

适用于 DC/DC 变换器的预测函数控制优化策略

周 凯, 宋 飞, 吴俊华, 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:针对使用预测函数控制(Predictive Function Control, PFC)的 DC/DC 变换器在负载切换时产生的扰动对变换器响应速度有较大影响的问题,提出通过设计观测器观测扰动来优化预测函数控制算法的控制效果;相对于其他提高系统抗扰动的方法,通过设计观测器来提高变换器抗扰动的优点是实现简单、优化后控制效果好等;设计 Luenberger 观测器对负载切换时产生的扰动进行观测,将观测值反馈给预测函数控制算法进行最优化分析,并结合仿真结果对目标函数进行调整,优化后的目标函数能更好地响应扰动并尽快达到稳态;最后将优化后的控制算法与 PI 双闭环控制方法进行比较,结果显示优化后的控制算法在受到扰动后比双 PI 控制方法动态性能更好,实现了应对负载切换时提高系统动态性能的目标,增强了 DC/DC 变换器的抗干扰能力;优化后的算法只考虑了负载切换时的扰动对于系统其他方面的扰动没有考虑进去,可以通过设计整个系统的观测器来进一步提高 DC/DC 变换器抗扰动的能力。

关键词:Buck 变换器;预测函数控制;Luenberger 观测器;动态响应

中图分类号:TN98 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0005.006

Prediction Function Control Optimization Strategy for DC/DC Converters

ZHOU Kai, SONG Fei, WU Junhua, GE Lusheng

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

Abstract: Aiming at the problem that the disturbance generated by the DC/DC converter using predictive function control (PFC) has a greater impact on the response speed of the converter during load switching, it is proposed to optimize the control effect of the predictive function control algorithm by designing the observer to observe the disturbance. Compared with other methods to improve the system immunity, the advantage of improving the converter immunity by designing an observer is to achieve simplicity and good control effect after optimization. The Luenberger observer was designed to observe the disturbance generated during load switching, feed the observation value back to the prediction function control algorithm for optimization analysis, and adjust the objective function in combination with the simulation results. The optimized objective function can better respond to the disturbance and reach a steady state as soon as possible. Finally, the optimized control algorithm was compared with the PI double closed-loop control method, and the results show that the optimized control algorithm has better dynamic performance than the dual-PI control method after being disturbed, which achieves the goal of improving the dynamic performance of the system during load switching and enhances the anti-interference ability of the DC/DC converter. The optimized algorithm only takes into account the disturbance during load

收稿日期:2022-03-05 **修回日期:**2022-05-18 **文章编号:**1672-058X(2023)05-0041-07

基金项目:国家自然科学基金项目资助(61873002)。

作者简介:周凯(1998—),男,江苏淮安人,硕士研究生,从事电力电子器件研究。

通讯作者:葛芦生(1962—),男,安徽潜山人,教授,从事电力电子器件和新能源研究。Email:876604272@qq.com。

引用格式:周凯,宋飞,吴俊华,等.适用于 DC/DC 变换器的预测函数控制优化策略[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(5):41—47.

ZHOU Kai, SONG Fei, WU Junhua, et al. Prediction function control optimization strategy for DC/DC converters[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(5): 41—47.

switching and does not take into account the disturbance of other aspects of the system, and the ability of the DC/DC converter to resist disturbance can be further improved by designing the observer of the entire system.

Keywords: Buck converter; predictive function control; Luenberger observer; dynamic response

1 引言

随着 DC/DC 变换器应用越来越广泛,对其动态性能有了更高的要求,传统的控制方式是通过控制器对常用的工作点进行补偿,容易受参数变化的影响,专家学者开始将关注度放在先进的控制方法上,通过先进的控制策略来提高变换器的动态响应特性。

