

# DC / DC 变换器的模糊自整定 PID 控制器设计<sup>①</sup>

金爱娟, 张 丽, 李少龙

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘 要:** 本设计以模糊集合理论为基础设计了一种自适应 PID 控制器。该控制器通过对误差及误差变化的识别, 进行模糊推理, 实现对控制参数( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ) 的在线整定, 以达到优化控制的目的。并利用 MATLAB 进行仿真研究, 结果表明: 模糊 PID 控制系统比常规的 PID 控制能更有效地改善系统的动态和稳态性能, 增强了系统的鲁棒性。

**关键词:** 自适应; 模糊控制; PID 控制器; DC/DC 变换器; 鲁棒性

## Design of Fuzzy Tuning PID Controller of DC/DC Converter

JIN Ai-Juan, ZHANG Li, LI Shao-Long

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** The self-tuning PID controller was designed based on set theory of fuzzy control. It can attain on-line tuning of the control parameters and realize the optimal control by measuring control error and error varying and fuzzy-reasoning. Simulation study was made with the toolboxes of Simulink and fuzzy inside MATLAB, the simulation results show that the fuzzy control system can improve the dynamic and static performance and improve the robustness of the system compared with the routine PID.

**Key words:** self-tuning; fuzzy control; PID controller; DC/DC converter; robust

DC/DC 变换器属于功率电子学的研究范畴, 涉及到电力电子和控制理论等学科, 从七十年代初发展至今, 有关这类变换器的理论分析和应用研究得到了极大的发展。

由于 DC/DC 变换器具有高效率, 高功率密度和高可靠性等优点, 其应用范围越来越广, 涉及到通讯、计算机、工业设备和家用电器等领域。因此, 人们对其动态特性的要求也越来越高。

应用于 DC/DC 变换器的数字控制器采用数字信号处理电路来实现控制算法, 因此对工艺参数不敏感, 且不需要外接补偿元件, 控制性能比模拟控制器更稳定; 易于使用各种总线配置新的控制信息以实现在线控制与监测; 可根据需要实现各种复杂算法, 且控制算法可编程。正是这些显著的优点, 使数字 DC/DC 控制器成为一个研究热点。

目前各国的研究主要集中在 DC/DC 开关变换器的系统建模、闭环控制、拓扑结构、开关器件的应用、软开关技术、如何减小设备的体积和重量以及测试、电磁兼容、干扰抑制等方面。但是, 目前在 DC/DC 变换器的建模及其控制等方面仍未建立通用的成套方法, 尤其是现有的一些理论仍具有较明显的局限性。

本文就 DC/DC 变换器的建模和控制方面进行了系统的研究。采用电压模式控制、数字 PID 算法对多相数字 DC/DC 控制器进行了设计。文中先介绍系统结构, 再介绍模糊控制单元的设计过程, 最后给出了 MATLAB 仿真结果。

## 1 DC/DC变换器建模

DC/DC 变换器的控制结构及系统如图 1 所示。电压基准源根据输入的基准电压与反馈的输出电压在

① 基金项目:上海市教育委员会科研创新项目(09YZ214)

收稿时间:2011-05-19;收到修改稿时间:2011-06-20

ADC 模块中相减, 并将差值转化为数字信号。误差数字信号送入数字 PID 模块进行处理, 得到的调节量送至 DPWM, DPWM 输出四相各相差 90 度的 PWM 信号, 这四相 PWM 信号经过 Driver 电路驱动晶闸管, 控制晶闸管的导通、关断时间。最终输出电压与参考电压的偏差在 ADC 的最小精度内, 此时, ADC 输出为 0, 系统稳定。

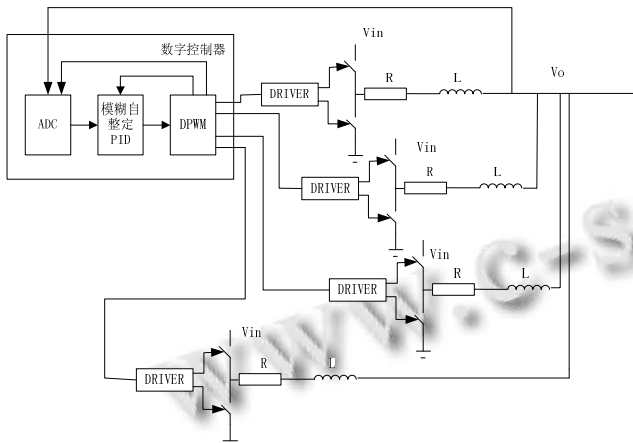


图 1 DC/DC 变换器的系统结构

图 2 为系统的等效框图。多相结构可以等效为单相结构, 等效的电感为各相电感的并联, 等效的串联电阻为各相等效电阻的并联。 $G_0(s)$  为控制信号  $V(s)$  到反馈信号  $B(s)$  之间的传递函数;  $G_{vd}(s)$  为 DC/DC 变换器的占空比  $\hat{d}(s)$  至输出  $\hat{v}_0(s)$  的传递函数;  $G_m(s)$  为 PWM 脉宽调制器的传递函数;  $H(s)$  表示反馈分压网络的传递函数;  $G_c(s)$  是误差  $B(s)$  至控制量  $V_c(s)$  的传递函数, 且为待设计的补偿网络的传递函数。

