

改进增量式无差拍电流预测的永磁同步电机控制研究

曲星宇, 闫盛硕, 彭成坤, 张爽, 杜甫哲

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:针对因参数变化以及外部影响等因素造成永磁同步电机性能下降、效率降低等问题,本文采用一种改进的增量型无差拍电流预测控制策略,以提高永磁同步电机控制系统抗干扰能力及稳定性。首先,本文采用增量型无差拍电流预测控制,消除磁通和电阻参数失配造成的鲁棒性差的问题;其次针对增量型无差拍电流预测中仍存在电感参数失配引起的预测精度低、误差大等问题,设计一种电感辨识方法,提高对电感参数的鲁棒性,并通过加入电压、电流界限以及设计电感变化限幅,获得平滑而稳定的电感辨识曲线;实验表明改进的增量型无差拍预测控制,电流跟踪误差减小了约40%,转速波动幅度小于2%。

关键词:永磁同步电机;无差拍电流预测控制;增量型无差拍;参数失配;电感辨识;低通滤波器

DOI:10.15938/j.emc.2025.10.011

中图分类号:TM341

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2025)10-0116-11

Research on improved incremental deadbeat current predictive control for PMSM

QU Xingyu, YAN Chengshuo, PENG Chengkun, ZHANG Shuang, DU Fuzhe

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: To address issues such as performance degradation and efficiency reduction in permanent magnet synchronous motors caused by parameter variations and external disturbances, an improved incremental deadbeat predictive current control strategy was proposed to enhance the anti-interference capability and stability of the PMSM control system. First, an incremental deadbeat predictive current control method was adopted to eliminate the poor robustness resulting from flux and resistance parameter mismatches. Second, to overcome the persistent problems of low prediction accuracy and significant errors induced by inductance parameter mismatch in the incremental deadbeat predictive current control, an inductance identification method was designed to improve robustness against inductance parameter variations. By incorporating voltage and current limits and designing an inductance variation limiter, a smooth and stable inductance identification curve was achieved. Experimental results demonstrate that the improved incremental deadbeat predictive control reduces the current tracking error by approximately 40% and maintains the speed fluctuation amplitude below 2%.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; deadbeat predictive current control; incremental deadbeat; parameter mismatch; inductance identification; low-pass filter

收稿日期: 2025-04-30

基金项目: “兴辽英才计划”科技创新团队项目(XLYC2404031)

作者简介: 曲星宇(1984—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为高端重型成套装备节能驱动系统及智能控制;

闫盛硕(2001—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机及其控制;

彭成坤(1998—),男,博士研究生,研究方向为永磁同步电机及其控制、人工智能;

张爽(1999—),女,博士研究生,研究方向为永磁同步电机及其控制、人工智能;

杜甫哲(1997—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机及其控制。

通信作者: 闫盛硕

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)以其自身结构简单、噪声小、可靠性强、高功率因数等优点,在实业领域应用广泛,如新能源汽车、医疗器械等^[1]。PMSM 是一个多变量、非线性、强耦合的系统,对于参数摄动和外部负载扰动非常敏感^[2]。表贴式永磁同步电机(surface-mounted permanent magnet synchronous motor, SPMSM)因其功率因数高、结构简单、可靠性强而在众多电机中脱颖而出^[3-4]。随着电机驱动技术的不断发展,高性能电机控制系统在工业、交通、能源等领域得到了广泛应用。为了满足系统对高动态响应、强鲁棒性以及高效率的需求,电机控制算法的研究成为重点方向之一。其中,电流环和转速环的控制策略直接决定了电机系统的动态性能和稳态精度。

在现有的电流环控制算法中,无差拍预测电流控制(deadbeat predictive current control, DPCC)因其高动态性能、结构简单和易于数字实现而受到关注^[5]。然而,DPCC 对电机建模精度要求较高^[6]。在长期运行和高温条件下,PMSM 参数容易发生变化,这会导致 DPCC 的参数失配并加大电流静态误差^[7]。为了解决 DPCC 参数鲁棒性差的问题,学者们提出了多种改进方案,包括扰动观测器方法^[8-10]和参数辨识方法^[11-13]。扰动观测算法主要包括扩展状态观测器^[14]、滑模观测器^[15-16]和龙伯格观测器^[17-18]。文献[19]提出了一种基于指数扩张状态观测器(extended state observer, ESO)的无差拍控制方法,该方法采用正切函数的指数特性来自适应地调节观测器增益。文献[20]提出了一种基于模型参考自适应(model reference adaptive control, MRAS)的参数辨识方法。为了解决秩亏问题,将一些参数作为已知的固定值来估计其他参数,这会导致 MRAS 的参数辨识结果不准确。

近些年对于预测模型的改进研究也成为重点,在文献[21]中提出将自抗扰控制与无差拍控制相结合,提高控制系统的抗干扰能力和控制性能。文献[22]和文献[23]都采用了超局部模型代替机器模型,同时提出了无模型 DPCC 方案。无模型 DPCC 其核心在于绕过传统模型预测控制(model predictive control, MPC)中对精确数学模型的依赖,转而通过数据驱动的方法在线或离线学习系统动态特性,并基于此进行优化控制。在文献[24]中,提出了增

量型无差拍电流预测控制(incremental deadbeat predictive current control, IDPCC),利用相邻控制周期之间的差分运算来预测电压增量,进而消除了磁链和电阻参数的影响。然而这种迭代的方法并没有引入补偿项或控制参数,虽然系统稳定性和鲁棒性有所提高,但是仍然存在电感参数失配带来的预测出现波动的问题。在文献[25]中,提出一种电感更新方法,通过微分 DPCC 中获得电感参数并不能直接应用于 IDPCC。根据以上问题,本文所提出的创新点如下:

针对增量式无差拍电流预测控制中电感参数的重要性,设计一种带有电感辨识的 IDPCC 控制方法,提高所有参数的鲁棒性。首先,利用 DPCC 控制与 IDPCC 控制转换,获取电感辨识所需要的电流参数和电压参数,并根据公差公式设计电感变化限幅,实现电感自适应更新的同时,解决辨识后的电感参数发生突变以及出现无效电感的问题;其次根据电感变化限幅,设计电流和电压的误差上限,利用误差上限决定开始电感辨识时间,并结合低通滤波器获得平滑、稳定的电感辨识曲线。最后,速度外环采用角度微分信号得到角速度信号,加入模拟噪声并改写转速计算公式,考虑实验中噪声带来的影响,提高鲁棒性。

1 永磁同步电机数学模型

在表贴式永磁同步电机中 $L_d = L_q$, 所以 d、q 轴坐标系下电压方程为:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= Ri_d - \omega_e L_s i_q + L_s \frac{di_d}{dt}; \\ u_q &= Ri_q - \omega_e L_s i_d + \omega_e \psi_f + L_s \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: i_d 和 i_q 是 d、q 轴电流; u_d 和 u_q 是 d、q 轴电压; L_s 是 SPMSM 定子电感; R 是 SPMSM 定子电阻; ψ_f 是永久磁通量; ω_e 是电机的电角速度。

同时, SPMSM 的力学方程可以表示为

$$\frac{d\omega_e}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} p_n^2 \psi_f i_q - p_n T - B \omega_e \right). \quad (2)$$

式中: J 是转动惯量; T 是负载转矩; B 是粘性摩擦系数; p_n 是 PMSM 的极对数。

2 传统 DPCC 预测分析

在实际的数字系统中,利用一阶泰勒公式对公式(1)进行离散化,以补偿由数字控制引起的一步

延迟。第 $k+1$ 时刻 d、q 轴预测电流 i_{dq}^{pre} 如下所示:

$$\left. \begin{aligned} i_d^{\text{pre}}(k+1) &= \left(1 - \frac{T_s R}{L_s}\right) i_d(k) + T_s \omega_e(k) i_q(k) + \frac{T_s}{L_s} u_d(k); \\ i_q^{\text{pre}}(k+1) &= \left(1 - \frac{T_s R}{L_s}\right) i_q(k) - T_s \omega_e(k) i_d(k) + \frac{T_s}{L_s} u_q(k) - \frac{T_s}{L_s} \psi_f \omega_e(k). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $i_d(k)$, $i_q(k)$, $u_d(k)$, $u_q(k)$ 和 $\omega_e(k)$ 分别代表第 k 时刻 d、q 轴电流、电压和电角速度; T_s 表示采样周期。

传统无差拍预测电流控制中 $k+2$ 时刻电流的公式为:

$$\left. \begin{aligned} i_d^{\text{pre}}(k+2) &= \left(1 - \frac{T_s R}{L_s}\right) i_d(k+1) + T_s \omega_e(k) i_q(k+1) + \frac{T_s}{L_s} u_d(k+1); \\ i_q^{\text{pre}}(k+2) &= \left(1 - \frac{T_s R}{L_s}\right) i_q(k+1) - T_s \omega_e(k) i_d(k+1) + \frac{T_s}{L_s} u_q(k+1) - \frac{T_s}{L_s} \psi_f \omega_e(k). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

因为速度属于电机的机械变量,而变量的变化速度都很慢,所以电角速度仍用第 k 时刻的数值,通常在几个周期内取为常值。图 1 为 DPCC 控制流程图。

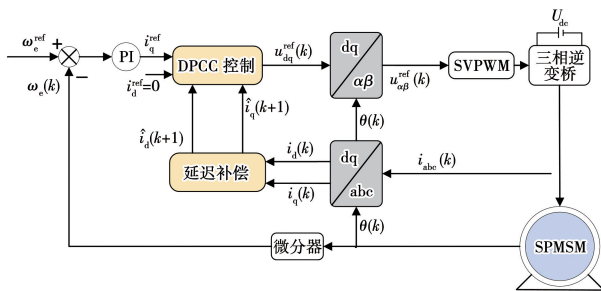


图 1 DPCC 控制流程图

Fig. 1 Flowchart of DPCC control

为了达到一步延迟补偿效果,使得电流在 $k+2$ 时刻达到参考电流,将式(4)中的 $k+2$ 时刻电流预测值替换为参考电流,公式如下:

$$\left. \begin{aligned} i_d^{\text{ref}}(k) &= i_d^{\text{pre}}(k+2); \\ i_q^{\text{ref}}(k) &= i_q^{\text{pre}}(k+2). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据式(4)可知,参考电流为:

$$\left. \begin{aligned} i_d^{\text{ref}}(k) &= \left(1 - \frac{T_s R}{L_s}\right) i_d^{\text{pre}}(k+1) + T_s \omega_e(k) i_q^{\text{pre}}(k+1) + \frac{T_s}{L_s} u_d^{\text{ref}}(k+1); \\ i_q^{\text{ref}}(k) &= \left(1 - \frac{T_s R}{L_s}\right) i_q^{\text{pre}}(k+1) - T_s \omega_e(k) i_d^{\text{pre}}(k+1) + \frac{T_s}{L_s} u_q^{\text{ref}}(k+1) - \frac{T_s}{L_s} \psi_f \omega_e(k). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