模型预测控制算法(Model Predictive Control MPC)经过三代优化形成了一种新的预测函数控制算法(Predictive Function Control PFC)。经典的模型预测控制算法不仅输入形式不规律,而且在线计算量较大,响应速度也比较慢,预测函数控制算法在输入形式上进行了优化,优化后的控制输入形式更结构化,减少了在线计算量,但是对于扰动并没有较好的控制性能。文献[2]通过一步预测法,对预测函数控制进行点对点的预测,减少了预测函数控制算法的在线计算量,使得被控对象可以快速向设定的参考曲线收敛,实现了对 DC/DC 变换器快速控制。虽然一步预测法使变换器具有良好的阶跃响应,但是对于具体算法的叙述并不清晰。由于预测函数控制算法在设计时没有考虑外部扰动的影响,当扰动过大时预测函数控制算法的预测误差将会变大,控制精度会大大降低,文献[1]通过设计扰动观测器来观测外部扰动再结合预测函数控制算法设计双环控制器对控制量进行前馈修正来抑制扰动。虽然文献[1]实现了提高系统抗干扰能力和提高控制精度的目的但是控制系统较为复杂,对控制器算力要求较高。文献[4]通过分数阶 PID 与预测函数结合,形成了一种同时具有 PI 和预测函数控制算法优点的控制算法,能够提高近空间飞行器的鲁棒性,但是此法只考虑小扰动的影响,当出现较大的扰动时这种新型的算法不一定能够适用,控制算法并没有普适性。文献[12]将 PID 控制算法与预测函数控制算法结合,使得新型算法既具有预测函数控制算法的优点又有 PID 算法的优点。这种算法文献[14]对于模型失配的解决办法是:提出一种基于 T-S 模糊模型的自适应模型预测控制算法,根据辨识模型参数来递推预测输出绕开

求解复杂方程,这样既降低了计算难度又提高了跟踪性能,但是模型较为复杂。

以 Buck 变换器为研究对象,为了进一步提高变换器的动态响应特性,通过设计观测器对预测函数控制算法进行了优化,观测器的作用是对负载切换时的情况进行观测,将观测值作为反馈,与预测函数控制共同构成控制系统,推导了最优控制律表达式。最后,通过仿真验证了预测函数优化算法对提高 Buck 变换器动态响应特性的有效性。

2 Buck 变换器建模

如图 1 所示为 Buck 变换器拓扑,其中: V_{in} 为输入电压; Q_1 、 Q_2 为可控开关管; L 、 C 分别为滤波电感和滤波电容; R 为负载电阻; V_o 为输出电压。

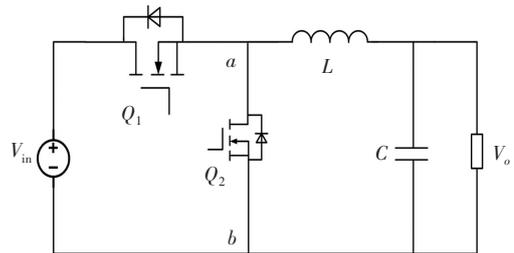


图 1 Buck 变换器电路拓扑

Fig. 1 Circuit topology of the Buck converter

PFC 算法是要根据模型来设计控制器的,因此需要首先推导出 Buck 变换器的模型。主要控制 CCM 模式下的 Buck 变换器,下面推导 CCM 模式下的 Buck 变换器模型。

(1) 当可控开关管 Q_1 导通、 Q_2 关断时。等效电路图如图 2 所示。

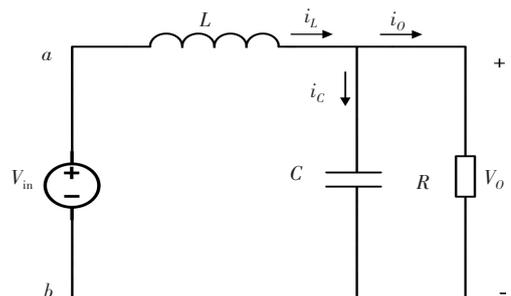


图 2 Q_1 导通、 Q_2 关断时等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit with Q_1 on and Q_2 off

模式下则有:

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{in}(t) - v_o(t) \\ C \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{v_o(t)}{R} \end{cases} \quad kT_s \leq t \leq (k+d(k))T_s \quad (1)$$

其中: T_s 为开关周期; $d(k)$ 为第 k 个周期的输出占空比。

(2) 当可控开关管 Q_1 关断、 Q_2 导通时。等效电路图如图 3 所示。

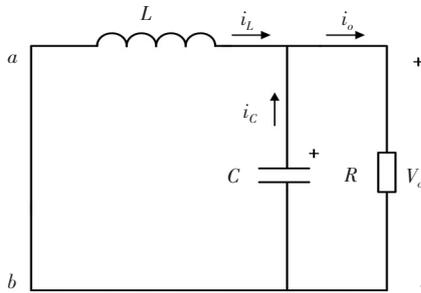


图 3 Q_1 关断、 Q_2 导通时等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit with Q_1 off and Q_2 on

