

# 基于超局部模型的双有源桥直流变换器无差拍预测控制方法

尹政<sup>1</sup>, 邓富金<sup>1</sup>, 沈湛<sup>1</sup>, 黄堃<sup>2,3</sup>, 詹昕<sup>4</sup>

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106;  
3. 东南大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096; 4. 国网江苏省电力公司扬州供电公司, 江苏 扬州 225000)

**摘要:**为改善双有源桥(DAB)直流变换器传统模型预测控制(MPC)的稳态、动态及鲁棒性能,提出一种基于超局部模型的DAB直流变换器无差拍预测控制方法。建立了DAB直流变换器的超局部模型,分析了不同控制周期的超局部模型关系,实现了超局部模型的实时更新,保证了DAB直流变换器电压预测控制的鲁棒性;提出无差拍控制与超局部模型相结合的策略,实时求解各控制周期内的最优移相角,从而确保DAB直流变换器的电压控制精度。所提方法能够动态更新超局部模型并优化移相角,有效克服电感和电容参数失配所造成的预测偏差,改善了传统MPC的输出电压性能。最后,通过实验验证了所提方法的有效性和优越性。

**关键词:**双有源桥变换器;无模型预测控制;超局部模型;无差拍预测控制;参数鲁棒性

**DOI:**10.15938/j.emc.2025.10.010

中图分类号:TM464

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2025)10-0106-10

## Deadbeat predictive control for dual-active-bridge DC converters based on ultra-local model

YIN Zheng<sup>1</sup>, DENG Fujin<sup>1</sup>, SHEN Zhan<sup>1</sup>, HUANG Kun<sup>2,3</sup>, ZHAN Xin<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. State Grid NARI Technology Company Ltd., Nanjing 211106, China; 3. School of Electronic Science & Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 4. Yangzhou Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yangzhou 225000, China)

**Abstract:** To enhance the steady-state, dynamic, and robustness performance of traditional model predictive control (MPC) for dual active bridge (DAB) DC converters, a deadbeat predictive control method based on ultra-local model was proposed. An ultra-local model of the DAB DC converter was established, the relationships of ultra-local models were analyzed over different control periods, and real-time updating of the ultra-local model was achieved to ensure the robustness of the voltage predictive control. By integrating the concept of deadbeat control and the ultra-local model, the optimal phase-shift-angle was computed in real-time for each control period, ensuring voltage control precision of DAB DC converter. This approach can update the ultra-local model of DAB DC converter and calculate the optimal phase-shift-angle in real-time, eliminating the impact of inductance and capacitance parameter mismatches on

收稿日期: 2024-08-28

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项(2022YFE0196300); 东南大学博士研究生创新能力提升计划(CXJH\_SEU 24163)

作者简介: 尹政(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源变换器预测控制;

邓富金(1983—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为模块化多电平变流器;

沈湛(1991—), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 研究方向为电力电子及人工智能技术;

黄堃(1985—), 男, 硕士, 研究方向为新能源接入与运行控制、综合能源服务;

詹昕(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制。

通信作者: 邓富金

predictive control and improving the output voltage performance of traditional MPC. Finally, experimental results demonstrate the effectiveness and advantages of the proposed approach.

**Keywords:** dual active bridge converter; model-free predictive control; ultra-local model; deadbeat predictive control; parameter robustness

## 0 引言

近年来,直流微电网凭借其高效的能源传输和分配能力,在全球范围内的应用领域不断扩展<sup>[1-2]</sup>。直流微电网的核心挑战在于实现高效率的电能转换与传输,双有源桥(dual-active-bridge, DAB)直流变换器以其宽范围调控能力、灵活的升降压特性及电气隔离等优势,在此方面展现出关键作用。其不仅优化了直流微电网中的能源转换过程,提高了能源利用效率,还通过高效的电压控制提升了系统的稳定性,推动了直流微电网技术的进一步发展<sup>[3-4]</sup>。

模型预测控制(model predictive control, MPC)已广泛应用在 DAB 直流变换器以实现可靠的电压控制,其通过建立变换器数学模型,预测其未来时刻的系统行为,并通过价值函数滚动优化实时选择最佳控制输入,从而实现高动态性能和多目标优化<sup>[5-9]</sup>。然而, MPC 的预测性能依赖于模型参数的准确性,元件老化、温度变化和制造公差易导致 DAB 直流变换器的系统实际参数与其模型参数不一致,造成参数失配,增大预测误差,影响 DAB 系统效率及稳定性<sup>[10-11]</sup>。

为增强 MPC 对参数变化的适应性,学者们已发展出多种适用于 DAB 直流变换器的改进方案,主要包括基于扰动观测器的 MPC<sup>[12-14]</sup>以及基于参数辨识的 MPC<sup>[15-19]</sup>。基于扰动观测器的 MPC 利用观测器估计参数及系统扰动,提高了 MPC 中电压预测的精度。文献[12]设计了一种用于 DAB 变换器的未知参数扰动观测器,提升了预测电压控制的鲁棒性能。文献[13]利用滑模观测器估计 DAB 的系统扰动。文献[14]利用扩展状态观测器观测并抑制系统扰动。然而,基于扰动观测器的 MPC 需要在不同工况下实时调整观测器增益,以保证观测精度。

此外,研究人员针对 DAB 直流变换器提出了基于参数辨识的 MPC,以提高 MPC 的鲁棒性。参数辨识方法利用 DAB 变换器的输入和输出数据,并采用合适的算法实时估计系统参数,从而建立精确的模型进行预测和控制。文献[15]采用梯度下降法实

现在电感参数辨识。文献[16]则利用粒子滤波进行电感估计。文献[17-20]借助递归最小二乘法对 DAB 系统参数进行在线辨识,以增强 MPC 的参数容错能力。然而,参数辨识精度易受到外部扰动影响,若存在参数辨识误差, DAB 变换器的电压输出性能仍会受损。

为此,本文提出一种基于超局部模型(ultra-local, UL)的无差拍预测控制(deadbeat predictive control, DPC)策略。首先探讨了参数失配在传统 MPC 中对 DAB 电压控制的具体影响;然后,提出了 UL-DPC 方法,通过建立并更新系统超局部模型,实现 DAB 直流变换器预测电压无模型计算,消除参数对预测电压计算的影响;进而,结合无差拍控制思想,实时计算 DAB 直流变换器最优移相角,提高了最优移相角计算精度;最后,通过实验验证了所提方法的可行性和有效性。

