

改进型预测函数在并联 DC-DC 中的应用

伍孟涛,王海生,闫小宇,刘 彬,葛芦生

安徽工业大学 电气与信息工程学院,安徽 马鞍山 243000

摘要:针对并联 DC-DC 开关电源主从模块电流分配精度不均以及面对负载扰动下动态性能、稳定较差等问题,提出一种基于主从均流的并联方法和将分数阶 PID 与预测函数(PFC)相结合的控制策略。对预测函数算法进行改进:首先,利用 v 步离散方法对 BUCK 变换器进行分段仿射建模(PWA);其次,在保留预测函数控制基础上,引入分数阶 PID 思想,得到一个新的二次型指标函数;最后,将其与传统 PI 控制输出效果作对比,利用 MATLAB 仿真去检验分数阶预测函数(FOPID-PFC)控制策略的可行性和可靠性。仿真结果表明:提出的分数阶 PID 预测函数,在均流精度上比传统 PI 高,在面对负载加、减的情况下,超调量和调节时间分别降低了 234 mv、170 μ s 和 221 mv、210 μ s,由此验证了 BUCK 变换器并联系统中,基于主从均流的分数阶预测函数控制策略总体性能优于传统 PI 控制,且主从模块的电流分配精度也满足预期设想。

关键词:并联控制;主从均流;BUCK 变换器;分数阶预测函数;均流精度;动态响应

中图分类号:TN98 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0001.013

Application of Improved Predictive Function in Parallel DC-DC

WU Mengtao, WANG Haisheng, YAN Xiaoyu, LIU Bin, GE Lusheng

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Anhui Ma' anshan 243000, China

Abstract: For the problems of uneven accuracy of current distribution between master and slave modules in parallel DC-DC switching power supplies and poor dynamic performance and stability in the face of load disturbances, a control strategy based on the parallel connection of master-slave current sharing was proposed, combining fractional-order PID with predictive function control (PFC). The prediction function algorithm was improved from the following aspects. Firstly, a piece-wise affine modeling (PWA) of BUCK converter was carried out by using v -step discrete method. Secondly, a new quadratic indicator function was obtained by introducing the idea of fractional-order PID based on the retained predictive function control. Finally, the output effect was compared with that of the conventional PI control. MATLAB simulation was used to test the feasibility and reliability of the fractional order prediction function (FOPID-PFC) control strategy. The simulation results showed that the proposed fractional-order PID prediction function is better than the traditional PI in the accuracy of current sharing, and the overshoot and regulation time were reduced by 234mv, 170 μ s and 221mv, 210 μ s, respectively, in the case of load addition and load reduction. Therefore, it is verified that the overall performance of the fractional-order prediction function control strategy based on master-slave current sharing is superior to the traditional PI control in BUCK converter parallel system, and the current allocation accuracy of master-slave module also meets the expected assumption.

Keywords: parallel control; master-slave current sharing; BUCK converter; fractional-order prediction function; current sharing accuracy; dynamic response

收稿日期:2021-03-05 **修回日期:**2021-05-18 **文章编号:**1672-058X(2023)01-0078-07

基金项目:国家自然科学基金项目(61873002).

作者简介:伍孟涛(1996—),男,安徽芜湖人,硕士研究生,从事电力电子器件的研究.

通讯作者:葛芦生(1962—),男,安徽潜山人,教授,从事电力电子器件、新能源等研究.

引用格式:伍孟涛,王海生,闫小宇,等.改进型预测函数在并联 DC-DC 中的应用[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(1):78—84.

WU Mengtao, WANG Haisheng, YAN Xiaoyu, et al. Application of improved predictive function in parallel DC-DC[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(1): 78—84.

1 引言

DC-DC 变换器是目前应用最多的开关电源之一,可以将直流输入电压转变为直流输出电压^[1]。在航天及军事领域中,为了能够在低成本、可靠性高的基础上,具有大容量、大功率的优点,并联电源技术就显得格外重要。因此研究开关电源的并联均流对于提高电源系统的稳定运行,具有一定的意义。

本文选用较为典型的 BUCK 变换器,研究其在并联状态下的动态性能、均流效果与鲁棒性。由于 BUCK 变换器属于强非线性系统,难以得到其准确的模型,且一旦受到外部干扰,将会让变换器产生非线性变化,传统的 PI 控制并不能满足实际需要^[2]。1695 年,Leibniz 第一次提出关于微分阶次从整数阶推广到非整数阶,随后就有国外学者将整数阶的 PID 发展到分数阶领域^[3]。FOPID 与传统 PID 相比多了两个可以调节的指数,让参数的整定变得更加灵活,使得控制器的动态性能大幅提升,但是针对阶数改变引入的两个参数的整定和优化问题并没有提出一个有效的解决方案。文献[4]提出将预测函数控制(PFC)成功应用到机器人的控制上,很大程度解决了抗干扰能力差和稳态下的误差问题,却忽视了预测函数控制的动态响应较差,没有进一步研究与传统 PID 结合的控制策略。预测函数控制(PFC)属于 MPC 的一种,它与 MPC 相比的优点是鲁棒性强、在线计算量较低和跟踪能力强,另外,PFC 的核心思想是注重控制输入的结构化^[5],它将控制输入用基函数的线性组合代替,使整个控制过程的在线计算量大大减少。文献[6]在预测函数控制算法的目标函数中引入分数阶 PI 算法,二者结合得到了分数阶 PI 预测函数控制算法,并将其应用到逆变器中,通过仿真波形和实验波形表明逆变器的动态性能得到了提升,但是面对扰动,稳定性仍存在不足,但该算法与单一的控制算法相比,具有更好的控制效果。

