DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.89 **中图分类号**：TM315 **文献标志码**：A

具有电感辨识功能的双馈感应风力发电机低开关频率模型预测电流控制

黄思源，刘述喜，刘 科，唐 博，王子豪
(重庆理工大学电气与电子工程学院，重庆 400054)

摘要：针对占空比模型预测电流控制稳态性能不佳、开关损耗较高及易受电机参数变化影响等问题，研究了一种具有电感辨识功能的双馈感应风力发电机DFIG(doubly-fed induction generator)低开关频率模型预测电流控制策略。首先，根据转子电压无差拍控制原理，分配相邻2个基本电压矢量及零矢量作用时间，合成6个期望电压矢量。其次，以最小转子电压预测误差与相邻2个控制周期切换点处最小开关切换次数为约束条件构建价值函数，对6种矢量组合枚举寻优。最后，建立 d 轴与 q 轴定转子磁链状态方程，采用模型参考自适应系统MRAS(model reference adaptive system)算法对电机系统中的电感参数进行在线辨识，并将实时辨识结果反馈至系统中。仿真和实验结果表明，所提策略在有效降低开关频率的同时，具有良好的控制性能与参数鲁棒性。

关键词：模型预测电流控制；电感辨识；双馈感应风力发电机；低开关频率；模型参考自适应系统

Low Switching Frequency Model Predictive Current Control of DFIG with Inductance Identification Function

HUANG Siyuan, LIU Shuxi, LIU Ke, TANG Bo, WANG Zihao
(School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Aimed at the problems of poor steady-state performance, high switching loss and susceptibility to changes in motor parameters of duty cycle model predictive current control, the low switching frequency model predictive current control strategy for a doubly-fed induction generator (DFIG) with an inductance identification function is studied. First, according to the principle of deadbeat control of rotor voltage, six expected voltage vectors are synthesized by distributing the action time of two adjacent basic voltage vectors and zero vectors. Second, a value function is constructed by taking the minimum rotor voltage prediction error and the minimum switching times at the switching points of two adjacent control cycles as the constraint conditions, and six vector combinations are enumerated and optimized. Finally, the d axis and q axis stator and rotor flux state equations are established. The model reference adaptive system (MRAS) algorithm is used to identify the inductance parameters in the motor system online, and the real-time identification results are fed back to the system. Simulation and experimental results show that the proposed strategy has good control performance and parameter robustness while effectively reducing the switching frequency.

Keywords: Model predictive current control; inductance identification; doubly-fed induction generator (DFIG); low switching frequency; model reference adaptive system (MRAS)

收稿日期：2024-09-05；**修回日期**：2024-12-30；**录用日期**：2025-02-05；**网络首发日期**：2025-02-25
基金项目：重庆市教委科学技术研究计划资助项目(KJQN202001128)
This work is supported by Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission under the grant KJQN202001128

双馈感应风力发电机DFIG (doubly-fed induction generator)具有成本低、效率高的特点，已被广泛用于各种实际应用型场合[1-2]。在电力电子领域中，有限集模型预测控制 FCS-MPC (finite control set model predictive control)因能有效处理非线性约束并具备较强的扩展性，已成为当前研究的热点之

—[3-5]。然而，DFIG 采用传统 FCS-MPC 策略存在 3 个明显缺点：其一，单个控制周期内作用电压矢量单一，导致 DFIG 稳态运行时其转子电流与电磁转矩存在显著脉动现象；其二，模型预测控制依赖于精确的电机参数，若参数失配可能会影响电机的控制性能；其三，驱动电机运行的开关管随机动作导致系统开关损耗增加。因此，提升传统 FCS-MPC 策略的稳态控制性能、减小开关损耗、增强系统对参数变化的鲁棒性是当前研究的重点目标。

在提升控制性能方面，文献[6]提出了一种基于最优占空比模型预测电流控制策略，该策略旨在通过最优电压矢量与零电压矢量的组合来实现电流控制，但电压矢量选择范围存在局限性，导致电流出现较大脉动；文献[7-8]扩展了第二电压矢量的选择范围，旨在进一步提升电流控制的精度，但其控制效果仍有待提升；文献[9-10]通过在单个控制周期内作用 3 个电压矢量来增强系统的控制性能，然而该策略要求对第一和第二电压矢量分别进行价值函数的遍历寻优，不仅增加了价值函数的迭代次数，而且未对三相桥臂开关器件的切换频率施加有效约束，频繁的电压矢量切换导致了换流器开关动作次数的显著增加，加剧了开关损耗。因此，在优化控制性能的过程中，需综合考虑开关损耗的增加，以实现系统控制性能与开关损耗之间的最优权衡。

在提升参数鲁棒性方面，模型预测电流控制因易受参数失配的影响，常采用在线参数辨识算法对预测模型进行调整，以保证模型的准确性。文献[11]采用最小二乘算法在线辨识电机 d 轴与 q 轴电感参数，该算法计算量小、收敛速度快，但其优化过程易陷入局部最优解而非全局最优解，影响辨识结果的准确性；文献[12]采用卡尔曼滤波算法对永磁同步电机电气参数进行在线辨识，抗干扰性较好，但实时更新卡尔曼滤波器对计算资源有较高要求；文献[13]将模型参考自适应系统 MRAS(model reference adaptive system)算法与卡尔曼滤波算法 2 种辨识算法进行对比，卡尔曼滤波算法在处理系统模型偏差及实时性方面存在局限性，相比之下，MRAS 算法凭借其较低的计算复杂性与良好的适应性，在参数辨识中展现出更为优越的性能；文献[14]采用 Adaline 神经网络算法在线辨识参数，尽管其收敛效果较好，但其实现过程需注入直轴电流以构造满秩矩阵，这一过程在电机的正常运行状态下会带来不利影响。

MRAS 算法具有结构简单、响应速度快等优点，被广泛应用于电机系统在线参数辨识中。MRAS 算法的核心环节在于自适应律的设计，该设计通过调节比例积分 PI(proportional integral)控制器参数，确保参考模型与可调模型之间的待辨识参数误差渐近收敛至 0[15]。文献[16]提出了一种在线辨识永磁同步电动机电阻、电感与磁链 3 个关键参数的方法，然而，由于系统存在欠秩问题，即可观测性受到限制，因此这些参数无法被准确辨识；文献[17]提出一种新型 MRAS 算法的参数分步辨识方法，其将固定的定子电阻与定子电感参数结合 MRAS 算法来辨识转子磁链参数，再进一步辨识定子电阻与定子电感，虽然在一定程度上解决了参数辨识中的欠秩问题，但其方法辨识过程较复杂，需分步进行，增加了控制算法的计算负担。此外，该方法在辨识过程中假设定子电阻与定子电感参数为已知，然而在实际应用中，这些参数往往难以直接获取或准确测量，因此仍需进一步考虑辨识算法对参数不确定情况下的辨识准确度。