## 1 DAB 直流变换器拓扑及运行原理

典型的 DAB 直流变换器拓扑结构如图 1 所示。其中,系统参数定义如下: $L$  为变压器串联电感; $C_1$  和  $C_2$  分别表示一次侧和二次侧电容; $R$  为负载电阻; $v_1$  和  $v_2$  为两侧电压; $i_L$  为串联电感电流; $i_s$  代表二次侧 H 桥电流; $i_o$  为负载电流; $T_r$  为高频变压器; $n$  为其匝比。 $Q_1 \sim Q_4$  为一次侧 H 桥开关管; $Q_5 \sim Q_8$  为二次侧 H 桥开关管。

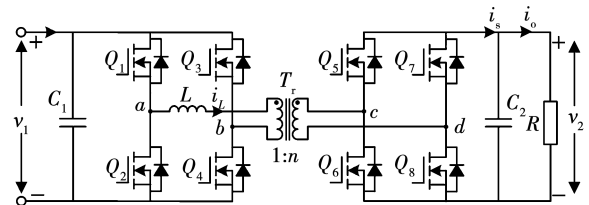


图 1 DAB 直流变换器拓扑结构

Fig. 1 Topology of DAB DC converter

图 2 为 DAB 直流变换器在单移相调制下的电流及电压波形。图中,串联电感电流  $i_L$  由变压器一次侧电压  $v_{ab}$  以及变压器二次侧电压  $v_{cd}$  之间的移相角  $D$  决定。

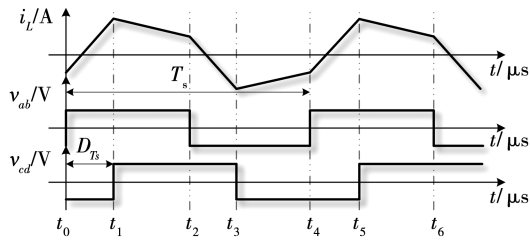


图2 采用单移相调制时DAB变换器的电流与电压波形

Fig.2 Current and voltage waveforms of the DAB converter adopting single phase shift modulation

在图2中,当功率双向传输时,移相角 $D$ 属于 $[-0.5 \sim 0.5]$ ;当功率由一次侧传输向二次侧时,移相角 $D$ 属于 $[0 \sim 0.5]$ ;当功率由二次侧传输向一次侧时,移相角 $D$ 属于 $[-0.5 \sim 0]$ 。在单移相调制下,DAB变换器的传输功率 $P^{[8]}$ 为

$$P = 2 \int_0^{T_s} v_{ab} i_r(t) dt = \frac{T_s v_1 v_2 D(1-2D)}{nL} \quad (1)$$

式中 $T_s$ 为控制周期。

## 2 DAB直流变换器传统MPC及分析

MPC在DAB直流变换器中已有广泛研究<sup>[8]</sup>。其过程如图3所示。首先确定各控制周期内的移相角候选集 $\{D + \Delta D_a, D, D - \Delta D_a\}$ ,进而预测各移相角对应的输出电压 $v_2(k+1)$ 。通过价值函数评估预测误差,选取误差最小的移相角作为最优解,并基于单移相调制生成开关信号 $S_1 \sim S_8$ ,以驱动 $Q_1 \sim Q_8$ 。

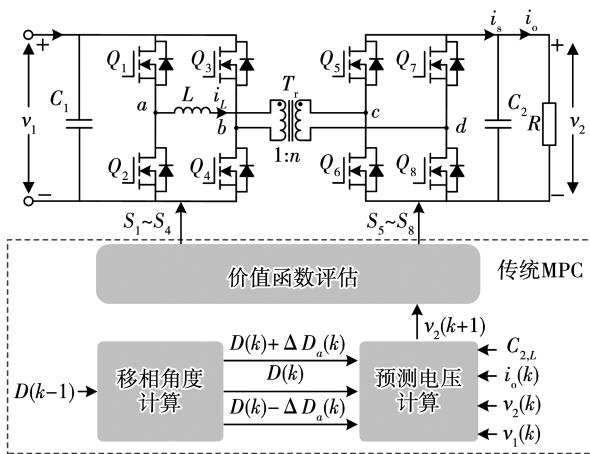


图3 传统的MPC方法控制架构

Fig.3 Traditional MPC method control architecture

### 2.1 移相角度计算

如图3所示,每个控制周期内的移相角候选集

为 $\{D + \Delta D_a, D, D - \Delta D_a\}$ 。这里, $D$ 表示上一周期的最优移相角, $\Delta D_a$ 为自适应移相角增量,其数值计算公式为

$$\Delta D_a = \Delta D(1 + \varepsilon \Delta v^2) \quad (2)$$

其中:

$$\Delta D = \frac{T_c}{T_s} \quad (3)$$

$\Delta v =$

$$\begin{cases} |v_{\text{ref}}(k) - v_2(k)|, & \text{当 } |v_{\text{ref}}(k) - v_2(k)| < v_m; \\ v_m, & \text{当 } v_m \leq |v_{\text{ref}}(k) - v_2(k)|. \end{cases}$$

(4)

式中: $T_c$ 为DSP处理器的时钟周期; $\Delta v$ 表示电压误差; $v_m$ 为其允许最大值; $v_{\text{ref}}(k)$ 是 $k$ 时刻的输出电压参考值; $\varepsilon$ 为调节系数。

### 2.2 预测电压计算

图3中,预测电压计算部分得到了每个移相角对应的预测电压 $v_2(k+1)$ 。根据图1所示DAB直流变换器,其二次侧电压可以表示为

$$C_2 \frac{dv_2}{dt} = i_s - i_o \quad (5)$$

根据前向欧拉法,式(5)可以离散并表示为

$$v_2(k+1) = v_2(k) + \frac{T_s}{C_2} [i_s(k) - i_o(k)] \quad (6)$$

其中:

$$i_s = \frac{P}{v_2} = \frac{T_s v_1 D(1-2D)}{nL} \quad (7)$$

### 2.3 价值函数评估

为从移相角集合 $\{D + \Delta D_a, D, D - \Delta D_a\}$ 中选取最优值用于下一控制周期,定义价值函数<sup>[8]</sup>如下:

$$G = [v_{\text{ref}}(k+1) - v_2(k+1)]^2 \quad (8)$$

根据式(8)得到最优移相角,并结合单移相调制,可实现对开关管 $Q_1 \sim Q_8$ 的控制。两侧H桥均采用50%占空比控制。一次侧H桥中, $S_1$ 与 $S_4$ 信号相同, $S_2$ 与 $S_3$ 与之互补;二次侧H桥的控制逻辑类似, $S_5$ 、 $S_8$ 同步, $S_6$ 、 $S_7$ 则与之互补。

