

移相全桥变换器滚动时域优化预测控制策略

薛瑞斌¹, 曾甲辰^{2,3}, 黄东晓^{2,3}, 吴昊^{2,3}

(1. 福建火炬电子科技股份有限公司, 福建 泉州 362005;

2. 中国科学院海西研究院泉州装备制造研究中心

电机驱动与功率电子国家地方联合工程研究中心,

福建 泉州 362216; 3. 泉州装备制造研究所, 福建 泉州 362216)

摘要:为解决复杂工况下传统控制策略应用在移相全桥变换器时系统鲁棒性劣化的问题,提出一种基于自适应超螺旋滑模观测器的滚动时域优化预测控制策略。首先,通过引入电流超局部等效模型有效简化系统建模复杂度。其次,为进一步降低超螺旋滑模观测器滑模面转换平滑性并提高非线性扰动下观测器性能,基于超局部模型电流误差期望动态变化值设计自适应超螺旋滑模观测器,通过在线最小二乘法对电感电流误差趋势进行实时预测,自适应调节超螺旋滑模观测器增益矩阵系数。通过该方法实时估算模型集总扰动并加以补偿,从而提升系统对非线性扰动的适应能力。最后,通过实验对所提算法进行验证,实验结果表明该方法在控制精度与鲁棒性方面表现出较好性能。

关键词:移相全桥;自适应超螺旋滑模观测器;滚动时域优化预测控制

中图分类号:TM461 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26574

Receding Horizon Optimal Predictive Control Strategy for Phase-shift Full-bridge Converter

XUE Ruibin¹, ZENG Jiachen^{2,3}, HUANG Dongxiao^{2,3}, WU Hao^{2,3}

(1. Fujian Torch Electron Technology Co., Ltd., Quanzhou 362005, Fujian, China;

2. National and Local Joint Engineering Research Center for Electrical Drives and Power Electronics, CAS Haixi Institute Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Quanzhou 362216, Fujian, China;

3. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Quanzhou 362216, Fujian, China)

Abstract: To address the degradation of system robustness when applying traditional control strategies to phase-shift full-bridge (PSFB) converters under complex operating conditions, a receding horizon optimal predictive control based on adaptive super-twisting sliding mode observer was proposed. First, an ultra-local current equivalent model was introduced to effectively simplify the system modeling complexity. Next, to further enhance the smoothness of the sliding mode surface transition in the super-twisting sliding mode observer and improve its performance under nonlinear disturbances, an adaptive super-twisting sliding mode observer was designed based on the expected dynamic variation of current errors from the ultra-local model. The observer's gain matrix coefficients were adaptively adjusted by real-time predictions of the inductor current error trend using an online least squares method. This approach enabled real-time estimation and compensation of lumped model disturbances, thus improving the system's ability to adapt to nonlinear disturbances. Finally, experimental validation of the proposed algorithm demonstrates that it exhibits superior performance in terms of control accuracy and robustness.

Key words: phase-shift full-bridge (PSFB); adaptive super-twisting sliding mode observer; receding horizon optimal predictive control (RHOPC)

近年来随着风力发电、光伏发电等新能源的快速发展,移相全桥(phase-shift full-bridge, PS-

FB)变换器因其结构简单、性能优越等优点作为主流拓扑在直流变换器中广泛运用^[1]。直流变换

基金项目:福建省科技计划项目(2024T3037)

作者简介:薛瑞斌(1972—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为电子工程,Email:xuerb@torch.cn

通讯作者:黄东晓(1987—),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为高频谐振变换技术,Email:dongxiao.huang@fjirms.ac.cn

器广泛运用于多种工商业电能变换场景,对电力系统稳定性提升起到关键作用。为进一步保障电力系统稳定性,近年来对直流变换器控制性能、稳定性及功率密度要求日益提高,愈加强调其在高性能、高功率密度等方面的发展^[2]。在该背景下,传统直流变换控制策略在复杂应用场景下难以满足要求。因此,探索一种具备更优动态性与鲁棒性的直流变换器控制策略已成为当前一大研究热点^[3]。