将预测函数的成本函数与分数阶 PID 的增量表达式相结合,得到一个新的控制算法预测函数分数阶(FOPID-PFC)。文献[7]设计了将 BUCK 变换器和这种新型控制算法结合的控制策略,在一定程度上保留了分数阶 PID 控制良好的动态性能,也让预测函数控制的鲁棒性融合进来,使得控制系统的可靠性大大提升,但针对解决新得到的成本函数参数在线计算量大的问题,并没有提出一个有效的改进方法;文献[8]在总结这种新型控制策略的同时,引入了优化算法粒子群,通过粒子群在线整定成本函数参数,使得计算量大大降低,参数的选取也变得更加方便。上述两个关于这种新型算法的文献均只被用在单个 BUCK 电路中,在 BUCK 并联系统中没有得到应用和验证。

实现均流技术的控制方法尤为重要,如果盲目将

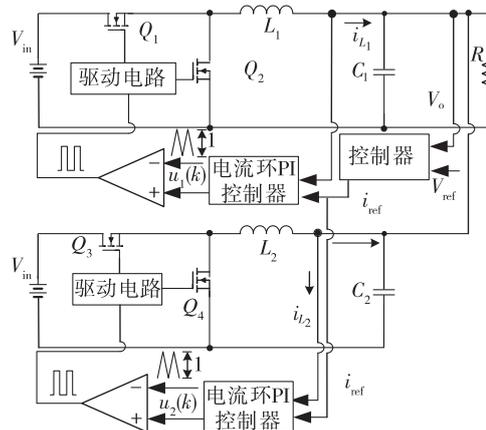
各个模块进行并联,不仅会出现负载电流分布不均,而且还会影响系统的正常工作,甚至导致系统的损坏。结合一系列问题,本文在上述文献研究的基础上设计出基于主从均流的方式,通过 v 步离散法得到较为精确的分段仿射模型(PWA),并将这种新型控制算法预测函数分数阶,应用到并联 BUCK 变换器当中,不仅解决了电感电流分配问题,而且也大大提高了并联系统在面对负载扰动的情况下,整个 BUCK 变换器的输出性能和稳定性。

2 均流方法

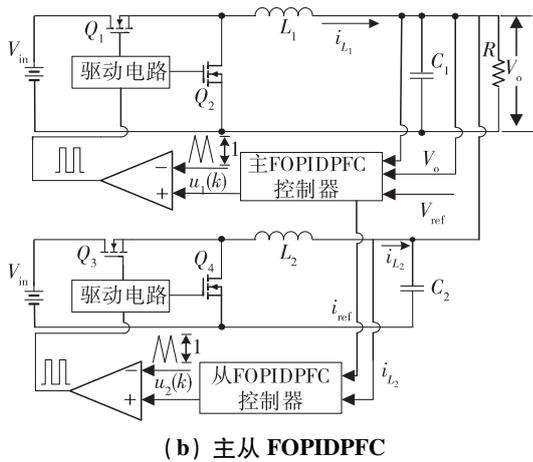
对于并联系统,输出电感电流 i_l 的分配差异由各子模块的外特性不同造成。以一个简单的均流系统为例,外部特性不同分为两种:一是两个模块空载的电压不同,输出的负载阻抗相等;二是空载电压相同,输出的阻抗不同。

随着航天事业的发展,人们对并联系统存在的电流分配问题,正在保持积极的研究,解决方法也是层出不穷。输出阻抗法(下垂法)^[9],并联的每个模块外特性呈下垂状,负载阻抗大,输出电压 V_o 小。在并联 BUCK 中,内阻小的模块输出电流较大,而内阻大的模块输出电流较小。此均流方法即将内阻小的模块外特性斜率调整至接近内阻大的模块,使得两个模块的电流分配较为均匀。文献[10]提出的平均电流自动均流法,即均流环参考电压为各个模块电流的平均值,但是当母线发生短路或者一些模块不能正常运行时,母线电压会下降,甚至会降到下限的阈值,导致 DC-DC 变换器故障的发生^[11]。