则有:

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = -v_o(t) \\ C \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{v_o(t)}{R} \end{cases} \quad (k+d(k))T_s \leq t \leq (k+1)T_s \quad (2)$$

将式(1)和式(2)平均化后,可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = d(k) \cdot v_{in}(t) - v_o(t) \\ C \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{v_o(t)}{R} \end{cases} \quad kT_s \leq t \leq (k+1)T_s \quad (3)$$

令状态变量为 $\mathbf{X}(t) = [i_L(t) \quad v_o(t)]^T$; i_L 为电感 L 上的电流, v_o 为负载 R 上的输出电压。取负载电压为输出变量,即 $y(t) = v_o(t)$, 则 CCM 模式下对应的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}(t) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{X}(t) + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot d(k) \cdot v_{in}(t) \\ y(t) = [0 \quad 1] \cdot \mathbf{X}(t) \end{cases} \quad (4)$$

取采样时间为 T_s , 然后对状态空间方程进行离散化, 可得:

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}d(k) \\ y(k+1) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k+1) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{T_s}{L} \\ \frac{T_s}{C} & 1 - \frac{T_s}{RC} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{T_s v_{in}}{L} \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{C} = [0 \quad 1].$$

3 预测函数控制算法

3.1 基函数

传统的 MPC 算法在求解控制输入量的过程中并不关注控制输入量的结构形式。所提 PFC 算法的目标是找到控制规律, 重点在于结构化输入量。将输入量变为一系列基函数的叠加, 通过选择不同的线性组合, 即可得到所需的输出值。对于 Buck 变换器本文选取的基函数为阶跃函数, 预测时域选为 4, 则控制变量为

$$u(k+i) = \mu_i \quad i=0, 1, 2, 3 \quad (6)$$

其中: $u(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻的控制输入量; μ_i 为基函数的线性组合系数。

3.2 参考轨迹

参考轨迹是在控制过程中, 设定好的目标曲线。参考曲线多为一阶指数的形式:

$$y_r(k+i) = c(k+i) - \beta^i (c(k) - y(k)) \quad i=1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

其中: c 为一数值; $\beta = e^{-\frac{T_s}{T_r}}$, T_r 是参考轨迹时间常数。

3.3 预测模型

当前的模型信息和即将进行的输入是 PFC 算法能够实现输出值进行预测的基础, 下面以 Buck 变换器的离散化状态空间模型为预测模型推导预测模型的输出值。

在 k 时刻预测的 $k+1$ 时刻的状态量 $\mathbf{X}(k+1|k)$ 为

$$\mathbf{X}(k+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}u(k|k) \quad (8)$$

在 k 时刻预测的 $k+2$ 时刻的状态量 $\mathbf{X}(k+2|k)$ 为

$$\mathbf{X}(k+2|k) = \mathbf{A}^2\mathbf{X}(k) + \mathbf{A}\mathbf{B}u(k|k) + \mathbf{B}u(k+1|k) \quad (9)$$

由此可以根据预测模型式(5)推出 $k+i$ 时刻模型的输出值:

$$y_m(k+i|k) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k+i|k) \quad (10)$$

PFC 的输入量是一系列基函数线性组合的形式,

则通过式(6)可改写式(12)为

$$y_m(k+i|k) = \mathbf{C}\mathbf{A}^i x(k) + \mathbf{C} \sum_{j=1}^i \mathbf{A}^{j-1} \mathbf{B} \mu_1 \quad (11)$$

3.4 观测器设计

由于负载切换时会产生扰动,可以通过设计观测负载的 Luenberger 观测器提高系统的鲁棒性。

根据电路模型可得以下电流关系:

$$\begin{cases} \frac{dX_o(t)}{dt} = \mathbf{A}_o X_o(t) + \mathbf{B}_o [u_1(t) - u_2(t)] \\ y_o(t) = \mathbf{C}_o X_o(t) \end{cases} \quad (12)$$

其中: i_o 为流向负载的电流; i_c 为流过电容的电流; i_L 为流过电感的电流; u_1 表示可控开关管 Q_1 的状态; u_2 表示可控开关管 Q_2 的状态; 开关管导通为“1”, 开关管关断为“0”, 则有以下关系:

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{i_o}{C} - \frac{i_L}{C} (u_2 - u_1) \quad (13)$$

因此可以建立输出特性的状态空间模型:

$$\begin{cases} \frac{dX_o(t)}{dt} = \mathbf{A}_o X_o(t) + \mathbf{B}_o [u_1(t) - u_2(t)] \\ y_o(t) = \mathbf{C}_o X_o(t) \end{cases} \quad (14)$$

其中,

$$\begin{cases} \mathbf{X}_o(t) = [i_o(t) \quad V_o(t)]^T \\ \mathbf{A}_o = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix} \\ \mathbf{B}_o = [0 \quad i_L(t)/C]^T \\ \mathbf{C}_o = [0 \quad 1] \end{cases} \quad (15)$$

离散化状态空间模型则为:

$$\begin{cases} x_o(k+1) = \mathbf{A}_{od} x_o(k) + \mathbf{B}_{od} [u_2(k) - u_1(k)] \\ y_o(k) = \mathbf{C}_{od} x_o(k) \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中,

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{od} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ T/C & 1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{B}_{od} = [0 \quad -T i_L(k)/C]^T \\ \mathbf{C}_{od} = [0 \quad 1] \end{cases} \quad (17)$$

根据离散化模型,可得如下 Luenberger 观测器:

$$\begin{cases} \hat{x}_o(k+1) = \mathbf{A}_{od} \hat{x}_o(k) + \mathbf{B}_{od} [u_1(k) - u_2(k)] + \mathbf{L} \bar{y}_o(k) \\ \hat{y}_o(k+1) = \mathbf{C}_{od} \hat{x}_o(k+1) \end{cases} \quad (18)$$

其中:

$$\begin{cases} \hat{x}_o(k) = [\hat{i}_o(k) \quad \hat{V}_o(k)]^T \\ \mathbf{L} = [l_1 \quad l_2]^T \\ \bar{y}_o(k) = y_o(k) - \hat{y}_o(k) = \\ \mathbf{C}_{od} [x_o(k) - \hat{x}_o(k)] = \mathbf{C}_{od} \bar{x}_o(k) \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中, $\hat{i}_o(k)$ 、 $\hat{V}_o(k)$ 为负载电流和输出侧电容 C 电压估计值; $\bar{y}_o(k)$ 表示系统实际输出值与估计输出值的误差; $\bar{x}_o(k)$ 表示状态变量与估计输出值的误差; l_1 、 l_2 为观测器增益系数。将式(19)代入式(18)可得:

$$\begin{aligned} \hat{x}_o(k+1) &= (\mathbf{A}_{od} - \mathbf{L}\mathbf{C}_{od}) \hat{x}_o(k) + \mathbf{B}_{od} [u_2(k) - u_1(k)] + \\ &\quad \mathbf{L} y_o(k) \end{aligned} \quad (20)$$

综合式(16)和式(20)可得:

$$\bar{x}_o(k+1) = (\mathbf{A}_{od} - \mathbf{L}\mathbf{C}_{od}) \bar{x}_o(k) \quad (21)$$

$(\mathbf{A}_{od} - \mathbf{L}\mathbf{C}_{od})$ 为 Hurwitz 矩阵才能说明观测器的可观性,所以,输出变量的观测值和等效负载观测值可由下式给出:

$$\begin{cases} \hat{V}_o(k+1) = (1 - L_2) \hat{V}_o(k) + \frac{T_s}{C} \hat{i}_o(k) + \\ \quad L_2 V_o(k) - \frac{T_s}{C} i_L(k) [u_2(k) - u_1(k)] \\ \hat{i}_o(k+1) = \hat{i}_o(k) + L_1 [V_o(k) - \hat{V}_o(k)] \\ \hat{R} = \hat{V}_o(k+1) / [\hat{i}_o(k+1)] \end{cases} \quad (22)$$

3.5 反馈校正

建模时的近似处理或者理想化以及参数的时变特性和外部扰动,会使得模型与实际电路之间会存在一定的误差,定义该误差为

$$e(k) = \bar{y}_o(k) - y_m(k|k-1) \quad (23)$$

通过将误差量反馈补偿到模型后再加入误差补偿系数 h_i 可以纠正建立模型的输出值,反馈的存在使得模型输出值更精确。

$$y_c(k+i|k) = \mathbf{C}\mathbf{A}^i \hat{x}_o(k) + \mu_1 + h_i e(k) \quad (24)$$