### 2.4 参数失配时传统MPC性能分析

根据式(6)、式(7)可知,当变压器串联电感模型参数 $L_0$ 和二次侧电容模型参数 $C_{20}$ 与实际参数 $L$ 和 $C_2$ 不匹配时,会影响 $v_2(k+1)$ 预测性能,导致较大的价值函数 $G$ 。基于后文表1的参数,图4展示了参数失配情况下价值函数 $G$ 的变化趋势,此处参数误差定义为 $P_e = L_0/L = C_{20}/C_2$ 。分析图4可知,当参数误差 $P_e \neq 1$ 时,价值函数值 $G$ 随之增加,导致DAB输出功率及效率降低<sup>[15]</sup>。

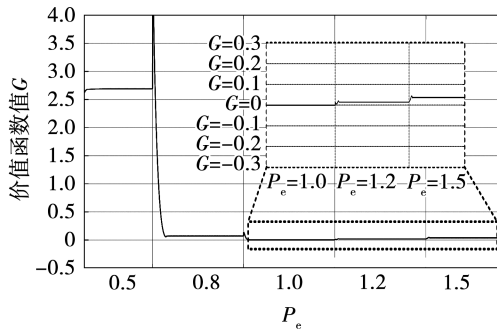


图 4 不同  $P_e$  下 MPC 价值函数值

Fig. 4 Cost function value of MPC under different  $P_e$

### 3 所提基于超局部模型的 DAB 直流变换器无差拍预测控制

为了降低参数失配对传统 MPC 的影响并改善电压预测精度,提出了一种基于超局部模型的 DAB 直流变换器无差拍预测控制方法,如图 5 所示。

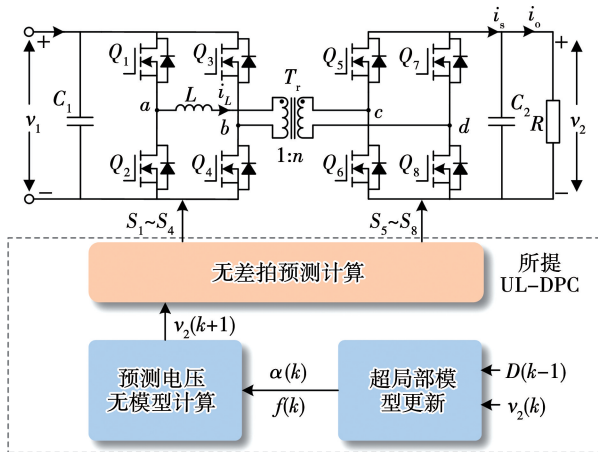


图 5 本文提出的 UL-DPC 方法控制架构

Fig. 5 UL-DPC method control architecture proposed in this paper

#### 3.1 所提 DAB 直流变换器超局部模型

##### 1) 超局部模型建立。

根据式(5),可以建立 DAB 直流变换器的超局部模型

$$\frac{dv_2}{dt} = \alpha u + f. \quad (9)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{T_s v_1}{nLC_2}; \\ u &= D(1 - 2D); \\ f &= -\frac{i_o}{C_2} + f_0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $\alpha$  为超局部模型增益; $u$  为超局部模型输入变

量; $f$  为超局部模型的集中扰动; $f_0$  为超局部模型的非线性扰动。

##### 2) 超局部模型更新及预测电压无模型计算。

为了实现超局部模型中超局部模型增益  $\alpha$  及超局部模型集中扰动  $f$  的实时更新,可根据前向欧拉法,将式(9)离散为

$$v_2(k+1) = v_2(k) + T_s[\alpha u(k) + f(k)]. \quad (11)$$

为了获得  $\alpha$  和  $f(k)$ ,式(11)可以进一步推导为

$$\Delta v_2(k) = T_s[\alpha u(k-1) + f(k)]. \quad (12)$$

其中

$$\Delta v_2(k) = v_2(k) - v_2(k-1). \quad (13)$$

同理,根据式(12)和式(13)可以得到

$$\Delta v_2(k-1) = T_s[\alpha u(k-2) + f(k-1)]. \quad (14)$$

其中

$$\Delta v_2(k-1) = v_2(k-1) - v_2(k-2). \quad (15)$$

将式(12)与式(14)相减可以得到

$$\Delta v_2(k) - \Delta v_2(k-1) = T_s\alpha[u(k-1) - u(k-2)] + T_s[f(k) - f(k-1)]. \quad (16)$$

由于 DAB 直流变换器工作在较高的采样及控制频率下,可认为  $f(k) - f(k-1) \approx 0$ 。因此,公式(16)可以进一步推导为

$$\Delta v_2(k) - \Delta v_2(k-1) = T_s\alpha[u(k-1) - u(k-2)]. \quad (17)$$

根据式(17),可以得到超局部模型增益  $\alpha$  并表示为

$$\alpha = \frac{\Delta v_2(k) - \Delta v_2(k-1)}{T_s[u(k-1) - u(k-2)]}. \quad (18)$$

将式(18)代入式(12)可以得到

$$f(k) = \frac{\Delta v_2(k)}{T_s} - \alpha u(k-1). \quad (19)$$

根据式(18)可知, $\alpha$  的计算结果受分母  $u(k-1) - u(k-2)$  数值影响。当  $u(k-1) \approx u(k-2)$  时, $\alpha$  的计算将失效。因此,需要设置阈值  $\sigma$  以保证  $\alpha$  计算的有效性。当  $|u(k-1) - u(k-2)| < \sigma$  时, $\alpha$  的计算结果与上一控制周期保持一致;当  $|u(k-1) - u(k-2)| \geq \sigma$  时, $\alpha$  根据式(17)计算得到。根据  $\alpha$ 、 $f(k)$  以及式(11)可以得到  $(k+1)$  时刻的预测电压  $v_2(k+1)$ ,其消除了参数的影响,保证了预测电压的鲁棒性。