本文选用主从并联方法,将一个模块作为系统的主模块,其余的为从模块。用主模块的电压控制其他并联模块的电压调整值,所有并联子模块均采用电流内环控制,将主模块的电感电流值 i_{l1} 作为从模块的电流环参考值 i_{ref} ,从而实现主从电流一致,得到很好的电流分配精度^[12]。图 1(a)为传统 PI 的并联 BUCK 结构图,图(1b)为预测函数分数阶的并联结构图。



(a) 双闭环 PI 控制



(b) 主从 FOPIDPFC
图 1 并联 Buck 结构框图

Fig. 1 The structure diagram of parallel Buck

3 分数阶预测函数算法

3.1 分段仿射(PWA)

针对像 DC-DC 这种由非线性功率开关器件组成的模型,一般设计常见的线性模型控制器虽然比较简单,但是这些控制器在控制非线性模型对象时,很难准确地表现出变换器系统的运行状态。BUCK 型 DC-DC 变换器属于切换线性系统,本小节提出利用其改进演变而来的分段仿射模型(PWA)^[13]。先对 BUCK 变换器进行分段仿射建模,然后在此基础上提出分数阶预测函数控制算法,并且在分段仿射模型(PWA)下,对分数阶预测函数求得最优控制量。其中分段仿射系统原理图如图 2 所示。

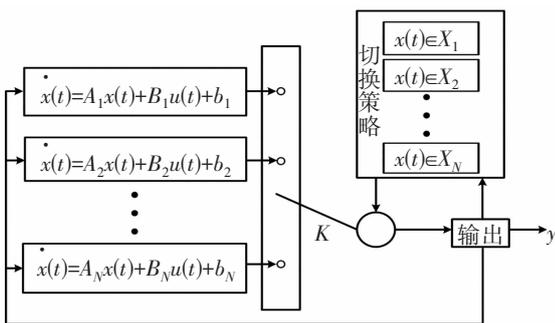


图 2 分段仿射系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of piece-wise affine system

分段仿射系统中含有多个连续变量的动态子系统,而且每个子系统都含有一个附加常数项,这一点和其他切换系统是一致的,在图 2 可以看出,其子系统按照切换的策略在 1 到 N 之间进行切换^[14]。虽然分段仿射的切换策略为离散状态,但是不同开关序列在同一个周期中 1 到 N 时处在连续的状态。

普通仿射系统定义如式(1)所示:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (1)$$

其中, $x \in \mathbf{R}^n$ 为系统的状态变量,函数 $f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$ 与 $g: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^{n \times m}$ 为连续函数, $u \in \mathbf{R}^m$ 为控制向量,并且 $f(0) = 0$ 。

对于同步整流的 BUCK 变换器,电感电流一直处于导通状态下,故本文只对 CCM 模式下的理想 Buck 变换器进行数学建模分析。其状态空间方程如式(2)、式(3)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ \dot{x}(t) = Ax(t) \\ kT_s \leq t < (k+d(k))T_s \\ (k+d(k))T_s \leq t < (k+1)T_s \end{cases} \quad (2)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3)$$

式(2)中: $A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$, $C = [1 \ 0]$ 。

在一个开关周期内,不同的数学模型会根据控制器提供的不同 PWM 信号,使系统的状态变量发生改变,故如果能够找到 PWM 信号即 $d(k)$ 与状态变量在不同开关周期的对应关系,即可建立 Buck 变换器的分析模型。本文利用 v 步离散方法^[15],对 BUCK 变换器进行 PWA 建模,这里的 $v = 3$ 。

这里的 3 个子区间划分为 BUCK 变换器开关管 Q_1 导通, Q_2 关断;BUCK 变换器开关管 Q_2 导通, Q_1 导通;BUCK 变换器开关从 Q_1 到 Q_2 切换。每个子区间的周期 $\tau_s = T/v$,开关周期分为 3 等份,即 $v = 3(\tau_s = \frac{T}{3})$ 。

为了确定子区间类型,引入 v 个 0 和 1 变量并定义如下:

$$\sigma_n = 1 \Leftrightarrow d(k) \geq n/v, n = 0, 1, \dots, v-1 \quad (4)$$

式(4)为第 n 个子区间的状态:当 σ_n 和 σ_{n+1} 均为 1 时,子区间处于状态 Q_1 ;当 σ_n 为 0 时,子区间处于状态 Q_2 ;当 σ_n 为 1, σ_{n+1} 为 0 时,子区间处于 Q_1 切换到 Q_2 状态。故在第 n 个子区间接式(4)、式(5)所示进行状态更新:

$$\xi(n+1) = \begin{cases} \Phi \xi(n) + \Psi_1, & \text{if } \sigma_n \wedge \sigma_{n+1} \\ \Phi \xi(n), & \text{if } \sigma_n \\ \Xi_3(\xi(n)), & \text{if } \sigma_n \wedge \sigma_{n+1} \end{cases}$$

$$\Xi_3(\xi(n)) := \Phi \xi(n) + \Psi_1(v \times d(k) - n)$$

其中: $\Phi = e^{A\tau_s}$, $\Psi_1 = \int_0^{\tau_s} e^{A(\tau_s-\tau)} d\tau$,子区间的占空比信