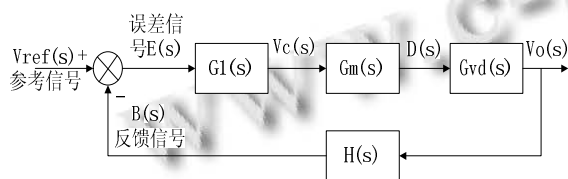


图 2 DC/DC 变换器闭环系统框图

其回路增益函数为:

$$G(s)H(s) = G_c(s)G_m(s)G_{vd}(s)H(s) = G_c(s)G_0(s)H(s) \quad (1)$$

本设计的 DC/DC 变换器系统的参数为: 输入电压  $V_g=48V$ , 输出电压  $V_0=12V$ , 输出负载  $R=0.6\Omega$ , 输出滤波电感  $L=60\mu H$ , 电容值  $C=4000\mu F$ , 开关频率  $f_s=40kHz$ , 即开关周期  $T=25\mu s$ 。PWM 调制器中锯齿波幅值为 2.5V。

工作占空比  $D = V_0 / V_g = 12 / 48 = 0.25$ , Buck 变换器占空比至输出的传递函数  $G_0(s)$  :

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{V}_0(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_0}{D} \frac{1}{1 + s \frac{L}{R} + s^2 LC} = \frac{48}{1 + 1 \times 10^{-4} s + 2.4 \times 10^{-7} s^2} \quad (2)$$

原始回路增益函数:

$$G_0(s) = G_m(s)G_{vd}(s) = \frac{V_0}{DV_m} \frac{1}{1 + s \frac{L}{R} + s^2 LC} = \frac{19.2}{1 + 1 \times 10^{-4} s + 2.4 \times 10^{-7} s^2} \quad (3)$$

## 2 控制器设计

常规 PID 调节器大量用于工业过程控制, 并取得了较好的控制效果。但由于常规 PID 调节器不具有在线整定  $K_p, K_i, K_d$  的功能, 致使其不能满足在不同 E 及 EC 下系统对 PID 参数的自整定要求, 从而会影响其控制效果。因此, 采用参数自整定的模糊-PID 控制会对系统的性能带来一定的提高。

参数自整定模糊-PID 控制系统原理框图如图 3 所示, 3 个二维模糊控制器分别用于实现 PID 控制器的参数  $K_p, K_i$  和  $K_d$  的调节。其控制原理是: 根据当前的偏差  $e$  和偏差的微分  $ec$ , 将 3 个模糊控制器 FC1、FC2 和 FC3 分别进行模糊化、模糊逻辑推理、解模糊化等一系列操作, 最后得到当前 PID 控制器参数的调节量。

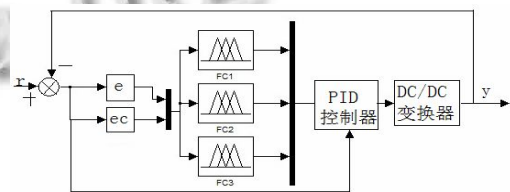


图 3 参数自整定模糊-PID 控制原理图

选定模糊控制器 FC1、FC2 和 FC3 的输入量作为控制系统偏差及偏差的微分, 输入量分别为 PID 控制器的比例系数  $K_p$  的调节量  $dK_p$ 、积分系数  $K_i$  的调节量  $dK_i$  和微分系数的  $K_d$  的调节量  $dK_d$ 。

模糊控制器 FC1、FC2 和 FC3 的输入模糊语言变量均取为 E (偏差的模糊语言变量) 和 EC (偏差微分的模糊语言变量), FC1、FC2 和 FC3 的输入模糊语言变量分别取  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$  和  $\Delta K_d$ 。

将变量 E、EC、deltaKp、deltaKi 和 deltaKd 的语言值设定为 7 个, 即{负大(NB), 负中(NM), 负小(NS), 零(Z), 正小(PS), 正中(PM), 正大(PB)}。其模糊控制规律如表 1 所示:

表 1 PID 系数模糊调节规律  
(1) 比例系数模糊调节规则表

deltaKp		E						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
EC	PB	Z	Z	NM	PS	PM	PB	PB
	PM	PS	Z	NS	NM	PS	PB	PB
	PS	PM	PS	Z	Z	Z	PM	PB
	Z	PB	PS	Z	Z	Z	PM	PB
	NS	PB	PS	Z	Z	Z	PS	PB
	NM	PB	PM	PS	NM	NS	Z	PS
	NB	PB	PM	PM	NB	NM	Z	Z

(2) 积分系数模糊调节规则表

deltaKi		E						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
EC	PB	Z	Z	NM	NM	PB	PB	PB
	PM	PS	Z	NS	NS	PM	PB	PB
	PS	PM	PS	Z	Z	PS	PM	PB
	Z	PB	PM	PS	Z	PS	PM	PB
	NS	PB	PB	PS	Z	Z	PS	PB
	NM	PB	PB	PM	NS	NS	Z	PS
	NB	PB	PB	PB	NM	NM	Z	Z

(3) 微分系数模糊调节规则表

deltaKd		E						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
EC	PB	NB	Z	PB	PB	PB	PM	PB
	PM	NB	NS	PM	PM	PM	PS	PM
	PS	NB	NB	PS	PS	PS	Z	PS
	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	NS	PS	Z	PS	PS	PS	NM	NB
	NM	PM	PS	PM	PM	PM	NS	NB
	NB	PB	PM	PB	PB	PB	Z	NB

### 3 控制系统仿真

在 MATLAB 的 Simulink 环境下, 建立参数自整定模糊-PID 控制系统及 PID 控制仿真模型如图 4 所示。在常规 PID 控制下系统的阶跃响应如图 5 所示, 在参数自整定模糊-PID 控制下系统的阶跃响应如图 6 所示。

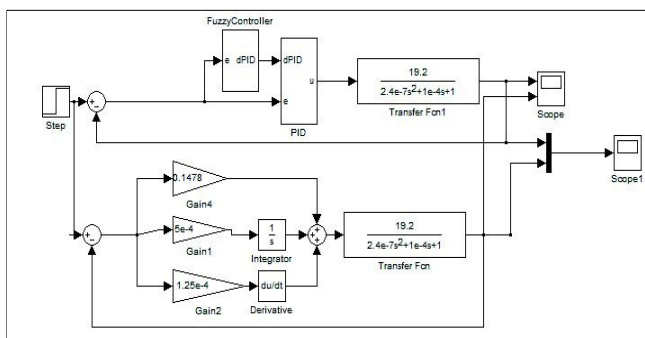


图 4 参数自整定模糊-PID 控制系统仿真模型

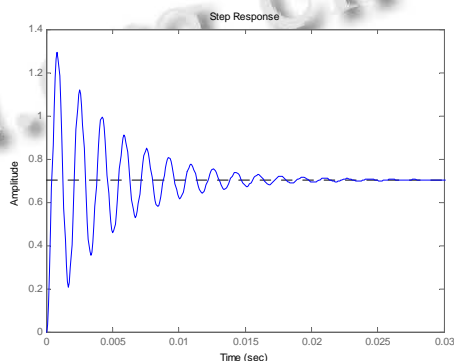


图 5 常规 PID 控制下单位阶跃响应曲线

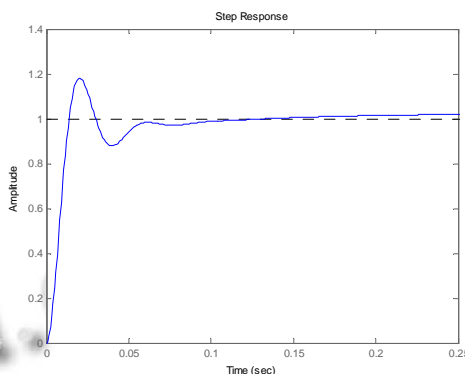


图 6 参数自整定模糊-PID 控制下单位阶跃响应曲线

对比图 5, 图 6 的控制系统单位阶跃响应曲线可以看出, 参数自整定模糊 PID 控制超调量小于普通 PID 控制, 且在第二周期就达到了稳定, 具有良好的动态和稳态性能。

### 4 结语

本文介绍了一种数字 DC / DC 控制器的设计方法。通过仿真结果表明, 该控制系统具有较好的稳定性和动态性能。仿真结果充分说明了整个设计方法与流程的正确性, 并为进一步研究与改进提供了方向。

(下转第 71 页)