当PSFB变换器运行在复杂工况,尤其处于强非线性扰动影响的环境中,传统控制方法通常难以对系统输出进行有效调节与高精度控制,导致PSFB变换器整体性能下降^[4-5]。模型预测控制(model predictive control, MPC)因良好的动态特性以及能适应系统的非线性和时变性,且在复杂系统中拥有较好的控制性能,近年来在电力电子领域得到了广泛关注^[6]。文献[7]设计了PSFB的MPC控制策略,提高了系统动态性能,但实际系统为非线性系统,当电路参数发生变化时,输出电压存在静差,系统控制性能下降。文献[8]改进了PSFB预测电压模型,加入了控制约束项,相较于传统MPC算法增强了系统抗扰性能。

由于MPC对系统参数依赖度较高,PSFB变换器在线路老化、工作环境温湿度变化等因素影响下难以获取精确的变换器模型参数,故MPC控制性能往往会受到较大影响^[9]。针对该问题,有学者提出无模型预测控制(model-free predictive-control, MFPC)。目前,学界主流的MFPC方法主要可分为两类,其中一类为基于大量物理输入/输出数据集的驱动型方法,通过对数据集进行采样与分析来构建系统模型,从而实现对控制策略的优化与调整,该方法能够有效提高控制器的动态性和鲁棒性,但缺点是计算量过大,当算力无法满足当前数据集处理速度时易造成控制器鲁棒性下降;另一种是超局部理论,超局部模型不依

赖模型参数,能够适用于多种功率变换器^[10-12]。文献[13]采用线性扩张状态观测器对系统动态扰动进行估算,但其高增益特性会引入高频噪声,给控制器带来负面影响;文献[14]提出了一种双有源全桥变换器无模型预测电流控制方法,引入滑模观测器对超局部模型中动态部分进行估计,显著提高了变换器稳定性及动态性,但当扰动处于快速变化时,控制器性能难以维持。

为满足PSFB变换器在非线性扰动下具备较优控制性能的需求,本文结合无模型预测控制与超局部理论,设计一种基于自适应超螺旋滑模观测器的滚动时域优化预测控制(receding horizon optimal predictive control based on adaptive super-twisting sliding mode observer, ASTSMO-RHOPC)策略。首先,该方法基于PSFB变换器输入输出数据建立超局部模型,替代传统的精确电路模型,从而简化系统建模过程,并提高了控制策略的灵活性与适应性,从而降低MPC在面对模型失配时对系统参数的依赖度。其次,将最小二乘法与超螺旋滑模观测器(super-twisting sliding mode observer, STSMO)进行结合,提出一种自适应超螺旋滑模观测器结构,通过将参数辨识算法与STSMO相结合,实现对超局部动态项的估算,进而提升控制精度。具体而言,最小二乘法用于拟合PSFB变换器运行中的非线性扰动变量,引入电流误差趋势预测对STSMO增益进行在线修正,进一步增强PSFB变换器在非线性扰动下的稳态性与动态性。最后,通过对比实验,验证了所提控制策略的卓越性。

1 PSFB变换器数学模型

PSFB变换器拓扑如图1所示。图中, U_{in} 为输入电压, U_{out} 为输出电压。 L_r 为谐振电感, L_f 为滤波电感。功率开关管 S_1 和 S_4 组成一组对角桥臂, S_2 和 S_3 组成另一组对角桥臂。变压器原副边匝数之比为 N 。