号,如图 3 所示。

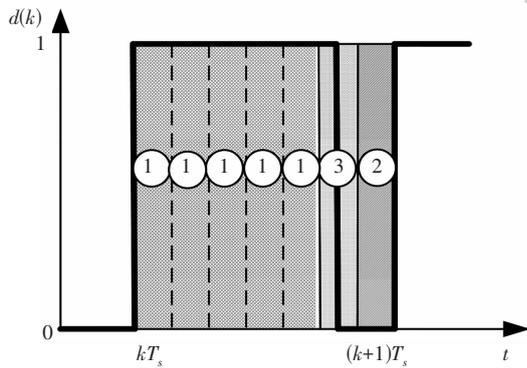


图 3 子区间占空比信号变化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the change of the duty cycle signal of the sub-interval

最后得到 PWA 的 Buck 变换器模型如式(5)所示:

$$x(k+1) = \begin{cases} A_1 x(k) + B_1 d(k) + f_1, & d(k) \in \left[0, \frac{1}{3}\right) \\ A_2 x(k) + B_2 d(k) + f_2, & d(k) \in \left[\frac{1}{3}, \frac{2}{3}\right) \\ A_3 x(k) + B_3 d(k) + f_3, & d(k) \in \left[\frac{2}{3}, 1\right] \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} A_1 &= A_2 = A_3 = \Phi^3 \\ B_1 &= 3\Phi^2\Psi_1, B_2 = 3\Phi\Psi_1, B_3 = 3\Psi_1 \\ f_1 &= 0, f_2 = \Phi^2\Psi_1 - \Phi\Psi_1 \\ f_3 &= \Phi^2\Psi_1 + \Phi\Psi_1 - 2\Psi_1 \end{aligned}$$

则 Buck 变换器的 PWA 模型如式(6)所示:

$$x(k+1) = A_n x(k) + B_n d(k) + f_n \quad n = 1, 2, 3 \quad (6)$$

3.2 分数阶预测函数

本文所设计的分数阶预测函数控制策略,是在预测函数的基础上加入增量式分数阶 PID,其算法具体流程与预测函数大体一致,也包含基函数的选取、参考轨迹、预测模型、滚动优化以及误差的校正。

PFC 算法的目的是使控制优化时域内的参考轨迹与预测值尽可能接近,故本文选取二次型性能指标函数的形式如式(7)所示:

$$J = \sum_{i=1}^P [y_c(k+i|k) - y_r(k+i)]^2 \mathbf{Q}_i + \sum_{i=1}^H [\Delta u(k+i-1)]^2 \mathbf{R}_i \quad (7)$$

其中, $\mathbf{Q}_i, \mathbf{R}_i$ 为加权系数矩阵, P, H 分别为预测时域及控制时域, $y_c(k+i|k)$ 为 $k+i$ 时刻的模型校正输出, Δu 为从当前时刻起, M 个连续控制增量。

PID 的增量表达式如式(8)所示:

$$u(k) = u(k-1) + k_p \Delta e(k) + k_i e(k) + k_d \Delta^2 e(k) \quad (8)$$

FOPID 的增量表达式如式(9)所示:

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= K_p \Delta e(k) + \\ &K_i T_s \left[q_0 e(k) - \sum_{j=1}^k \frac{1+\lambda}{j} q_{j-1} e(k-j) \right] + \\ &K_d T_s^\mu \left[d_0 e(k) - \sum_{j=1}^k \frac{1-\mu}{j} d_{j-1} e(k-j) \right] = \\ &K_p \Delta e(k) + (K_i T_s^\lambda + K_d T_s^\mu) e(k) - \\ &\sum_{j=1}^k \left(\frac{1+\lambda}{j} K_i T_s^\lambda q_{j-1} + \frac{1-\mu}{j} K_d T_s^\mu d_{j-1} \right) e(k-j) \end{aligned} \quad (9)$$

令 $K_a = K_i T_s^\lambda + K_d T_s^\mu, K_j = -\left(\frac{1+\lambda}{j} K_i T_s^\lambda q_{j-1} + \frac{1-\mu}{j} K_d T_s^\mu d_{j-1}\right)$, 则 $\Delta u(k)$ 可以简化表示为式(10):

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_a e(k) + \sum_{j=1}^k K_j e(k-j) \quad (10)$$

由式(7)的目标函数和式(10)的 FOPID 增量式得到本文设计的分数阶预测函数的新目标函数式(11):

$$J = \sum_{i=1}^P \mathbf{Q}_i \{ K_p [\Delta e(k+i)]^2 + K_a [e(k+i)]^2 + \sum_{j=1}^p K_j [\Delta^2 e(k+i-j)]^2 \} + \sum_{i=1}^H \mathbf{R}_i [u(k+i-1)]^2 \quad (11)$$

