

文章编号: 1004-4353(2020)01-0055-06

负载电阻下变论域模糊 PI 控制对 Buck-Boost 变换器的影响

杨铠睿, 祝熙彤, 姜锐函, 徐红梅*

(延边大学 工学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 为提高 Buck-Boost 变换器的控制精度, 提出一种变论域模糊 PI 控制器方法. 该方法利用模糊 PI 控制器来实时调整系统的参数, 并通过引入变论域解决输入量过大或过小时控制器的参数无法自适应的问题. Matlab/Simulink 仿真实验结果表明, 本文提出的变论域模糊 PI 控制方法在控制精度和响应速度方面均优于传统 PI 控制和模糊 PI 控制方法, 因此本文方法对提高 Buck-Boost 变换器系统的稳定性具有很好的参考价值.

关键词: Buck-Boost 变换器; 变论域; 模糊 PI 控制; 电阻参数; Matlab/Simulink

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Analysis of the influence of resistance change on fuzzy PI control in variational domain of Buck-Boost converter

YANG Kairui, ZHU Xitong, JIANG Ruihan, XU Hongmei*

(Engineering College, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: In order to improve the control accuracy of buck-boost converter, a fuzzy PI controller method is proposed. This method uses the fuzzy PI controller to adjust the system parameters in real time, and introduces the variable theory domain to solve the problem that the parameters of the controller can not be adaptive if the input is too large or too small. Matlab/Simulink simulation results show that the proposed fuzzy PI control method is better than the traditional PI control and fuzzy PI control methods in terms of control accuracy and response speed. So the method to improve the stability of the Buck-Boost converter system has the very good reference value.

Keywords: Buck-Boost converter; variable universe; fuzzy PI control; resistance parameters; Matlab/Simulink

0 引言

Buck-Boost 变换器因具有升压和降压功能, 被广泛应用于照明设备、新能源汽车等领域^[1]. Buck-Boost 变换器属于非最小相位系统, 易受外部环境干扰, 且内部参数变化也会影响其性能, 因此在使用 Buck-Boost 变换器时需引入控制环节来提高系统的稳定性^[2]. 目前, Buck-Boost 变换器多采用线性 PI 控制方法^[3]来提高系统的稳定性, 该方法虽然可以提高系统鲁棒性, 但因实际电路系统均为非线性系统, 因此该 PI 控制方法难以达到最佳控制效果^[4]. 为改善上述问题, 2019 年, 黄梦涛等^[5]将变论域应用在 PID 控制系统中, 结果显示该方法可提高系统的稳态性能. 目前为止, 未有文献报道变论域是否适用

收稿日期: 2020-01-02

* 通信作者: 徐红梅(1975—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为混沌动力学.

基金项目: 延边大学博士启动基金资助项目(602014093); 延边大学 2017 年度国家自然科学基金前期培育专项资助项目(413080016)

于 PI 控制系统. 为此, 本文提出一种变论域模糊 PI 控制器, 并利用 Matlab/Simulink 仿真对比分析负载电阻参数突变时, 传统 PI 控制器、模糊 PI 控制器和变论域模糊 PI 控制器在 Buck-Boost 变换器系统中的控制精度和响应速度, 以此验证变论域模糊 PI 控制器在 Buck-Boost 变换器系统中的控制性能.

1 Buck-Boost 变换器工作原理

Buck-Boost 变换器的电路拓扑结构如图 1 所示. 开关 S 接通时, 二极管 D 截止, 电感 L 储存能量, 电容 C 中的能量为负载 R 供电, 负载两端电压为上负下正; 开关 S 断开时, 二极管 D 导通, 电容 C 储存能量, 电感 L 为负载 R 供电, 负载两端电压为上负下正, 与输入电压极性相反.

