双有源桥变换器自适应参数辨识鲁棒预测控制

尹政[1]， 邓富金[1]， 黄堃[2,3]， 詹昕[4]
（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：针对双有源桥（DAB）变换器传统模型预测控制（MPC）输出电压性能对系统参数变化较为敏感的问题，提出一种基于自适应参数辨识的 DAB 变换器鲁棒预测控制方法。本研究采用递归最小二乘法构建参数辨识矩阵，通过在线实时校正 DAB 系统的电感与电容动态参数，有效增强了 MPC 在变工况下的鲁棒特性；通过参数误差反馈及门槛值设置，在每个控制周期中根据误差大小自适应调整遗忘因子，提高参数辨识准确性及收敛速度；结合系统采样和参数辨识结果，实现未来时刻的电压预测，并通过价值函数评估最优移相角，应用在下一个控制周期。该方法可以实时辨识 DAB 系统电感和电容参数，消除了参数失配对预测控制的影响，保证了输出电压性能。最后，通过仿真和硬件实验平台验证了所提方法在稳态、动态以及参数辨识下的运行性能。

关键词：双有源桥变换器；模型预测控制；参数辨识；递归最小二乘法；自适应遗忘因子；鲁棒性
DOI：10.15938/j.emc.2025.02.008
中图分类号：TM464 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-449X(2025)02-0074-11

Robust predictive control for dual-active-bridge converters with adaptive parameter identification

YIN Zheng[1]， DENG Fujin[1]， HUANG Kun[2,3]， ZHAN Xin[4]
（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 solve the problem that the output voltage performance of conventional model predictive control (MPC) under dual active bridge (DAB) converter is sensitive to the change of system parameters, a robust predictive control method based on adaptive parameter identification was proposed for DAB converter. In this study, a recursive least squares algorithm was used to construct the parameter identification matrix, and the dynamic parameters of the inductance and capacitor of the DAB system were corrected online in real time, which effectively enhances the robust characteristics of MPC under variable operating conditions. Through parameter error feedback and threshold setting, the forgetting factor was adjusted adaptively according to the error size in each control period to improve the accuracy of parameter identification and convergence speed. Combined with the results of system sampling and parameter identification, the voltage prediction at future time is realized, and the optimal phase shift angle is evaluated by cost function and applied to the next control period. This method can identify the inductance and capacitance

收稿日期：2023-12-18
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)
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；
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

parameters of DAB system in real time, eliminate the influence of parameter mismatch predictive control, and ensure the output voltage performance. Finally, the performance of the proposed method under steady state, dynamic state and parameter identification was verified by simulation and hardware experiment platform.

Keywords: dual active bridge converter; model predictive control; parameter identification; recursive least-square method; adaptive forgetting factor; robustness

0 引　言

双碳战略驱动下,直流微电网渗透率不断提高,其应用场景从分布式发电延伸至数据中心供电等新兴领域[1]。在直流微电网中,高效的能源转换和电力传输是关键挑战之一,为了满足这一需求,双有源桥(dual-active-bridge, DAB)变换器因其高效率、高性能、宽控制范围、高升压/降压能力、电流隔离等优点逐渐受到广泛的关注和研究[2-3]。

为了实现 DAB 变换器的高效控制,现有研究已形成单移相(single phase-shift, SPS)[4]、扩展移相[5]、双移相[6]和三相移相[7]等多元调制技术体系。其中,SPS 调制实现简单,已有学者将 SPS 调制与模型预测控制(model predictive control, MPC)相结合,通过利用 DAB 离散模型,结合输出电压目标,实现 DAB 稳定且高效的输出电压控制,保证了快速的瞬态响应以及优越的稳态性能[8-12]。DAB 关键元件参数受环境温升、元件老化及工况波动等因素影响,实际运行中普遍存在电感/电容值偏移现象,并可能产生高达 50% 的参数误差。在 MPC 中,当模型参数与实际参数存在误差时,其稳态性能及瞬态响应速度均可能下降[13-14]。

针对参数时变问题,文献[15-19]提出了基于参数辨识的 MPC 改进方案:文献[15]采用梯度下降法在线估计电感参数,文献[16]开发了卡尔曼滤波辨识模块。文献[17]中,研究人员利用瞬时相量法实时辨识了 DAB 变换器中变压器的寄生参数。文献[18-19]则通过递归最小二乘法(recursive least-squares, RLS)实现电感参数的动态修正,有效增强了控制系统的参数适应性。然而,上述方法只辨识了 DAB 中的电感参数,未考虑电容参数的影响。同时,文献[18-19]中,RLS 的遗忘因子均设置为固定值,无法根据系统的实际情况进行调节,影响了参数辨识的速度以及准确性。

针对上述问题,本文提出一种基于自适应参数辨识的 DAB 变换器鲁棒预测控制(robust predictive control, RPC)方法。首先建立电感与电容参数的耦合作用模型,并系统分析其动态特性对传统 MPC 控制精度的影响机制;其次,提出一种基于自适应遗忘因子的 RLS(adaptive forgetting factor-RLS, AR),实现电感和电容参数的实时辨识,并通过辨识误差实时反馈,自适应调整遗忘因子,提高 DAB 变换器中电感和电容参数的辨识速度及精度,进而实现鲁棒的预测控制;最后,通过仿真和硬件实验平台验证所提方法在稳态、动态以及参数辨识下的运行性能。

1 基于传统 MPC 的 DAB 输出电压误差分析

1.1 DAB 拓扑及 SPS 运行原理

图 1 所示为典型单相 DAB 拓扑结构,该电路架构包含输入/输出 H 桥单元及连接二者的高频变压器。系统参数定义如下:L_r表示变压器漏感参数;C_{in}和C_o分别为输入侧与输出侧滤波电容;R 为等效负载阻抗;v_{in}和v_o分别表征输入/输出电压特性;i_{in}、i_r、i_s、i_o分别对应输入直流电流、漏感电流、输出桥臂电流及负载电流;T_r为高频变压器本体;n 为变压器绕组匝数比。输入侧 H 桥功率开关管 $Q_1 \sim Q_4$与输出侧 H 桥 $Q_5 \sim Q_8$分别配置独立驱动系统,其控制信号按 $S_1 \sim S_4$和 $S_5 \sim S_8$分组控制。

在 SPS 调制中,输入侧 H 桥和输出侧 H 桥均施加 50% 的占空比,通过调整 DAB 变换器的两个 H 桥的相位角度,可有效控制输出电压或电流的大小和方向。其中,桥臂控制采用互补逻辑:输入侧 S_1/S_4与 S_2/S_3、输出侧 S_5/S_8与 S_6/S_7分别形成互补对。对应工况下漏感电流及变压器端口电压波形如图 2[4]所示。