其中, i 是预测步长。为了找到最优控制量,使目标函数值最小,通过求极值得到控制量式(12):

$$u = \left\{ [K_p(1-q^{-1}) + K_a + \sum_{j=1}^k K_j q^{-j}] \mathbf{g} \mathbf{Q} \mathbf{g}^T + \mathbf{f} \mathbf{R} \mathbf{f}^T \right\}^{-1} \times [K_p(1-q^{-1}) + K_a + \sum_{j=1}^k K_j q^{-j}] \mathbf{g} \mathbf{Q} d \quad (12)$$

其中, q^{-1} 为位移算子。

4 并联 FOPIDPFC 的仿真设计

本节将在 Matlab/Simulink 中搭建 FOPIDPFC 控制并联 Buck 变换器的仿真模型,通过仿真结果验证主从 FOPIDPFC 控制器设计的可行性。仿真中的主从 Buck 电路参数为 $V_{in} = 12 \text{ V}, C_1 = C_2 = 210 \text{ } \mu\text{F}, L_1 = L_2 = 15 \text{ } \mu\text{H}, R_{\max} = 0.5 \text{ } \Omega, R_{\min} = 0.25 \text{ } \Omega$ 。此外,主从 FOPIDPFC 控制器参数相同,均为 $T_s = 1 \times 10^{-5} \text{ s}, T_r = 6 \times 10^{-5} \text{ s}, K_p = 0.1, K_i = 37.43, K_d = 12.62, \lambda = 26.86, \mu = 16.43, \mathbf{Q}_{(2 \times 2)} = 0.1 \times \text{diag}[1, 1], h_{2 \times 1} = [2.04, 2.37], \mathbf{R}_{(2 \times 2)} = 0.8 \times \text{diag}[1, 1]$ 。搭建的仿真模型如图 4、图 5 所示。