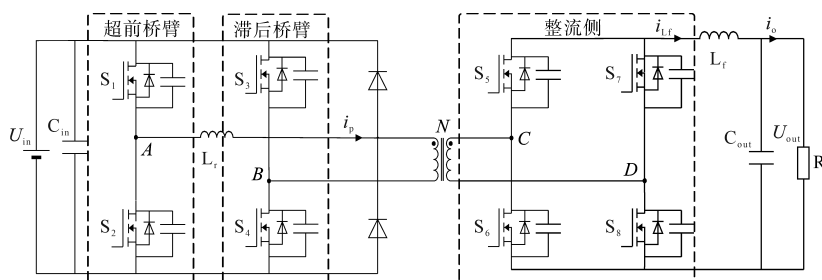


图1 PSFB拓扑图

Fig.1 Diagram of the PSFB topology

设 PSFB 变换器运行在连续导通模式,选取输出电感电流和输出电容电压作为系统状态变量,推导电路数学模型如下:

$$\begin{cases} L_f di_{Lf}/dt = uU_{in}/N - U_{out} \\ C_{out} dU_{out}/dt = i_{Lf} - U_{out}/R \\ u = D - D_{loss} \\ D_{loss} \approx 4L_f f_s i_o / (NU_{in}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u 为副边等效占空比; D 为最优等效占空比; D_{loss} 为占空比丢失预测值; f_s 为系统固定开关频率。

PSFB 变换器工作时序图如图 2 所示,原边占空比设定为 $0.5T_s$,为防止桥臂开关管直连造成变换器损坏故加入死区时间,原边同一桥臂可近似互补导通。通过调节对角桥臂的移相角度,实现原副边功率传输的动态控制。

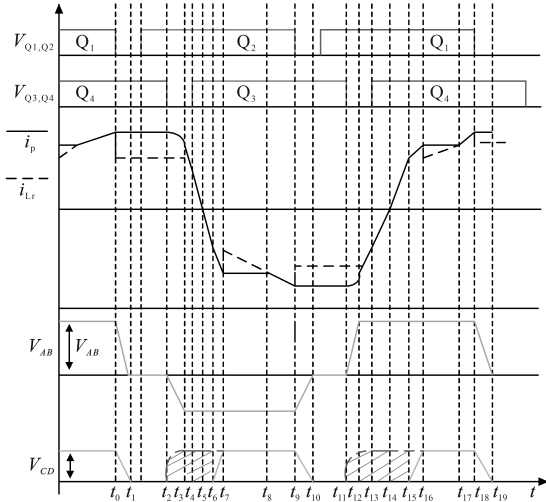


图2 PSFB工作时序图

Fig.2 Timing diagram of the PSFB converter operation

PSFB 变换器移相角度与系统最优占空比之间的关系如下:

$$\theta = (1 - D) \times 180^\circ \quad (2)$$

2 PSFB 变换器无模型预测控制策略

2.1 超局部模型

根据 PSFB 变换器数学模型,可将其改写为单输入单输出的一阶超局部模型:

$$\dot{y} = \alpha u + f \quad (3)$$

式中: $\dot{y}$ 为电感电流状态变量; α 为 PSFB 变换器对应的增益系数; u 为等效占空比; f 为超局部模型的扰动值。

综合式(1)与式(3)可得:

$$\begin{cases} \alpha = U_{in}/(NL_f) \\ f = -U_{out}/L_f \end{cases} \quad (4)$$

其电流超局部模型为

$$di_{Lf}/dt = \alpha u + f \quad (5)$$

基于欧拉离散原理,对式(5)作离散化处理,得到相应离散化表达式为

$$i_{Lf}(k+1) = i_{Lf}(k) + T_s[\alpha u(k) + f(k)] \quad (6)$$

式中: $i_{Lf}(k+1)$ 为滤波电感在 $(k+1)$ 时刻的预测值; $u(k+1)$ 为变换器有效占空比在 $(k+1)$ 时刻的预测值。

将式(6)改写,得到有效占空比表达式为

$$u(k) = [i_{Lf}(k+1) - i_{Lf}(k)]/(\alpha T_s) - f(k)/\alpha \quad (7)$$

数字电路为非理想电路,信号传输存在一定延时,为减小延迟对控制性能造成的影响,采用差一拍延迟补偿,补偿后的表达式为

$$u(k+1) = \frac{i_{Lf}(k+2) - i_{Lf}(k+1)}{\alpha T_s} - \frac{f(k+1)}{\alpha} \quad (8)$$