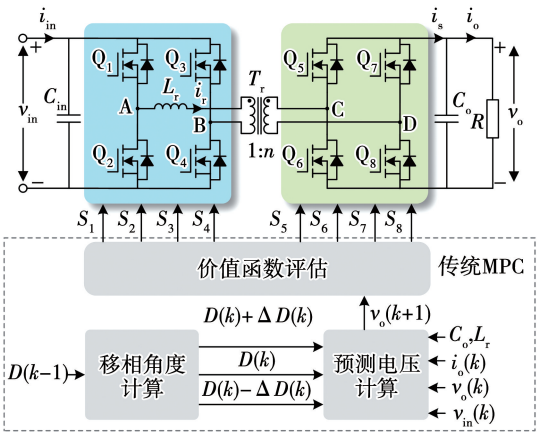


图 1 基于传统 MPC 的 DAB 输出电压控制框图

Fig. 1 Diagram of output voltage control in DAB under conventional MPC

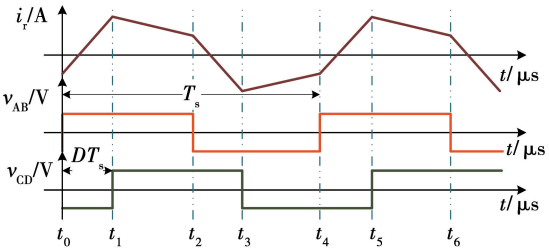


图 2 基于 SPS 调制的 DAB 关键电流和电压波形

Fig. 2 Waveforms of crucial current and voltage in DAB based on SPS modulation

图中：v_{AB}为变压器输入侧电压；v_{CD}为变压器输出侧电压；T_s为控制周期；D 为 v_{AB}和 v_{CD}之间的移相角，移相角范围为[-0.5,0.5]。在 SPS 调制下，DAB 的传输功率[8]可以表示为

$$P = 2\int_0^{\frac{T_s}{2}} V_{AB} i_r(t)\,\mathrm{d}t = \frac{T_s v_{in} v_o D(1-2D)}{nL_r}。\quad (1)$$

根据式(1)，输出侧 H 桥的平均输出电流为

$$I_s = \frac{P}{v_o} = \frac{T_s v_{in} D(1-2D)}{nL_r}。\quad (2)$$

1.2 基于 MPC 的 DAB 输出电压控制方法

如图 1 所示，MPC 已广泛应用于 DAB 变换器系统[13]。移相角计算模块通过动态调节算法生成每个控制周期内的移相角候选集$\{D+\Delta D_a, D, D-\Delta D_a\}$。考虑到 DAB 系统在单向功率传输模式下移相角的物理约束($0 \leqslant D \leqslant 0.5$)，采用离散化处理得到候选集$\{D \mid D=0,\ \Delta D,\ 2\Delta D, \cdots, 0.5\}$。基于动态寻优策略，以历史最优移相角 D 为基准构建了$\{D+\Delta D_a, D, D-\Delta D_a\}$邻域搜索空间，有效降低了 MPC 的计算量。

然后，通过迭代计算候选移相角对应的预测电压 $v_o(k+1)$，基于价值函数评估各相位点的电压跟踪误差，最终选取误差最小的移相角作为最优移相角，进而基于 SPS 调制原理，设置控制信号 $S_1 \sim S_8$，实现两个 H 桥中开关管 $Q_1 \sim Q_8$的控制。

1.3 参数失配时 DAB 预测电压误差分析

根据图 1 所示 DAB 变换器拓扑，输出电压 v_o的数学模型为

$$C_o \frac{\mathrm{d}v_o}{\mathrm{d}t} = i_s - i_o。\quad (3)$$

联立式(2)和式(3)可以得到平均输出电压 V_o为

$$C_o \frac{\mathrm{d}V_o}{\mathrm{d}t} = I_s - i_o。\quad (4)$$

式(4)的离散形式可以表示为

$$V_o(k+1) = V_o(k) + \frac{T_s}{C_o}(I_s(k) - i_o(k)) = V_o(k) + \frac{T_s}{C_o}\left(\frac{T_s v_{in}(k) D(k)(1-2D(k))}{nL_r} - i_o(k)\right)。\quad (5)$$

根据式(5)可知，$V_o(k+1)$的计算和 L_r和 C_o有关。模型参数失配($L_{r0} \neq L_r$，$C_{o0} \neq C_o$)会引发电压预测误差 v_{oerr}，其定量关系如图 3 所示。定义参数失配度 $G_e = L_{r0}/L_r = C_{o0}/C_o$，观测发现 v_{oerr}与 G_e呈正相关性，当 $G_e \neq 1$ 时系统效率下降[15]。

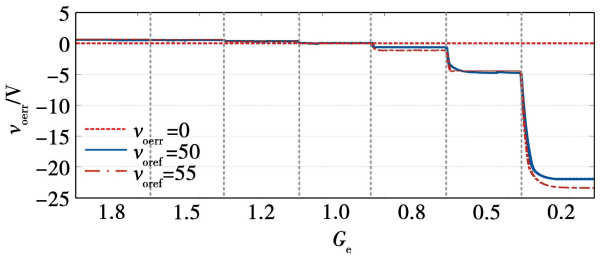


图 3 不同参数失配度 G_e 下的电压误差 v_{oerr}

Fig. 3 Voltage errors v_{oerr} under different parameter mismatch degree G_e

2 基于自适应参数辨识的 DAB 鲁棒预测控制

本节构建了鲁棒预测控制架构，如图 4 所示，通过自适应参数辨识模块动态修正 L_r 和 C_o 的估计值，以抑制模型失配带来的控制偏差。

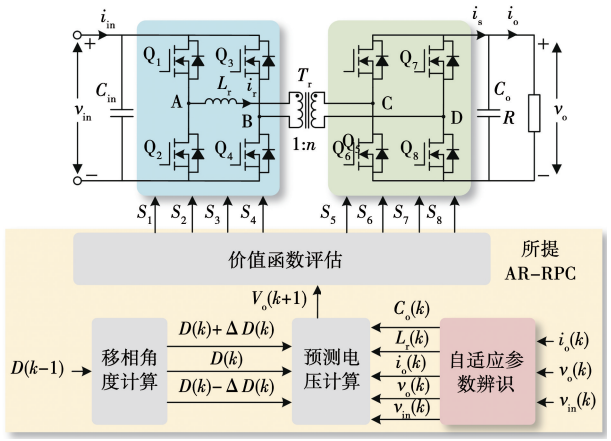


图 4　基于所提 AR-RPC 的 DAB 输出电压控制框图

Fig. 4　Diagram of output voltage control in DAB under proposed AR-RPC

2.1　所提自适应参数辨识方法

2.1.1　所提参数辨识方法

为了实时辨识 DAB 变换器中的实际参数 L_r 和 C_o,可以将式(5)改写为

$$\frac{m(k-1)}{L_r(k-1)} - C_o(k-1)(V_o(k) - V_o(k-1)) = -n(k-1)。\tag{6}$$

其中:

$$m(k-1) = \frac{T_s^2 v_{in}(k-1)D(k-1)(1-2D(k-1))}{n};\tag{7}$$

$$n(k-1) = -T_s i_o(k-1)。\tag{8}$$

式(6)的矩阵形式可以表示为

$$\boldsymbol{K}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{H}。\tag{9}$$