- 7 De Boor C. A Practical Guide to Splines.114–115. Springer-Verlag, 1978.
- 8 Holland JH. Adaptation in Natural and Artificial System, 1975.
- 9 Lawrence D. Genetic Algorithm and Simulated Annealing, 1987.
- 10 Goldberg DE. Genetic Algorithms—in Search, Optimization and Machine Learning, 1985.
- 11 Tu J, Yang S. Genetic Algorithm Based Path Planning for a Mobile Robot. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, Sept. 2003.1221–1226.
- 12 李克东,刘国栋,任华.基于蚁群算法的机器人路径规划.微计算机信息,2009,25.
- 13 朱庆保.复杂环境下的机器人路径规划蚂蚁算法.自动化学报,2006,32(4):586–593.
- 14 庄晓东,孟庆春,高云,等.复杂环境中基于人工势场优化算法的最优路径规划.机器人,2003,25(6):531–535.
- 15 岳富占,崔平远,崔祐涛.基于改进蚁群算法的星球探测机器人路径规划技术.控制与决策,2006,21(12):1438–1449.
- 16 陈雄,袁杨.一种机器人路径规划的蚁群算法.系统工程与电子技术,2008,30(5):952–955.
- 17 Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics–B,1996, 26(2):29–41.
- 18 段海滨,王道波,朱家强,等.蚁群算法理论及应用研究的进展.控制与决策,2004,19(12):1321–1326.
- 19 Tian LF, Collins C. An Effective Robot Trajectory Planning Method using a Genetic Algorithm. Mechatronics, 2004,14(5):455–470.
- 20 Namgung I, Duffy J. Two Dimensional Collision-Free Path Planning using Linear Parametric Curve. Journal of Robotic Systems, 1998,14(9):659–673.
- 21 Jolly KG, Sreerama R, Vijayakumar KR. A Bezier Curve Based Path Planning in a Multi-Agent Robot Soccer System without Violating the Acceleration Limits. Robotics and Autonomous Systems, 2009,57(1):23–33.
- 22 Namgung I. A global Collision-Free Path Planning using Parametric Parabola Through Geometry Mapping of Obstacles in Robot Work Space. Journal of Mechanical Science and Technology,1996,10(4):443–449.
- 23 Magid E, Keren D, Rivlin E, Yavneh I. Spline-Based Robot Navigation. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China,Oct. 2006. 2296–2301.
- 24 Eren H, Chun CF, Evans J. Implementation of the Spline Method for Mobile Robot Path Control. Proceedings of the 16th, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 1999,2:739–744.
- 25 张帆,周庆敏.基于遗传算法的移动机器人路径规划仿真.微计算机信息,2008,24.
- 26 况菲,王耀南.基于混合人工势场—遗传算法的移动机器人路径规划仿真研究.系统仿真学,2006,18.
- 27 陈华华,杜歆,顾伟康.基于神经网络和遗传算法的机器人动态避障路径规划.传感技术学报,2004,17.

(上接第 58 页)

### 参考文献

- 1 毛盾,郭丙君.基于模糊 PID 控制的 Cuk 变换器研究.自动化仪器与仪表,2010,3.
- 2 范晓聪,方建安.基于模糊 PID 控制的光伏并网发电系统设计.机电工程 2010.9.9.
- 3 嵇保健,赵健锋.DC/DC 变换器数字控制方法研究.电力电子技术,2010,4.4.
- 4 梁琬.PWM/PFM 型降压 DC–DC 电压变换器的研究与设计[硕士学位论文].西安:西安电子科技大学,2010.
- 5 夏顺贵,等.DC/DC 变换器的模糊控制方法研究[硕士学位论文].无锡:江南大学,2008.
- 6 Prodie A, Maksimovic D. Mixed-signal Simulation of Digitally Controlled Switching Converters. IEEE Workshop on Computers in Power Electronics,2002,(3–4).
- 7 蔡自兴,等.模糊控制原理及应用.北京:清华大学出版社,2007.
- 8 刘曙光,等.模糊控制技术.北京:中国纺织出版社,2001.
- 9 Peterehev AV. Digital Pulse-width Modulation Control in Power Electronic Circuit:Theory and Applications. Berkeley, USA, University of California, Berkeley, 2005.
- 10 邱涛.基于 DSP 的双 PWM 变频调速系统研究[硕士学位论文].广州:广东工业大学,2006.
- 11 张强.风力发电并网变流器工程问题研究[博士学位论文].合肥:合肥工业大学,2006.
- 12 许颇,张崇巍,张兴.三相光伏并网逆变器控制及其反孤岛效应.合肥工业大学学报,2006.9. 9.
- 13 侯庆明.中小型永磁直驱风力发电控制系统的设计和仿真[硕士学位论文].沈阳:沈阳工业大学,2006.