

基于模糊-PID 复合控制的 DC/DC 变换器研究

王亚芳^{1,2}, 陈瑞祥², 秦 岭²

(1. 南通大学杏林学院, 江苏 南通 226007; 2. 南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: DC/DC 功率变换器是一种强非线性系统, 传统的 PID 控制算法简单, 设计容易, 但依赖于其线性化小信号模型, 且当功率变换器的参数发生变化时, 其参数不能兼顾动态性能和静态性能, 影响最终的控制效果. 针对传统 PID 控制器的不足, 结合模糊控制不需要建立被控对象精确数学模型的特点, 以 Buck 变换器为例, 提出一种新的模糊控制和 PID 控制相结合的方法. 当输出的偏差范围较大时, 采用模糊控制提高其动态响应速度; 反之, 切换到 PID 控制以提高其稳态精度. 最后利用 MATLAB 对系统进行仿真验证. 仿真结果表明: 模糊-PID 复合控制器具有响应速度快、超调量小、稳定性好等优点.

关键词: 模糊-PID 复合控制; DC/DC 功率变换器; Buck 变换器; 小信号模型

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1673-2340(2014)03-0026-05

Study of DC/DC Converters Based on Fuzzy-PID Hybrid Control

WANG Yafang^{1,2}, CHEN Ruixiang², QIN Ling²

(1. Nantong University Xinglin College, Nantong 226007, China;

2. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: DC/DC power converter is a kind of strongly nonlinear system. The design of traditional PID controller is based on precise linearization model, known for its simple algorithm and easy design. When the parameters of the power converter change, they can do well in dynamic performance and static performance, which affect the final control effect. Taking the Buck converter as an example, a fuzzy-PID controller was proposed to address the above disadvantages while the fuzzy control doesn't need the establishment of accurate mathematical model of controlled object. The fuzzy control was used at large error to improve the dynamic response speed. On the other hand, the PID control was switched to improve the steady-state accuracy. The converter was verified in the Matlab software and the simulation results showed that the proposed fuzzy-PID controller has good characteristics including faster response, smaller overshoots and better stability.

Key words: fuzzy-PID hybrid control; DC/DC power converter; Buck converter; small signal model

近年来, 随着新能源技术的快速发展, DC/DC 功率变换器在新能源汽车等领域得到了广泛的应

用^[1-3]. DC/DC 功率变换器是一种强非线性系统, 如何使该变换器系统能够更稳、更快、更准的工作是

收稿日期: 2014-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51207075); 南通大学杏林学院科研基金项目(2012K111)

作者简介: 王亚芳(1981—), 女, 讲师, 主要研究方向为功率电子变换、电能质量管理. E-mail: wang.yf@ntu.edu.cn

大家研究的热点问题^[4-6].

传统的 PID 控制算法简单、稳定性好、可靠性高且易于设计, 然而, PID 控制严格基于对象的数学模型, 当功率变换器的参数发生变化时, 其参数不能兼顾动态性能和静态性能, 影响最终的控制效果^[7-8]. 为此, 传统的 PID 控制已经难以满足 DC/DC 变换器这种强非线性系统不断提高的性能指标要求.

模糊控制是建立在人类思维具有模糊逻辑特性的基础上的. 其设计不依赖于被控系统的精确模型, 具有鲁棒性好、自适应能力强等优点, 已被广泛应用于各种具有高度时变和非线性的复杂系统控制中, 但稳态精度较差^[9-10].

为了提高变换器系统的性能, 本文将 PID 控制与模糊控制相结合, 以 Buck 变换器为例进行仿真验证. 仿真结果表明: DC/DC 变换器采用模糊-PID 复合控制方式后, 其控制精度和动态性能大大提高.

1 Buck 变换器小信号模型

图 1 为典型的 Buck 变换器电压闭环控制原理框图. 其中, S 为开关器件, V_D 为二极管, U_{in} 为输入电压, U_o 为输出电压, U_{ref} 为参考电压, $H(s)$ 、 $G_c(s)$ 、 $G_m(s)$ 分别为采样网络、补偿网络和 PWM 调制器的传递函数, $d(s)$ 为变换器的占空比, 在某一稳定工作点的占空比为 D .