可以得出参考电压为:

$$\left. \begin{aligned} u_d^{\text{ref}}(k+1) &= \frac{L_s}{T_s} [i_d^{\text{pre}}(k+1) - i_d^{\text{ref}}(k)] + R i_d^{\text{pre}}(k+1) - L_s \omega_e(k) i_q^{\text{pre}}(k+1); \\ u_q^{\text{ref}}(k+1) &= \frac{L_s}{T_s} [i_q^{\text{pre}}(k+1) - i_q^{\text{ref}}(k)] + R i_q^{\text{pre}}(k+1) + L_s \omega_e(k) i_d^{\text{pre}}(k+1) + \psi_f \omega_e(k). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

3 增量型无差拍电流预测控制

3.1 无差拍电流控制器的设计

传统 DPCC 控制中影响性能的主要因素是磁通量和电感参数。为了解决这个问题,本文采用增量预测模型来消除磁通不匹配对控制性能的影响,并设计了一种带有电感辨识的 IDPCC 方法,减小电感参数失配带来影响。

其中,电角速度在连续时刻的两个预测电流中几乎保持不变,利用这个特性,将第 $k+1$ 时刻与第 k 时刻的预测电流相减,进而消除 q 轴预测电流公式中带有 ψ_f 参数部分,以此消除控制中磁通量参数失配的影响。通过相减得到增量电流为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_d^{\text{pre}}(k+1) &= \left(1 - \frac{T_s \Delta R}{L_s}\right) \Delta i_d(k) + T_s \omega_e(k) \Delta i_q(k) + \frac{T_s}{L_s} \Delta u_d(k); \\ \Delta i_q^{\text{pre}}(k+1) &= \left(1 - \frac{T_s \Delta R}{L_s}\right) \Delta i_q(k) - T_s \omega_e(k) \Delta i_d(k) + \frac{T_s}{L_s} \Delta u_q(k). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

利用增量电流与当前时刻的电流相加,可以得到消除磁通量参数的 $k+1$ 时刻的预测电流,即:

$$\left. \begin{aligned} i_d^{\text{pre}}(k+1) &= i_d(k) + \left(1 - \frac{T_s \Delta R}{L_s}\right) \Delta i_d(k) + \\ &\quad T_s \omega_e(k) \Delta i_q(k) + \frac{T_s}{L_s} \Delta u_d(k); \\ i_q^{\text{pre}}(k+1) &= i_q(k) + \left(1 - \frac{T_s \Delta R}{L_s}\right) \Delta i_q(k) - \\ &\quad T_s \omega_e(k) \Delta i_d(k) + \frac{T_s}{L_s} \Delta u_q(k) \circ \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中估计增量电压可得:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_d^{\text{ref}}(k+1) &= \frac{L_s}{T_s} [\Delta i_d^{\text{ref}}(k) - \Delta i_d^{\text{pre}}(k+1)] + \\ &\quad \Delta R \Delta i_d^{\text{pre}}(k+1) - L_s \omega_e(k) \Delta i_q^{\text{pre}}(k+1); \\ \Delta u_q^{\text{ref}}(k+1) &= \frac{L_s}{T_s} [\Delta i_q^{\text{ref}}(k) - \Delta i_q^{\text{pre}}(k+1)] + \\ &\quad \Delta R \Delta i_q^{\text{pre}}(k+1) + L_s \omega_e(k) \Delta i_d^{\text{pre}}(k+1) \circ \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

同理,可以得到增量电压之后可以得出 $k+1$ 时刻的参考电压。

从上面的等式推导过程可以看出,在 IDPCC 中的磁通量参数被消除,可以解决因为磁通量参数变化而引起的控制性能降低以及预测效果差的问题。

3.2 电感参数辨识

通过增量式无差拍电流预测控制可以看出,解决了磁通参数失配带来的影响,但是电感参数的变化仍对预测过程产生较大的影响。

电阻不匹配对控制性能的影响可以忽略不计。由于采样周期较短,即使存在电阻不匹配, ΔR 与 T_s 的乘积很小,可以忽略不计^[26]。

可将式(8)简化为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_d^{\text{pre}}(k+1) &= \Delta i_d(k) + T_s \omega_e(k) \Delta i_q(k) + \\ &\quad \frac{T_s}{L_s} \Delta u_d(k); \\ \Delta i_q^{\text{pre}}(k+1) &= \Delta i_q(k) - T_s \omega_e(k) \Delta i_d(k) + \\ &\quad \frac{T_s}{L_s} \Delta u_q(k) \circ \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由式(11)可得:

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_d^{\text{pre}}(k) &= \Delta i_d(k-1) + T_s \omega_e(k) \Delta i_q(k-1) + \\ &\quad \frac{T_s}{L_s} \Delta u_d(k-1); \\ \Delta i_q^{\text{pre}}(k) &= \Delta i_q(k-1) - T_s \omega_e(k) \Delta i_d(k-1) + \\ &\quad \frac{T_s}{L_s} \Delta u_q(k-1) \circ \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

对于式(12)中 L_s 是控制器电感参数,在实际电感参数下为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_d(k) &= \Delta i_d(k-1) + T_s \omega_e(k) \Delta i_q(k-1) + \\ &\quad \frac{T_s}{L_{\text{real}}} \Delta u_d(k-1); \\ \Delta i_q(k) &= \Delta i_q(k-1) + T_s \omega_e(k) \Delta i_d(k-1) + \\ &\quad \frac{T_s}{L_{\text{real}}} \Delta u_q(k-1) \circ \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(12)与式(13)相减可得:

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_d^{\text{pre}}(k) - \Delta i_d(k) &= \left(\frac{T_s}{L_s} - \frac{T_s}{L_{\text{real}}}\right) \Delta u_d(k-1); \\ \Delta i_q^{\text{pre}}(k) - \Delta i_q(k) &= \left(\frac{T_s}{L_s} - \frac{T_s}{L_{\text{real}}}\right) \Delta u_q(k-1) \circ \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将式(14)展开为:

$$\left. \begin{aligned} i_d^{\text{pre}}(k) - i_d(k) &= \left(\frac{T_s}{L_s} - \frac{T_s}{L_{\text{real}}}\right) u_d(k-1) - \\ &\quad \left(\frac{T_s}{L_s} - \frac{T_s}{L_{\text{real}}}\right) u_d(k-2); \\ i_q^{\text{pre}}(k) - i_q(k) &= \left(\frac{T_s}{L_s} - \frac{T_s}{L_{\text{real}}}\right) u_q(k-1) - \\ &\quad \left(\frac{T_s}{L_s} - \frac{T_s}{L_{\text{real}}}\right) u_q(k-2) \circ \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

进一步推导可得:

$$\frac{T_s}{L_{\text{real}}} = \frac{T_s}{L_s} - \frac{i_d^{\text{pre}}(k) - i_d(k)}{u_d(k-1) - u_d(k-2)} = \frac{T_s}{L_s} - \frac{i_q^{\text{pre}}(k) - i_q(k)}{u_q(k-1) - u_q(k-2)} \circ \quad (16)$$

最终可推理出 L_{real} 表达式为:

$$L_{\text{real}} = \frac{T_s}{\frac{T_s}{L_s} - \frac{i_d^{\text{pre}}(k) - i_d(k)}{u_d(k-1) - u_d(k-2)}} = \frac{T_s}{\frac{T_s}{L_s} - \frac{i_q^{\text{pre}}(k) - i_q(k)}{u_q(k-1) - u_q(k-2)}} \circ \quad (17)$$

由式(17)可以看出,电感辨识计算需要 $k-1$ 和 $k-2$ 时刻的电压值和电流值,所以本文将 DPCC 与带有电感辨识的 IDPCC 相结合的方法,当电机开始启动后,先利用 DPCC 控制,运行两个控制周期后,获取到公式所需的电压、电流值后进行控制切换,实现带有电感辨识的 IDPCC 控制。

将式(17)进一步推导为

行了仿真验证,并进行了全面的对比分析。表 1 中列出了仿真过程中 SPMSM 的物理参数。

表 1 仿真模型的参数

Table 1 Parameters of simulation model

参数	数值
极对数 p_n	5
额定速度 $n_N/(r/min)$	3 000
额定电阻 R_s/Ω	0.12
额定电感 L_s/mH	3.5
磁通量 ψ_f/Wb	0.084
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.001 7

首先,给定转速为 2 000 r/min,在 0.1 s 时突加负载转矩为 10 N·m,0.2 s 时突减负载至 5 N·m,同时在 0.3 s 时改变转速为 1 000 r/min,运行至 0.5 时恢复到 2 000 r/min。设置在 0.05 s 时开始辨识,初始电感为实际电感的 200%。转速环中 $k_p = 0.08, k_i = 10$ 。

图 3 所示为加入滤波环节后的仿真结果,可以看出加入滤波环节后,在 0.1 s 和 0.2 s 负载转矩突变以及在 0.3 s 和 0.5 s 速度改变时,跟踪效果良好,在考虑噪声的影响的同时速度计算几乎不会受到影响。

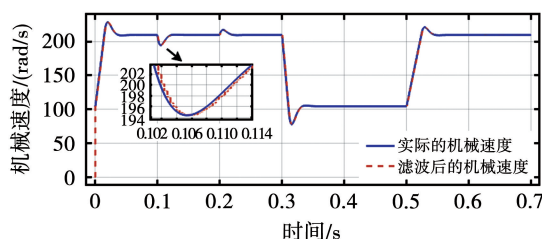


图 3 加入低通滤波器的仿真结果

Fig. 3 Simulation results after adding the low-pass filter

如图 4 和图 5 所示,分别为不加低通滤波器和加入低通滤波器和电感变化限幅的仿真结果图。

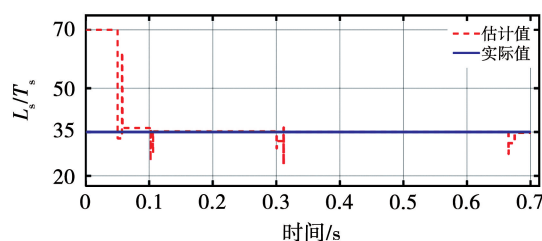


图 4 不加低通滤波器和电感变化限幅的仿真结果

Fig. 4 Simulation results without low-pass filter and inductor current limiting

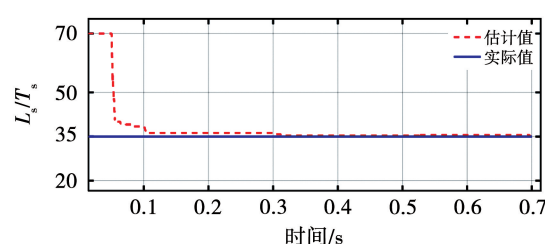


图 5 加入低通滤波器和电感变化限幅仿真结果

Fig. 5 Simulation results with low-pass filter and inductor current limiting

根据图 4 和图 5 仿真结果可以看出,在不加低通滤波器和电感变化限幅的时候,电感辨识在 0.06 s 出现了明显的突变情况,超出预计值 70% 左右,在 0.01 s 后趋于稳定。在 0.1 s 突加负载转矩以及 0.3 s 变速的时候,估计电感也出现了明显的突变,但突变程度变小且持续时间也在 0.01 s,而在 0.2 s 减载时刻,波形没有明显变化。同时在系统 0.6~0.7 s 稳定时也仍出现了突变情况。而图 5 在加入低通滤波器和电感变化限幅之后,虽然会出现小幅波动,但有效地解决了辨识电感发生突变的问题,对电感辨识过程可以得到更加平滑、稳定的结果,减小了突变电感对电机的损害。所以,加入低通滤波器和电感变化限幅有效解决了电感辨识过程中辨识的电感参数突变以及出现无效电感的情况。