为实现 PSFB 变换器电感电流无静差跟踪,设计成本函数为

$$g = [i^{ref} - i_{Lf}(k+2)]^2 \quad (9)$$

对式(9)求导,令求导结果为零,此时可以得出 PSFB 变换器最优等效占空比为

$$u(k+1) = \frac{i^{ref} - i_{Lf}(k+1)}{\alpha T_s} - \frac{f(k+1)}{\alpha} \quad (10)$$

根据上式推导可知,通过离散化方法对 PSFB 变换器进行滚动时域优化,进而可以提高变换器控制性能。

2.2 ASTSMO 设计

从前文分析可知,在 PSFB 变换器超局部模型中,集总扰动和系统参数扰动之间存在耦合关系,为进一步提升本文所提 RHOPC 控制策略的性能,本文设计了一种 ASTSMO 用于对电流超局部模型动态项的有效估计。通过结合在线最小二乘法,实时调整 STSMO 的增益矩阵系数,并对非线性扰动作出前馈补偿。该方法有效提高了 STSMO 在复杂工况下 PSFB 变换器对外部扰动的估计精度,增强了系统鲁棒性和自适应性。

首先,将 ASTSMO 的状态方程表示为

$$\begin{cases} \dot{\hat{i}}_{Lf} = \alpha u + \beta_1 |s|^{0.5} \operatorname{sgn}(s) + \int \beta_2 \operatorname{sgn}(s) dt \\ s = \hat{i}_{Lf} - i_{Lf} \end{cases} \quad (11)$$

式中: β_1, β_2 分别为对误差的观测增益值; α 为控制输入量增益; s 为所设计的滑模面。

因此,离散化时间模型中的集总扰动估计值可表示为

$$\mu = \beta_1 |s|^{0.5} \operatorname{sgn}(s) + \int \beta_2 \operatorname{sgn}(s) dt \quad (12)$$

其次,从STSMO状态方程中可以看出,其误差观测增益在运行过程中持续受到积分带来的延迟,易引发系统响应滞后。针对该问题,本文提出一种具备自适应调节能力的ASTSMO,通过引入自适应调节机制,减小滞后效应负面影响,从而有效提高观测器性能。所设计ASTSMO为

$$\begin{cases} \dot{\hat{i}}_{Lf} = \alpha u + \lambda [\beta_1 |s|^{0.5} \operatorname{sgn}(s) + \int \beta_2 \operatorname{sgn}(s) dt] \\ s = \hat{i}_{Lf} - i_{Lf} \end{cases} \quad (13)$$

式中: λ 为自适应跟踪因子。

为实现STSMO增益矩阵系数的实时自适应调节机制,采用递推最小二乘法对电流误差序列进行动态拟合与趋势预测,从而计算未来时刻STSMO的最佳误差增益矩阵系数。该方法基于差分方程构建估计模型,使得增益矩阵能够实时响应系统电感电流状态的动态变化,提高了STSMO在变工况条件下的适应能力。具体模型如下:

$$\lambda(k) = -\eta_1 \lambda(k-1) + \eta_2 s(k-1) \quad (14)$$

递推最小二乘法的数学表达式为

$$\begin{cases} \hat{\eta}(k) = \hat{\eta}(k-1) + K(k) \varepsilon(k) \\ K(k) = \frac{P(k-1) \varphi(k)}{1 + \varphi(k)^T P(k-1) \varphi(k)} \\ P(k) = [1 - K(k) \varphi(k)^T] P(k-1) \end{cases} \quad (15)$$

