]. 管理工程学报, 2008, 22(1): 122-124.

(Cai J H, Huang W L, Zhang Z G. Study on a two-echelon supply chain inventory model under buy back contract [J]. J of Industrial Engineering/Engineering Management, 2008, 22(1): 122-124.)

[4] Clark A J, Scarf H. Optimal policies for a multi-echelon inventory problem [J]. Management Science, 1960, 6(4): 475-490.

[5] Muthoo A. Bargaining theory with application [M]. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2005.