图 6 为 d、q 轴实际值与参考值仿真结果,图 7 为 d、q 轴电流预测效果图,图 8 为加入电感辨识的 IDPCC 与 DPCC 电流预测仿真对比结果图。

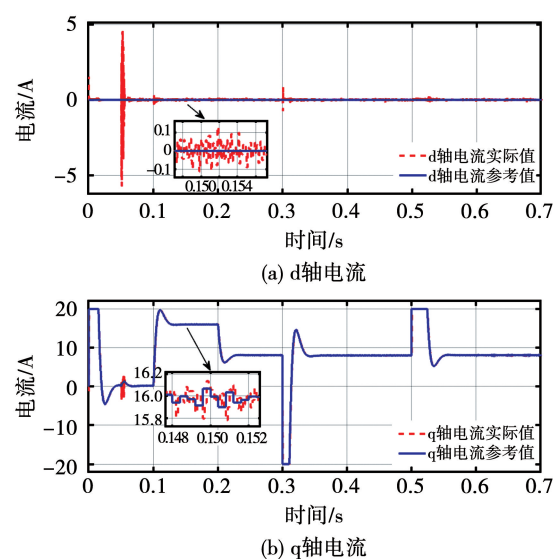
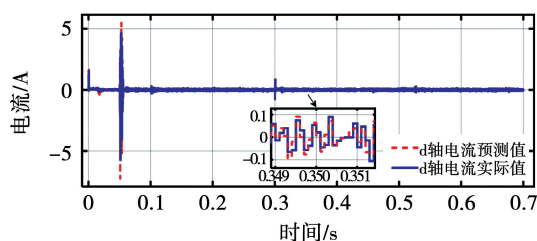


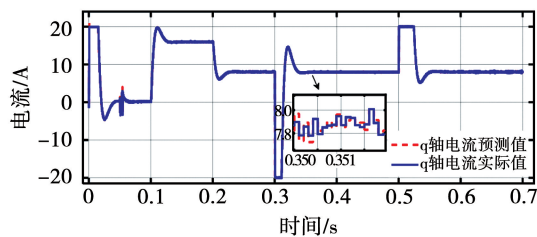
图 6 d、q 轴实际值与参考值仿真结果

Fig. 6 Simulation results of actual and reference values for d、q axes

根据图6的仿真结果可以看出,控制系统在0.05 s开始电感辨识时刻,d、q轴实际电流出现明显波动,持续时间大概在0.02 s之内。并在0.1 s突加负载转矩、0.2 s突减负载转矩以及0.3 s和0.5 s变速时,实际电流受到系统变化影响出现明显的小幅波动,但很快趋于平稳。从图7仿真结果可以看出,可以在系统突加、减负载转矩以及加速、减速过程中,即使实际电流出现波动情况,但经过电感辨识的d、q轴预测电流仍可以达到很好的跟踪效果,并且总体预测精度达到预期效果。



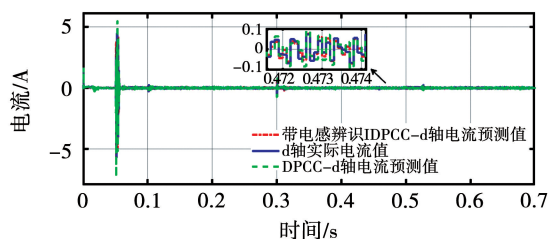
(a) d轴电流



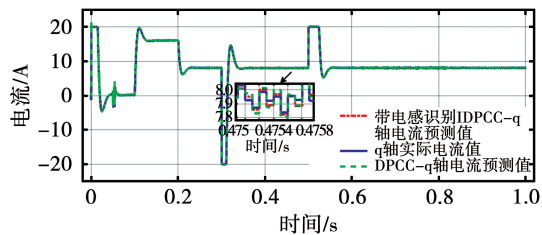
(b) q轴电流

图7 d、q轴电流预测效果图

Fig.7 Predictive performance diagram of d、q axis currents



(a) d轴电流对比图



(b) q轴电流对比图

图8 DPCC 相比较的仿真结果图

Fig.8 Simulation results compared with DPCC

根据图8对比仿真结果可以看出,本文设计的

带有电感辨识的IDPCC控制系统,对于d、q轴电流预测效果以及跟踪效果比DPCC有更好的预测精度。

图9和图10为IDPCC在0.05 s时开始辨识,初始电感为实际电感的200%情况下的转矩和转速仿真结果图。根据图9结果来看,在0.1 s突加负载转矩和0.2 s突减负载时,转矩迅速上升,响应时间短,具有优异的动态跟踪能力且未出现超调。根据图10来看在负载突变和变速过程中,转速波动幅度 $<2\%$,且无持续振荡。