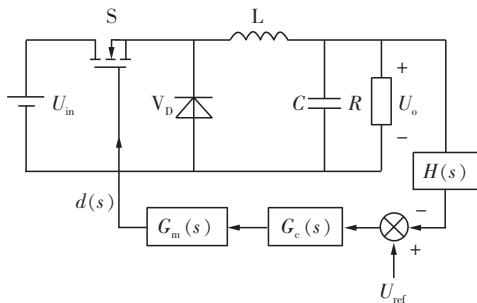


图 1 Buck 变换器电压闭环控制原理框图

当补偿网络采用线性 PID 控制器时, 需对 Buck 变换器进行小信号建模. 假设变换器的元器件均为理想元器件, 利用状态空间平均法^[11], 得到 Buck 变换器的小信号模型为

$$G_{ud}(s) = \frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{d}(s)} \Big|_{\hat{u}_m(s)=0} = \frac{U_o}{D} \frac{1}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (1)$$

由式(1)可知, Buck 变换器小信号模型传递函数为占空比 D 的非线性函数, 当变换器参数发生变化时, 系统的传递函数也随之变化. 因此, 必须设计合适的调节器来兼顾系统的稳定性和动态性.

2 模糊-PID 复合控制

模糊-PID 复合控制除了具有 PID 控制的动态跟踪品质和稳态精度外, 还能充分发挥模糊控制鲁棒性强、动态响应好、上升时间快、超调小等优点. 为此, 对强非线性和滞后的 DC/DC 变换器, 采用模糊-PID 复合控制可以大大提高系统的控制精度和动态性能.

图 2 给出了基于模糊-PID 复合控制器的 Buck 变换器原理框图. 图中, 在 2 个控制器 (PID 控制器、模糊控制器) 与控制对象 (Buck 变换器) 之间设置了一个切换开关, 可以通过偏差 e 与设定的切换值比较来决定 2 种控制方式的选择, 产生 Buck 变换器工作占空比, 得到稳定的直流输出电压. 当 $e \geq$ 切换值, 即在大偏差范围内, 认为系统运行在动态过程, 采用模糊控制方式来提高其动态响应速度; 反之, 当 $e <$ 切换值, 即在小偏差范围内, 认为系统进入了稳态, 切换为 PID 控制方式以发挥其稳态精度高的优势. 其中, 切换值可以通过反复试验整定得到.

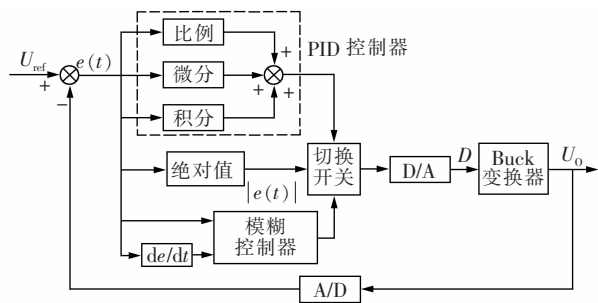


图 2 基于模糊-PID 复合控制的 Buck 变换器原理框图

2.1 PID 控制器的设计

假定 Buck 变换器参数如下: $U_{in} = 72 \text{ V}$, $U_o = 24 \text{ V}$, $R = 4.8 \ \Omega$, $L = 0.5 \text{ mH}$, $C = 470 \ \mu\text{F}$, 开关频率为 $f_s = 50 \text{ kHz}$. PWM 调节器中锯齿波幅值,

$V_m = 2.5$, 采样环节传递函数 $H(s) = 0.2$.