3.6 滚动优化

PFC 算法针对的最优解是在有限时域内求得的,这个过程通过滚动预测时域的方式不断进行下去。通过对二次型目标函数不断地进行最小值求解即是实现了滚动优化。

经过仿真发现,在负载切换时产生的扰动会导致输出电压到达设定值的速度较慢而且有一定的误差,为了加快响应并消除误差,将观测器的观测值反馈到预测模型中,来增强系统的抗干扰能力并加快响应速度消除误差。下面对目标函数进行调整,选择目标函数为

$$J(k) = \|D(k) - G_k \cdot \mu_1\|^2 Q + \|H \cdot \mu_1\|^2 R \quad (25)$$

其中: $D(k) = [D(k+1), \dots, D(k+4)]^T$

$$D(k+i) = (1-\beta^i) \cdot c(k) + \beta^i \cdot \hat{y}_o(k) - CA^i \hat{x}_o(k) - h_i \cdot e(k)$$

$$G_k = [CB, C(A+I)B, \dots, C \sum_{j=1}^p A^{j-1} B]^T$$

$$R = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_p); Q = \text{diag}(q_1, q_2, \dots, q_p)$$

$$H = [1, 1, \dots, 1]^T \quad (26)$$

对 $J(k)$ 求偏导数,令 $\frac{\partial J(k)}{\partial \mu(k)} = 0$, 则有:

$$\mu_1 = M \cdot D(k) \quad (27)$$

其中 $M = (G_k^T G_k)^{-1} G_k^T$

目标函数的第二项是为了约束占空比的变化,占空比的大幅度振荡会导致 Buck 变换器输出电压不稳定。

根据以上推导可得占空比的显示解表达式:

$$d(k) = k_0 \cdot c_0(k) + k_1 \cdot \hat{v}_o(k) - k_2 \cdot [i_L(k) \quad v_o(k)]^T - k_3 \cdot e(k) \quad (28)$$

其中:

$$k_0 = M[1-\beta^1, 1-\beta^2, 1-\beta^3, 1-\beta^4]^T$$

$$k_1 = M[\beta^1, \beta^2, \beta^3, \beta^4]^T$$

$$k_2 = M[CA, CA^2, CA^3, CA^4]^T$$

$$k_3 = M[h_1, h_2, h_3, h_4]^T$$

通过前面的推导, Buck 变换器的控制框图可以用图 4 表示。

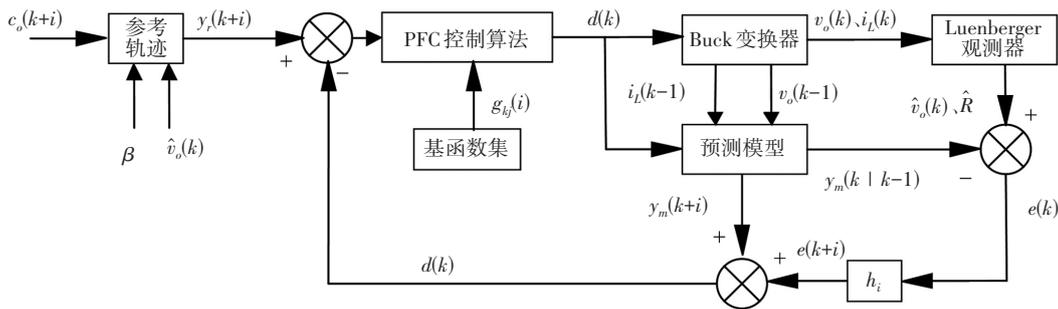


图 4 控制框图

Fig. 4 Control block diagram

4 仿真验证

使用 Matlab/simulink 仿真环境验证所设计的 PFC 控制器的有效性,电路的具体参数如表 1 所示。

表 1 Buck 变换器电路参数

Table 1 Buck converter circuit parameters

电路参数	数值
输入电压 V_m/V	12
输出电压 V_o/V	2.5
电感 $L/\mu H$	15
电容 $C/\mu F$	200
最小负载电阻 R_{min}/Ω	0.25
最大负载电阻 R_{max}/Ω	0.5
开关频率 f_s/kHz	100