综上所述，本文以 DFIG 为研究对象，提出了一种具有电感辨识功能的双馈感应风力发电机低开关频率模型预测电流控制策略。该策略通过选取矢量扇区中的相邻电压矢量与零矢量合成 6 个期望电压矢量，并基于转子电压无差拍控制原理分配各矢量的作用时间。以 d 轴与 q 轴转子电压预测误差最小化及相邻控制周期切换点处开关切换次数最小化为控制目标，构建价值函数进行枚举寻优。此外，通过建立双馈感应风力发电机 d 轴与 q 轴定子、转子磁链状态方程，结合 MRAS 算法实现定子电感、转子电感与励磁电感的在线辨识。

1　占空比模型预测电流控制

1.1 DFIG 数学模型

在 dq 同步旋转坐标系下，DFIG 转子电流 d 轴与 q 轴分量预测表达式为

$$\begin{bmatrix} i_{dr}(k+1) \\ i_{qr}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{dr}(k) \\ i_{qr}(k) \end{bmatrix} + T_s \left(\begin{bmatrix} -\dfrac{R_r}{\sigma L_r} & \omega_s - \dfrac{\omega_m}{\sigma} \\ \dfrac{\omega_m}{\sigma} - \omega_s & -\dfrac{R_r}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr}(k) \\ i_{qr}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dfrac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} & -\dfrac{\omega_m L_m}{\sigma L_r} \\ \dfrac{\omega_m L_m}{\sigma L_r} & \dfrac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}(k) \\ i_{qs}(k) \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma L_r} \begin{bmatrix} u_{dr}(k) \\ u_{qr}(k) \end{bmatrix} - \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} u_{ds}(k) \\ u_{qs}(k) \end{bmatrix} \right) \tag{1}$$

式中：k 为当前采样时刻；k+1 为下一采样时刻；$i_{dr}(k+1)$、$i_{qr}(k+1)$分别为 k+1 时刻转子电流 d 轴、q 轴分量；$i_{ds}(k)$与 $i_{qs}(k)$、$i_{dr}(k)$与 $i_{qr}(k)$分别为 k 时刻定子、转子电流 d 轴与 q 轴分量；T_s为采样周期；R_r 为转子电阻；σ 为漏感系数，σ=1–L_m^2/L_sL_r；L_r 为转子电感；ω_s 为定子绕组电压与电流角频率；ω_m为转子角频率；R_s为定子电阻；L_s为定子电感；L_m为励磁电感；$u_{ds}(k)$与 $u_{qs}(k)$、$u_{dr}(k)$与 $u_{qr}(k)$分别为 k 时刻定子、转子电压 d 轴与 q 轴分量。

1.2 占空比模型预测电流控制

占空比模型预测电流控制 DC-MPCC (duty cycle model predictive current control)策略的核心思想为通过遍历价值函数寻优遴选出最优电压矢量，在此基础上引入占空比控制机制，增加零矢量作用于控制周期，以实现准确的电机控制。

在单个控制周期中，可根据当前时刻 q 轴转子电流 $i_{qr}(k)$与矢量作用时间预测得到 $i_{qr}(k+1)$，即

$$i_{qr}(k+1) = i_{qr}(k) + s_{qr,\text{opt1}} t_{\text{opt1}} + s_{qr,0} t_0 \tag{2}$$

式中：t_{opt1}、t_0 分别为第一电压矢量、零矢量作用时间；$s_{qr,\text{opt1}}$、$s_{qr,0}$分别为第一电压矢量、零矢量作用时转子电流变化率 q 轴分量。

根据式(1)得 q 轴转子电流变化率 $s_{qr,0}$、$s_{qr,\text{opt1}}$为

$$\begin{cases} s_{qr,0} = \left(\dfrac{\omega_m}{\sigma} - \omega_s \right) i_{dr} - \dfrac{R_r}{\sigma L_r} i_{qr} + \dfrac{\omega_m L_m}{\sigma L_r} i_{ds} + \dfrac{R_s L_m}{\sigma L_s L_r} i_{qs} - \dfrac{L_m}{\sigma L_s L_r} u_{qs} \\ s_{qr,\text{opt1}} = s_{qr,0} + \dfrac{1}{\sigma L_r} u_{qr,\text{opt1}} \end{cases} \tag{3}$$

式中，$u_{qr,\text{opt1}}$为第一电压矢量的转子电压 q 轴分量。

根据 q 轴转子电流无差拍控制原理，分配电压矢量作用时间 t_{opt1}、t_0 为

$$\begin{cases} t_{\text{opt1}} = \dfrac{i_{qr}^* - i_{qr}(k) - s_{qr,0} T_s}{s_{qr,\text{opt1}} - s_{qr,0}} \\ t_0 = T_s - t_{\text{opt1}} \end{cases} \tag{4}$$

以转子电流与期望转子电流误差的最小化为控制目标，构建价值函数为

$$g_1 = [i_{dr}^* - i_{dr}(k+1)]^2 + [i_{qr}^* - i_{qr}(k+1)]^2 \tag{5}$$

式中，i_{dr}^* 和 i_{qr}^* 为期望转子电流 d 轴与 q 轴分量。

2　具有电感辨识功能的低开关频率模型预测电流控制

为解决 DC-MPCC 策略在控制性能、开关损耗及电机电感参数失配情况下预测精度不足的问题，本文提出一种具有电感辨识功能的低开关频率三矢量模型预测电流控制 LSF-TV-MPCC(low switching frequency three vector model predictive current control)策略，其结构框图如图 1 所示。

2.1 三矢量模型预测电流控制

为提高转子电流预测准确度，采用 TV-MPCC 策略，其核心思想为根据基本电压矢量 $\boldsymbol{u}_1$~$\boldsymbol{u}_6$所在位置划分 6 个矢量扇区，在每个扇区内，选取相邻的 2 个电压矢量与零矢量合成期望电压矢量，该合成矢量的幅值与方向均可动态调节，扩展了电压矢量的覆盖范围。