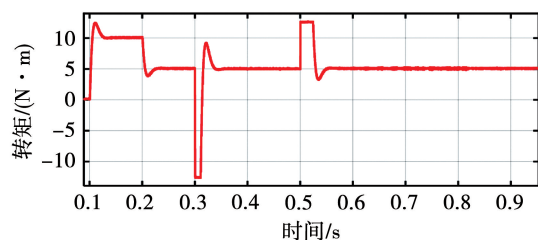


图9 转矩仿真结果图

Fig.9 Torque simulation results diagram

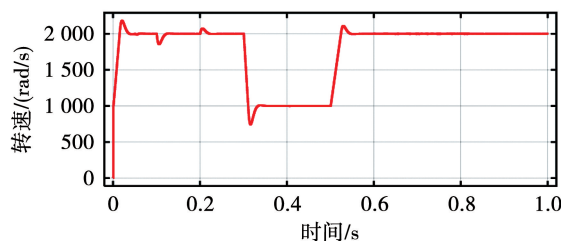


图10 转速仿真结果图

Fig.10 Rotational speed simulation results diagram

为了进一步验证所提方法的可行性和优越性,通过以下3个仿真实验来进行验证。图11为保持开始电感辨识时间在0.05 s,将初始电感改为实际电感的50%,图12为将开始电感辨识的时间改为0.15 s,初始电感设置为实际电感的50%,图13为保持开始电感辨识的时间为0.15 s,初始电感设置为实际电感的200%。

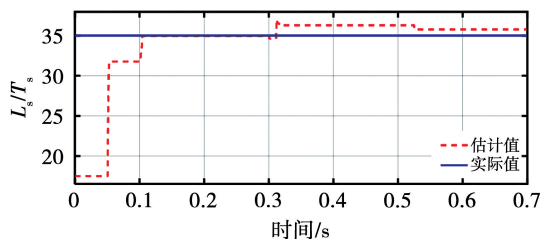


图11 0.05 s开始电感辨识,初始电感为实际电感的50%

Fig.11 Inductance identification starts at 0.05 seconds, and the initial inductance is 50% of actual inductance

根据图 11、图 12 以及图 13 的仿真结果看出,当控制系统改变开始电感辨识时间以及改变初始电感数值时,电感辨识效果仍保持良好。

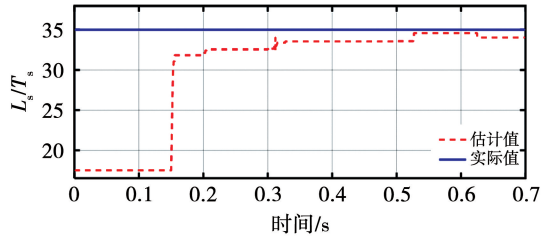


图 12 0.15 s 开始电感辨识,初始电感为实际电感的 50 %

Fig. 12 Inductance identification starts at 0.05 seconds, and the initial inductance is 50 % of actual inductance

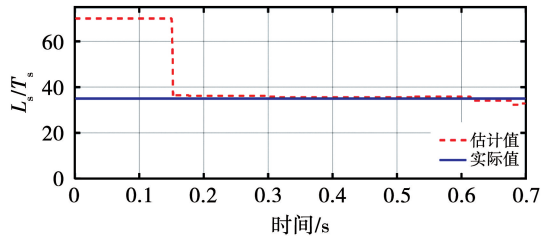


图 13 0.15 s 开始电感辨识,初始电感为实际电感的 200 %

Fig. 13 Inductance identification starts at 0.15 seconds, and the initial inductance is 200 % of actual inductance

5 实验分析

为了进一步验证本文所提出的带有电感辨识的 IDPCC 方法的可靠性,在基于 DSP28355 数字芯片的全实物实验平台上对 SPMSM 驱动系统进行了实验验证。实验平台如图 14 所示,主要包括控制板、开关电源、扭矩显示器、磁粉制动器、PC 上位机、永磁同步电动机等。

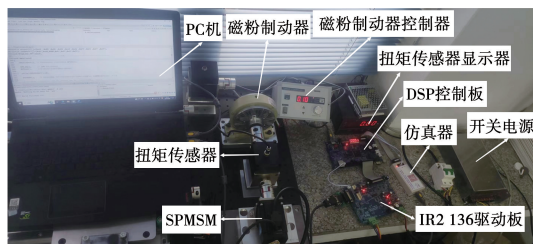
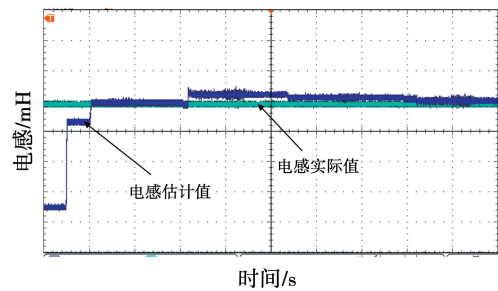


图 14 实验平台

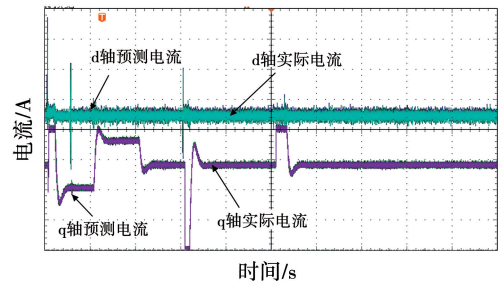
Fig. 14 Experimental platform

为了尽量保持仿真和实验的一致性和真实性,实验条件与仿真条件一致。首先,给定转速为 2 000 r/min,0.1 s 时突加负载转矩为 10 N · m,0.2 s 时突减负载至 5 N · m,并在 0.3 s 时改变转速为 1 000 r/min,运行到 0.5 s 后恢复到 2 000 r/min。设置电感开始辨识时间为 0.05 s,初始电感为实际电感的 50 %。