其中:

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} m(k-1) & -(V_o(k) - V_o(k-1)) \\ \lambda m(k-2) & -\lambda(V_o(k-1) - V_o(k-2)) \\ \cdots & \cdots \\ \lambda^{k-2} m(1) & -\lambda^{k-2}(V_o(2) - V_o(1)) \end{bmatrix}_{(k-1)\times 2};\tag{10}$$

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{L_r(k-1)} \\ C_o(k-1) \end{bmatrix}_{2\times 1};\tag{11}$$

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} -n(k-1) \\ -\lambda n(k-1) \\ \cdots \\ -\lambda^{k-2} n(k-1) \end{bmatrix}_{(k-1)\times 1}。\tag{12}$$

式中 λ 为遗忘因子。

为了求解式(9)中矩阵 $\boldsymbol{x}$,可将式(9)重写并表示为

$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} E(k-1) \\ E(k-2) \\ \cdots \\ E(1) \end{bmatrix}_{(k-1)\times 1} = \boldsymbol{K}\boldsymbol{x} - \boldsymbol{H}。\tag{13}$$

同时,误差矩阵 $\boldsymbol{E}$ 的均方误差可以表示为

$$M(x) = \|\boldsymbol{E}\|^2 = (\boldsymbol{K}\boldsymbol{x} - \boldsymbol{H})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{K}\boldsymbol{x} - \boldsymbol{H})。\tag{14}$$

式中上标 T 表示矩阵的转置。

为求解目标函数 $M(x)$ 的极值点,通过求导运算令 $\partial M(x)/\partial x = 0$,可获取其全局唯一极小值,其导数形式推导如下:

$$\frac{\partial M(x)}{\partial x} = 2\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{x} - 2\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H} = 0。\tag{15}$$

因此,$\boldsymbol{x}$ 可以求解并表示为

$$\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K})^{-1}\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}。\tag{16}$$

将式(10)~式(12)代入式(16),即可求解得到 $\boldsymbol{x}$,从而得到 L_r 和 C_o 的实际值。

2.1.2　所提自适应遗忘因子

在式(10)中,遗忘因子 λ 一般设置为 $0<\lambda<1$。当 λ 的值接近于 0,则参数辨识精度对于采样噪声的敏感性会增加,但其收敛速度提高。同样,当 λ 的值接近于 1,增强了参数辨识对于采样噪声的鲁棒性,但会降低收敛速度[18]。考虑到 DAB 系统运行在不同工况下,其参数在运行过程中可能发生变化,为了保持 RLS 算法的辨识性能,需要自适应地改变 λ 的值。

根据式(13)可以得到 $k-1$ 时刻的辨识误差并表示为

$$E(k-1) = [m(k-1) \quad -(V_o(k) - V_o(k-1))] \times \begin{bmatrix} \dfrac{1}{L_r(k-1)} \\ C_o(k-1) \end{bmatrix} - [-n(k-1)]。\tag{17}$$

在辨识过程中,$E(k-1)$ 可以反映 RLS 的辨识精度。当 $E(k-1)$ 较大时,应选择较小的遗忘因子值,以提高收敛速度。当 $E(k-1)$ 较小时,应选择较大的遗忘因子值以保证辨识精度和对采样噪声的鲁棒性。因此,本节提出了一种自适应遗忘因子,其可以表示为

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0, (|E(k-1)| > E_0); \\ \lambda_0 + (1-\lambda_0)\dfrac{4e^{\tau E(k-1)}}{(e^{\tau E(k-1)}+1)^2}, (|E(k-1)| \leqslant E_0)。 \end{cases}\tag{18}$$

式中：λ_0 为遗忘因子的边界值；τ 为正系数；E_0 为 $E(k-1)$ 的边界值。

根据式(18)，可以得到自适应遗忘因子 λ 的变化曲线，如图 5 所示，当 $|E(k-1)|$ 大于 E_0 时，λ 保持在 λ_0，从而保持较高的收敛速度。当 $|E(k-1)|$ 小于 E_0 时，λ 趋近于 1，$|E(k-1)|$ 随之降低，从而保持较高的辨识精度。

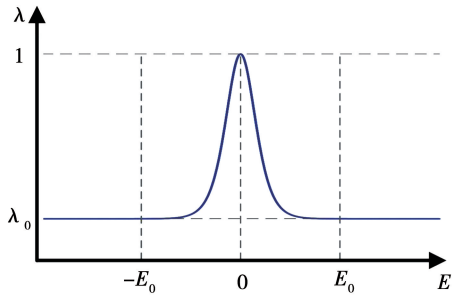


图 5 自适应遗忘因子示意图

Fig. 5 Diagram of adaptive forgetting factor

2.2 移相角度计算

图 4 中，移相角计算模块得到了移相角步长参数 ΔD。根据功率传输特性，移相角 $\in[0,0.5]$，经离散化处理可表述为 $\{0,\Delta D,2\Delta D,\cdots,0.5\}$，其中步长参数为

$$\Delta D = \frac{T_c}{T_s}。 \tag{19}$$

式中 T_c 为 DSP 时钟周期。

传统 MPC 需遍历 $\{0,\Delta D,2\Delta D,\cdots,0.5\}$ 全集，本文设计动态邻域搜索策略：以历史最优移相角 D 为中心，构建移相角候选集 $\{D+\Delta D_a,D,D-\Delta D_a\}$，其边界移相角 ΔD_a 由系统动态特性决定：

$$\Delta D_a = \Delta D(1+\varepsilon\Delta V^2)。 \tag{20}$$

其中 ΔV 为电压误差，即

$$\Delta V = \begin{cases} |V_{oref}(k)-V_o(k)|,\text{当}|V_{oref}(k)-V_o(k)|<V_m; \\ V_m,\text{当}V_m\leqslant|V_{oref}(k)-V_o(k)|。 \end{cases} \tag{21}$$

式中：V_m 为最大电压误差；$V_{oref}(k)$ 为 k 时刻输出电压参考；$V_o(k)$ 为 k 时刻输出电压；ε 为调整系数。

2.3 价值函数评估

本节建立多目标优化价值函数为

$$g = \alpha_1 G_1 + \alpha_2 G_2。 \tag{22}$$

其中：α_1 和 α_2 分别为 G_1 和 G_2 的权重因子；G_1 表征电压跟踪精度；G_2 反映稳态运行约束。分别为：

$$\left.\begin{aligned} G_1 &= (V_{oref}(k+1)-V_o(k+1))^2; \\ G_2 &= (V_o(k+1)-V_o(k))^2。 \end{aligned}\right\} \tag{23}$$