#### 3.2 所提方法无差拍预测控制

为了进一步降低预测电压无模型计算精度,可结合无差拍控制思想,认为  $v_{ref}(k+1) = v_2(k+1)$ 。

进而,通过对式(8)求导可得

$$u(k+1) = \frac{v_{\text{ref}}(k+1) - v_2(k)}{T_s \alpha} - \frac{f(k)}{\alpha} \quad (20)$$

结合式(20)和式(10)可以得到

$$D(k+1) = \frac{1 - \sqrt{1 - 8u(k+1)}}{4} \quad (21)$$

同时,当功率由一次侧传输向二次侧时,需要对  $D(k+1)$  进行限幅。当  $D(k+1) > 0.5$  时,需将  $D(k+1)$  设置为 0.5; 当  $D(k+1) < 0$  时,需将  $D(k+1)$  设置为 0。

### 3.3 所提 UL-DPC 方法

图6为所提 UL-DPC 应用在 DAB 直流变换器的流程图。首先,采样获得  $v_2(k)$ 、 $v_2(k-1)$ 、 $v_2(k-2)$ 、 $D(k-1)$  以及  $D(k-2)$ , 将其代入式(18)和式(19)计算超局部模型增益  $\alpha$  和超局部模型集中扰动  $f(k)$ ; 进而,根据式(20)获得超局部模型最优输入变量  $u(k+1)$ , 并根据式(21)计算最优移相角  $D(k+1)$ 。最后,结合单移相调制原理,生成控制信号  $S_1 \sim S_8$  控制开关管  $Q_1 \sim Q_8$ 。

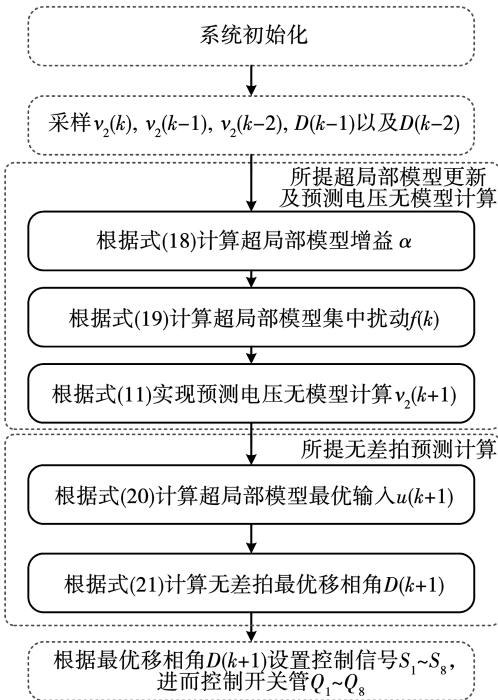


图6 所提 UL-DPC 方法

Fig. 6 Proposed UL-DPC method

## 4 实验验证

为检验所提 UL-DPC 方法的性能,构建了图7所示的 DAB 实验系统,对比所提方法与文献[8]中传统 MPC 在输出电压控制上的表现。实验采用

TMS320C28346 作为控制器,具体参数见表1。

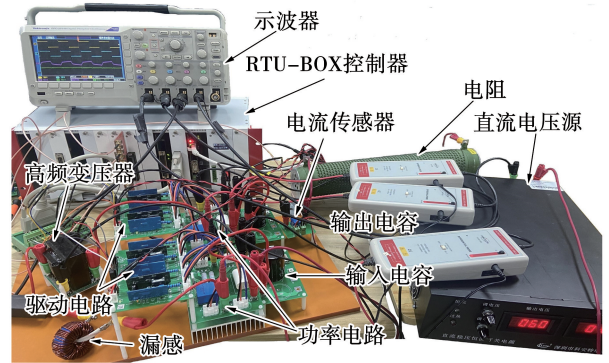


图7 DAB 直流变换器实验平台

Fig. 7 Experimental platform of DAB DC converter

表1 DAB 系统参数

Table 1 Parameters of DAB System

参数	数值
输入电压 $v_1/V$	50
输出电压参考 $v_{\text{ref}}/V$	50, 40
变压器串联电感 $L/\mu\text{H}$	61.5
输入电容 $C_1/\mu\text{F}$	820
输出电容 $C_2/\mu\text{F}$	820
负载电阻 $R/\Omega$	10, 20
控制周期 $T_s/\mu\text{s}$	50

### 4.1 稳态实验验证

#### 1) 参数准确。

在参数准确条件下,图8对比了所提 UL-DPC 与传统 MPC 的稳态电压控制效果 ( $v_{\text{ref}} = 50 \text{ V}$ )。图8(a)所示的传统 MPC 性能受移相角计算精度限制,最大预测误差达 1.48 V。而图8(b)所示的 UL-DPC 方法引入无差拍控制思想直接求解最优移相角,将电压误差减小至 0.82 V,体现出更优的控制精度。

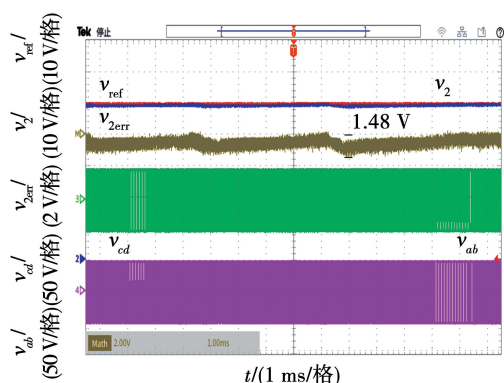
#### 2) 参数失配。

图9展示了在参数失配情况下本文 UL-DPC 与传统 MPC 的稳态电压控制效果。设定电感实际值  $L$  和电容实际值  $C_2$  分别与模型参数  $L_0$ 、 $C_{20}$  存在偏差,参数误差  $P_e$  ( $L_0/L = C_{20}/C_2$ ) 从 0.2 至 1.8 间变化,输出电压参考为 50 V。从图9(a)可见,传统 MPC 依赖精确模型,参数误差引起输出电压明显偏离设定值。而 UL-DPC 借助超局部模型,显著抑制了参数偏差对控制性能的影响,如图9(b)所示。