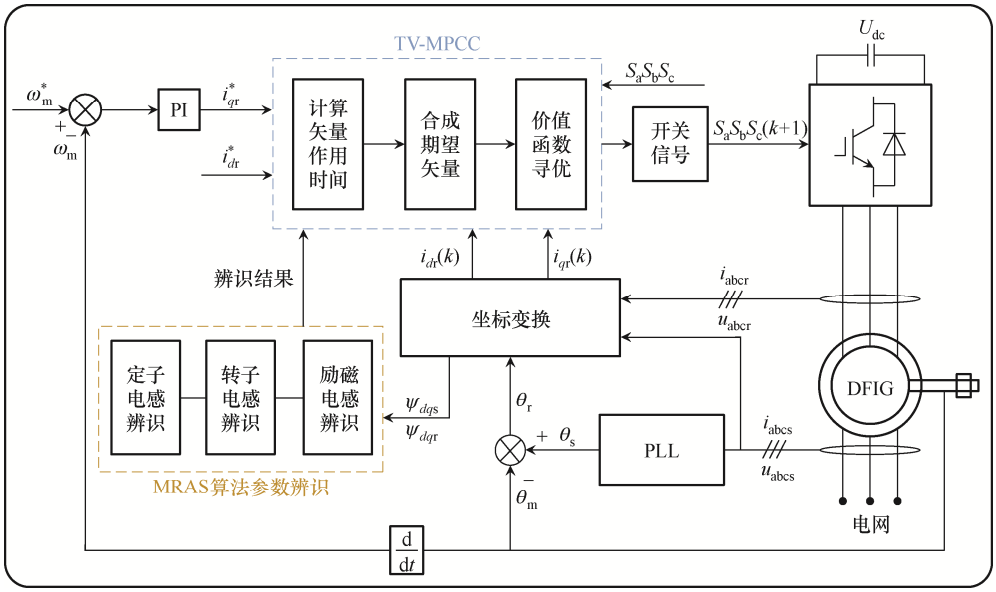


图 1 具有电感辨识功能的 LSF-TV-MPCC 框图

Fig. 1 Block diagram of LSF-TV-MPCC with inductance identification function

依据转子电流无差拍原理，结合式(1)得期望转子电压矢量表达式为

$$\begin{bmatrix} u_{dr}^* \\ u_{qr}^* \end{bmatrix} = \frac{\sigma L_r}{T_s}\begin{bmatrix} i_{dr}^* \\ i_{qr}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r - \dfrac{\sigma L_r}{T_s} & L_r(\omega_m - \sigma\omega_s) \\ L_r(\sigma\omega_s - \omega_m) & R_r - \dfrac{\sigma L_r}{T_s} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{dr}(k) \\ i_{qr}(k) \end{bmatrix} + \frac{L_m}{L_s}\left(\begin{bmatrix} -R_s & L_s\omega_m \\ -L_s\omega_m & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}(k) \\ i_{qs}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ds}(k) \\ u_{qs}(k) \end{bmatrix} \right) \tag{6}$$

式中，u_{dr}^*、u_{qr}^* 分别为期望转子电压 d 轴、q 轴分量。

DC-MPCC 策略以转子电流变化率为基础分配矢量作用时间，但由于涉及的计算参数较多，计算过程较为复杂。为简化计算量，可依据转子电压无差拍控制原理直接分配矢量作用时间。第一电压矢量、第二电压矢量、零矢量的作用时间 t_f、t_s、t_z 的表达式为

$$\begin{cases} t_f = \left(\dfrac{u_{dr}^* u_{qr,s} - u_{qr}^* u_{dr,s}}{u_{dr,f} u_{qr,s} - u_{qr,f} u_{dr,s}} \right) T_s \\ t_s = \left(\dfrac{u_{dr}^* u_{qr,f} - u_{qr}^* u_{dr,f}}{u_{dr,s} u_{qr,f} - u_{qr,s} u_{dr,f}} \right) T_s \\ t_z = T_s - t_f - t_s \end{cases} \tag{7}$$

式中，$u_{dr,f}$、$u_{qr,f}$ 与 $u_{dr,s}$、$u_{qr,s}$ 分别为第一电压矢量与第二电压矢量相对应的转子电压 d 轴、q 轴分量。

所得电压矢量作用时间 t_f、t_s、t_z 被严格限定在控制周期范围内，确保电压矢量在整个控制周期内的有效性。

在 1 个控制周期中，不同电压矢量组合及矢量作用时间在 d 轴与 q 轴分量上的表达式为

$$\begin{cases} u_{dr}(k+1) = \dfrac{t_f}{T_s} u_{dr,f} + \dfrac{t_s}{T_s} u_{dr,s} \\ u_{qr}(k+1) = \dfrac{t_f}{T_s} u_{qr,f} + \dfrac{t_s}{T_s} u_{qr,s} \end{cases} \tag{8}$$

2.2 低开关频率

TV-MPCC 策略电压矢量切换顺序未受到有效约束，导致开关频率过高而增加功率损耗与高次谐波含量，为解决这一问题，本文提出 LSF-TV-MPCC 策略，旨在通过减少电压矢量切换时的开关动作次数显著降低开关频率。

在确保 t_f、t_s、t_z 均处于有效范围的前提下，基于 2.1 节所设定的第一电压矢量与第二电压矢量均为相邻电压矢量原则，在 2 个电压矢量切换过程中，开关状态仅发生单次变换，这一特性减少了单个控制周期内的开关动作次数。再者，在价值函数中加入当前控制周期向下一控制周期电压矢量切换时开关动作次数作为新约束条件，实现开关频率的降低。

当前控制周期向下一控制周期电压矢量切换时，开关动作次数为

$$N_{\text{switch}}=\left|S_{\text{a}}(k+1)-S_{\text{a}}(k)\right|+\left|S_{\text{b}}(k+1)-S_{\text{b}}(k)\right|+\left|S_{\text{c}}(k+1)-S_{\text{c}}(k)\right| \tag{9}$$

式中：$S_{\text{a}}(k)$、$S_{\text{b}}(k)$、$S_{\text{c}}(k)$为当前控制周期末段开关状态；$S_{\text{a}}(k+1)$、$S_{\text{b}}(k+1)$、$S_{\text{c}}(k+1)$为下一控制周期初段开关状态。

以 N_{switch}最小化与转子电压预测误差最小化为控制目标，构建价值函数为

$$g_2=[u_{dr}^{*}-u_{dr}(k+1)]^2+[u_{qr}^{*}-u_{qr}(k+1)]^2+\lambda N_{\text{switch}} \tag{10}$$