该函数包含电压跟踪项与稳态约束项的加权组合，用于从候选集中筛选最优移相角[13]。

2.4 所提方法实施过程

图 6 为所提 AR-RPC 的实施流程图。在系统初始化后，通过采样获得 $v_{in}(k)$、$v_o(k)$ 以及 $i_o(k)$，将其代入式(17)计算 $E(k-1)$，并根据式(18)计算自适应遗忘因子 λ，进而根据式(16)辨识获得 L_r 和 C_o 的实际值。

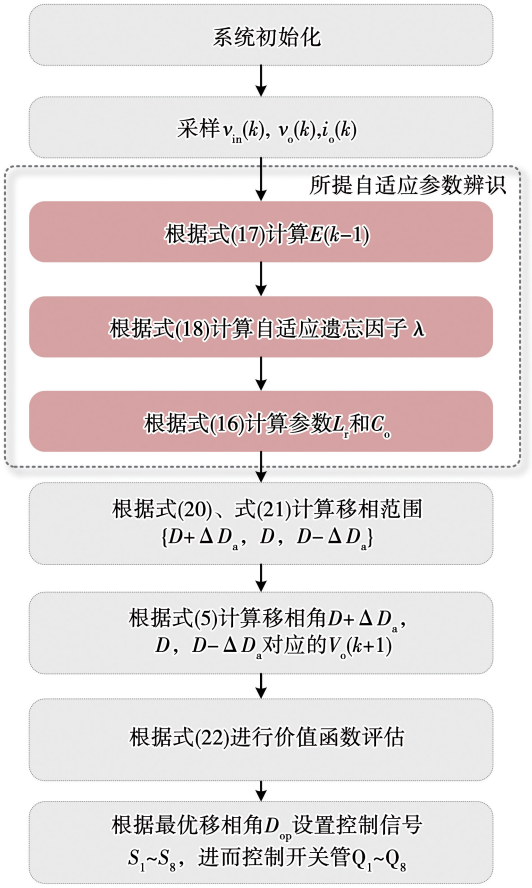


图 6 所提 AR-RPC 方法

Fig. 6 Proposed AR-RPC Method

然后，根据式(20)、式(21)得到边界移相角 ΔD_a，结合上一控制周期最优移相角，获得移相角候选集 $\{D+\Delta D_a,D,D-\Delta D_a\}$。将候选移相角 $\{D+\Delta D_a,D,D-\Delta D_a\}$ 代入状态方程(5)进行数值迭代，获得对应的输出电压预测值 $V_o(k+1)$，继而基于式(22)建立的多目标优化函数进行综合性能评估，最终从候选集中筛选最优移相角 D_{op} 应用在下一个控制周期。

3　仿真验证

为验证控制策略的有效性,基于 MATLAB/Simulink 环境构建了 DAB 系统仿真平台,开展传统 MPC 与所提 AR-PRC 的电压调节特性对比研究,系统关键参数如表 1 所示。

表 1　DAB 变换器系统关键参数

Table 1　Key parameters of DAB converter system

参数	数值
输入电压 v_{in}/V	60
输出电压参考 v_{oref}/V	50,55
变压器漏感 L_r/μH	61.8
输入电容 C_{in}/μF	820
输出电容 C_o/μF	820
负载电阻 R/Ω	10
控制周期 T_s/μs	100
匝数 n	1

3.1　稳态仿真验证

图 7 通过仿真对比了模型失配工况下两种控制策略的输出电压特性,其中图 7(a)、图 7(b)分别对应 v_{oref} = 50、55 V 的测试场景。

如图 7 所示,传统 MPC 方法因依赖固定参数模型,在 G_e = 0.2 时产生显著稳态误差,当 v_{oref} = 50、55 V时输出电压误差分别达到 22、24 V。所提 AR-RPC 方法可以实时辨识 DAB 漏感及输出电容参数,输出电压性能不受参数失配影响。

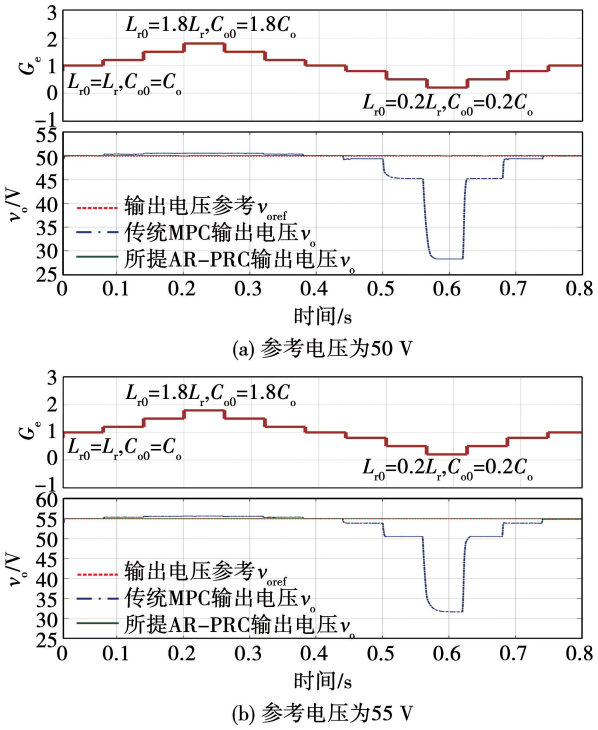
参数失配工况下的输出电压误差对比如图 8 所示。实验数据显示:当 v_{oref} = 50 V 时,所提 AR-PRC 将输出电压误差控制在 0.15 V 以内,较传统 MPC 的 4.75 V 最大误差降低 96.8%;当 v_{oref}提升至 55 V 时,AR-PRC 仍保持 0.20 V 的误差水平,而传统 MPC 误差增大至 4.85 V(图 8(b))。

3.2　动态仿真验证

3.2.1　参考电压突变

图 9 通过仿真对比了模型失配工况以及电压阶跃突变下两种控制策略的输出电压特性。在图 9(a)与图 9(b)中,参数失配度 G_e分别为 0.5、1.5。

如图 9(a)所示,传统 MPC 方法因依赖固定参数模型,始终存在约 5 V 的电压误差。动态响应特性测试表明:传统 MPC 在电压突增/突降时的调节时间分别为 10 ms 和 20 ms,而 AR-PRC 分别缩短至 5.1 ms 和 4.5 ms,响应速度提升 49% 和 77.5%。