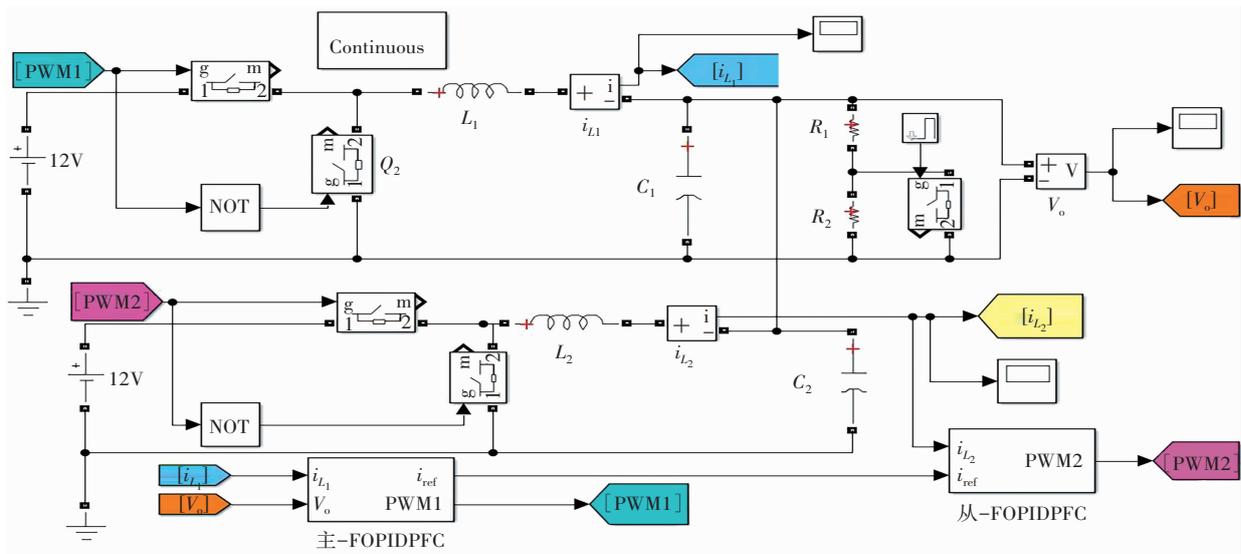


图 4 主从 FOPIDPFC 控制并联 Buck 仿真模型

Fig. 4 Master-slave FOPIDPFC control parallel Buck simulation model

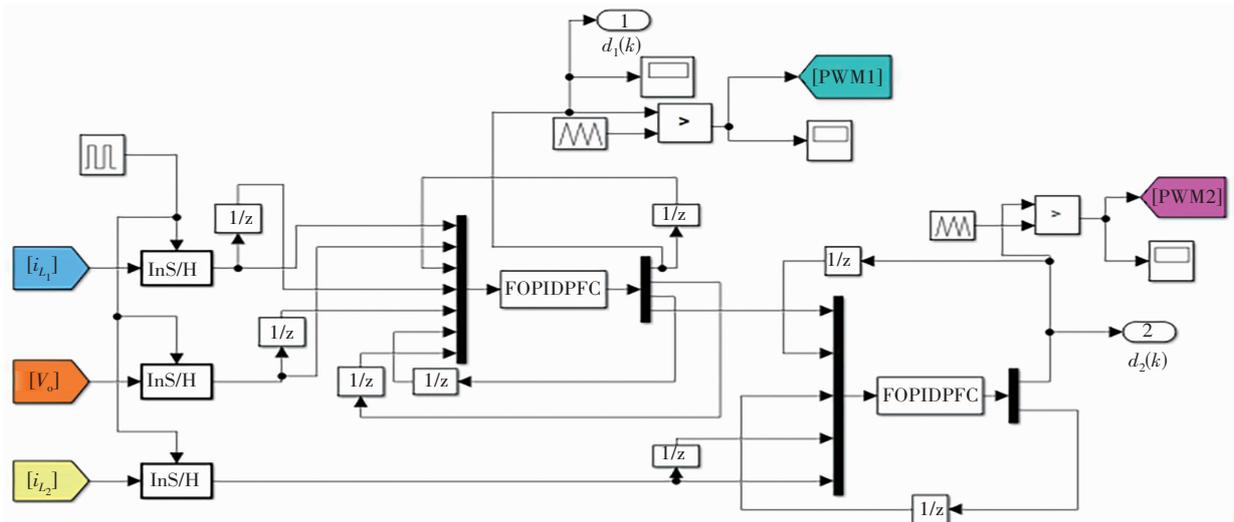


图 5 主从 FOPIDPFC 控制器内部仿真模型

Fig. 5 Internal simulation model of master-slave FOPIDPFC controller

传统双闭环 PI 控制的电流参考值 i_{ref} 的取值与其电压外环紧密相关,输出电压的误差值会影响电压外环的输入。另外,电流内环的参考值由误差值经过电压外环调节得到。本文设计的分数阶预测函数与传统 PI 有所不同。在主从均流系统中,主 FOPIDPFC 控制器的输入并不仅与输出电压误差值有关,也与主变换器的电感电流值有一定联系,因此 FOPIDPFC 控制器电流值的选取准则不能和传统的 PI 控制一致。这里将第二节 FOPIDPFC 控制器的输出控制量表达式,计算简化,结合上面提到的双闭环 PI 控制的电流参考值选取原则,从显式中找出仅与输出电压差值相关的表达式,将其单独作为从 FOPIDPFC 控制器的电流参考值。得到的电流参考值 i_{ref} 的表达式如式(13)、式(14):

$$D = C(h_i - A^i)A \cdot [i_L(k-1) \quad v_o(k-1)]^T + C(h_i - A^i)B \cdot u(k-1) - (h_i - a^i) \cdot v_o(k) + (1 - a^i) \cdot c(k) + L \cdot f_i = \begin{bmatrix} T \\ T_1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$i_{ref} = Q \cdot S_0 \cdot T_1 + Q \cdot S_1 \cdot T - Q \cdot S_2 \cdot T_{-1} \quad (14)$$

式(14)中: T_1 表示的是开关周期延时一个周期 $D_{(1,1)}$ 的值,且 $D_{(1,1)}$ 为第一行第一列的值。 $M_{(1,2)}$ 、 $M_{(2,2)}$ 与其表达意思相同,即矩阵里的某行某列数值。

式(13)中:

$$L = [h_1, h_2, \dots, h_p]^T C_m - C_m [A_{mt} - I, A_{mt}^2 - A_{mt} - I, \dots, A_{mt}^p - A_{mt}^{p-1} - I, \dots, -I]^T$$

$$M = [h_1, h_2]^T C_m A_{mt} - [C_m A_{mt}, C_m A_{mt}^2]^T A_{mt}$$

$$T = M_{(1,2)} v_o(k-1) - [h_1 - a, h_2 - a^2]^T_{(1,1)} \cdot v_o(k) +$$

$$T_1 = M_{(2,2)} v_o(k-1) - [h_1 - a, h_2 - a^2]^T_{(2,1)} \cdot v_o(k) + [1 - a, 1 - a^2]^T_{(1,1)} \cdot v_{ref}$$

$$S_0 = [K_1 \cdot G_{1(1,2)} + K_a \cdot G_{k(1,2)} + K_p \cdot \Delta G_{k(1,2)}]$$