式中，λ为开关频率抑制权重系数。

理论分析表明，λ的选取对电压预测误差及开关频率具有一定影响，随着λ值的增大，开关频率呈下降趋势，但同时电压预测值与期望值之间的误差也增大；反之，当λ值减小时，开关频率升高，而电压预测误差相应减小。

LSF-TV-MPCC 策略的具体实现步骤为：①由式(6)计算期望转子电压；②选取相邻电压矢量与零矢量组合，共 6 组电压矢量，通过式(7)分配矢量作用时间；③将 6 组期望电压矢量与矢量作用时间代入式(8)得 $u_{dr}(k+1)$、$u_{qr}(k+1)$，再将开关状态代入式(9)得 N_{switch}，结合式(10)枚举寻优，选择 g_2 值最小时对应的期望电压矢量为最优电压矢量输出。

2.3 MRAS 算法电感辨识

LSF-TV-MPCC 策略对 DFIG 转子电流 *d* 轴与 *q* 轴分量准确预测的前提是期望转子电压计算准确，根据式(6)可知当电感参数存在失配时，期望转子电压误差增大，进而影响式(7)矢量作用时间分配的准确性，最终导致 LSF-TV-MPCC 策略转子电压预测误差增大。为提升 LSF-TV-MPCC 策略的参数鲁棒性，采用 MRAS 算法在线辨识电感参数，以有效抑制电感参数失配对 DFIG 控制性能的不利影响，增强控制策略的鲁棒性。

MRAS 算法电感辨识的核心思想为建立 DFIG 定转子磁链的状态方程，分别作为参考模型与可调模型。当电感参数存在失配时，通过设计自适应律调整可调模型中的电感参数趋近于参考模型中的实际正确值，以实现 DFIG 电感参数的准确辨识。

DFIG 定子、转子电压 *dq* 轴分量公式为

$$\begin{cases}\boldsymbol{u}_{dqs}=R_{\text{s}}\boldsymbol{i}_{dqs}+\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{dqs}}{\mathrm{d}t}+\mathrm{j}\omega_{\text{s}}\boldsymbol{\psi}_{dqs}\\ \boldsymbol{u}_{dqr}=R_{\text{r}}\boldsymbol{i}_{dqr}+\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{dqr}}{\mathrm{d}t}+\mathrm{j}(\omega_{\text{s}}-\omega_{\text{m}})\boldsymbol{\psi}_{dqr}\end{cases} \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{i}_{dqs}$、$\boldsymbol{i}_{dqr}$ 与 $\boldsymbol{u}_{dqs}$、$\boldsymbol{u}_{dqr}$ 分别为定子、转子电流与电压的 *dq* 轴分量；$\boldsymbol{\psi}_{dqs}$、$\boldsymbol{\psi}_{dqr}$ 为定子、转子磁链的 *dq* 轴分量，其表达式为

$$\begin{cases}\boldsymbol{\psi}_{dqs}=L_{\text{s}}\boldsymbol{i}_{dqs}+L_{\text{m}}\boldsymbol{i}_{dqr}\\ \boldsymbol{\psi}_{dqr}=L_{\text{m}}\boldsymbol{i}_{dqs}+L_{\text{r}}\boldsymbol{i}_{dqr}\end{cases} \tag{12}$$

由式(12)可知，定子磁链与转子磁链方程的秩均为 2，且分别包含参数 L_{s}、L_{m} 与 L_{r}、L_{m}。因此可结合式(11)与式(12)进行变量替换，建立参考模型与可调模型，分别为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{dqs}}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{R_{\text{s}}}{L_{\text{s}}}\boldsymbol{\psi}_{dqs}-\mathrm{j}\omega_{\text{s}}\boldsymbol{\psi}_{dqs}+\dfrac{R_{\text{s}}L_{\text{m}}}{L_{\text{s}}}\boldsymbol{i}_{dqr}+\boldsymbol{u}_{dqs}\\ \dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{dqr}}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{R_{\text{r}}}{L_{\text{r}}}\boldsymbol{\psi}_{dqr}-\mathrm{j}(\omega_{\text{s}}-\omega_{\text{m}})\boldsymbol{\psi}_{dqr}+\dfrac{R_{\text{r}}L_{\text{m}}}{L_{\text{r}}}\boldsymbol{i}_{dqs}+\boldsymbol{u}_{dqr}\end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\tilde{\boldsymbol{\psi}}_{dqs}}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{R_{\text{s}}}{\tilde{L}_{\text{s}}}\tilde{\boldsymbol{\psi}}_{dqs}-\mathrm{j}\omega_{\text{s}}\tilde{\boldsymbol{\psi}}_{dqs}+\dfrac{R_{\text{s}}\tilde{L}_{\text{m}}}{\tilde{L}_{\text{s}}}\boldsymbol{i}_{dqr}+\boldsymbol{u}_{dqs}\\ \dfrac{\mathrm{d}\tilde{\boldsymbol{\psi}}_{dqr}}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{R_{\text{r}}}{\tilde{L}_{\text{r}}}\tilde{\boldsymbol{\psi}}_{dqr}-\mathrm{j}(\omega_{\text{s}}-\omega_{\text{m}})\tilde{\boldsymbol{\psi}}_{dqr}+\dfrac{R_{\text{r}}\tilde{L}_{\text{m}}}{\tilde{L}_{\text{r}}}\boldsymbol{i}_{dqs}+\boldsymbol{u}_{dqr}\end{cases} \tag{14}$$

式中，上标“~”为对应参数的辨识值。

本文将自适应律设计为比例积分结构，根据波波夫(Popov)超稳定性理论，为使整个 MRAS 参数辨识系统保持全局渐进稳定，设计定子侧 $\tilde{L}_{\text{m}}/\tilde{L}_{\text{s}}$、$1/\tilde{L}_{\text{s}}$ 待辨识参数自适应律为

$$\begin{cases}\dfrac{\tilde{L}_{\text{m}}}{\tilde{L}_{\text{s}}}=k_{\text{p}}R_{\text{s}}(v_{ds}i_{dr}+v_{qs}i_{qr})+k_{\text{i}}\displaystyle\int_0^t R_{\text{s}}(v_{ds}i_{dr}+v_{qs}i_{qr})\mathrm{d}t\\ \dfrac{1}{\tilde{L}_{\text{s}}}=-k_{\text{p}}R_{\text{s}}(v_{ds}\tilde{\psi}_{ds}+v_{qs}\tilde{\psi}_{qs})-k_{\text{i}}\displaystyle\int_0^t R_{\text{s}}(v_{ds}\tilde{\psi}_{ds}+v_{qs}\tilde{\psi}_{qs})\mathrm{d}t\end{cases} \tag{15}$$

