

DOI: 10.7652/xjtuxb201604006

双闭环 Buck 变换器系统模糊 PID 控制

杨航¹, 刘凌¹, 阎治安¹, 杨娴²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 国网安徽省电力公司电力科学研究院, 230061, 合肥)

摘要: 针对传统线性 PID 控制对复杂控制对象难以建模及人工整定经验缺乏等问题,提出了一种双闭环 Buck 变换器系统的模糊 PID 控制策略。首先,设计了电压外环和电流内环结构以同时提高系统的抗扰性和跟随性;其次选择高斯函数和三角形函数相结合的隶属度函数以使控制器对小误差的灵敏度得以增强;接着,针对 PID 参数分别设计了 3 个子推理器并通过基于专家经验的规则库制定出 Buck 变换器的模糊规则,可以使控制器不依赖于 Buck 变换器系统精确的数学模型,从而克服传统 PID 控制导致的输出电压高超调、振荡等缺点;最后,设计了一套新型双闭环 Buck 变换器硬件系统,利用 STM32 单片机将模糊 PID 算法首次用于控制变化速度快、时滞小的被控量。实验结果表明:模糊 PID 控制策略不仅能够提高输出电压跟踪精度,还能有效抑制负载扰动及参数摄动,在阶跃启动下,系统输出电压超调量低于 10%,调节时间低于 3 ms;与传统 PID 单环系统相比,其输出电压纹波、扰动下的最大动态压降和恢复时间均减小了一个数量级以上。

关键词: Buck 变换器;双闭环;模糊 PID 控制;参数自整定

中图分类号: TP273.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)04-0035-06

A Fuzzy PID Control Strategy for Buck Converter System of Double Closed Loop Circuits

YANG Hang¹, LIU Ling¹, YAN Zhi'an¹, YANG Xian²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Institute of Electric Power Research, State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230061, China)

Abstract: A novel fuzzy PID control strategy of Buck converter system with double closed loop structures is proposed to solve problems that complex control objects are difficult of modeling and the artificial tuning experiences are lack, etc. The voltage and current loop structures are designed to improve both the anti-disturbance performance and the following performance of the system. A membership function that combines the Gauss function and the triangular function is selected to enhance the sensitivity of the controller to small error. Three sub inference devices are designed based on the PID parameters and the rule base of expert experiences, and the fuzzy rule of Buck converter is developed to make the designed controller independent of the precise mathematical model of Buck converter. So that it overcomes the high percent overshoot, oscillation and other shortcomings of the output voltage caused by traditional PID controls. A new Buck converter system of double closed loop circuits is designed, and the fuzzy PID control strategy is applied to control the quantities with rapid change and small time delay by making use

of STM32. Experimental results show that the fuzzy PID control strategy not only improves the tracking accuracy of the output voltage, but also effectively suppresses the load disturbance and parameter perturbation, and that the overshoot of the output voltage is less than 10% and the adjustment time is less than 3 ms under the step to start. A comparison with the traditional PID system show that the designed system's output voltage ripple, maximum dynamic voltage drop and recovery time under the disturbance are reduced by one order of magnitude.

Keywords: buck converter; double loop circuit; fuzzy PID control; parameters self-tuning

严峻的开关电源抗扰性能形势迫切要求研究开关电源控制器的参数自整定,而 Buck 型 DC-DC 变换器是开关电源的核心,其面临的抗扰问题更为突出,必须得到有效解决。目前,主要存在以下 3 点问题:①当前对 Buck 变换器的控制大多采用传统线性 PID 控制,其鲁棒性和抗扰性的矛盾,零超调和快速性的矛盾导致控制性能低下^[1];②由于 Buck 变换器非线性的特征,因此通过假设推导的数学模型或由辨识得到的估计模型的适用范围有限;③传统人工整定的固定参数无法使系统获得期望抗扰性能^[2]。

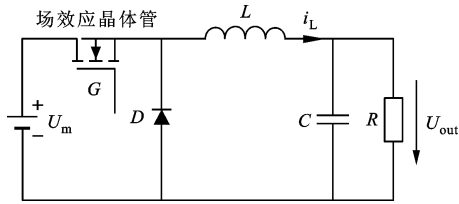
近年来,国内越来越多的科技人员开始研究智能控制策略来提高抗扰性能。文献[1]给出了一种基于模糊自适应 PID 的控制方案,但仅指出了该方案相比传统 PID 控制有更好的动静态性能而未制作硬件实现。文献[3]针对温室环境的多变量、非线性和难建模等特性,运用模糊控制实现了对温室环境参数的有效控制,但被控量变化缓慢,没有实现对变化速度快的被控量的实时控制。文献[4]针对液位控制过程中存在大滞后、时变和非线性的特点,运用模糊控制使系统响应加快,但仅停留在仿真而未付诸实践。文献[5]采用模糊算法实现了对智能车速度的控制,使赛车对赛道的适应性和控制稳定性都得到了较大的提高,然而其结构为单环且模糊算法直接获得控制量,控制精度低。