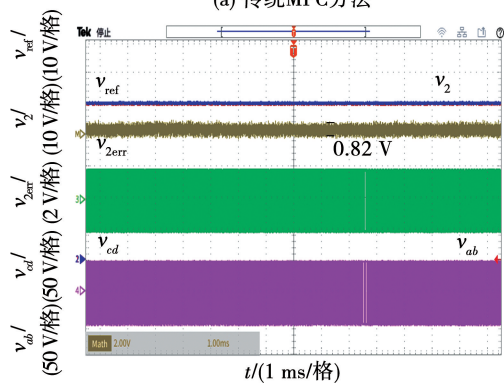
### 4.2 动态实验验证

#### 1) 参数准确。

图10为参数准确前提下参考电压阶跃变化时的动态响应对比。



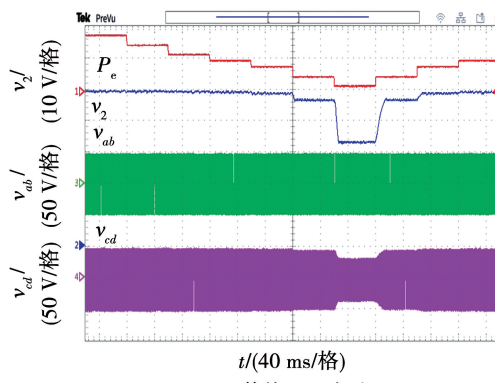
(a) 传统MPC方法



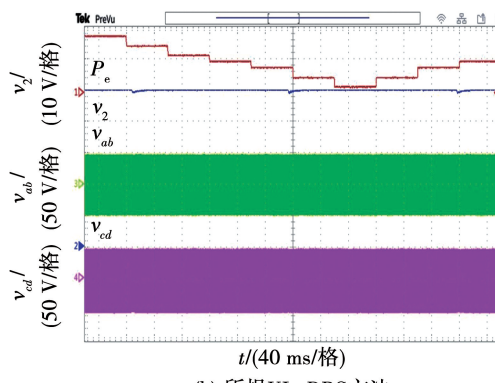
(b) 所提UL-DPC方法

图 8 稳态性能实验对比 (参数无失配情形)

Fig. 8 Steady-state performance experiment comparison (No parameter mismatch)



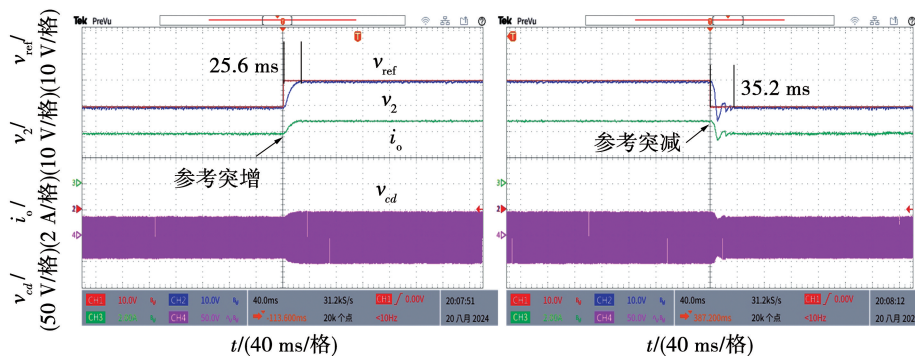
(a) 传统MPC方法



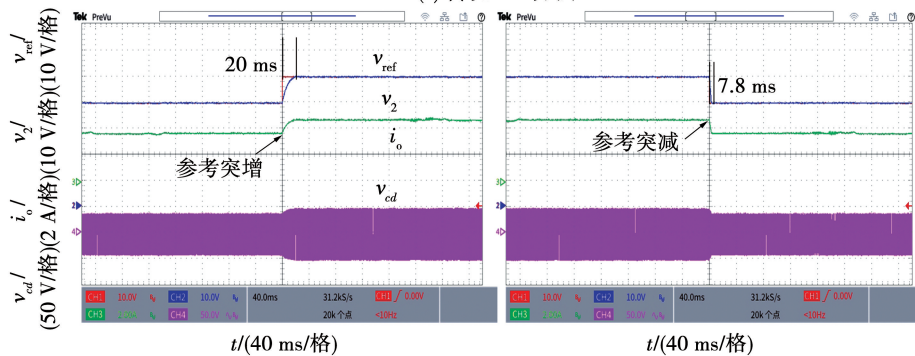
(b) 所提UL-DPC方法

图 9 参数存在偏差时的稳态控制效果对比

Fig. 9 Comparison of steady-state control effects with deviations in parameters



(a) 传统MPC方法



(b) 所提UL-DPC方法

图 10 电压参考阶跃变化下的动态控制性能比较 (参数无失配)

Fig. 10 Dynamic control performance comparison under voltage reference step change (No parameter mismatch)

传统 MPC 在电压由 40 V 升至 50 V 时调节时间为 25.6 ms, 由 50 V 降至 40 V 时为 35.2 ms, 如图 10(a) 所示。而 UL-DPC 在相应工况下调节时间分别为 20 ms 与 7.8 ms, 如图 10(b) 所示, 较传统 MPC 分别提升 5.6 ms 与 27.4 ms。

图 11 展示了参数无失配且负载突变下两种方法的动态性能。传统 MPC 在负载从 10  $\Omega$  增至 20  $\Omega$  时调节时间为 25.8 ms, 从 20  $\Omega$  减至 10  $\Omega$  时为 18.4 ms, 如图 11(a) 所示。UL-DPC 对应时间分别为 8.8 ms 与 17.6 ms, 如图 11(b) 所示, 比传统 MPC 分别缩短 17 ms 与 0.8 ms。

2) 参数失配。

图 12 为参数失配结合电压参考突变下的动态响应。当  $P_e = 0.5$  时, 传统 MPC 在电压突变过程中持续偏离参考值, 如图 12(a) 所示; 而 UL-DPC 仍保持 20 ms (升压) 与 7.8 ms (降压) 的调节时间, 与无失配情况一致, 如图 12(b) 所示。当  $P_e = 1.5$  时, 传统 MPC 调节时间与  $P_e = 1$  时相比增至 25.9 ms 与 35.5 ms, 比无失配时各延迟 0.3 ms, 如图 12(c) 所示; UL-DPC 则仍保持较快响应, 较传统 MPC 提升 5.9 ms 与 27.7 ms, 体现出强鲁棒性, 如图 12(d) 所示。