在稳态导通状态下, Buck-Boost 电路系统的线性动态方程^[6]为

$$p\hat{x} = A\hat{x} + B\hat{u} + \hat{d}_0(A_1 - A_2)x + \hat{d}_0(B_1 - B_2)U. \quad (1)$$

将式(1) 进行拉氏变换可得

$$x(s) = (sE - A)^{-1} \{ Bu(s) + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U]d_0(s) \}. \quad (2)$$

其中 E 为单位矩阵, $x(s) = \begin{bmatrix} i_L(s) \\ v_C(s) \end{bmatrix}$, $u(s) = \begin{bmatrix} V_S(s) \\ V_D(s) \end{bmatrix}$. 根据 Buck-Boost 变换器的电路拓扑可得系统的状态空间方程为

$$\begin{bmatrix} p(i_L)_{T_s} \\ p(v_C)_{T_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (i_L)_{T_s} \\ (v_C)_{T_s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L} & -\frac{1-D}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ V_D \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由式(2) 和式(3) 可得输出电压 V_O 与占空比 D 的传递函数为

$$\frac{\hat{v}_O(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{-LRI_Ls + (1-D)(V_O + V_S + V_D)R}{LCRs^2 + Ls + (1-D)^2R}. \quad (4)$$

由式(3) 还可得到稳态时流过电感 L 的电流 I_L ($I_L =$

$\frac{v_O}{(1-D)R}$) 和输出电压 V_O ($V_O = \frac{DV_S}{1-D} - V_D$).

由式(4) 可知输出电压与占空比的传递函数存在正实根, 即 S 平面右半平面存在一个零点, 因此可判定 Buck-Boost 变换器系统为非最小相位系统. 为验证 Buck-Boost 变换器系统的稳定性, 利用 Matlab 绘制未进行 PI 控制前的 Buck-Boost 变换器的伯德图, 如图 2 所示. 由图 2 可知变换器系统的相位裕量为 -39.1 dB, 幅值裕量为 -75.8 deg, 由此表明系统是不稳定的, 需引入控制环节. 绘制伯德图时相关参数的设置如表 1 所示.

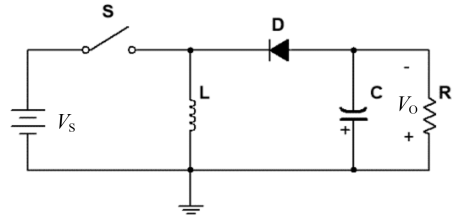


图 1 Buck-Boost 变换器的电路拓扑结构

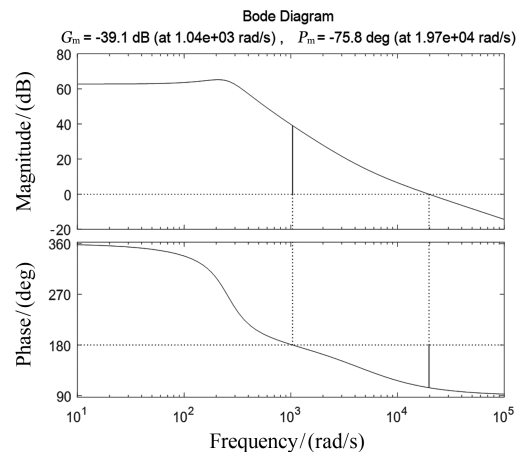


图 2 未进行 PI 控制前的 Buck-Boost 变换器的伯德图

表 1 绘制伯德图时 Buck-Boost 变换器的相关参数

参数	输入电压 V_{IN}/V	开关频率 f/kHz	参考电压 V_{ref}/V	电阻 R/Ω	电容 $C/\mu F$	电感 $L/\mu F$	二极管正向压降 V_D/V
数值	15	100	30	10	470	350	0.7

2 Buck-Boost 变换器的 PI 控制器模型

为改善 Buck-Boost 变换器系统的稳定性,本文采用 PI 控制器对 Buck-Boost 变换器的稳定性能进行补偿.实现 Buck-Boost 变换器的 PI 控制,只需将输出电压反馈至输入端并对其进行串联校正即可^[7].传统 PI 控制器的流程图如图 3 所示.