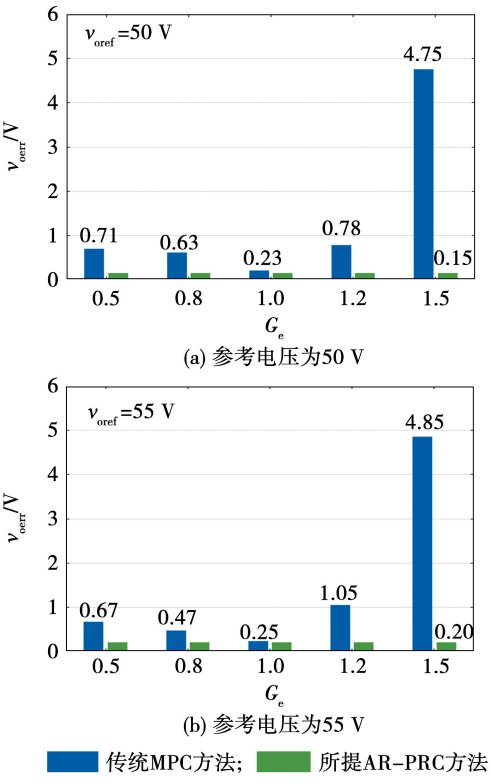


(a) 参考电压为50 V

(b) 参考电压为55 V

图 7　参数失配时稳态性能仿真比较

Fig. 7　Simulation comparison of steady-state performance under mismatched parameter



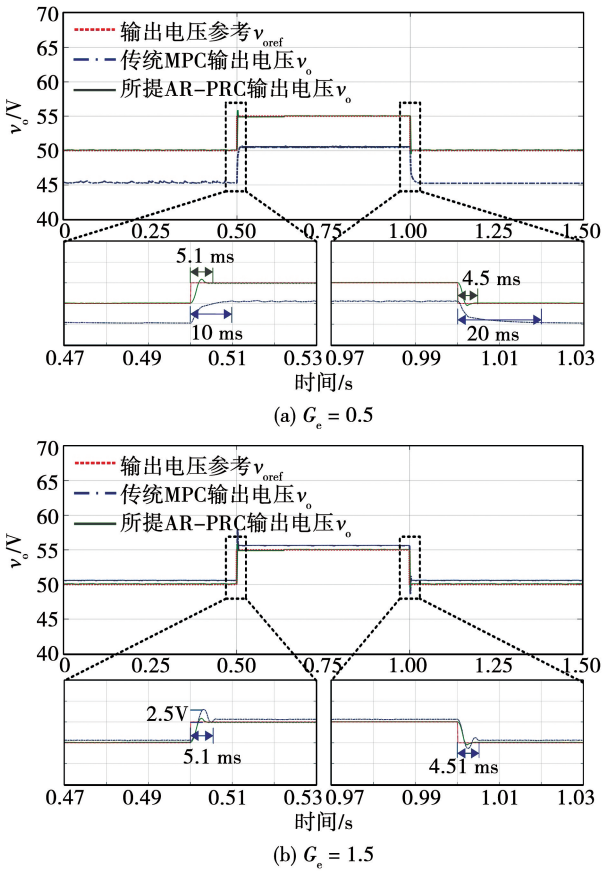
(a) 参考电压为50 V

(b) 参考电压为55 V

图 8　参数失配时稳态误差仿真比较

Fig. 8　Simulation comparison of steady-state error under mismatched parameter

如图 9(b)所示,传统 MPC 方法因依赖固定参数模型,始终存在约 2.5 V 的电压误差。同时,在参考电压突变时,电压尖峰大于所提 AR-RPC 方法,验证所提方法的有效性。



(a) G_e = 0.5

(b) G_e = 1.5

图 9 参考电压突变时动态性能仿真比较

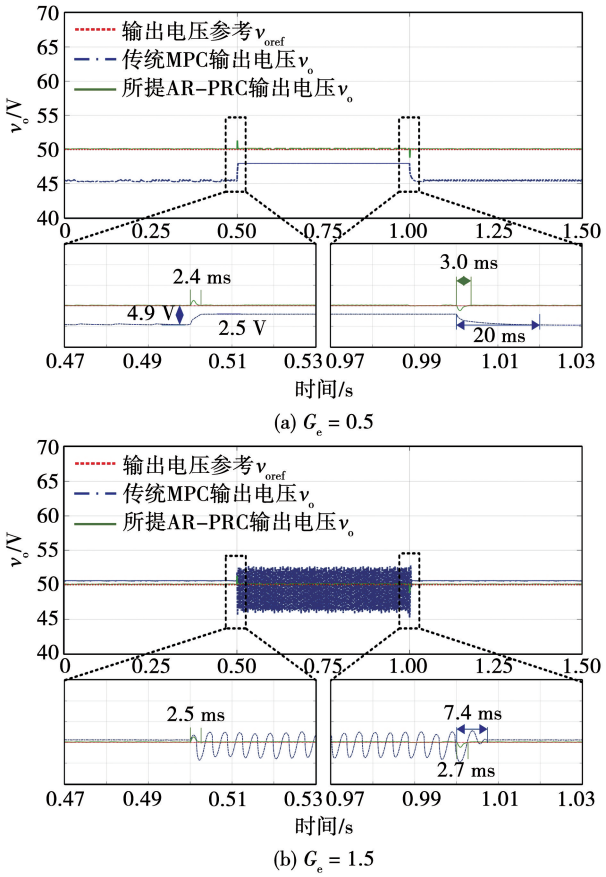
Fig. 9 Simulation comparison of dynamic-state performance under changed reference voltage

3.2.2 负载突变

图 10 通过仿真对比了模型失配工况以及负载阶跃突变下两种控制策略的输出电压特性。在图 10(a)与图 10(b)中,参数失配度 G_e 分别为 0.5、1.5。

如图 10(a)所示,传统 MPC 在负载突增时响应速度为 2.4 ms;在负载突减时响应速度为 20 ms。所提 AR-RPC 在负载突增时响应速度为 2.4 ms;在负载突减时响应速度为 3.0 ms,与传统 MPC 方法相比减少 17 ms。

如图 10(b)所示,传统 MPC 在负载突增时,其输出电压产生振荡;在负载突减时响应速度为 7.4 ms。在负载扰动工况下,AR-PRC 在负载突增/突降时的调节时间分别为 2.5 ms 和 2.7 ms,较传统 MPC 的 7.4 ms 基准值分别提升 66.2% 和 63.5%。



(a) G_e = 0.5

(b) G_e = 1.5

图 10 负载突变时动态性能仿真比较

Fig. 10 Simulation comparison of dynamic-state performance under changed load

4 实验验证

基于图 11 所示硬件实验平台,采用 TMS320C28346 数字控制器对传统 MPC 与所提 AR-PRC 两种控制算法进行实测验证,实验系统参数与仿真环境保持一致(见表 1)。实测结果进一步证实了 AR-PRC 的实用性。