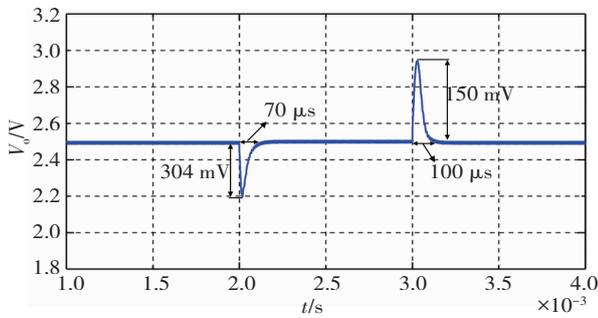
$$S_1 = [K_p \cdot \Delta G_{k(1,1)} - K_p \cdot \Delta G_{k(1,2)} + K_a \cdot G_{k(1,1)}]$$

$$S_2 = K_p \cdot \Delta G_{k(1,1)}$$

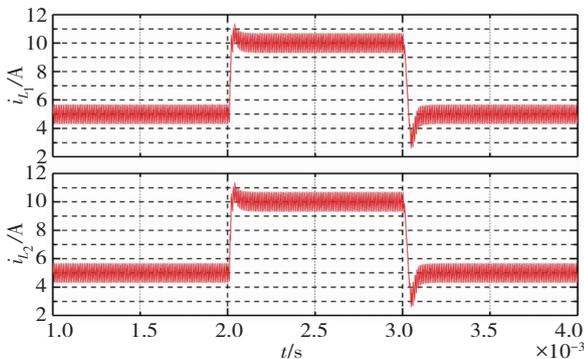
a 为柔化系数 ($e^{-\frac{T_s}{T_r}}$), h_i 为 $k+i$ 时刻的误差补偿系数, G_k 为过程响应函数, 可通过离线计算获得。

5 结果分析

图 6 为主从 FOPIDPFC 控制并联 Buck 变换器的仿真结果。从图 6(a) 中可以看出: 主从 FOPIDPFC 控制的 Buck 变换器输出电压能够达到设定值 2.5V, 并且在加卸载时, 主从 FOPIDPFC 控制器能够快速调节系统重新回到稳态值且具有较小的超调量。其中在加载时, 系统经过 70 μs 的调节时间使得输出电压重新回到设定值, 超调量为 304 mV; 在减载时, 系统经过 100 μs 的调节时间使得输出电压回到设定值, 超调量为 450 mV。从图 6(b) 中可以看出: 从 Buck 电感电流值与主 Buck 电感电流值始终保持相等, 说明主从 FOPIDPFC 控制器的设计很好地实现了并联 Buck 变换器的均流效果。



(a) 并联负载突变时输出电压波形

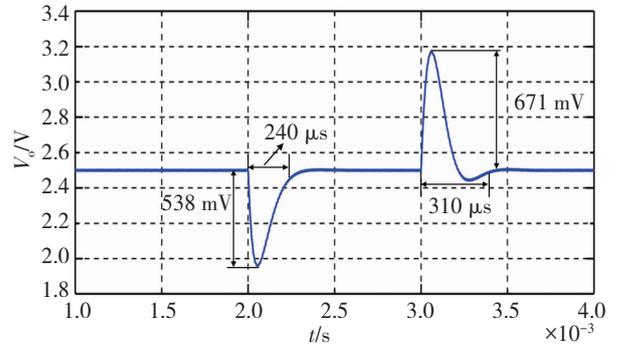


(b) 并联负载突变时电感电流波形

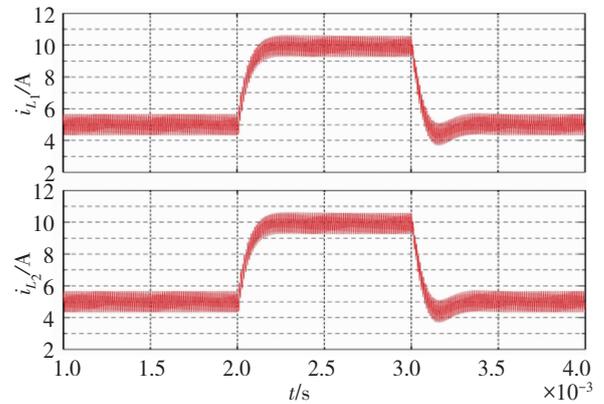
图 6 主从 FOPIDPFC 控制并联 Buck 仿真波形

Fig. 6 Master-slave FOPIDPFC control parallel Buck simulation waveform

图 7 为传统双闭环 PI 控制的主从均流控制 BUCK 变换器的仿真结果波形。图 7(a) 中, 负载在加载情况下, 超调量为 538 mV, 调节时间为 240 μs ; 系统减载时, 超调量为 671 mV, 恢复时间为 310 μs 。



(a) 并联负载突变时输出电压波形



(b) 并联负载突变时电感电流波形

图 7 双闭环 PI 控制并联 Buck 仿真波形

Fig. 7 Double closed-loop PI control parallel Buck simulation waveform

从仿真结果可以看出: 分数阶预测函数控制的并联 BUCK 变换器在面对负载加、减载的情况下, 超调量和调节时间分别降低了 234 mV、170 μs 和 221 mV、210 μs 。因此, 采用本文的基于主从均流的并联方法分数阶预测函数控制在电流的分配精度、动态性能以及稳定性上均比传统双闭环 PI 控制更好。