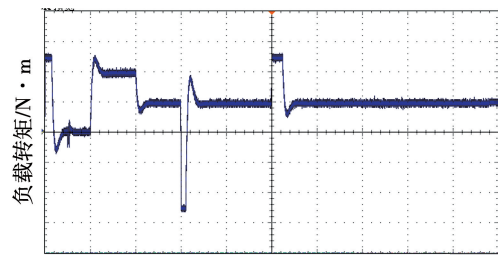
图 15 为电感辨识结果图、d、q 轴电流预测结果图、转矩结果图以及转速结果图。



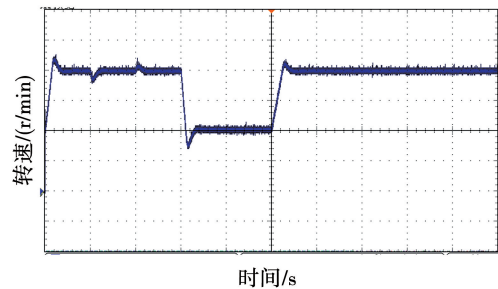
(a) 电感辨识的结果



(b) d、q轴电流预测结果



(c) 转矩结果图



(d) 转速结果图

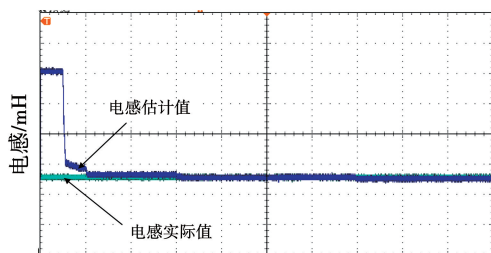
图 15 0.05 s 开始电感辨识,初始电感为实际电感的 50 %

Fig. 15 Inductance identification starts at 0.05 seconds, and the initial inductance is 50 % of actual inductance

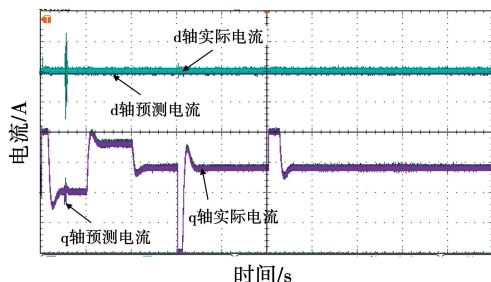
根据图 15(a) 电感辨识的结果,可以看出电感在 0.05 s 开始辨识并迅速达到实际电感参数值,并在加、减负载转矩过程中,电感辨识效果受到的影响不明显,波动较小。而在变速阶段电感辨识受到速度改变的影响出现小幅波动,但波动幅度不大,在系统稳定时间内电感辨识效果逐渐趋于稳定。图 15(b) 为 d、q 轴电流预测结果,可以看出 d、q 轴电流只有在开始电感辨识时刻出现明显小幅波动,在加、减负载转矩以及变速阶段电流预测效果出现波动情况并不明显,几乎没有波动,总体来看电流预测效果保持良好。根据图 15(c)、图 15(d) 可以看出,在转速、转矩发生改变的时候出现波动,但很快恢复稳定,整体看来稳定性和控制精度保持良好。

保持速度和开始辨识时间不变,将初始电感改为实际电感的 200%。图 16 为电感辨识结果图、d、q 轴电流预测结果图、转矩结果图以及转速结果图。

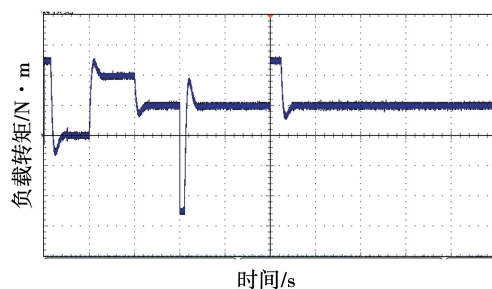
图 16(a) 为电感辨识的结果,可以看出在 0.05 s 后估计电感值迅速贴近实际电感值并在 0.1 s 几乎重合,在加、减载过程中出现小幅波动,并不明显,在 0.3 s 到 0.5 s 变速过程中出现小幅波动,电感辨识总体的辨识效果保持良好。图 16(b) 为 d、q 轴电流预测结果,可以看出 d、q 轴电流预测图线和实际图线几乎重合,预测效果良好。图 16(c)、图 16(d) 可以看出,控制过程会出现小幅波动,但很快恢复稳定,在不同情况下所设计的控制方法仍保持良好的稳定性和控制精度。



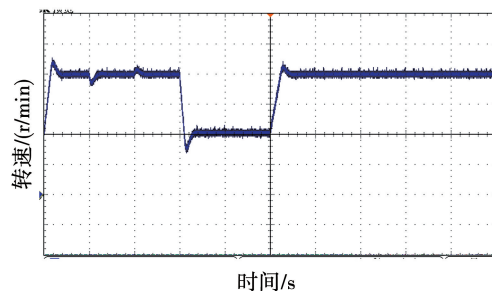
(a) 电感辨识结果



(b) d、q 轴电流预测结果



(c) 转矩结果图



(d) 转速结果图

图 16 0.05 s 开始电感辨识,初始电感为实际电感的 200 %

Fig. 16 Inductance identification starts at 0.05 seconds, and the initial inductance is 200 % of actual inductance