式中：k_p、k_i 分别为比例、积分系数；$v_{ds}=\psi_{ds}-\tilde{\psi}_{ds}$；$v_{qs}=\psi_{qs}-\tilde{\psi}_{qs}$。

设计转子侧 $\tilde{L}_m/\tilde{L}_r$、$1/\tilde{L}_r$ 待辨识参数自适应律为

$$\begin{cases}\dfrac{\tilde{L}_m}{\tilde{L}_r}=k_pR_r(v_{dr}i_{ds}+v_{qr}i_{qs})+\\ \qquad k_i\displaystyle\int_0^t R_r(v_{dr}i_{ds}+v_{qr}i_{qs})\mathrm{d}t\\ \dfrac{1}{\tilde{L}_r}=-k_pR_r(v_{dr}\tilde{\psi}_{dr}+v_{qr}\tilde{\psi}_{qr})-\\ \qquad k_i\displaystyle\int_0^t R_r(v_{dr}\tilde{\psi}_{dr}+v_{qr}\tilde{\psi}_{qr})\mathrm{d}t\end{cases}\tag{16}$$

式中：$v_{dr}=\psi_{dr}-\tilde{\psi}_{dr}$；$v_{qr}=\psi_{qr}-\tilde{\psi}_{qr}$。

3 仿真与实验分析

本节对所提LSF-TV-MPCC策略进行仿真与实验分析，以验证该策略的有效性与可行性。DFIG参数见表1。

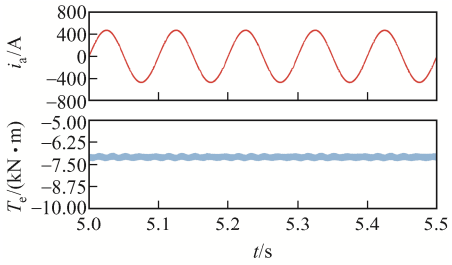
表1 DFIG参数

Tab. 1 Parameters of DFIG

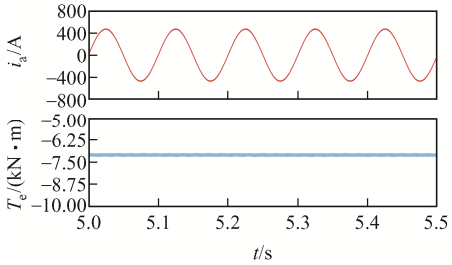
参数	数值
额定频率 f/Hz	50
定子电压 U_s/V	690
直流侧电压 U_{dc}/V	1 150
定子电阻 R_s/mΩ	2.6
转子电阻 R_r/mΩ	2.9
定子电感 L_s/mH	2.587
转子电感 L_r/mH	2.587
励磁电感 L_m/mH	2.5
额定功率 P_N/MW	2
极对数	2

3.1 仿真分析

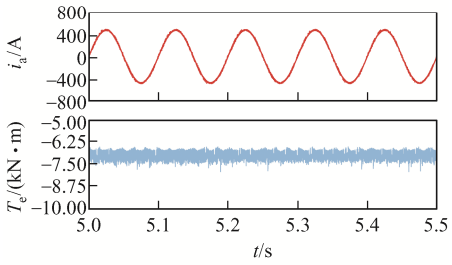
基于MATLAB/Simulink平台搭建DFIG的DC-MPCC策略与TV-MPCC策略模型进行对比分析，仿真设置DFIG额定转速为1 800 r/min，风速为10 m/s。DFIG在此工况下2种控制策略有无参数失配时的稳态性能如图2所示，图中 i_a 为a相转子电流，T_e 为电磁转矩。可以看出，相比于DC-MPCC策略，TV-MPCC策略无参数失配下的控制性能显著提升，可在参数匹配准确的情况下实现更优的控制效果。在存在参数失配的情况下，相比于DC-MPCC策略，TV-MPCC策略更依赖于电机参数的准确度，对电机参数的变化更为敏感。在 L_s、L_r、L_m 3个参数同时发生失配时，TV-MPCC策略的控制性能受到的影响更为显著。



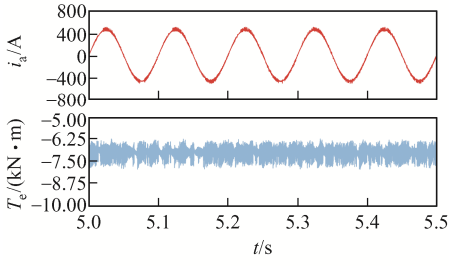
(a) DC-MPCC策略无参数失配



(b) TV-MPCC策略无参数失配



(c) DC-MPCC策略L_s失配2倍、L_r失配2倍、L_m失配0.5倍



(d) TV-MPCC策略L_s失配2倍、L_r失配2倍、L_m失配0.5倍

图2 2种控制策略有无参数失配时的稳态性能

Fig. 2 Steady-state performance under two control strategies with or without parameter mismatch

进一步对无参数失配下a相转子电流总谐波畸变率 THD (total harmonic distortion)进行量化分析，结果表明 DC-MPCC 策略的 THD 约为 2.65%，TV-MPCC 策略的 THD 约为 0.77%，其转子电流畸变程度有效降低。此外，采用标准差分析 2 种控制策略下的电磁转矩波动，样本数 N 取 100 000，量化结果见表 2，标准差公式为

$$\Delta T_{\mathrm{e}}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\left[T_{\mathrm{e}}(n)-T_{\mathrm{e,ave}}\right]^{2}} \tag{17}$$

式中：ΔT_{e} 为电磁转矩 T_{e} 的标准差；$T_{\mathrm{e}}(n)$ 为第 n 个样本的瞬时转矩；$T_{\mathrm{e,ave}}$ 为平均转矩。

表 2　2 种控制策略稳态性能量化结果

Tab. 2 Quantitative results of steady-state performance under two control strategies

控制策略	ΔT_{e}/(N·m)
DC-MPCC	124.760 7
TV-MPCC	53.437 7

从表 2 可以看出，DC-MPCC 策略转矩发生明显的偏移，而 TV-MPCC 策略转矩偏移程度相对较小，进一步验证了其在控制精度方面的优势。

TV-MPCC 策略与 LSF-TV-MPCC 策略作用下，上桥臂开关次数如图 3 所示。未引入相邻控制周期电压矢量切换的开关动作次数为控制目标时，每 0.2 s 内的平均开关次数为 8 481 次，对应的开关频率约为 7.07 kHz。而当引入开关动作次数作为控制目标时，每 0.2 s 内的平均开关次数降低为 7 799 次，对应的开关频率降低至约 6.50 kHz。在原有转子电压控制目标基础上加入了开关次数为新的控制目标后，LSF-TV-MPCC 策略的 THD 由 0.77%升至 1.31%，控制精度有所下降。在实际