其中,定义控制器所采集PSFB变换器输入输出物理量为 $\varphi(k) = [-\omega(k-1) \ s(k-1)]^T$,修正项定义为 $K(k) \varepsilon(k)$, $P(k)$ 为协方差阵, $\hat{\eta} = [\eta_1 \ \eta_2]^T$ 为控制器参数向量。

综合式(13)和式(15)推导结果,本文所提ASTSMO结构框图如图3所示。

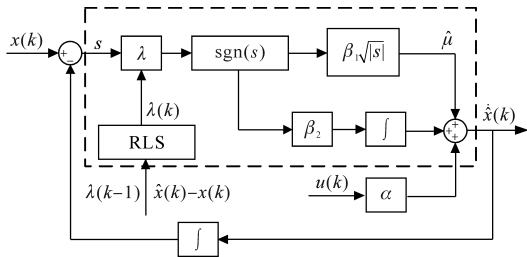


图3 自适应超螺旋滑模观测器结构框图

Fig.3 Block diagram of ASTSMO

2.3 稳定性分析

结合式(3)与式(11),推导所提改进ASTSMO误差动态方程如下:

$$\dot{s} = -[\lambda \beta_1 |s|^{0.5} \operatorname{sgn}(s) + \int \lambda \beta_2 \operatorname{sgn}(s) dt] + \mu \quad (16)$$

通常假设该值为有界量,并将其表示为

$$|\dot{\mu}| \leq \delta \quad \forall t \geq 0 \quad (17)$$

式中: δ 为近似零的值。

将式(16)表示为状态方程:

$$\begin{cases} \dot{s} = -\lambda \beta_1 |s|^{1/2} \operatorname{sgn}(s) + y \\ \dot{y} = -\lambda \beta_2 \operatorname{sgn}(s) + \dot{\mu} \end{cases} \quad (18)$$

为进一步分析,选取对称正定矩阵为

$$P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 4\lambda\beta + (\lambda\alpha)^2 & -\lambda\alpha \\ -\lambda\alpha & 2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

将对称正定矩阵以类二次型Lyapunov函数设计为

$$V(s, y) = \zeta^T P \zeta \quad (20)$$

其中 $\zeta = [|s|^{1/2} \operatorname{sgn}(s) \ y]$

又因为 $\frac{d|s|}{dt} = \dot{s} \operatorname{sgn}(s)$, 因此,可对 ζ 导数作进一步推导:

$$\dot{\zeta} = \frac{1}{|\zeta_1|} (A + B \tilde{\mu}) \quad (21)$$

其中 $\tilde{\mu} = |\zeta_1| \dot{\mu}$ $|\zeta_1| = |s|^{1/2}$

矩阵 A, B 和输出矩阵 C 展开为

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \lambda \beta_1 & \frac{1}{2} \\ -\lambda \beta_2 & 0 \end{bmatrix} \\ B = [0 \ 1]^T \\ C = [1 \ 0] \end{cases} \quad (22)$$

结合式(20)与式(21),对 $V(s, y)$ 导数进行求解,可以得到如下结果:

$$\begin{aligned} \dot{V}(s, y) &= 2\dot{\zeta}^T P \zeta \\ &= \frac{1}{|s|^{1/2}} (2\zeta^T A^T + 2\tilde{\mu} B^T) P \zeta \\ &\leq \frac{1}{|s|^{1/2}} \zeta^T (A^T P + P A + \delta^2 C^T C + P B B^T P) \zeta \end{aligned} \quad (23)$$

对式(23)进一步整理,将不等式右边整理为 $Q = -(A^T P + P A + \delta^2 C^T C + P B B^T P)$, 则 $\dot{V}(s, y)$ 可简化为

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{|\zeta_1|} \zeta^T Q \zeta \quad (24)$$