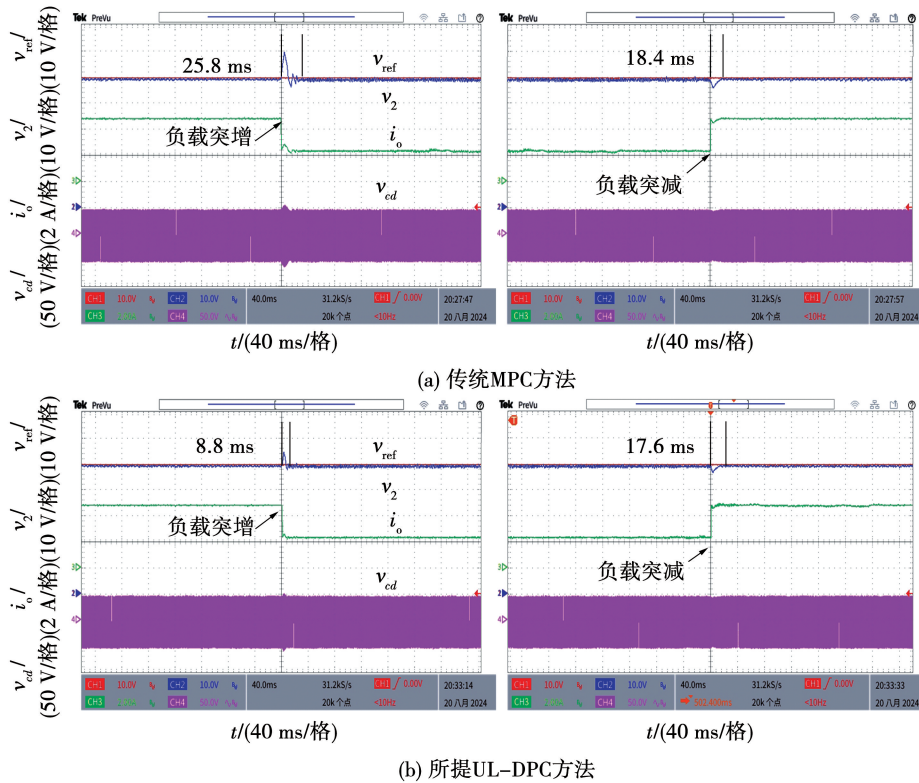


图 11 负载阶跃变化下的动态控制性能比较 (参数无失配)

Fig. 11 Dynamic control performance comparison under load step change (No parameter mismatch)

图 13 展示了参数失配与负载突变复合工况下的动态响应。 $P_e = 0.5$  时, 传统 MPC 无法准确跟踪电压参考, 如图 13(a) 所示; UL-DPC 调节时间仍为 8.8 ms (负载增加) 与 17.6 ms (负载减少), 如图 13(b) 所示。当  $P_e = 0.5$  时, 传统 MPC 调节时间

进一步延长, 与  $P_e = 1$  时相比分别增加 11 ms 与 5.6 ms, 如图 13(c) 所示; UL-DPC 仍保持稳定快速的响应, 不受参数误差影响, 展现出优越的鲁棒性与动态性能, 如图 13(d) 所示。