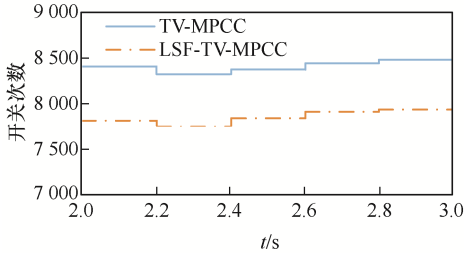


图 3　开关次数

Fig. 3 Switching times

应用中，需在保证系统性能的同时，实现开关频率的最优控制，以达到电能质量与开关频率的最佳平衡。

对 DC-MPCC 策略与 LSF-TV-MPCC 策略下电压矢量数量、预测次数、价值函数约束条件、作用时间计算复杂度及矢量作用范围等方面进行比较，结果见表 3。DC-MPCC 策略矢量作用范围相对有限，导致其控制精度较低，另外该策略在作用时间分配上具有较高复杂度，增加了计算负担。LSF-TV-MPCC 策略作用 3 个电压矢量来扩展矢量作用范围，显著提升了控制精度，同时将开关动作次数作为额外控制目标，有效降低了开关频率。

表 3　2 种控制策略比较

Tab. 3 Comparison between two control strategies

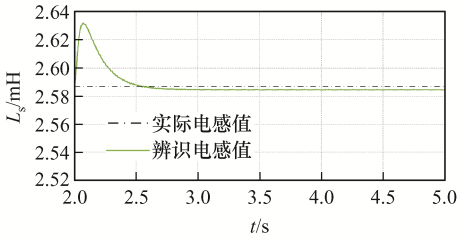
控制策略	电压矢量数量	预测次数	价值函数约束条件	作用时间计算复杂度	矢量作用范围
DC-MPCC	2	6	转子电流	高	固定方向与任意幅值
LSF-TV-MPCC	3	6	转子电压与开关动作次数	低	任意方向与任意幅值

在 MATLAB 环境中对 DC-MPCC 策略与 LSF-TV-MPCC 策略运行时间进行分析，可得 DC-MPCC 策略平均运行时间约为 62.8 μs，LSF-TV-MPCC 策略平均运行时间约为 60.3 μs，由此可知本文所提策略运行时间较短，具有良好的实时求解能力。

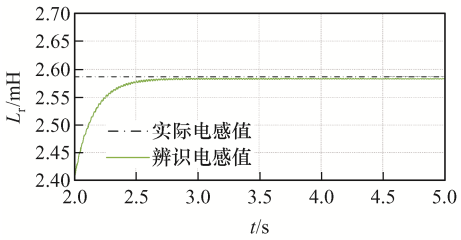
综合上述分析，本文所提 LSF-TV-MPCC 策略的稳态性能明显优于 DC-MPCC 策略，该策略在不同方面的性能评估展现出高效且优异的稳态特性。

在验证 LSF-TV-MPCC 策略有效性后，根据 2.3 节 MRAS 参数辨识算法，结合 LSF-TV-MPCC 策略对定子电感、转子电感、励磁电感进行在线辨识，设定风速为 10 m/s，电感辨识结果如图 4 所示。电机定子电感实际值为 2.587 mH，辨识值约为 2.584 mH，辨识误差约为 0.12%；转子电感实际值

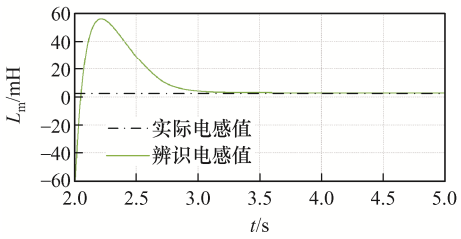
为 2.587 mH，辨识值约为 2.582 mH，辨识误差约为 0.19%；励磁电感实际值为 2.500 mH，辨识值约为 2.502 mH，辨识误差约为 0.08%。通过辨识结果与实际值对比可以看出，采用 MRAS 算法辨识电机电感参数具有较小误差，辨识结果相对准确。



(a) 定子电感



(b) 转子电感



(c) 励磁电感

图 4 LSF-TV-MPCC 策略电感辨识波形

Fig. 4 Waveforms of identified inductance under LSF-TV-MPCC strategy

3.2 实验分析

本文搭建 DFIG 实时数字半实物平台 RT-LAB (real time digital semi-physical laboratory)验证 LSF-TV-MPCC 策略的有效性与可行性，实验的采样频率为 10 kHz，RT-LAB 验证 LSF- TV-MPCC 策略可行性的过程如图 5 所示。

为清晰表达 DFIG 运行时参数失配所带来的影响，本节将参数失配时的条件设置为 L_s 失配 1.5 倍，L_r 失配 1.3 倍，L_m 失配 0.7 倍，初始风速设定为 10 m/s。无参数辨识环节电感参数各自失配时电机稳态性能 i_a、i_{dr}、i_{qr} 及 T_e 如图 6 所示。图中，3 个电感参数在分别发生失配时转子电流脉动与电磁转矩脉动幅度均较大。L_s 失配 1.5 倍时，i_a 的 THD 为 2.81%，i_{dr} 与 i_{qr} 的脉动幅度大致相同；L_r 失配 1.3 倍时，i_a 的 THD 为 1.70%，i_{qr} 的脉动稍大于 i_{dr} 的