对 Q 进行展开:

$$Q = \begin{bmatrix} \lambda^2 \beta_1 \beta_2 + \frac{(\lambda \beta_1)^3}{2} - \delta^2 - \frac{(\lambda \beta_1)^2}{4} & \frac{\lambda \beta_1}{2} - \frac{(\lambda \beta_1)^2}{2} \\ \frac{\lambda \beta_1}{2} - \frac{(\lambda \beta_1)^2}{2} & \frac{\lambda \beta_1}{2} - 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

结合式(19)、式(24)和式(25)可知,判定 Q

与 P 满足对称正定矩阵所需的要求为

$$\begin{cases} \beta_1 > \frac{2}{\lambda} \\ \beta_2 > \frac{\beta_1^3 + \delta^2(4\beta_1 - 8)}{\lambda\beta_1(4\beta_1 - 8)} \end{cases} \quad (26)$$

综上分析,当所设计 ASTSMO 的 β_1, β_2 符合式 (26) 时, $V(s, y) > 0, \dot{V}(s, y) < 0$ 。此时,式 (23) 满足 Lyapunov 第二定律,因此可以认为本文所设计的 ASTSMO 是稳定的。

2.4 ASTSMO-RHOPC 设计

本文所提 ASTSMO-RHOPC 控制框图如图 4 所示。

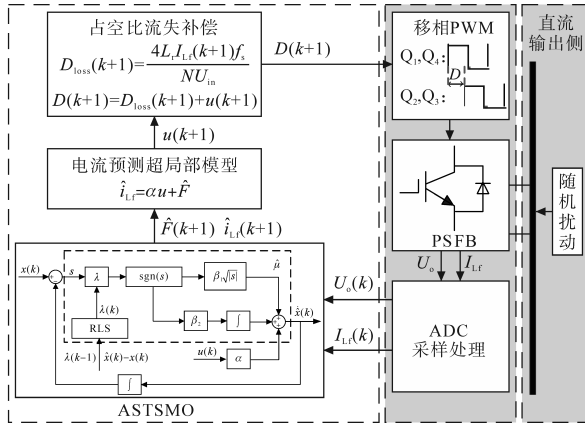


图 4 系统控制框图

Fig.4 Control block diagram of system

将超局部模型中的扰动项用 ASTSMO 估计所得 $\hat{F}$ 进行替换,并实时补偿至控制器中。将式 (10) 有效占空比预测离散公式改写为

$$\begin{cases} u(k+1) = \frac{i_{Lf}^{ref} - i_{Lf}(k+1)}{\alpha T_s} - \frac{\hat{F}(k+1)}{\alpha} \\ \hat{F}(k+1) = \lambda[\beta_1 |s|^{0.5} \text{sgn}(s) + \int \beta_2 \text{sgn}(s) dt] \end{cases} \quad (27)$$

系统集总扰动观测值由 ASTSMO 估计所得,当 PSFB 变换器工况发生变化时,ASTSMO 能够预测电感电流误差变化趋势,从而对观测误差增益矩阵自适应调整,实时在线更新超局部模型集总扰动,有效提高 PSFB 变换器控制性能。

3 实验验证

图 5 展示了本文所搭建的相关实验平台,其功率电路主要参数如表 1 所示。为验证本文所提控制策略在稳态精度与动态性能方面具有有效性与优越性,在该实验平台上分别对 STSMO-RHOPC 和 ASTSMO-RHOPC 进行相关实验验证。

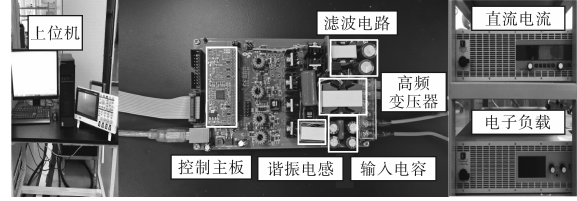


图 5 PSFB 平台实物图

Fig.5 Diagram of physical PSFB converter platform

表 1 主功率电路参数

Tab.1 Parameters of the main power circuit

类别	参数	类别	参数
输入电压 U_{in}/V	50	负载电阻 R/Ω	0.72
谐振电感 $L_r/\mu H$	3.3	开关频率 f_s/kHz	100
滤波电感 $L_f/\mu H$	3.3	额定功率 P/W	200
输出电容 $C_{out}/\mu F$	500		