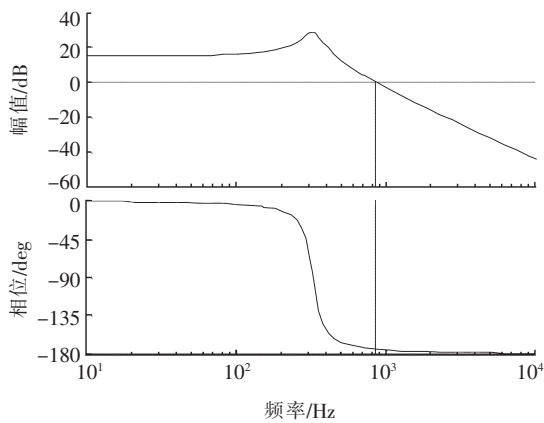
PWM 调节器传递函数 $G_m(s)$ 可以视为 1 个比例环节, 即

$$G_m(s) = \frac{\hat{d}(s)}{\hat{V}_c(s)} = \frac{1}{V_m} \quad (2)$$

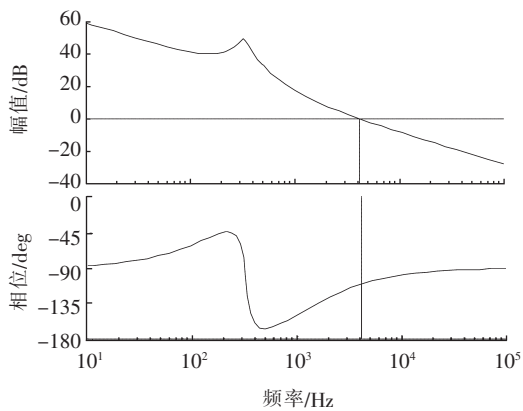
不含调节器的原始回路开环传递函数为

$$G_o(s) = G_m(s)G_{ud}(s)H(s) \quad (3)$$

结合式(1)~式(3), 代入已知数据, 画出 Buck 变换器额定工作条件下的开环频率特性, 如图 3a 所示.



a 开环频率特性



b 补偿后频率特性

图 3 Buck 变换器频率特性曲线图

由图 3a 可以看出: 控制对象穿越频率为 $f_c = 852 \text{ Hz}$, 相位裕量 $\varphi_m = 5.33^\circ$. 虽然系统是稳定的, 但存在较大的输出超调量和较长的调节时间. 在实际系统中, 要求系统有一定的稳定裕量以保持系统的鲁棒性, 同时使系统获得较好的暂态特性^[12]. 因此, 需要加入补偿网络 $G_c(s)$, 提高相位裕量和增

益裕量.

采用 PID 调节器进行补偿, 补偿网络 $G_c(s)$ 为

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4)$$

经分析与设计, 最终可得: $K_p = 10$, $K_i = 10\,000$, $K_d = 0.001$. 代入式(4)即可得到 PID 控制器的传递函数.

则加入 PID 调节器补偿后开环传递函数为

$$G_o(s) = G_m(s)G_{ud}(s)G_c(s)H(s) \quad (5)$$

代入已知数据, 画出加入 PID 调节器补偿后的开环频率特性, 如图 3b 所示. 可以看出: 系统经过 PID 控制器补偿后, Buck 变换器具有 $\varphi_m = 69.7^\circ$ 的稳定裕度.

2.2 模糊控制器的设计

模糊控制不依赖被控对象的精确模型, 是一种非线性控制, 具体设计流程如下:

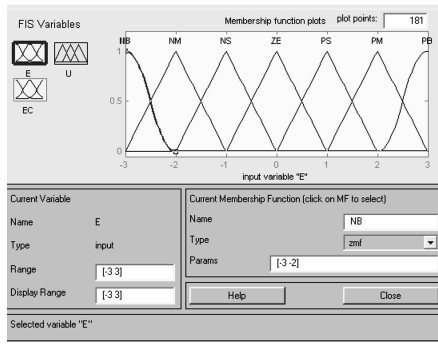
1) 确定模糊变量. 本设计采用双输入单输出的二维模糊控制器. 其中, 2 个输入语言变量分别为输入电压误差 E 和电压误差变化率 EC , 输出语言变量为控制量 U .

2) 输入、输出语言变量语言值的选取及其赋值表. 在输入变量 E , EC 和输出变量 U 的论域上定义 7 个模糊子集, 即负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZE)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB). 将偏差 E 和偏差变化率 EC 量化到 $(-3, 3)$ 的区域内, 量化等级为 $\{-3.0, -2.5, -2.0, -1.5, -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0\}$; 输出 U 量化到 $(0, 1.7)$ 的区域内, 量化等级为 $\{0, 0.14, 0.28, 0.42, 0.56, 0.70, 0.85, 0.99, 1.13, 1.27, 1.41, 1.55, 1.70\}$.