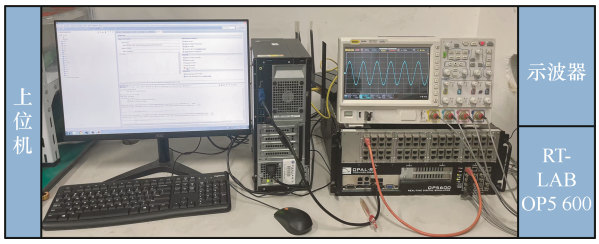
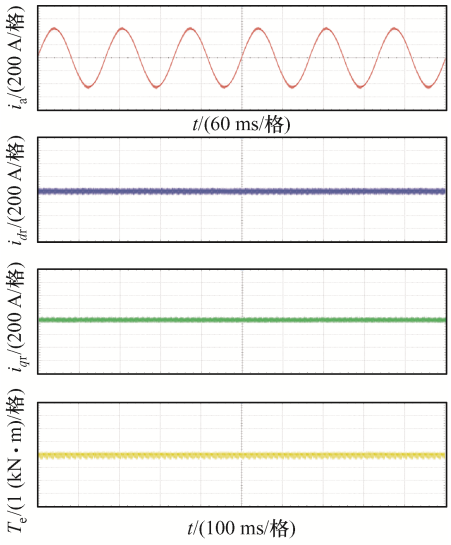
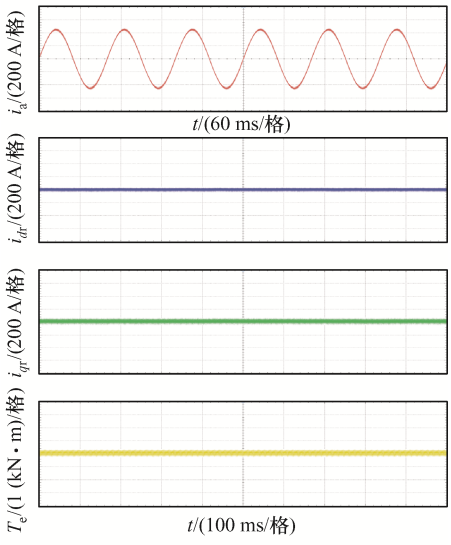


图 5 RT-LAB 验证 LSF-TV-MPCC 策略可行性过程

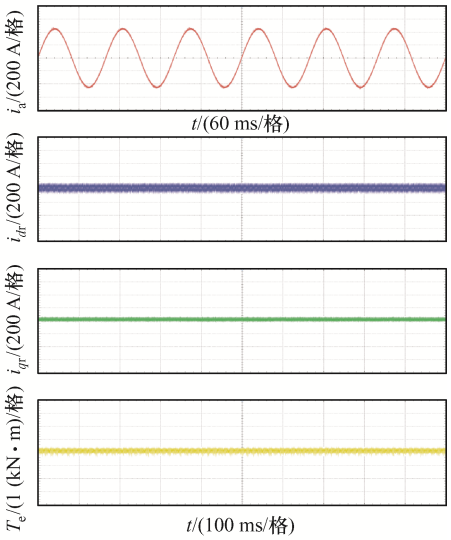
Fig. 5 Feasibility process of LSF-TV-MPCC strategy verified by RT-LAB



(a) L_s失配1.5倍



(b) L_r失配1.3倍



(c) L_m失配0.7倍

图 6　LSF-TV-MPCC 策略参数失配时稳态性能

Fig. 6 Steady-state performance under LSF-TV-MPCC strategy with parameter mismatch

脉动；L_m失配 0.7 倍时，i_a的 THD 为 2.74%，i_{dr}的脉动明显大于 i_{qr}的脉动。

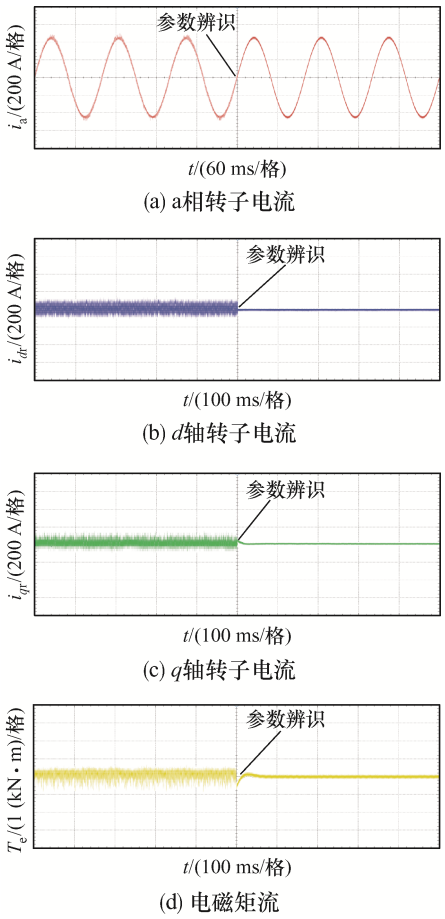
采用式(17)对电感参数各自失配时的电磁转矩脉动进行分析，量化结果见表 4。

表 4　电感参数各自失配时的稳态性能量化结果

Tab. 4 Quantitative results of steady-state performance with respective mismatch of inductive parameters

失配条件	ΔT_e/(N·m)
L_s失配 1.5 倍	137.346 8
L_r失配 1.3 倍	99.940 9
L_m失配 0.7 倍	106.225 2

为验证 MRAS 算法在线参数辨识能力，设定 3 个电感参数同时失配，其中 L_m失配 0.7 倍，原因为转子电流预测表达式(1)中存在 $\sigma=1-L_m^2/L_sL_r$，若 L_m与 L_s、L_r同时增大或减小，则 σ 变化很小，导致 DFIG 有无参数辨识环节的实验结果差异不明显。电感参数同时失配情况下，LSF-TV-MPCC 策略参数辨识环节的 DFIG 控制性能如图 7 所示。i_a、i_{dr}和 i_{qr}的脉动以及 T_e的脉动与未加入参数辨识环节时相比显著减小，实验结果表明当 DFIG 电感参数失配时采用 MRAS 参数辨识算法具有良好的参数鲁棒性。



(a) a相转子电流

(b) *d*轴转子电流

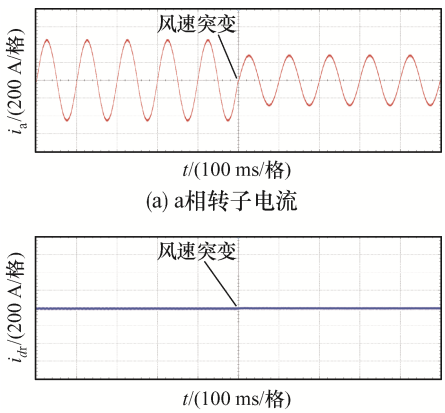
(c) *q*轴转子电流

(d) 电磁矩流

图 7　LSF-TV-MPCC 策略参数辨识环节控制性能

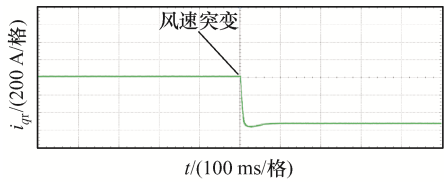
Fig. 7 Control performance of parameter identification link under LSF-TV-MPCC strategy