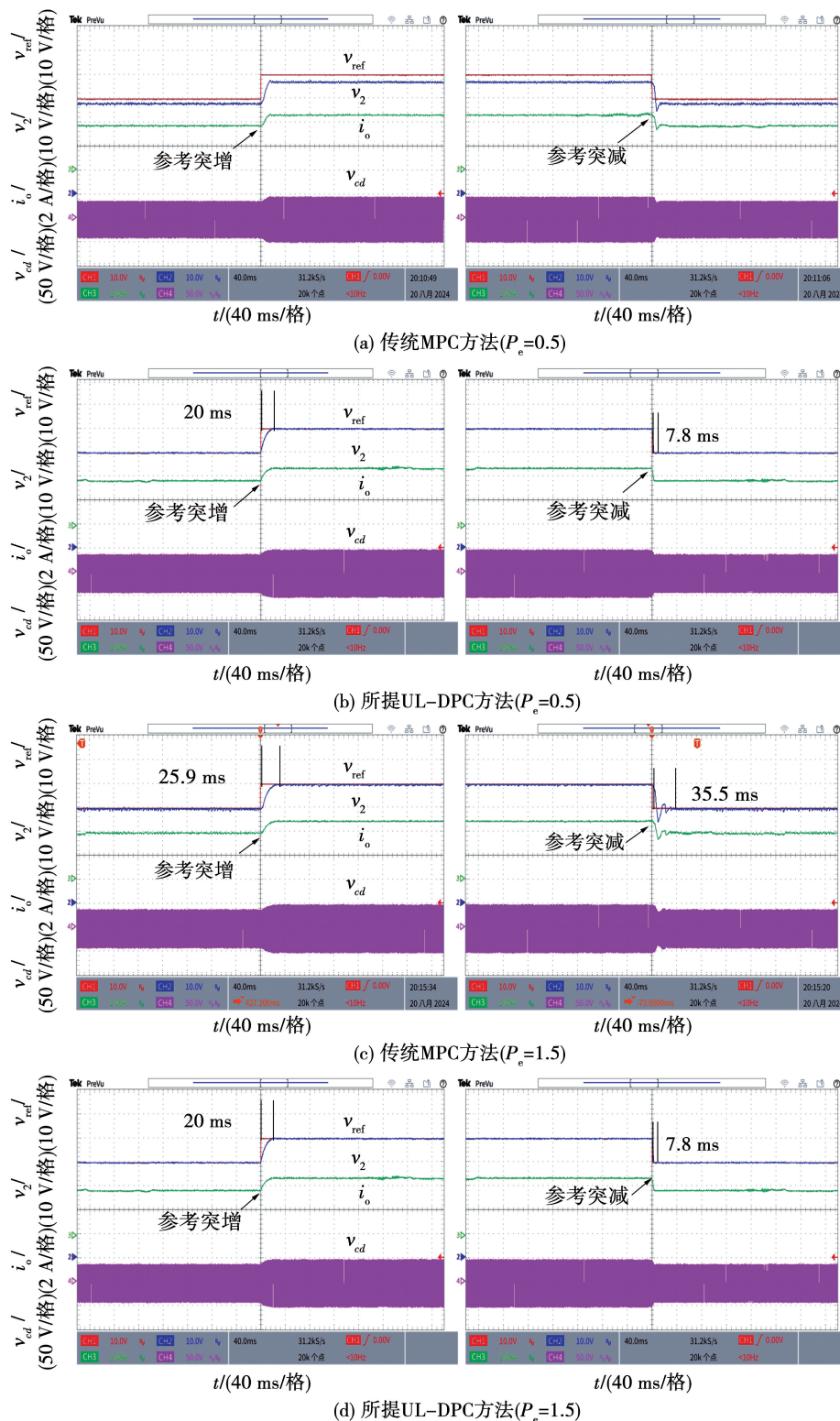


图 12 电压参考阶跃下的动态性能对比 (参数失配情形)

Fig. 12 Dynamic performance comparison under voltage reference step (Parameter mismatch situation)

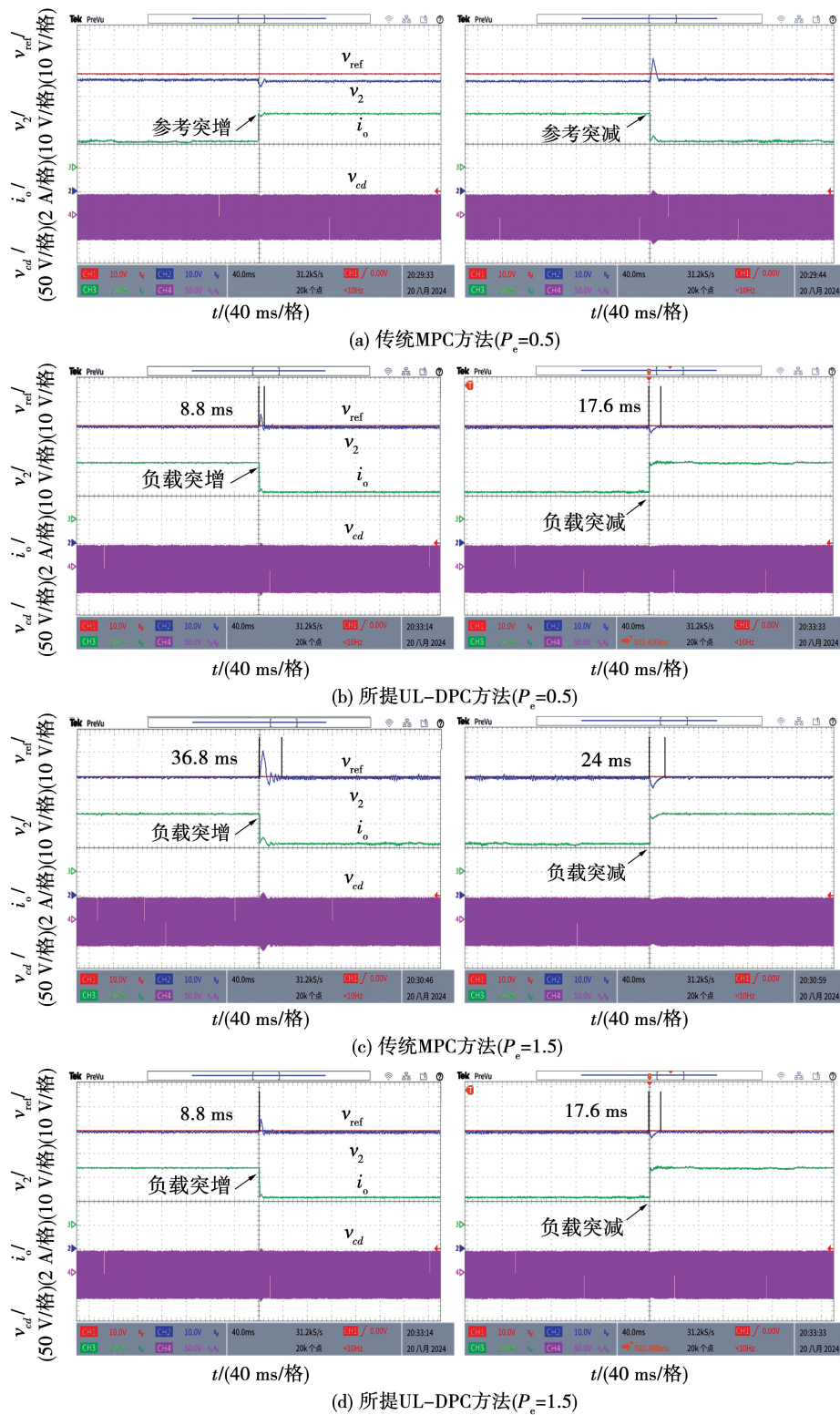


图 13 负载电阻阶跃下的动态性能对比 (参数失配情形)

Fig. 13 Dynamic performance comparison under load resistance step (Parameter mismatch situation)

## 5 结论

为实现对参数变化不敏感的鲁棒控制,本文为

DAB 变换器开发了一种融合无差拍控制与超局部模型的新型预测控制方案。所提方法建立了 DAB 变换器超局部模型,并建立超局部模型在不同控制

周期的方程关系,实现超局部模型的实时更新,消除参数对电压预测的影响;此外,结合了无差拍原理,实时计算每个控制周期最优移相,改善了电压控制精度。实验结果表明:1)当参数准确时,与传统 MPC 方法相比,所提方法预测误差降低 0.66 V,在参考突增、突减时的响应时间分别降低 5.6 ms、27.4 ms,在负载突增、突减时的响应时间分别降低 17 ms、0.8 ms,其拥有更低预测误差和更快的动态性能;2)当参数失配时,所提出的控制方法有效克服了参数失配对系统性能的制约,无论在稳态还是动态过程中,均展现出比传统方法更强的适应能力。