本文克服了以上各文献的不足,提出一种双闭环 Buck 变换器系统模糊 PID 控制策略,特别针对变化速度快且时滞小的电压、电流被控量,应用 3 个子模糊推理器对比例、积分、微分参数分别推理它们各自增益的增量,再通过运算获得最后的实际控制量,以提高控制器输出控制量的平滑性。本文制作了一个以 STM32 单片机为控制核心、可在线自整定参数的双闭环 Buck 变换器控制系统。它在稳定段之内用传统 PID 精细调节,在稳定段之外运用模糊控制辅助调节^[6]。利用软件编程,将专家知识及经验,即制定好的模糊规则表转化为相应算法并存

入微控制器中,通过微控制器表达和模拟熟练工人和专家的知识 and 经验,实现判断、推理和决策,从而避免了需要导出广义对象数学模型的困难。当系统启动、轻载或受到扰动时,控制器可通过在线自整定参数,使系统保持良好的动稳态特性,解决了传统 PID 控制器性能不佳、控制对象复杂多变和人工整定经验不足等问题。

1 Buck 变换器数学模型

Buck 变换器作为单管非隔离直流变换器,其拓扑如图 1 所示。



U_{in} 为 Buck 变换器输入电压; U_{out} 为 Buck 变换器输出电压; G 为金属-氧化物半导体场效应晶体管的栅极; D 为续流二极管; L 为滤波电感; C 为滤波电容; R 为电阻负载; i_L 为电感电流

图 1 Buck 变换器拓扑图

Buck 变换器是一种典型的非线性器件,研究该器件在某一稳定工作点附近的动态特性时,可用状态空间平均法将其近似成线性系统^[7],其输出电压与占空比传递函数如下

$$\frac{U_{out}(s)}{\alpha(s)} \Big|_{U_{in}(s)=0} = \frac{U_{in}}{LCs^2 + (L/R)s + 1} \quad (1)$$

式中: α 为半导体场效应晶体管 (MOSFET) 的占空比。设置系统工作在电感电流连续模式下,取 $U_{in}=24\text{ V}$, $U_{out}=5\text{ V}$, $R=10\text{ }\Omega$, 开关频率 $f_s=100\text{ kHz}$, 由电感电流连续条件可得滤波电感的最小值

$$L \geq \frac{1-\alpha}{2f_s} R \approx 39.6\text{ }\mu\text{H} \quad (2)$$

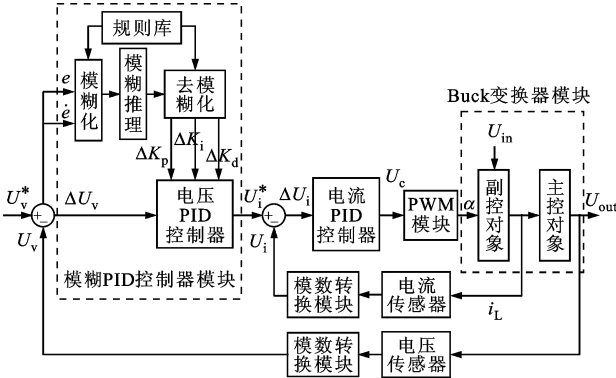
同时还要使纹波电流符合要求,根据下式可得滤波电感临界值

$$L \geq \frac{1-\alpha}{f_s \Delta I_L} U_{out} \approx 395.8\text{ }\mu\text{H} \quad (3)$$

式中: ΔI_L 为电流纹波值。联立式(2)和式(3)并考虑裕量, 选取滤波电感为 1 mH。通过式(4)可算得滤波电容的最小值

$$C \geq \frac{1-\alpha}{8Lf_s^2\Delta U_{out}}U_{out} \approx 5\ \mu\text{F} \tag{4}$$

式中: ΔU_{out} 为输出电压纹波值。考虑裕量, 选取滤波电容为 100 μF 。好的环路结构才能得到良好的动稳态性能, 本文所设计的双闭环系统框图如图 2 所示。