为验证所提策略动态性能，实验设置风速从 10 m/s 突降至 9 m/s，LSF-TV-MPCC 策略动态性能如图 8 所示。结果表明在风速发生突变时，转子电流与电磁转矩均迅速跟随给定信号发生变化，所提策略具有良好的动态性能。

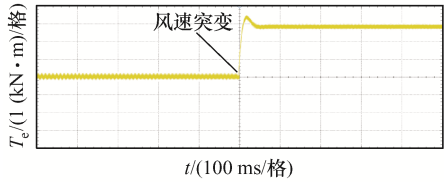


(a) a相转子电流

(b) *d*轴转子电流



(c) q轴转子电流



(d) 电磁转矩

图 **8** **LSF-TV-MPCC** 策略动态性能

Fig. 8 Dynamic performance under LSF-TV-MPCC strategy

4 结论

为提升占空比模型预测电流控制的稳态性能，降低开关频率，并增强其对电感参数失配的鲁棒性，本文提出了一种具有电感辨识功能的双馈感应风力发电机低开关频率模型预测电流控制策略，研究结论如下。

(1) TV-MPCC 策略相较于 DC-MPCC 策略，转子电流与电磁转矩脉动有效减少，具有良好的稳态性能。

(2) LSF-TV-MPCC 策略通过在价值函数中引入约束条件，有效减少了单个控制周期内的开关次数，从而降低了开关频率。

(3) 在电感参数同时失配的情况下，采用 MRAS 算法进行在线参数辨识，LSF-TV-MPCC 策略仍能保持良好的控制性能，展现出较强的参数鲁棒性。

参考文献：

[1] 凌禹. 对称电压故障下双馈风力发电机瞬态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6871-6879.
Ling Yu. Transient characteristics analysis of DFIG-based wind turbine under symmetrical voltage fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6871-6879. (in Chinese)

[2] 凌禹. 双馈风力发电机故障穿越关键技术综述[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 141-151.
Ling Yu. Review of key technologies for fault ride through of DFIG-based wind turbine [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 141-151. (in Chinese)

[3] 高曼曼, 龙珊珊, 王飞, 等. 基于双矢量的三电平 PFC 中点电位平衡无权重型模型预测控制[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 41-48.
Gao Manman, Long Shanshan, Wang Fei, et al. Neutral-point potential balance unweighted factor model predictive control of three-level PFC based on double vectors [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 41-48. (in Chinese)

[4] Rodriguez J, Garcia C, Mora A, et al. Latest advances of model predictive control in electrical drives: Part I: Basic concepts and advanced strategies [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 3927-3942.

[5] Davari S A, Nekoukar V, Garcia C, et al. Online weighting factor optimization by simplified simulated annealing for finite set predictive control [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(1): 31-40.

[6] Saeed M S R, Song Wensheng, Yu Bin, et al. Low-complexity deadbeat model predictive current control with duty ratio for five-phase PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12085-12099.

[7] 徐艳平, 张保程, 周钦. 永磁同步电机双矢量模型预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 222-230.
Xu Yanping, Zhang Baocheng, Zhou Qin. Two-vector based model predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 222-230. (in Chinese)

[8] 周有为, 刘述喜, 孙超俊. 双馈风力发电系统双矢量模型预测电流控制[J]. 重庆理工大学学报, 2023, 37(8): 226-234.
Zhou Youwei, Liu Shuxi, Sun Chaojun. Prediction of current control for doubly-fed wind power generation systems based on a two-vector model [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2023, 37(8): 226-234. (in Chinese)

[9] 徐艳平, 王极兵, 周钦, 等. 永磁同步电动机双优化三矢量模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2018,

38(6): 1857-1864.

Xu Yanping, Wang Jibing, Zhou Qin, et al. Double optimazation three-vector-based model predictive current control for permanent magnet synchronous motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1857-1864. (in Chinese)

[10] 兰志勇, 王波, 徐琛, 等. 永磁同步电机新型三矢量模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1): 243-249.

Lan Zhiyong, Wang Bo, Xu Chen, et al. A novel three-vector model predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 243-249. (in Chinese)

[11] 贾成禹, 王旭东, 周凯. 基于电感辨识的内置式永磁同步电机电流模型预测控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(11): 75-82.

Jia Chengyu, Wang Xudong, Zhou Kai. Model predictive control method for current control of IPMSM with inductance parameter identification [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(11): 75-82. (in Chinese)

[12] Li Xinyue, Kennel R. General formulation of Kalman-filter-based online parameter identification methods for VSI-fed PMSM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 2856-2864.

[13] Boileau T, Leboeuf N, Nahid-Mobarakeh B, et al. Online identification of PMSM parameters: Parameter identifiability and estimator comparative study [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4): 1944-1957.

[14] 何静, 唐润忠, 张昌凡, 等. 基于 Adaline 神经网络参数辨识的 PMSM 鲁棒电流预测控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(4): 127-139.

He Jing, Tang Runzhong, Zhang Changfan, et al. Robust current predictive control for PMSM based on Adaline neural network parameter identification [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(4): 127-139. (in Chinese)

[15] 李垣江, 董鑫, 魏海峰, 等. 基于改进模型参考自适应系统的永磁同步电机参数辨识[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(9): 1983-1988.

Li Yuanjiang, Dong Xin, Wei Haifeng, et al. Parameter identification method of permanent magnet synchronous motor based on improved model reference adaptive system [J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(9): 1983-1988. (in Chinese)

[16] 安群涛, 孙力, 赵克. 一种永磁同步电动机参数的自适应经线辨识方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 31-36.

An Quntao, Sun Li, Zhao Ke. An adaptive on-line identification method for the parameters of permanent maget synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(6): 31-36. (in Chinese)

[17] 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): 157-167.

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): 157-167. (in Chinese)



黄思源

作者简介：

黄思源(2001—　)，女，硕士研究生。研究方向：双馈风力发电系统控制算法。E-mail：52220712188@stu.cqut.edu.cn。

刘述喜(1969—　)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子变换器、电机及其控制技术。E-mail：shuxi@cqut.edu.cn。

刘科(2000—　)，男，硕士研究生。研究方向：深度学习与电气设备故障诊断。E-mail：liuke666@stu.cqut.edu.cn。

唐博(1999—　)，男，硕士研究生。研究方向：DAB 变换器控制策略优化研究与应用。E-mail：cquttb@foxmail.com。

王子豪(1998—　)，男，硕士研究生。研究方向：双馈风力发电系统控制。E-mail：GrainYu@stu.cqut.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)