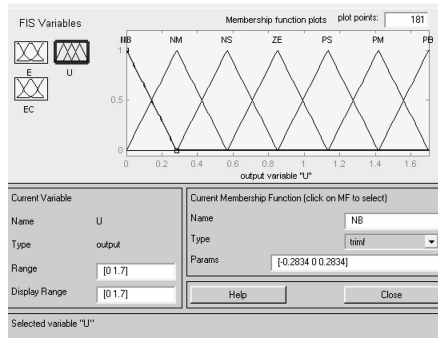
在 MATLAB 命令窗口运行 Fuzzy 函数进入模糊逻辑编辑器, 建立输入变量 E , EC 和输出变量 U 的三角形隶属函数^[13], 如图 4 所示.

3) 建立模糊控制规则. 对于模糊控制器而言, 建立合适的模糊规则尤为重要^[14]. 根据输入变量 E , EC 和输出变量 U , 建立模糊控制率, 第 i 条模糊控制率 R_i 可以用语言描述, 如:

$$R_i: \text{if } E = A_i \text{ and } EC = B_i, \text{ then } U = C_i.$$



a 输入变量 E , EC 的隶属函数



b 输出变量 U 的隶属函数

图 4 输入输出隶属函数

其中, A_i, B_i, C_i 分别为 E, EC 和 U 在各自论域上的模糊子集。

模糊控制器共有 $7 \times 7 = 49$ 条以上形式的 if-then 条件语句^[15], 具体的模糊控制规则表如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

$U \backslash EC$	E	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB	PB

3 仿真研究

为了验证模糊-PID 复合控制的正确性, 按照上述方法在 MATLAB/Simulink 设计模糊控制器, 其模型如图 5 所示。图中, 量化因子 ke, kec 将 e 和 ec 量化为 $(-3, 3)$ 上的模糊量, 经模糊控制规则动态

处理, 成为 $(0, 1.7)$ 上的模糊控制量, 由比例因子 u 将其精确化, 与给定的三角载波交截, 产生 MOSFET 的控制信号。

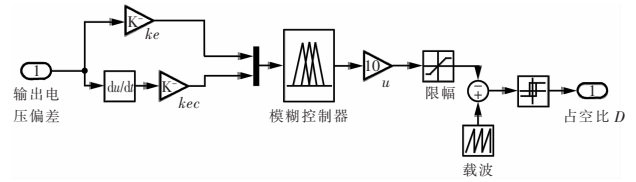


图 5 模糊控制器的模型示意图

将 PID 控制器与模糊控制器结合, 即得模糊-PID 复合控制器, 如图 6 所示。当输出在大偏差范围里 (偏差 e 的绝对值 $>$ 切换值), 采用模糊控制, 以提高其动态响应速度; 当输出在小偏差范围里 (偏差 e 的绝对值 $<$ 切换值), 就切换到 PID 控制, 以提高其稳态精度。

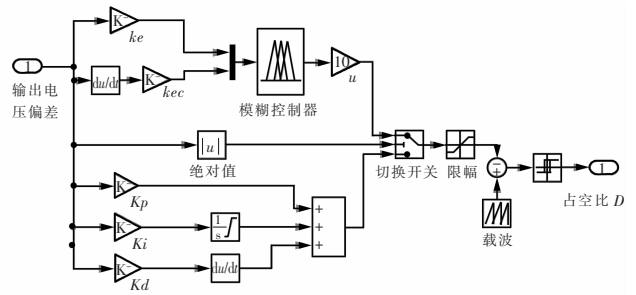


图 6 模糊-PID 复合控制器仿真模型示意图

图 7 给出了常规 PID 控制和模糊-PID 复合控制下 Buck 变换器输出电压的对比曲线。可以看出: 采用模糊-PID 复合控制, 输出电压波形超调量远小于常规 PID 控制时的波形, 且调节时间也小于常规 PID 控制。

图 8 给出了在常规 PID 控制和模糊-PID 复合控制 2 种控制方式下, 在 5 ms 时加入扰动 (负载突变), Buck 变换器输出电压的对比曲线。可以看出, 当负载突变时, 模糊-PID 复合控制较常规 PID 控制动态过程快速且震荡小。