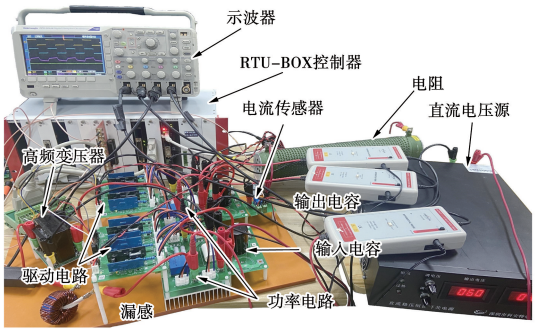


图 11 DAB 变换器实验平台

Fig. 11 Experimental platform of DAB converter

4.1　稳态实验验证

图 12 通过实验对比了模型失配工况下两种控制策略的输出电压特性。图 12(a)、图 12(b)展示了输出电压参考值 v_{oref} = 50 V 时的系统特性,图 12(c)、图 12(d)则对应 v_{oref} = 55 V 的工况分析,两组对比实验完整呈现了不同电压基准下的鲁棒特性。

如图 12(a)所示,在 G_e 为 0.2 时,传统 MPC 输出电压误差达到 9.8 V。如图 12(b)所示,所提 AR-RPC 可以实时辨识 DAB 漏感及输出电容参数,输出电压性能不受参数失配影响。

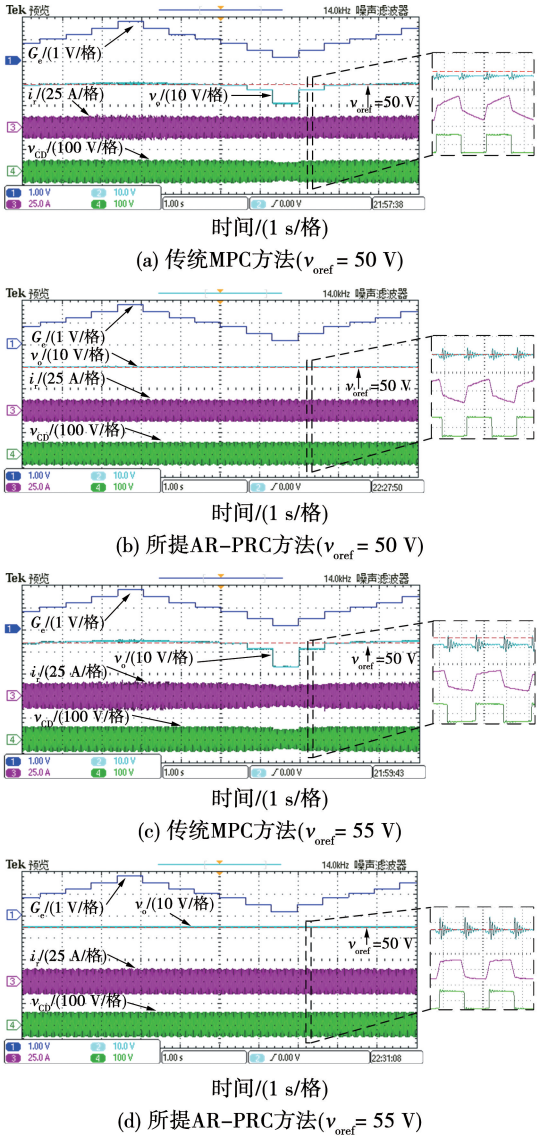


图 12　参数失配时稳态性能实验比较

Fig. 12　Experimental comparison of steady-state performance under mismatched parameter

如图 12(c)所示,在 G_e 为 0.2 时,传统 MPC 输出电压误差达到 11 V。如图 12(d)所示,所提 AR-RPC 可以实时辨识 DAB 漏感及输出电容参数,拥有良好的鲁棒性。

4.2　动态实验验证

图 13 通过实验对比了模型失配工况以及参考电压阶跃突变下两种控制策略的输出电压特性。在图 13(a)、图 13(b)中,参数失配度 G_e 为 0.5;在图 13(c)、图 13(d)中,参数失配度 G_e 为 1.5。

动态性能测试结果表明:在 50% 参数失配度下,传统 MPC 的电压阶跃响应时间呈现显著差异,突增工况需 13.8 ms,突降工况为 11 ms;而所提 AR-RPC 分别缩短至 10 ms 和 10.8 ms,响应速度相对提升 27.5% 和 1.8%。值得注意的是,当参数失配度增至 1.5 倍时,传统 MPC 出现持续振荡现象,其突增/突降调节时间恶化至 35 ms 和 30 ms,相较之下 AR-RPC 仍保持 10 ms 级响应能力,调节时间分别减少 71.4% 和 64%,充分验证了控制算法的强鲁棒性。

图 14 通过实验对比了模型失配工况以及负载阶跃突变下两种控制策略的输出电压特性。在图 14(a)、图 14(b)中,参数失配度 G_e 为 0.5;在图 14(c)、图 14(d)中,参数失配度 G_e 为 1.5。

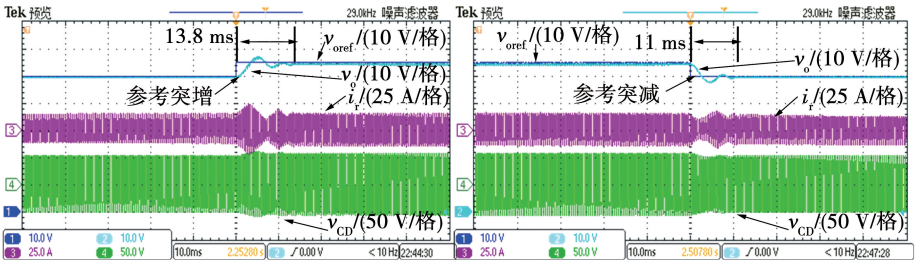
如图 14(a)所示,传统 MPC 方法在负载突增和突减时,其始终存在误差;如图 14(b)所示,所提 AR-RPC 在负载由突增时响应速度为 10 ms,负载突减时响应速度为 12 ms。

如图 14(c)所示,传统 MPC 方法在负载由 10 Ω 突增为 20 Ω 时,输出电压产生振荡,漏感电流产生 3 倍尖峰;在负载由 20 Ω 突减为 10 Ω 时,漏感电流尖峰消失,但输出电压始终存在振荡。如图 14(d)所示,所提 AR-RPC 方法仍然可以准确追踪参考电压,拥有良好的响应速度。