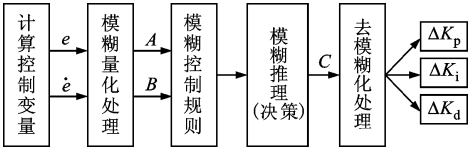
e 为当前 U_{out} 的误差; $\dot{e}$ 为当前 U_{out} 的误差变化率; ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为经去模糊化处理后的电压 PID 控制器的比例、积分、微分参数增益的变化量; U_v^* 为给定电压的数字量; U_v 为 U_{out} 经模数转换后的数字量; ΔU_v 为 U_v^* 和 U_v 的差值; U_i^* 为电压 PID 控制器输出电压的数字量; U_i 为 i_L 经模数转换后的数字量; ΔU_i 为 U_i^* 和 U_i 的差值; U_c 为电流 PID 控制器输出电压的数字量

图 2 双闭环模糊 PID 控制系统方框图

双闭环结构可显著提高系统对二次扰动的抗扰能力, 能减小对象的时间常数和相位滞后, 从而提高系统的动态性能。电流内环能限制电感电流, 这对系统可靠运行意义重大。

2 模糊 PID 控制器

图 3 为本文使用的二维模糊推理器原理图。



A 为误差模糊集; B 为误差变化率模糊集; C 为输出模糊集^[8]

图 3 二维模糊推理器原理图

2.1 论域及隶属度函数

论域为连续取值的模拟量^[9]。因额定输出电压为 5 V, 故设偏差的基本论域为 $[-5, 5]$; 设偏差变化率的基本论域为 $[-1\ 000, 1\ 000]$ 。模糊子集为 {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB}^[10] 分别代表 {负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}。根据论域覆盖程

度、稳定性和灵敏度等来确定隶属度函数^[11]。本文选取高斯函数和三角函数相结合的隶属度函数。当偏差大时用高斯函数, 偏差小时用三角函数。

2.2 数据库规则库制定

数据库存放所有变量模糊子集的隶属度函数^[12], 在推理模糊关系方程中向推理机提供数据。对于非线性、时变及难用精确传递函数描述的系统, 可以总结出 PID 参数的各种整定经验和知识^[13]。当偏差较大时, 以尽快消除偏差为主; 当偏差较小时, 以防止超调, 提高系统稳定性为主。根据控制经验和大量实验, 制定出模糊规则如表 1 及表 2 所示。

表 1 比例增益变化量模糊规则表

e	$\dot{e}$				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	Z
NS	PS	Z	Z	Z	NS
Z	Z	Z	Z	Z	Z
PS	NS	Z	Z	Z	PS
PB	Z	PS	PS	PB	PB

表 2 积分增益变化量模糊规则表

e	$\dot{e}$				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NS	Z	Z	Z	NS
NS	PS	PB	PB	PB	PS
Z	Z	PS	PS	PS	Z
PS	PS	PS	PS	PB	PS
PB	NS	Z	Z	Z	NS

模糊推理选用马丹尼 (Mardani) 型, 整定好的电压 PID 控制器比例、积分、微分增益分别为

$$\left. \begin{aligned} K_p &= K'_p + \Delta K_p \\ K_i &= K'_i + \Delta K_i \\ K_d &= K'_d + \Delta K_d \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中: K'_p 、 K'_i 、 K'_d 为 PID 参数初值; K_p 、 K_i 、 K_d 为整定好的 PID 参数。规则库推理时为推理机提供规则, 但推理的结果为模糊矢量, 经过去模糊化后转换为精确量, 才能发挥模糊推理结果的决策效果^[14]。本文采用重心法去模糊并通过离线计算制成控制量查询表, 实现参数在线自整定。