对于 PFC 控制器的参数如表 2 所示。

表 2 PFC 控制器参数

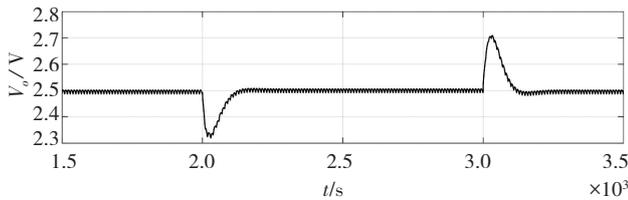
Table 2 PFC controller parameters

PFC 控制器参数	数值
$c_0(k)$	2.5
P	4
T_s	1×10^{-5}
T_r	1.5×10^{-5}
Q	$\text{diag}(1, 1, 1, 1)$
R	$0.02 \times \text{diag}(1, 1, 1, 1)$
H	$[4.6, 4.14, 3.22, 2.67]^T$

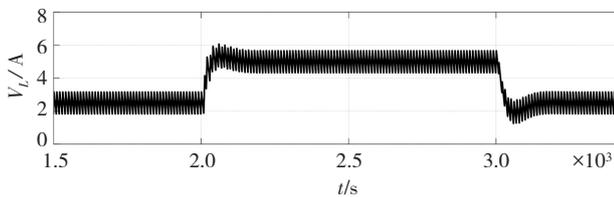
对应的观测器参数为 $L = \begin{bmatrix} 0.3 \\ -0.1 \end{bmatrix}$, 仿真结果如图 4

所示。

从图 5 可以看出 Buck 变换器的输出电压稳定在给定量 2.5 V; 在 $t=0.8$ ms 时, 由于负载切换, 输出电压稍微下降, 经过 PFC 控制器调节后经过大约 12 个时钟周期后重新达到跟踪值; 在 $t=1.6$ ms 时, 负载电阻切换回去, 输出电压有些超调量, 经过 PFC 控制器调节后经大约 12 个开关周期达到设定值。



(a) 输出电压波形

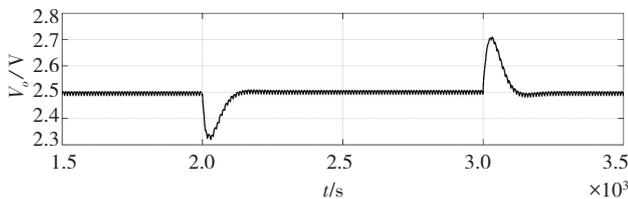


(b) 输出电流波形

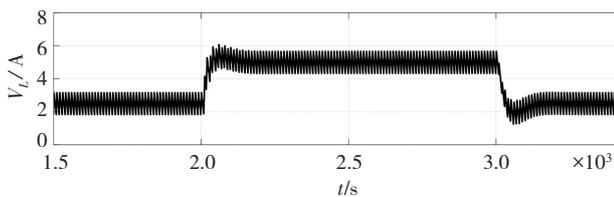
图 5 输出电压、输出电流波形

Fig. 5 Waveform of output voltage and output current

从图 6 可以看出在负载切换时, PFC 控制器相比于 PI 控制器有更好的控制效果, 从调节时间来看, 负载切换的时候 Buck 变换器达到稳态时间更短, 从超(欠)调量来看, PFC 控制器的控制效果更好, 由此可见, PFC 控制器有效提高了 Buck 变换器有扰动时的动态性能。



(a) 输出电压对比图



(b) 输出电流对比图

图 6 负载切换时 PFC 控制器与 PI 控制器对应波形

Fig. 6 The PFC controller corresponds to the waveform of the PI controller during load switching

5 结束语

介绍了预测函数控制的基本原理, 结合状态空间方程推导出了 Buck 变换器的预测模型, 设计 Luenberger 观测器观测负载, 将观测值反馈给目标函数进行最优化分析, 并通过仿真调整了目标函数, 增强了对于 Buck 变换器抗干扰的能力, 实现了应对负载突变时提高 Buck 变换器的动态性能的目标。主要是应对于负载切换时产生的扰动进行了调节, 没有考虑到其他方面例如输入电压或者电感电阻的干扰。

参考文献(References):