3.1 稳态性能对比实验

图 6 展示了两算法在稳态下的对比实验结果。实验参数设置为: $U_{in}=50V, U_{out}=12V, R=2\Omega$ 。实验结果表明,STSMO-RHOPC 在稳态下的输出电压纹波为 475 mV;而 ASTSMO-RHOPC 的稳态输出电压纹波仅为 261 mV。结果表明,ASTSMO-RHOPC 稳态性能更为优越。

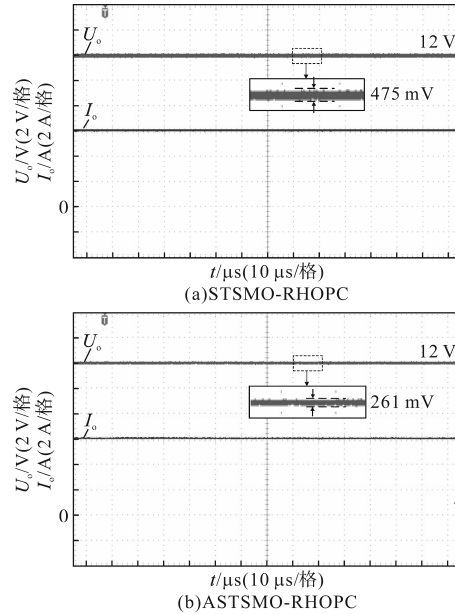


图 6 稳态实验

Fig.6 Steady-state experiment

3.2 动态性能对比实验

图 7 展示了两算法在动态工况下的响应特性对比实验。实验参数设置为: $U_{in}=50V, R=1.2\Omega, U_{out}$ 由 6 V 突变至 12 V。实验结果表明,STSMO-RHOPC 输出电压完成动态调节所需时间为 22.5 ms;而 ASTSMO-RHOPC 输出电压完成动态调节所需时间仅需 17.6 ms。结果表明,ASTSMO-

RHOPC在动态性能方面更为优越。

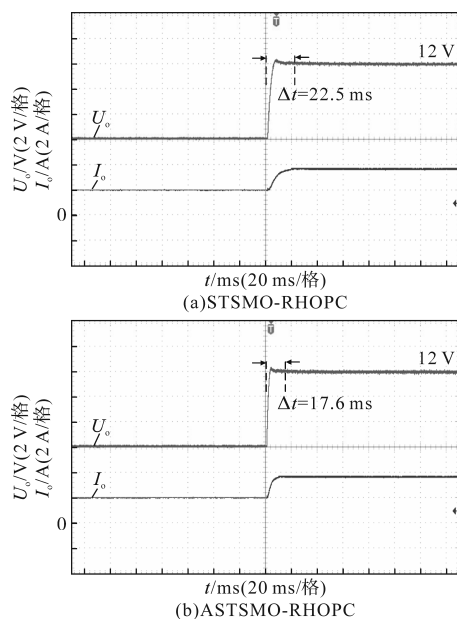


图7 输出电压突变实验

Fig.7 Output voltage mutation experiment

4 结论

针对传统控制策略在PSFB变换器复杂工况下易导致系统控制性能恶化的问题,本文提出一种融合ASTSMO与RHOPC的控制策略。首先,该策略通过引入超局部建模方法,对PSFB系统的物理模型进行简化,有效缓解了控制器对模型精确性的依赖程度;其次,构建ASTSMO观测器,增强对电感电流超局部模型中动态分量的估计精度,提升系统鲁棒性。最后,通过实验验证了所提ASTSMO-RHOPC控制性能方面的优越性。