3 系统实验

3.1 系统硬件平台

Buck 变换器控制系统示意图如图 4 所示。

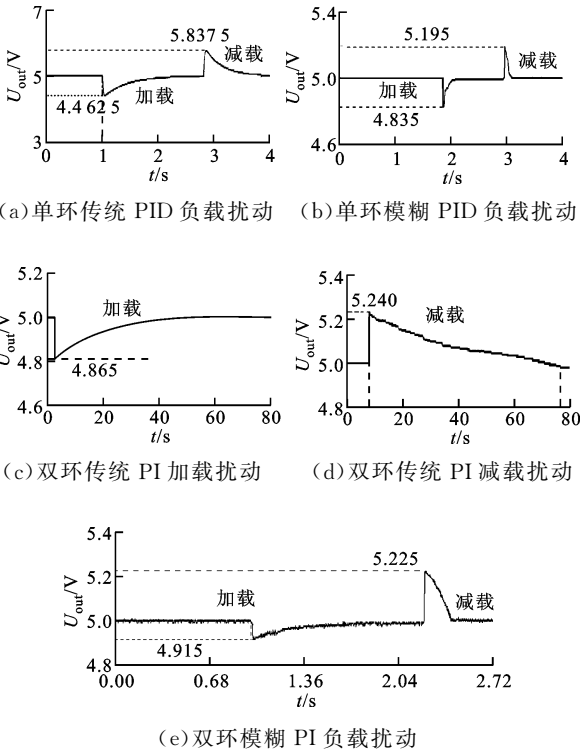


图 7 负载扰动时 4 种控制结构及策略下系统的输出电压波形

动态性能变差,而采用模糊 PID 控制后,参数能够分别通过 3 个子推理器推理得出,实现参数在线自整定,使得系统输出电压的精度更高,提高了系统的动态性能。

3.2.3 输入电压扰动测试 突增输入电压设为 24~34 V,突减输入电压设为 24~14 V。图 8 为使用安捷伦 DSO7014B 示波器测得的输入电压扰动下 4 种控制结构及策略下系统的输出电压波形。测得的 4 种控制结构及策略下系统的扰动性能指标数据如表 5 所示。

控制结构 及策略	最大动态压降/mV		恢复时间/ms	
	突增 U_{in}	突减 U_{in}	突增 U_{in}	突减 U_{in}
单环传统 PID	45.00	124.00	1 145	2 600
单环模糊 PID	21.88	35.00	550	565
双环传统 PI	9.75	27.50	570	1 060
双环模糊 PI	7.75	10.25	365	240

输入电压突变情况下,单闭环模糊 PID 控制系统输出电压动态压降减小,恢复时间缩短;双闭环模糊 PI 控制系统输出电压动态压降最小,恢复时间也最短。实验结果说明因输入电压改变,传统 PID 因

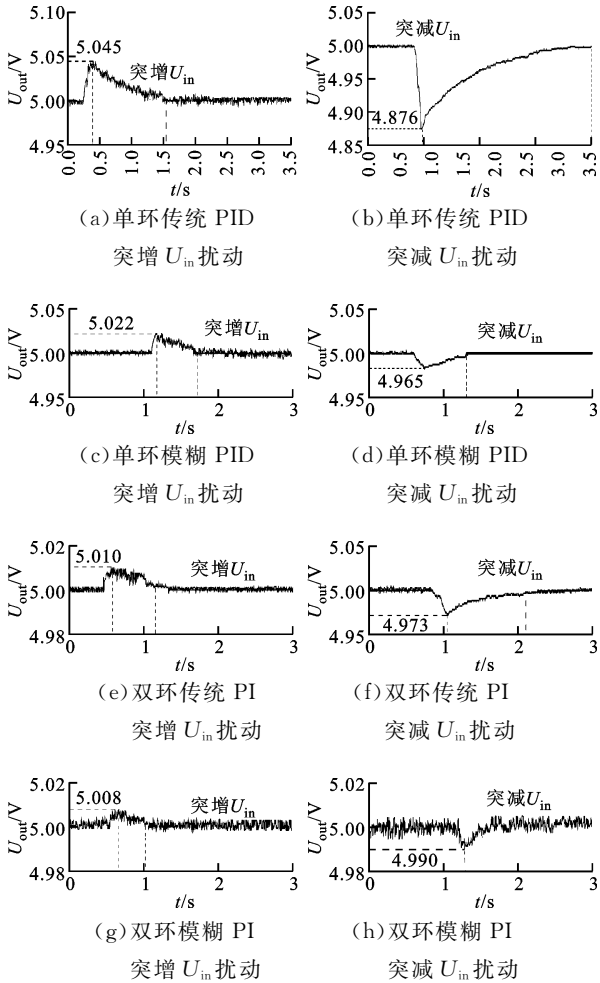


图 8 输入电压扰动时 4 种控制结构及策略下系统的输出电压波形

仍采用固定 PID 参数,无法兼顾在所有工作点处的控制性能,导致控制器性能恶化。双闭环系统通过增加电流内环,使输入电压波动可以通过电流反馈得到及时调节,不必再像单闭环系统需影响到输出电压后才能反馈回来,因而系统的抗扰性能得到改善。在双闭环结构基础上再采用模糊 PID 控制后,参数能够在线自整定且分别通过子推理器推理出的 PID 参数增量合成的控制量使得系统输出电压的精度更高,进一步提高了系统的动态性能。根据 3 种类型的实验测试,可得到双闭环模糊 PID 控制策略的优越性,4 种控制结构及策略下系统的各项性能指标比较如表 6 所示。