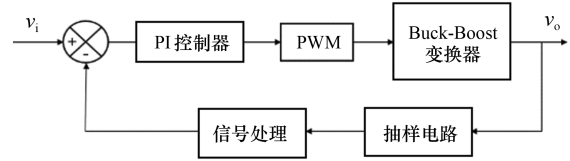


图 3 传统 PI 控制器的流程图

采用 PI 控制器对 Buck-Boost 变换器的稳定性能进行补偿的具体方法为:建立 PI 控制器模型;在 pidTuner 中利用系统的开环传递函数计算 PI 控制系统的比例系数和积分系数;根据仿真结果调整比例系数和积分系数.经仿真实验本文最终选取的比例系数 K_p 为 0.0028,积分系数 K_i 为 0.0046.为检测补偿后的 Buck-Boost 变换器系统的稳定性,绘制补偿后变换器系统的伯德图,如图 4 所示.由图 4 可知,相位裕量为 7.63 dB,幅值裕量为 26.3 deg,这表明系统的稳定性较强.对传统 PI 控制器进行补偿后系统虽然趋于稳定,但因传统 PI 控制器属于线性控制方法,当受到外部干扰时系统仍会变得不稳定^[8],因此需对控制器进行进一步改进.

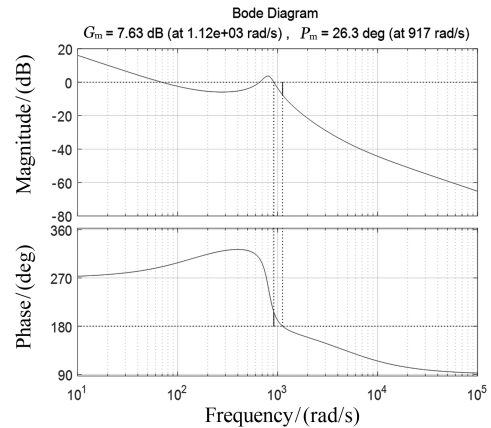


图 4 补偿后 Buck-Boost 变换器的伯德图

3 Buck-Boost 变换器的变论域模糊 PI 控制器模型

模糊控制是一种动态响应特性良好的非线性控制,能够通过实时调整系统参数来提高系统的动态性能^[9],且可不依赖于系统的固定模型^[10].因此本文将模糊控制与 PI 控制结合,以此根据误差来实时调整 PI 控制器的参数,减少外部干扰.模糊控制与 PI 控制结合的模糊 PI 控制器如图 5 所示,图 5 中 e 为输入量误差, ec 为误差率.输入与输出变量采用如图 6 所示高斯隶属度函数进行计算,其中 NB、NM、ZE、PM、PB 分别表示负大、负小、零、正小、正大.模糊 PI 控制器根据上述参数的变化及模糊规则即可得出 K_p 与 K_i 的调整量 ΔK_p 和 ΔK_i ,并以此使系统适应参数变化所带来的影响.