6 结 论

传统无差拍电流预测控制中参数失配导致预测精度降低、鲁棒性差的问题, IDPCC 可以有效地解决磁通和电阻参数的影响,但是电感参数的影响却仍然存在,本文在 IDPCC 的基础上,设计了一种带有电感辨识的 IDPCC,并将其与 DPCC 相结合的控制框架,最后进行了仿真和实验的验证,结论如下:

1) 本文设计的带有电感辨识的 IDPCC,在 IDPCC 可以解决电阻和磁通量参数失配引发的预测精度下降等问题的基础上,通过电感辨识,解决 IDPCC 最后一个重要参数因失配带来的影响,实现了对电感参数鲁棒性的提高。

2) 在设计电感辨识过程中考虑电压和电流的噪声影响,设置稳态误差上限以及设计电感变化限幅,并加入低通滤波器,消除突变的电感估计值和无效电感估计值,进而获得更加平滑的电感辨识曲线,消除突变电感对电机造成的不良影响。

3) 基于 IDPCC 控制中考虑转速环出现噪声的影响,角速度信号改成由角度信号微分之后得到,并

选择低通滤波的方法简化了设计过程。

参考文献:

- [1] 赵希梅,王海朋,金鸿雁. 基于离散空间矢量调制的 PMSM 模型预测电流控制[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(3): 50.
ZHAO Ximei, WANG Haipeng, JIN Hongyan. Model predictive current control based on discrete space vector modulation for PMSM[J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(3): 50.
- [2] SUN Xiaodong, CAO Junhao, LEI Gang, et al. A composite sliding mode control for SPMSM drives based on a new hybrid reaching law with disturbance compensation[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1427.
- [3] ZHANG Li, DENG Sisi, ZHU Xiaoyong, et al. New flux intensifying technique for five-phase fault-tolerant interior permanent magnet motors under multiple sensorless operation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(11): 13801.
- [4] 张懿,徐斌,魏海峰,等. 新型模型参考自适应的 PMSM 无差拍电流预测控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(9): 157.
ZHANG Yi, XU Bin, WEI Haifeng, et al. New model reference adaptive deadbeat predictive current control of PMSM[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(9): 157.
- [5] SUN Xiaodong, CAO Junci, LEI Gang, et al. A robust deadbeat predictive controller with delay compensation based on composite sliding-mode observer for PMSMs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9): 10742.
- [6] WANG Fengxiang, YAO Wei, KE Dongliang, et al. Continuous-control-set model-free predictive fundamental current control for PMSM system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(5): 5928.
- [7] YUAN Xin, XIE Shuangchun, CHENG Jiahao, et al. An enhanced deadbeat predictive current control of SPMSM with linear disturbance observer[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5): 6304.
- [8] 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.
- [9] YANG Nan, ZHANG Shuo, LI Xueping, et al. A new model-free deadbeat predictive current control for PMSM using parameter-free Luenberger disturbance observer[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 11(1): 407.
- [10] ZHANG Xiaoguang, CHENG Yu, ZHAO Zhihao, et al. Robust model predictive direct speed control for SPMSM drives based on full parameter disturbances and load observer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(8): 8361.
- [11] 刘刚,张婧,郑世强,等. 基于参数在线辨识的高速永磁电机无差拍电流预测控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(9): 98.
LIU Gang, ZHANG Jing, ZHENG Shiqiang, et al. Deadbeat predictive current control of high speed permanent magnet motor based on online parameter identification[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(9): 98.
- [12] 李耀华,王孝宇,张勇,等. 永磁同步电机多步模型预测电流控制成本函数优化计算研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(5): 17.
LI Yaohua, WANG Xiaoyu, ZHANG Yong, et al. Cost function optimization calculation for multi-step model predictive current control of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2023, 50(5): 17.
- [13] CHEN Junlei, FAN Ying, CHENG Ming, et al. Parameter-free ultra-local model-based deadbeat predictive current control for PMVMs using finite-time gradient method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(6): 5549.
- [14] 刘旭东,李珂,孙静,等. 基于广义预测控制和扩展状态观测器的永磁同步电机控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(12): 1613.
LIU Xudong, LI Ke, SUN Jing, et al. Generalized predictive control based on extended state observer for permanent magnet synchronous motor system[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(12): 1613.
- [15] 赵希梅,李德豪,金鸿雁. 基于负载力观测器的永磁直线同步电机自适应全阶动态滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(12): 53.
ZHAO Ximei, LI Deihao, JIN Hongyan. Adaptive full order dynamic sliding mode control of permanent magnet linear synchronous motor based on load force observer[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(12): 53.
- [16] 林茂,李颖晖,吴辰,等. 基于滑模模型参考自适应系统观测器的永磁同步电机预测控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 156.
LIN Mao, LI Yinghui, WU Chen, et al. A model reference adaptive system based sliding mode observer for model predictive controlled permanent magnet synchronous motor drive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 156.
- [17] 李争,贾良冠,张云飞,等. 基于龙伯格观测器的 PMLSM 非光滑积分终端滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(6): 153.
LI Zheng, JIA Liangguan, ZHANG Yunfei, et al. Non-smooth integral terminal sliding mode control of PMLSM based on Luenberger observer[J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(6): 153.
- [18] WANG Fengxiang, KE Dongliang, YU Xinhong, et al. Enhanced predictive model based deadbeat control for PMSM drives using exponential extended state observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(3): 2357.
- [19] KIM H S, LEE K. Model predictive current control with online

- 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)