6 总结

在并联 BUCK 变换器的控制中, 本文设计的分数阶预测控制策略, 在负载受到加、减载的扰动下, 其输出性能效果和动态响应均比 PI 控制优越, 在电感电流分配上, 也更加均匀。

由于本文引入的分数阶思想导致参数从原本的 3 个变为了 5 个, 使得计算难度大大提高, 未来可以在此基础上, 对参数的整定和优化提出一种解决办法, 降低计算量。

参考文献(References):

- [1] 吴爱国, 李际涛. DC-DC 变换器控制方法研究现状[J]. 电力电子技术, 1999, 33(2): 75—78.
WU Ai-guo, LI Ji-tao. Research status of DC-DC converter control methods[J]. Power Electronics Technology, 1999, 33(2): 75—78.
- [2] 郑长明, 张加胜, 许睿, 等. Buck 变换器的鲁棒离散积分滑模控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4306—4313.
ZHENG Chang-ming, ZHANG Jia-sheng, XU Rui, et al. Robust discrete integral sliding mode control of Buck converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4306—4313.
- [3] 薛定宇, 赵春娜. 分数阶系统的分数阶 PID 控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(5): 771—776.
XUE Ding-yu, ZHAO Chun-na. Design of fractional PID controller for fractional order system[J]. Control Theory and Applications, 2007, 24(5): 771—776.
- [4] 王国玉, 韩璞, 王东风. 预测函数控制及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(8): 1087—1091, 1108.
WANG Guo-yu, HAN Pu, WANG Dong-feng. Predictive functional control and its application research[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(8): 1087—1091, 1108.
- [5] 夏泽中, 张光明. 预测函数控制及其在伺服系统中的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 130—134.
XIA Ze-zhong, ZHANG Guang-ming. Predictive functional control and its simulation research in servo system[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(14): 130—134.
- [6] 郭伟, 徐金成, 钱承山, 等. 一种基于分数阶 PI 预测函数的逆变器控制方法[P]. CN103269176A, 2013.
GUO Wei, XU Jin-cheng, QIAN Cheng-shan, et al. An inverter control method based on fractional PI prediction function[P]. CN103269176A, 2013.
- [7] 王海生, 陈克难, 寇金, 等. 预测函数分数阶 PID 控制在 DC-DC 变换器中的应用[J]. 兰州工业学院学报, 2019, 26(6): 55—59.
WANG Hai-sheng, CHEN Ke-nan, KOU Jin, et al. Application of predictive function fractional PID control in DC-DC converter[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2019, 26(6): 55—59.
- [8] 卢文, 王海生, 赵刚耀, 等. 改进型预测函数控制在 DC-DC 变换器中的应用[J]. 兰州工业学院学报, 2021, 28(2): 55—59.
LU Wen, WANG Hai-sheng, ZHAO Gang-yao, et al. Application of improved predictive function control in DC-DC converter[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2021, 28(2): 55—59.
- [9] 黄桂根. 直流微网自适应下垂均流技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
HUANG Gui-gen. Research on adaptive droop current sharing technology of DC microgrid[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [10] 刘晓东, 姜婷婷, 方炜. DC/DC 变换器平均电流自动均流并联控制的研究[J]. 电子技术应用, 2012, 38(12): 60—63.
LIU Xiao-dong, JIANG Ting-ting, FANG Wei. Research on automatic average current sharing and parallel control of DC/DC converters [J]. Application of Electronic Technology, 2012, 38(12): 60—63.
- [11] 费海伦. 混杂系统模型预测控制及其在编队飞行器中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
FEI Hai-lun. Hybrid system model predictive control and its application in formation aircraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [12] 徐璐, 陈宗祥, 葛芦生. 基于无线数字控制的并联 DC-DC 变换器主从均流策略的研究[C]//第七届中国高校电力电子与电力传动学术年会论文集. 2013: 104—108.
XU Lu, CHEN Zong-xiang, GE Lu-sheng. Research on the master-slave current sharing strategy of parallel DC-DC converters based on wireless digital control[C]//Proceedings of the 7th China University Power Electronics and Power Drive Academic Annual Conference. 2013: 104—108.
- [13] 储仁杰. 基于软开关和并联均流技术的直流电源的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
CHU Ren-jie. Development of DC power supply based on soft switching and parallel current sharing technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [14] 方炜, 刘晓东, 刘宿城, 等. 基于分段仿射模型的 DC/DC 变换器预测控制研究[J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(3): 381—386.
FANG Wei, LIU Xiao-dong, LIU Su-cheng, et al. Research on predictive control of DC/DC converter based on piecewise affine model[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2015, 44(3): 381—386.
- [15] 邹博, 夏利民, 杨胜跃, 等. 基于直接分段仿射模型 DC/DC 变换器混杂系统控制[J]. 控制工程, 2018, 25(2): 231—237.
ZOU Bo, XIA Li-min, YANG Sheng-yue, et al. DC/DC converter hybrid system control based on the direct segmented affine model[J]. Control Engineering, 2018, 25(2): 231—237.