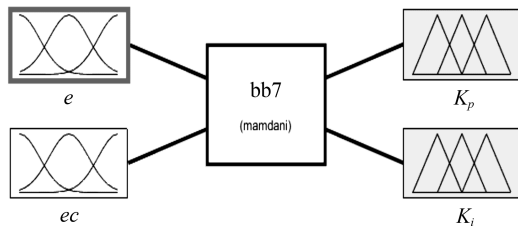


图 5 模糊 PI 控制器示意图

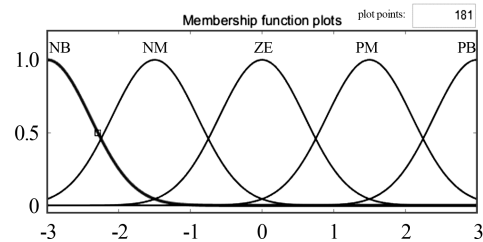


图 6 高斯隶属度函数示意图

模糊 PI 控制器调整后的系统的比例系数 K'_p 和积分系数 K'_i 的计算公式为: $K'_p = K_p + \Delta K_p$, $K'_i = K_i + \Delta K_i$. 其中 K_p 和 K_i 为初始值.由于模糊控制器的模糊论域是固定的,因此当输入量变化过大或过小时模糊控制器就无法进行自适应变化.为此,本文引入变论域,即将变论域与模糊控制相结合来避免因参数突变而带来的控制器无法自适应的问题.变论域模糊 PI 控制器能够在不改变模糊控制规则的情况下利用收缩因子来改变论域范围.因 Buck-Boost 变换器系统对误差和误差灵敏度要求不高,所以本文选用比例型伸缩因子.比例型伸缩因子的表达式^[11]为 $\alpha(x) = \left(\frac{|x|}{E}\right)^\tau + \epsilon$, 其中 τ 是 0 到 1 之间的常

数, ϵ 是很小的正数. 收缩因子 $\alpha(x)$ 应满足条件: ① 对偶性. 在 x 的取值范围内, $\alpha(-x) = \alpha(x)$; ② 避零性. 当 $x = 0$ 时, $\alpha(x)$ 取值 ϵ , ϵ 是很小的正数; ③ 协调性. 在 x 的取值范围内, $|x| \leq \alpha(x)E$.

4 各控制器在负载电阻变化情况下的仿真结果与分析

在 Matlab/Simulink 中建立 Buck-Boost 变换器的电路仿真模型, 并分别利用传统 PI 控制器、模糊 PI 控制器和变论域模糊 PI 控制器对变换器的电路进行控制. 各仿真电路模型如图 7—图 9 所示, 电路的相关参数按表 1 设置.