- [1] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于预测函数控制和扰动观测器的永磁同步电机速度控制[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1598—1605.
DENG Yong-ting, LI Hong-wen, WANG Jian-li, et al. Speed control for PMSM based on predictive functional control and disturbance observer[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(6): 1598—1605.
- [2] 刘振, 高飞, 谢磊, 等. 基于预测函数控制的 DC-DC 控制[C]//第 27 届中国控制与决策会议论文集, 2015: 327—332.
LIU Zhen, GAO Fei, XIE Lei, et al. Predictive functional control for buck DC-DC converter[C]//Proceedings of the 27th China Conference on Control and Decision-making, 2015: 327—332.
- [3] ROJAS D, RIVERA M, WHEELER P, et al. A study of cost function selection in model predictive control applications[J]. 2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control(ICA-ACCA), 2021, 17(8): 1—6.
- [4] 韩丹丹. 改进型预测函数控制算法及其应用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
HAN Dan-dan, Improvement and application research on predictive functional control algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2014.
- [5] MI S, HE C, WU H. Duty-Cycle model predictive current control[J]. 2021 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics

- (PRECEDE), 2021, 16(18): 552—556.
- [6] 田恒杰, 郑鹏远. Buck_Boost 变换器恒功率负载优化算法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(23): 23—29.
- TIAN Heng-jie, ZHENG Peng-yuan, Optimization algorithm for Buck_Boost converter with constant power loads[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 23—29.
- [7] LENG Z, LIU Q. A simple model predictive control for Buck converter operating in CCM[J]. 2017 IEEE International Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (PRECEDE), 2017, 8(9): 19—24.
- [8] WU Y, FANG Y, WANG H, et al. A new optimal guidance law based structure stochastic jump system theory[J]. 2007 IEEE International Conference on Control and Automation, 2007, 44(12): 332—335.
- [9] 贾志东, 姜久春, 程龙, 等. 适用于 Boost 变换器的自适应模型预测控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5838—5845.
- JIA Zhi-dong, JIANG Jiu-chun, CHENG Long, et al. An adaptive model predictive control for DC-DC boost converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5838—5845.
- [10] SOHELI S N, SAROWAR G, HOQUE M A, et al. Design and analysis of a DC-DC buck boost converter to achieve high efficiency and low voltage gain by using Buck boost topology into Buck topology[J]. 2018 International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEEE), 2018, 56(9): 11—19.
- [11] KANAAN H Y, AL-HADDAD K. Modeling and simulation of DC-DC power converters in CCM and DCM using the switching functions approach: application to the Buck and CUK converters[J]. 2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005, 34(7): 468—473.
- [12] 周磊, 费树岷, 黄家才. 一种新型的预测函数 PID 控制算法的研究[J]. 自动化仪表, 2013, 34(9): 63—66.
- ZHOU Lei, FEI Shu-min, HUANG Jia-cai. Research on a novel predictive functional PID control algorithm[J]. Process Automation Instrumentation, 2013, 34(9): 63—66.
- [13] ZHENG L F, JIANG J C, WANG Z U, et al. Embedded implementation of SOC estimation based on the Luenberger observer technique[J]. 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014, 35(7): 35—41.
- [14] 苏成利, 李平, 邓淑贤, 等. 一种基于 T-S 模糊模型的自适应预测函数控制[J]. 控制工程, 2007(6): 610—613.
- SU Cheng-li, LI Ping, DENG Shu-xian, et al. Adaptive predictive functional control based on T-S fuzzy model[J]. Control Engineering of China. 2007(6): 610—613.
- [15] BOULMANE A, ZIDANI Y, BELKHAYAT D. Sensorless vector control of the IM drives for an urban electric vehicle using Luenberger observer with fuzzy adaptation mechanism[J]. 2019 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), 2019, 24(3): 28—32.
- [16] 袁林峰, 徐勇明, 史建勋. Buck 变换器的全扰动观测补偿策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(3): 116—122.
- YUAN Lin-feng, XU Yong-ming, SHI Jian-xun. Voltage oscillation suppression strategy for Buck converter based on full disturbance observation compensation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(3): 116—122.
- [17] 陶彩霞, 王伟斌, 祝曦, 等. 带恒功率负载 Buck 变换器的模型预测控制[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(8): 96—102.
- TAO Cai-xia, WANG Wei-bin, ZHU Xi, et al. A model predictive control for Buck converter with constant power load [J] Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2021, 48(8): 96—102.