#### 参 考 文 献:

- [1] 曹善康,魏繁荣,林湘宁,等. 网侧电压跌落下计及无功支撑效能的直流微电网多目标优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5759.  
CAO Shankang, WEI Fanrong, LIN Xiangning, et al. Multi-objective optimization strategy of DC microgrid based on reactive power support efficiency during voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5759.
- [2] 陶海军,赵蒙恩,郑征,等. 基于回流功率优化的直流微网 DC-DC 变流器超螺旋滑模控制[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3502.  
TAO Haijun, ZHAO Mengen, ZHENG Zheng, et al. Super twisting sliding mode control of DC microgrid DC-DC converter based on backflow power optimization[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3502.
- [3] SHAO Shuai, CHEN Linglin, SHAN Zhenyu, et al. Modeling and advanced control of dual-active-bridge DC-DC converters: a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 1524.
- [4] 刘然,李鲲鹏,许烈,等. 一种考虑最坏工况的双有源桥变换器参数优化设计方法[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(10): 1.  
LIU Ran, LI Kunpeng, XU Lie, et al. A parameter optimization method of dual active bridge converter considering the worst conditions[J]. Electric Machine and Control, 2019, 23(10): 1.
- [5] CHEN Linglin, SHAN Shuai, XIAO Qian, et al. Model predictive control for dual-active-bridge converters supplying pulsed power loads in naval DC micro-grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1957.
- [6] 尹政,胡存刚,芮涛,等. LC 滤波型电压源逆变器无模型预测电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(14): 3723.  
YIN Zheng, HU Cungang, RUI Tao, et al. Model-free predictive voltage control strategy for LC-filtered voltage source inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3723.
- [7] 尹政,邓富金,詹昕,等. 双有源桥变换器无电流传感器调制模型预测控制[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(1): 49.  
YIN Zheng, DENG Fujin, ZHAN Xin, et al. Current-sensorless modulated model predictive control for dual-active-bridge converters[J]. Electric Machine and Control, 2025, 29(1): 49.
- [8] 王攀攀,徐泽涵,王莉,等. 基于三重移相的双有源桥 DC-DC 变换器效率与动态性能混合优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4720.  
WANG Panpan, XU Zehan, WANG Li, et al. A hybrid optimization control strategy of efficiency and dynamic performance of dual-active-bridge DC-DC converter based on triple-phase-shift [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4720.
- [9] TARISCIOTTI L, CHEN Linglin, SHAO Shuai, et al. Finite control set model predictive control for dual active bridge converter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2155.
- [10] 尹政,邓富金,王青松,等. 双有源桥变换器移动离散控制集无模型预测电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(6): 1853.  
YIN Zheng, DENG Fujin, WANG Qingsong, et al. Model-free predictive voltage control with moving-discrete-control set for dual active bridge converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(6): 1853.
- [11] 安峰,宋文胜,杨柯欣. 电力电子变压器的双有源全桥 DC-DC 变换器模型预测控制及其功率均衡方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3921.  
AN Feng, SONG Wensheng, YANG Kexin. Model predictive control and power balance scheme of dual-active-bridge DC-DC converters in power electronic transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3921.
- [12] WU Yuheng, MAHMUD M H, ZHAO Yue, et al. Uncertainty and disturbance estimator-based robust tracking control for dual-active-bridge converters[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(4): 1791.
- [13] PAL P, BEHERA R K, SHARMA R. Disturbance observer based sliding mode approach for dual active bridge converter [C]// 2023 IEEE 3rd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation, August 9 – 12, 2023, Bhubaneswar, India. 2023: 1 – 6.
- [14] GUO Zhiqiang, LUO Yong, SUN Kai. Decoupling control of multiaactive bridge converters using linear active disturbance rejection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 10688.

- parameter estimation for synchronous reluctance machine controlled by high-frequency signal injection position-sensorless[J]. IEEE Access, 2022, 10: 25267.
- [20] WANG Yicheng, FANG Shuhua, HUANG Demin. An improved model-free active disturbance rejection deadbeat predictive current control method of PMSM based on data-driven[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(8): 9606.
- [21] ZHANG Yongchang, JIN Jialin, HUANG Lanlan. Model-free predictive current control of PMSM drives based on extended state observer using ultralocal model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(2): 993.
- [22] ZHANG Yongchang, SHEN Wenjian, YANG Haitao. An improved deadbeat predictive current control of PMSM drives based on the ultra-local model[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2023, 9(2): 27.
- [23] WANG Weihua, XIAO Xi, DING Youshuang. An improved predictive current control method for permanent magnet synchronous motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 50.
- [24] WANG Hongzhe, GAN Chun, NI K, et al. Self-updating incremental model based robust current predictive control for permanent-magnet synchronous motor drives[C]//2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), November 5–8, 2023, Zhuhai, China. 2023: 4627–4631.
- [25] WU Xuan, KANG Jinyu, YANG Meizhou, et al. Robust deadbeat predictive current control for SPMSM using parameter adaptive incremental model[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 11(1): 4609.

(编辑:刘素菊)

## (上接第 115 页)

- [15] BANDYOPADHYAY S, QIN Zian, BAUER P. Model predictive control with a novel parameter identification scheme for dual-active-bridge converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(5): 4704.
- [16] LI Zhiyong, DENG Fujin, YIN Zheng, et al. Parameter identification with particle filtering algorithm for deadbeat control in DAB converter[C]//2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference, May 17–20, 2014, Chengdu, China. 2024: 3325–3330.
- [17] GUO Zhiqiang, LUO Yong, SUN Kai. Parameter identification of the series inductance in DAB converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7395.
- [18] LI Xuming, DONG Zheng, CAO Yan, et al. Model-predictive control with parameter identification for multi-dual-active-bridge converters achieving accurate power balancing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(9): 10880.
- [19] 尹政, 邓富金, 黄堃, 等. 双有源桥变换器自适应参数辨识鲁棒预测控制[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(2): 74.
- YIN Zheng, DENG Fujin, HUANG Kun, et al. Robust predictive control for dual-active-bridge converters with adaptive parameter identification[J]. Electric Machine and Control, 2025, 29(2): 74.
- [20] DUONG T, CHOI S. Deadbeat control with bivariate online parameter identification for SPS-modulated DAB converters[J]. IEEE Access, 2022, 10: 54079.

(编辑:刘素菊)