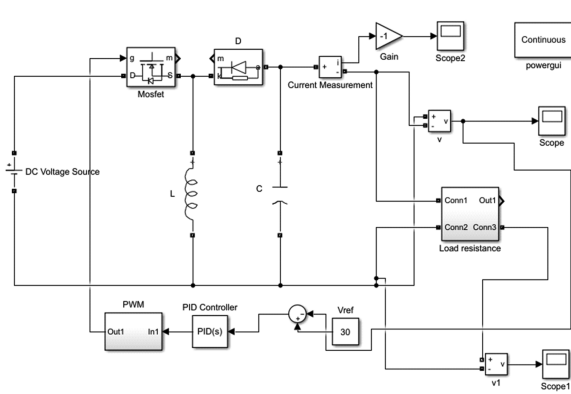


图 7 传统 PI 控制器的仿真电路

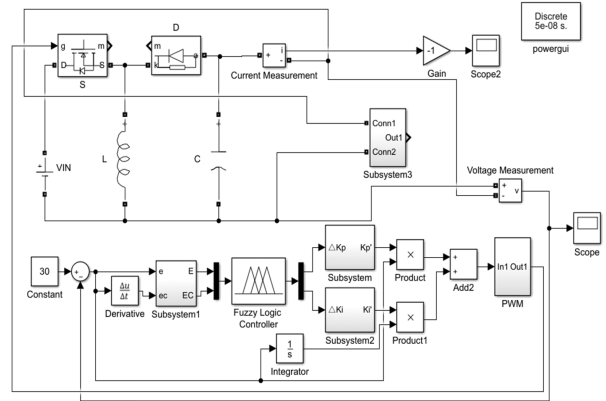


图 8 模糊 PI 控制器的仿真电路

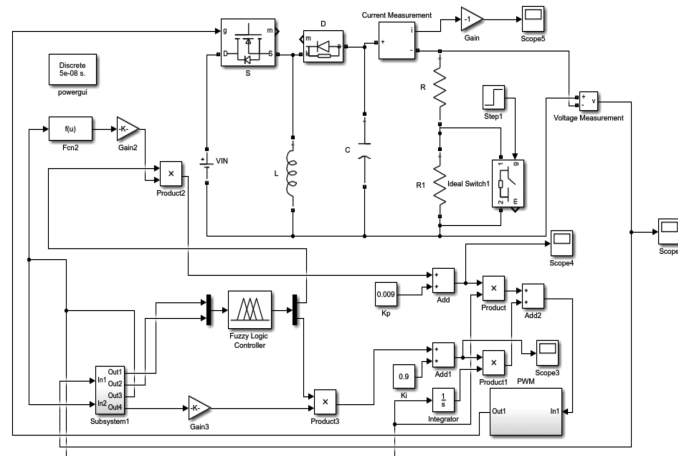


图 9 变论域模糊 PI 控制器的仿真电路

3 种控制器在电阻参数突变前的输出电压波形图如图 10 所示. 图 10 中横坐标为仿真时间, 纵坐标为输出电压. 由图 10 可以看出, 变论域模糊 PI 控制器在系统精度、系统稳定状态和调节时间方面均优于传统 PI 控制器和模糊 PI 控制器.

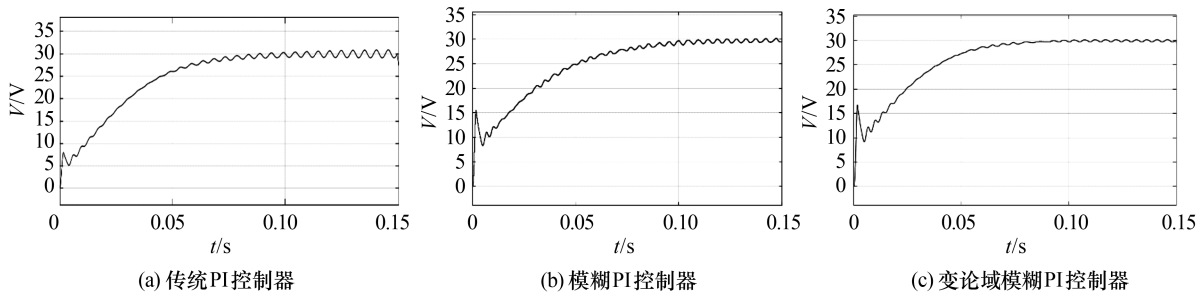


图 10 3 种控制器在负载电阻突变前的输出仿真电压波形

为分析负载电阻参数突变时各控制器的控制效果,在仿真时间达到 0.15 s 时对负载电阻参数进行减小和增大.当负载电阻参数由 $10\ \Omega$ 突然减小到 $5\ \Omega$ 时,各控制器的输出电压波形图如图 11 所示.由图 11 可以看出,参数发生突变后:(a)传统 PI 控制器的输出电压波形在调节时间达到 0.110 s 后趋于稳定的等幅振荡状态,稳态误差为 0.86 V;(b)模糊 PI 控制器的输出电压波形在调节时间达到 0.070 s 后呈现稳定的等幅振荡状态,稳态误差为 0.62 V;(c)变论域模糊 PI 控制器的输出电压波形在调节时间达到 0.046 s 后达到稳定的等幅振荡状态,稳态误差为 0.27 V.由此可知变论域模糊 PI 控制在负载电阻参数突然减小时其响应速度和控制精度均优于传统 PI 控制和模糊 PI 控制.