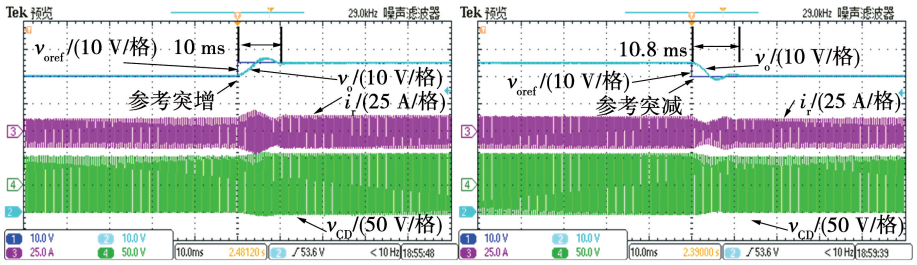
4.3　参数辨识实验验证

图 15 比较了应用不同遗忘因子时,所提 AR-PRC 方法的参数辨识性能。如图 15(a)所示漏感辨

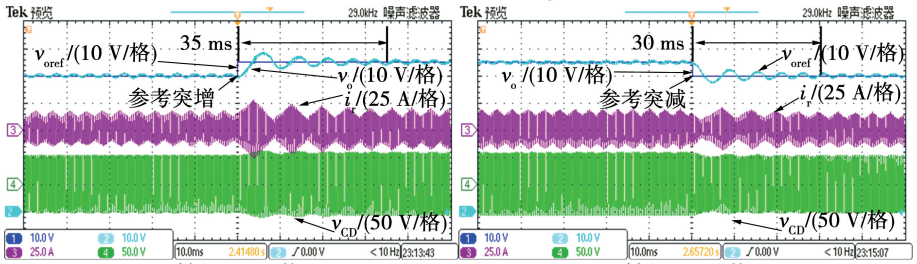
识结果,当遗忘因子 λ 固定为0.8时,其响应速度最快,但稳态误差较大;当遗忘因子 λ 固定为0.95时,其响应速度最慢,但稳态误差减小;当应用所提自适应遗忘因子时,其响应速度与 $\lambda=0.8$ 时相同,稳态误差比 $\lambda=0.95$ 时更低,验证了所提自适应参数辨识方法的精度和响应速度。



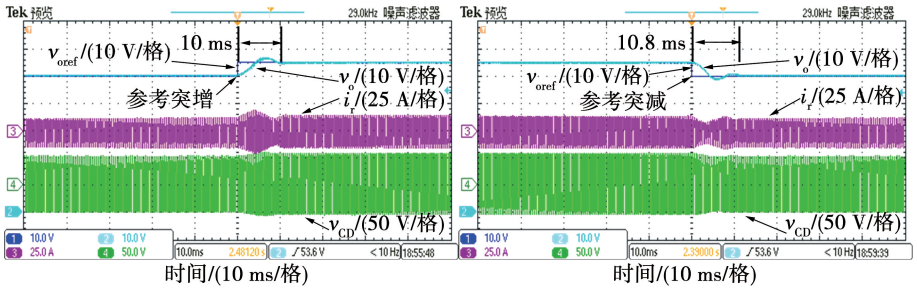
(a) 传统MPC方法(G_e=0.5)



(b) 所提AR-PRC方法(G_e=0.5)



(c) 传统MPC方法(G_e=1.5)

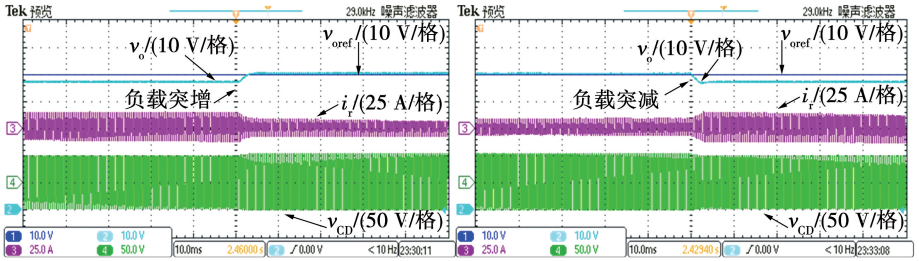


(d) 所提AR-PRC方法(G_e=1.5)

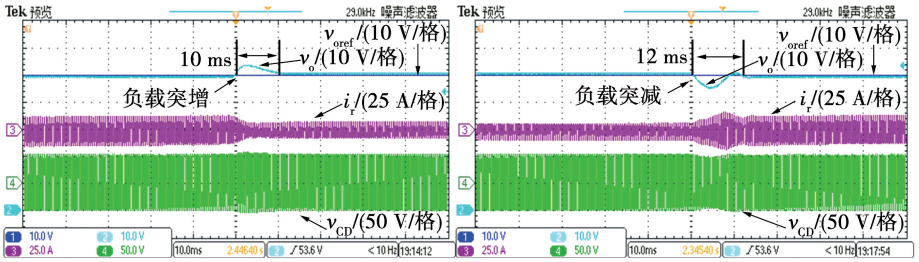
图 13 参考电压突变时动态性能实验比较

Fig. 13 Experimental comparison of dynamic-state performance under changed reference voltage

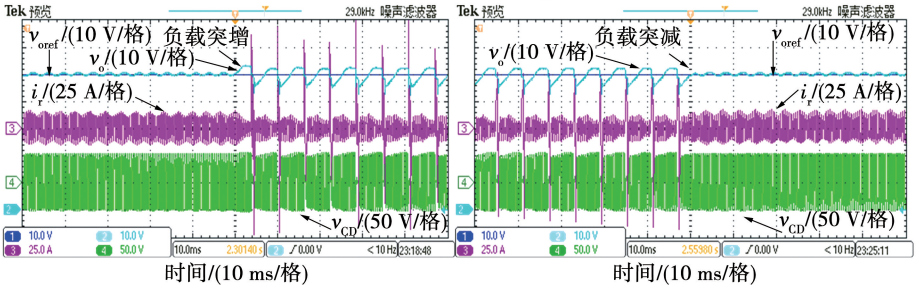
如图15(b)所示电容辨识结果,当遗忘因子 λ 固定为0.8时,其响应速度最快,但稳态误差最大;当遗忘因子 λ 固定为0.95时,其响应速度最慢,但稳态误差减小;当应用所提自适应遗忘因子时,其响应速度与 $\lambda=0.8$ 时相同,稳态误差比 $\lambda=0.95$ 时更低,验证了所提自适应参数辨识的精度和响应速度。



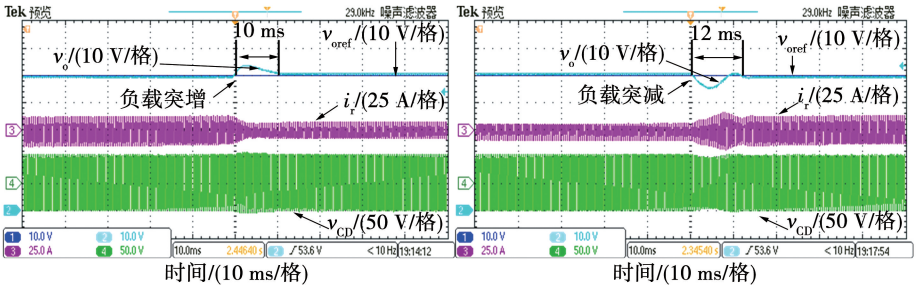
(a) 传统MPC方法(G_e=0.5)