参考文献

- [1] 何俊鹏,张润泽,白旭峰,等. 基于ZVS负载范围的移相全桥变换器参数优化设计[J]. 电气传动, 2021, 51(21): 14-21.
HE Junpeng, ZHANG Runze, BAI Xufeng, et al. Optimization parameter design of phase-shifted full-bridge converter based on ZVS load range[J]. Electric Drive, 2021, 51(21): 14-21.
- [2] BHARGAVI P, CHAGANTI P C V, SOWMYA V, et al. A comparative study of phase shifted full bridge and high-frequency resonant transistor DC-DC converters for EV charging application[C]//2022 IEEE 2nd International Conference on Mobile Networks and Wireless Communications (ICMNWC), IEEE, 2022: 1-6.
- [3] 应鸿,游锋,林琳,等. 高频隔离型B-PSFB变换器模块优化设计[J]. 电气传动, 2020, 50(9): 60-65.
YING Hong, YOU Feng, LIN Lin, et al. High-frequency isolated bidirectional PSFB (B-PSFB) converter optimal design[J]. Electric Drive, 2020, 50(9): 60-65.

- [4] 曾志辉,刘云鹏,张琳梅,等. 基于新能源发电改进型移相全桥变换器研究[J]. 电气工程学报, 2024, 19(2): 65-73.
ZENG Zhihui, LIU Yunpeng, ZHANG Linmei, et al. Analysis of improved phase-shift full-bridge converter for new energy generation[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(2): 65-73.
- [5] 高瑞祥,高俊侠,李永亮,等. 移相全桥电路寄生振荡的抑制策略[J]. 电力电子技术, 2024, 58(11): 38-40, 43.
GAO R X, GAO J X, LI Y L, et al. The suppression strategy of parasitic oscillations in phase-shifting full bridge circuits[J]. Power Electronics, 2024, 58(11): 38-40, 43.
- [6] 张笛,黄路,崔晶,等. 单相级联H桥虚拟磁链模型预测功率控制[J]. 电气传动, 2023, 53(10): 10-16.
ZHANG Di, HUANG Lu, CUI Jing, et al. Virtual flux model prediction power control algorithm for cascaded H-bridge rectifier[J]. Electric Drive, 2023, 53(10): 10-16.
- [7] SAEED J, WANG L, FERNANDO N. Model predictive control of phase shift full-bridge DC-DC converter using Laguerre functions[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 30(2): 819-826.
- [8] BAK Y, LEE Y J, LEE K B. Dynamic characteristic improvement of phase-shift full-bridge center-tapped converters using a model predictive control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(2): 1488-1497.
- [9] SUN X, ZHOU Y, CHEN G, et al. Model predictive control of a phase-shifted full-bridge DC-DC converter[C]//2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia), IEEE, 2020: 2710-2714.
- [10] JIN N, CHEN M, GUO L, et al. Double-vector model-free predictive control method for voltage source inverter with visualization analysis[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(10): 10066-10078.
- [11] 曾桑杰,李红梅,张恒果,等. Boost PFC变换器的无模型预测电流控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 106-111.
ZENG Shenjie, LI Hongmei, ZHANG Hengguo, et al. Model-free predictive current control for Boost PFC converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 106-111.
- [12] BABAYOMI O, ZHANG Z, LI Z. Model-free predictive control of DC-DC boost converters: sensor noise suppression with hybrid extended state observers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 39(1): 245-259.
- [13] 肖盼,于新红. 基于扩张状态观测器的移相全桥变换器无模型预测电流控制[J]. 微特电机, 2023, 51(8): 41-46.
XIAO Pan, YU Xinhong. Model-free predictive current control of phase-shifted full-bridge converters based on extended state observer[J]. Small & Special Electrical Machines, 2023, 51(8): 41-46.
- [14] SUN J, QIU L, LIU X, et al. Model-free moving-discretized-control-set predictive control for three-phase dual-active-bridge converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 39(8): 9160-9173.

收稿日期:2025-04-16

修改稿日期:2025-05-28