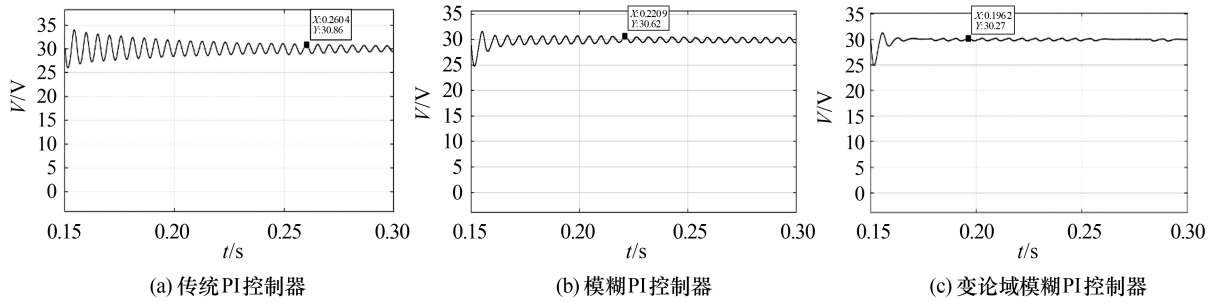


图 11 3 种控制器在负载电阻由 $10\ \Omega$ 突变为 $5\ \Omega$ 时的仿真输出电压波形

当负载电阻参数由 $10\ \Omega$ 突然增大到 $15\ \Omega$ 时,模糊 PI 控制器和变论域模糊 PI 控制器的输出电压波形如图 12 所示.由图 12 可以看出,模糊 PI 控制器的输出电压波形在调节时间达到 0.053 s 后趋于等幅振荡状态,稳态误差为 0.33 V;变论域模糊 PI 控制器的输出电压波形在调节时间达到 0.037 s 后稳定在等幅振荡状态,稳态误差为 0.24 V.由此表明变论域模糊 PI 控制在负载参数突然增大时其控制精度和响应速度均优于模糊 PI 控制.

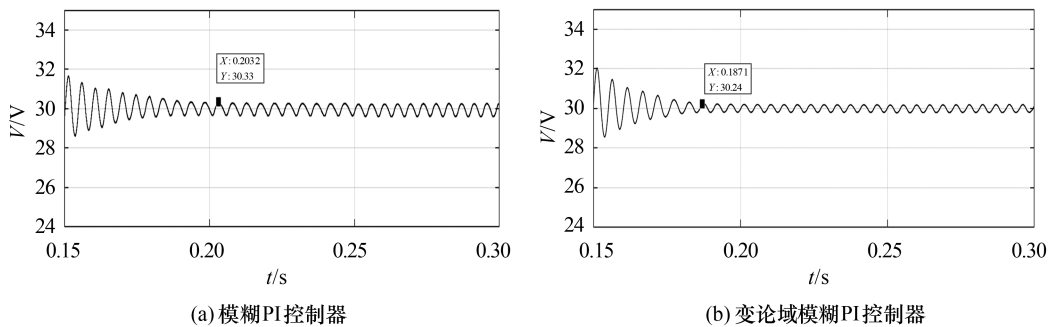


图 12 2 种控制器在负载电阻由 $10\ \Omega$ 突变为 $15\ \Omega$ 时的仿真输出电压波形

5 各控制器在输入电压突降时的仿真结果与分析

为验证负载电阻参数不变,输入电压突降时变论域模糊 PI 控制器的控制性能,在负载电阻参数为 $10\ \Omega$ 和仿真时间为 0.15 s 的条件下,将输入电压从 20 V 突降为 15 V,其仿真结果如图 13 所示.由图 13 可知,当输入电压从 20 V 突降为 15 V 时,传统 PI 控制器的输出电压波形在调节时间达到 0.083 s 后达到等幅振荡状态,稳态误差为 3.32 V;模糊 PI 控制器的输出电压波形在调节时间达到 0.069 s 后达到稳定状态,稳态误差为 0.23 V;变论域模糊 PI 控制器的输出电压波形在调节时间达到 0.056 s 后达到稳定状态,稳态误差为 0.12 V.由此可知,当负载不变、输入电压突然减小时,变论域模糊 PI 控制器的控制精度和响应速度均优于传统 PI 控制器和模糊 PI 控制器.