(b) 所提AR-PRC方法(G_e=0.5)



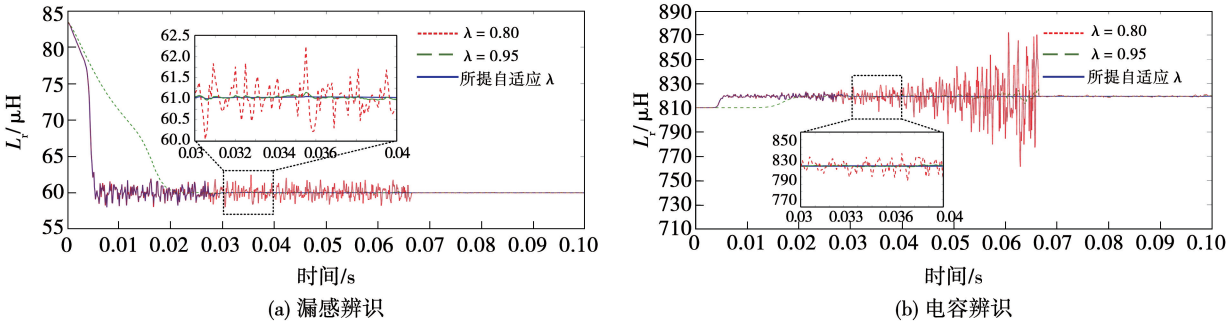
(c) 传统MPC方法(G_e=1.5)



(d) 所提AR-PRC方法(G_e=1.5)

图 14　负载突变时动态性能实验比较

Fig. 14　Experimental comparison of dynamic-state performance under changed load



(a) 漏感辨识　　(b) 电容辨识

图 15　参数辨识实验比较

Fig. 15　Experimental comparison of parameter identification

5 结 论

本文构建了基于在线参数辨识的 DAB 变换器鲁棒预测控制,通过动态参数修正机制有效提升了系统在参数摄动工况下的控制精度与稳定性。首先,该方法采用递归最小二乘法构建参数辨识矩阵,通过在线实时校正 DAB 系统的电感与电容动态参数,有效增强了 MPC 在变工况下的鲁棒特性。然后,通过设计自适应调整遗忘因子,提高参数辨识准确性及收敛速度。最后,通过仿真和实验验证,所提方法具有如下特点:1)与传统 MPC 方法相比,当 DAB 变换器系统漏感和输出电容失配时,所提方法拥有优越的鲁棒性和快速的响应能力;2)当 DAB 变换器系统辨识漏感和输出电容参数时,与固定遗忘因子的参数辨识方法相比,所提方法拥有更快的辨识速度和更高的辨识精度。

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] 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.

[3] 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 Machines and Control, 2019, 23(10): 1.

[4] CHEN Xiaoying, XU Guo, HAN Hua, et al. Light-load efficiency enhancement of high-frequency dual-active-bridge converter under SPS control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12941.

[5] 李善寿, 王浩, 叶伟, 等. 抑制 DAB 变换器回流功率的双重移相调制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 14.
LI Shanshou, WANG Hao, YE Wei, et al. Dual phase shift modulation strategy for reactive power suppression of a DAB converter [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 14.

[6] 郭华越, 张兴, 赵文广, 等. 扩展移相控制的双有源桥 DC-DC 变换器的优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3889.
GUO Huayue, ZHANG Xing, ZHAO Wenguang, et al. Optimal control strategy of dual active bridge DC-DC converters with extended-phase-shift control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3889.

[7] 高宇, 李若愚, 李林柘, 等. 三重移相调制模式下双有源变换器的直接功率控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4707.
GAO Yu, LI Ruoyu, LI Linzhe, et al. Triple phase shift modulation-based direct power control strategy for a dual active bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4707.

[8] 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.

[9] 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.

[10] CHEN Linglin, LIN Lyuyi, SHAO Shuai, et al. Moving discretized control set model-predictive control for dual-active bridge with the triple-phase shift[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8624.

[11] 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.

[12] DENG Yaru, SONG Wensheng, YIN Shuai, et al. A model predictive control scheme without current sensor of dual active bridge DC-DC converters: improving dynamic performance and reducing hardware cost[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2916.

[13] 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.

[14] 芮涛,尹政,汪凤翔,等. 基于双矢量的并网逆变器无模型预测电流控制策略[J]. 电工技术学报,2023,38(14):3759.
RUI Tao, YIN Zheng, WANG Fengxiang, et al. Model-free predictive current control strategy of grid-connected inverter based on double-vector [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3759.

(下转第 95 页)

SUN Lihong, ZHAO Yongsheng, LI Cunhe, et al. Modeling of switched reluctance motor based on pretreatment BP neural network[J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(3): 64.

[19] 谢勇军, 赵世伟, 程小华. 采用少量样本的开关磁阻电机磁链 SVM 建模与分析[J]. 电工电能新技术,2020,39(8):10.
XIE Yongjun, ZHAO Shiwei, CHENG Xiaohua. SVM-based modeling of SRM with few flux-linkage sample[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(8): 10.

[20] SONG S J, ZHANG M, GE L F. A new fast method for obtaining flux-linkage characteristics of SRM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2015, 62(7): 4105.

[21] LIU J, WANG G F, SUN L, et al. A novel method to obtain the flux-linkage characteristics of switched reluctance motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2021, 57(11): 1.

[22] SONG S J, GE L F, ZHANG M. Data-reconstruction-based modeling of SRM with few flux-linkage samples from torque-balanced measurement[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(2): 424.

[23] XIE L,HAN T,ZHOU H,et al. Tuna swarm optimization: a novel swarm-based metaheuristic algorithm for global optimization[J]. Computational Intelligence and Neuroscience,2021:9210050.

[24] LE-HUY H, BRUNELLE P. A versatile nonlinear switched reluctance motor model in Simulink using realistic and analytical magnetization characteristics[C]//Proceedings of the 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, November 6 - 10,2005,Raleigh,North Carolina,USA. 2005:1556 - 1561.

(编辑:刘琳琳)

(上接第 84 页)

[15] ZHU Yi, YANG Yong, WEN Huiqing, et al. 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 Yuan, SAHOO S, DRAGICEVIC T, et al. A model predictive control based power sharing control of dual active bridge converter with parameters estimation[C]// IECON 2022 - 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 17 - 20, 2022, Brussels, Belgium. 2022: 1 - 6.

[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.

(编辑:刘素菊)