- (1)响应速度:模糊 PID 控制为减小电压超调,会牺牲一定快速性,但增加的上升时间很少。
- (2)输出电压纹波:双闭环系统输出电压纹波很小,加上模糊 PID 控制后,电压纹波进一步减小。
- (3)抑制扰动:双闭环系统可及时克服输入电压扰动,但不能有效抑制负载扰动。模糊 PID 控制则

能通过对 PID 参数的在线整定,同时克服负载扰动和输入电压扰动,从而获得满意的控制效果。

(4)稳定性:双闭环系统因其对电流的控制,使其比单闭环系统的鲁棒性更强;模糊控制系统由于其对参数的自适应性,使其鲁棒性最强。

(5)自适应性:传统 PID 控制器在非线性系统中的性能是易变的,不能适应系统工作点的变化。当对象特性变化大时,采用模糊 PID 控制器可实现参数最佳调整,使系统具有更强的自适应能力。

表 6 4 种控制结构及策略下系统的各项性能指标比较

控制结构 及策略	响应 速度	电压 纹波	抗负载 扰动	抗电压 扰动	稳定性
单环传统 PID	优	差	差	差	差
单环模糊 PID	优	良	优	良	中
双环传统 PI	中	中	差	良	良
双环模糊 PI	中	优	优	优	优

4 结 论

本文提出了模糊 PID 控制策略,设计了一套新型的具有专家控制特点的双环 Buck 型 DC-DC 变换器控制系统。特别针对变化速度快、时滞小的被控量,通过微控制器和应用子模糊推理器表达和模拟熟练工和专家的知识 and 经验,进行判断、推理和决策,实现了参数的在线自整定。由于不使用数值而用语言式的模糊变量来描述系统,故本文所设计的控制器是一种容易控制的非线性控制器,具有较佳适应性、强健性和容错性。

当参数摄动或负载扰动时,本文所设计的控制器不依赖系统数学模型,能保持良好的动稳态特性,具有控制灵活、响应快和适应性强的优点,很适合于过程控制,即使针对复杂的控制对象也能克服传统 PID 控制器的缺点,实现高精度、高鲁棒性控制。本文所设计的控制器具有自适应能力和一定的智能水平,解决了传统 PID 控制器性能不佳、控制对象复杂多变和人工整定经验不足等问题。

参考文献:

[1] 施三保,夏泽中. DC-DC 变换器的模糊自适应 PID 控制仿真研究 [J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2006, 28(8): 20-23.
SHI Sanbao, XIA Zezhong. Simulation study of fuzzy adaptive PID control of DC-DC converters [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information and Management Engineering, 2006, 28(8): 20-23.

[2] 李竞, 胡保生. 模糊 PID 增益调节器的算法、结构及硬件实现 [J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(5): 9-13.
LI Jing, HU Baosheng. Algorithm, architecture and FPGA implementation for fuzzy PID gain conditioner [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(5): 9-13.
[3] 陈岩, 杜晓明. 模糊 PID 控制在温室环境中的应用 [J]. 农机化研究, 2010, 32(8): 173-177.
CHEN Yan, DU Xiaoming. Application fuzzy PID control in the greenhouse environment [J]. Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(8): 173-177.
[4] 李岩. 模糊 PID 控制在液位控制中的应用 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
LI Yan. The application on fuzzy PID control in water level control system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.
[5] 丁芳, 贾翔宇, 李科伟, 等. 模糊算法在智能车控制中的应用 [J]. 中国民航大学学报, 2009, 27(1): 27-30.
DING Fang, JIA Xiangyu, LI Kewei, et al. Application of fuzzy algorithm in smart car [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2009, 27(1): 27-30.
[6] LI Jun, LIU Junhua. Nonlinear inverse modeling of sensor based on back-propagation fuzzy logical system [J]. Academic Journal of Xian Jiaotong University, 2007(1): 14-17.
[7] 李胜男, 张浩, 马西奎, 等. Buck-Boost DC/DC 变换器中边界碰撞分岔现象的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(4): 454-458.
LI Shengnan, ZHANG Hao, MA Xikui, et al. Experimental study of border collision bifurcation in buck-boost DC/DC power converters [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(4): 454-458.
[8] 文乐, 高林, 戴义平. 透平压缩机组的模糊 PID 控制与特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(7): 76-81.
WEN Le, GAO Lin, DAI Yiping. Study on fuzzy PID control of turbine-driven centrifugal compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(7): 76-81.
[9] ZADEH L A. Fuzzy sets [J]. Information and Control, 1965, 65(8): 338-353.
[10] 罗光明, 黄晓宇, 朱建林. 基于 MATLAB 的模糊自适应 PID 参数控制器计算机仿真 [J]. 机械与电子, 2001(2): 23-26.

(下转第 67 页)