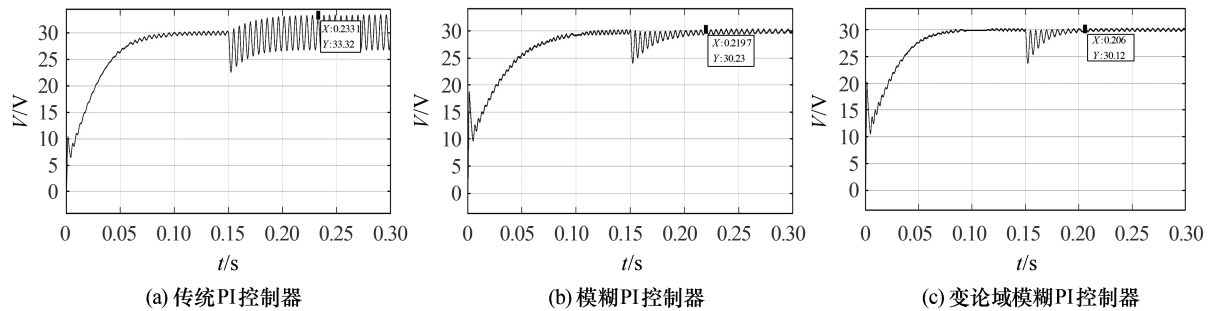


图 13 3 种控制器在输入电压突降时的仿真输出电压波形

6 结论

本文在 Buck-Boost 变换器负载电阻参数变化的情况下,利用 Matlab/Simulink 仿真实验分别对 PI 控制器、模糊 PI 控制器和变论域模糊 PI 控制器的性能进行了研究. 研究表明,变论域模糊 PI 控制的控制精度和响应速度均显著优于其他 2 种控制器. 另外,在负载电阻参数不变,突降负载电压时,变论域模糊 PI 控制器的控制精度和响应速度也优于传统 PI 控制器和模糊 PI 控制器. 本文结果对改善 Buck-Boost 变换器系统的稳定性具有很好的参考价值. 负载电阻参数不变,突增负载电压时变论域模糊 PI 控制器的控制效果将做后续报道.

参考文献:

- [1] 雷志方,汪飞,高艳霞,等. 面向直流微网的双向 DC-DC 变换器研究现状和应用分析[J]. 电工技术学报,2016,31(22):137-147.
- [2] 李国志,任小洪,任兵. 模糊 PI 复合控制器在永磁同步电机中的应用[J]. 机床与液压,2013,41(9):51-53.
- [3] 杨超,苑红,余岱玲,等. 变论域模糊 PID 控制在改善 DC-DC 变换器非线性非最小相位系统的性能研究[J]. 电工电能新技术,2017,36(1):30-37.
- [4] 孙方雅,祝熙彤,李泽宇,等. 电压模式 Buck 变换器典型工作状态分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2019,17(3):469-473.
- [5] 黄梦涛,李平. 电子轴凹印系统的变论域模糊 PID 控制研究[J]. 电气传动,2019,49(12):77-81.
- [6] 张勇敢,宋树祥,廖志贤,等. 电动汽车新型光伏充电桩 DC-DC 变换器的研究与设计[J]. 广西大学学报(自然科学版),2018,43(5):1765-1776.
- [7] 林志超,韦园清,罗步升,等. 基于变论域模糊 PI 的 SVG 无功补偿新型控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(4):58-62.
- [8] 张鹏,孙树亮,倪振松. 改进型 PI 控制在纯电动汽车调速系统上的应用[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2018,32(3):21-26.
- [9] 崔业兵,左月飞,桂亮,等. 基于复合 PI 控制器的永磁伺服电机电流控制[J]. 电机与控制学报,2019,23(4):105-110.
- [10] 时培成,徐增伟,王锁,等. 变论域自适应模糊 PID 主动悬架控制研究[J]. 机械科学与技术,2019,38(5):713-720.
- [11] 于今,陈华,刘骏豪. 液压机械无级变速器的变论域模糊 PID 速比跟踪控制[J]. 中国机械工程,2019,30(10):1226-1232.