4 结论

本文以 Buck 变换器为例, 介绍了模糊-PID 复合控制器的设计与实现。并运用 MATLAB 软件对 Buck 变换器系统进行了仿真。仿真结果表明: 模糊-PID 复合控制较常规 PID 控制相比, 具有响应时间

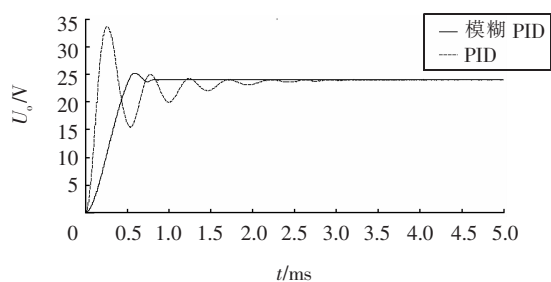


图7 PID控制与模糊-PID复合控制输出电压对比曲线图

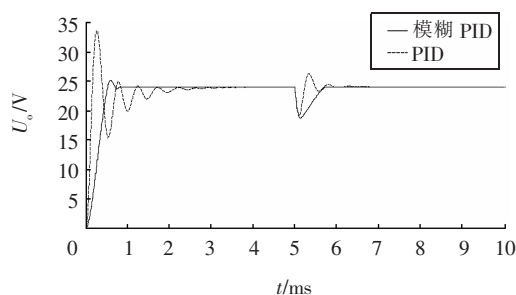


图8 负载突变时PID控制与模糊-PID复合控制输出电压对比曲线图

快、超调量小、调节时间短等优点,更能适应变换器参数的变化,具有更好的动态性能。

参考文献:

- [1] Hegazy O, Van Mierlo J, Lataire P. Analysis, modeling, and implementation of a multidevice interleaved DC/DC converter for fuel cell hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11):4445-4458.
- [2] Galek M, Mondal G. Modular DC/DC converter with improved efficiency for electric vehicles applications[C]//Proceedings of 2014 29th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 16-20, 2014, Fort Worth, TX. New York:IEEE Xplore, 2014: 1958-1965.
- [3] 孙文, 林平, 卢冶, 等. 用于电动汽车的双向 DC/DC 变换器控制设计[J]. 电力电子技术, 2012, 46(7):40-42.
- [4] Ma Hao, Liu Qinwei, Guo Jin. A sliding-mode control scheme for LLC resonant DC/DC converter with fast transient response[C]//Proceedings of 2012 38th Annual conference on IEEE Industrial Electronics Society, October 25-28, 2012, Montreal, QC. New York:IEEE Xplore, 2012: 162-167.
- [5] Zhao Yue, Qiao Wei, Ha Daiyun. A sliding-mode duty-ratio controller for DC/DC buck converters with constant power loads[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(2):1448-1458.
- [6] 张聚, 谢作樟, 杨光利. DC/DC 变换器混合逻辑动态建模与约束优化控制策略[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(4):106-112.
- [7] 朱盈, 朱俊. 多种 PID 控制及其仿真比较[J]. 工业控制计算机, 2010, 23(1):53-54.
- [8] 桑绘绘, 杨奕, 沈彩琳. 基于 PID 控制的 Buck 变换器仿真系统设计[J]. 南通大学学报:自然科学版, 2011, 10(1):24-28.
- [9] 陆超, 袁静. DC/DC 变换器模糊控制和 PID 控制比较研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(6):22-25.
- [10] 黄勤, 丁明亮, 凌睿, 等. 基于模糊 PID 的数字控制在 DC/DC 变换器中的应用[J]. 世界科技研究与发展, 2013, 35(5):620-623.
- [11] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2006:6-20.
- [12] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 6版. 北京:科学出版社, 2013:233-275.
- [13] 杨世勇, 徐国林. 模糊控制与 PID 控制的对比及其复合控制[J]. 自动化技术与应用, 2011, 30(11):21-25.
- [14] 匡经国, 刘跃, 张仁红. 基于新型模糊 PID 控制的 DC-DC 变换器仿真研究[J]. 现代机械, 2012(4):66-70.
- [15] 邢峰, 张让辉, 王敦富, 等. 模糊 PID 控制仿真与实验研究[J]. 机床与液压, 2012, 40(10):147-149.

(责任编辑:仇慧)