

计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制策略

刘浩睿, 王金梅*, 刘永强

(宁夏大学 电子与电气工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:针对永磁同步电机三矢量模型预测控制中存在的计算效率与参数鲁棒性不足的问题,提出一种计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制策略。基于电流无差拍控制思想,将最小电流跟踪误差目标映射为最小电压矢量跟踪误差目标,并构建了全新的价值函数;通过起始电压矢量的扇区定位,对备选电压矢量进行预筛选,显著减少了每个控制周期内所需的预测评估次数;引入龙伯格状态观测器,将由参数失配引起的扰动补偿到模型中,有效抑制了参数失配对模型性能的影响。以表贴式永磁同步电机为研究对象,在起停-加载-升速-降速工况下,对计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制策略进行仿真,结果表明,该控制方案在维持系统期望系统动态和稳态响应的同时,有效减轻了实时计算负担,增强了系统稳定性。

关键词:永磁同步电机;模型预测电流控制;优化三矢量;参数失配;Simulink

中图分类号:TM341;TP273 **文献标志码:**A

预测模型依赖电机本体模型时,常因参数失配而鲁棒性不足^[1]。为提升控制策略的参数鲁棒性,降低模型预测控制(model predictive control, MPC)对参数的敏感性,国内学者已提出诸多方法。这些方法大致可归纳为2类:其一,借助扰动观测器或估计算法实时捕捉参数失配引起的干扰,并将其作为补偿项嵌入系统模型,以削弱失配影响^[2],此类扰动观测手段包括自适应观测、龙伯格观测器^[3]、扩散卡尔曼滤波以及滑模观测器^[4]等。然而,这类方法本质上属于被动补偿策略——仅在干扰显现后进行抑制,难以在参数失配初期前瞻校正,补偿滞后性可能导致系统瞬态性能劣化。其二,聚焦于电机参数的在线辨识,例如,采用最小二乘估计^[5]或随机逼近算法,将辨识结果实时反馈至预测模型,从而增强模型的参数鲁棒性。值得注意的是,在线辨识在电机稳速运行场合的参数收敛速度与辨识精度往往顾此失彼;辨识-更新-预测的串行结构引入了额外的计算延时,在高开关频率下会显著增强系统的计算负担。

本研究聚焦于三矢量模型预测电流控制

(three vector-model predictive current control, TV-MPCC)所面临的高计算复杂度与参数鲁棒性不足问题,深入剖析了包含参数失配建模的永磁同步电机模型预测控制方法,在干扰显现前预先评估参数失配对控制性能的影响;通过优化电压矢量选择过程,降低算法的计算复杂度并提升参数鲁棒性。具体而言,基于电流无差拍控制(deadbeat current control, DBC)思想,将最小化电流跟踪误差转化为最小化电压矢量跟踪误差,构建了全新的价值函数。同时,利用起始电压矢量的扇区定位对备选电压矢量进行预筛选,显著减少了每个控制周期内所需的预测评估次数。此外,引入龙伯格状态观测器,将参数失配引起的扰动补偿至模型中,有效抑制了参数失配对模型性能的影响。通过仿真测试,对所提出的控制策略算法的性能与鲁棒性进行了全面评估,验证了其整体有效性及在工程应用中的潜在价值。

1 优化三矢量模型预测电流控制方案

1.1 三矢量模型预测电流控制方案

三相永磁同步电机主要分为2种类型:表贴式

收稿日期:2025-08-20

基金项目:宁夏自然科学基金项目(2026AAC030155);宁夏重点研发计划项目(2020BDE03003)

作者简介:刘浩睿(1999—),男,硕士研究生,主要从事电力电子与电力传动研究(15500879600@163.com)。

*通信作者:王金梅(1968—),女,教授,博士,主要从事新能源并网、电力电子与电力传动研究(wang_jm@nxu.edu.cn)。

引用格式:刘浩睿,王金梅,刘永强.计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制策略[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(1):77-87.

(surface permanent magnet synchronous motor, SPMSM) 和内置式 (interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM)。表贴式电机中永磁体贴装于转子表面, 而内置式电机中永磁体则被嵌入转子铁芯内部。表贴式永磁同步电机的一个显著特点是其 d 轴和 q 轴电感相同, 这使得对其数学模型进行分析时更加方便和简洁^[6]。本文聚焦于 SPMSM, 所研究的电机由三相两电平电压源逆变器 (voltage source inverters, VSI) 驱动。

方案: 在传统 TV-MPCC 策略中, 每个控制周期会输出 3 个电压矢量, 具体包括 2 个有效电压矢量 u_i, u_j , 以及 1 个零电压矢量 u_z 。通过优化这些电压矢量的作用时间, 可以合成 1 个虚拟电压矢量 u_r , 其方向和幅值均可独立调节^[7]。随后, 计算每个虚拟电压矢量对应的预测电流, 并利用价值函数进行评估和优化, 最终选取最优电压矢量并输出至逆变器, 从而实现高性能的电机控制。

通过 Park 坐标变换, 将 SPMSM 在三相静止坐标系 (a, b, c) 中的模型映射到两相旋转坐标系 (d, q), 模型随之简化为以下定子电流方程^[8]。即

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{1}{L_s} [u_s - R_s i_s - j\omega_r L_s i_s - j\omega_r \psi_f] \quad (1)$$

欧拉离散后为

$$i_s(k+1) = i_s(k) + \frac{T_s}{L_s} [u_s(k) - R_s i_s(k) + E(k)] \quad (2)$$

$$E(k) = -j\omega_r(k) L_s i_s(k) - j\omega_r(k) \psi_f \quad (3)$$

式中: i_s 表示定子电流, A; $i_s(k+1)$ 为预测的下一采样时刻的定子电流, A; u_s 为定子电压, V; R_s 为定子电阻, Ω ; ψ_f 为永磁体磁链, Wb; ω_r 为转子角速度, r/s; T_s 为采样周期, s; L_s 为定子电感, H。 R_s, L_s, ψ_f 为电机本体的关键参数, 这些参数可通过专用的参数估计工具 Motor Control Blockset 经注入测试信号获取。

根据式(1), 可以推导出在每个电压矢量组合中, 电压矢量 u_i, u_j, u_z 作用时对应的电流斜率 s_i, s_j, s_z , 其公式分别为

$$s_z = \left. \frac{di_s}{dt} \right|_{u_z} = \frac{1}{L_s} [-R_s i_s - j\omega_r L_s i_s - j\omega_r \psi_f] \quad (4)$$

$$s_i = \left. \frac{di_s}{dt} \right|_{u_i} = s_z + \frac{u_i}{L_s} \quad (5)$$

$$s_j = \left. \frac{di_s}{dt} \right|_{u_j} = s_z + \frac{u_j}{L_s} \quad (6)$$

为确保 d, q 轴电流预测值能够精确跟踪其给定值, 控制算法在每个采样周期内计算出最优的电

压矢量作用时间组合 t_i, t_j, t_z ^[8], 从而实现无差跟踪。因此, 可以建立关系为

$$i_s(k+1) = i_s(k) + s_i t_i + s_j t_j + s_z t_z = i_s^* \quad (7)$$

依据式(8)~(9), 任意电压矢量组合 (u_i, u_j, u_z) 及其对应的作用时间可被合成为一个虚拟电压矢量。借助这一方法, 能够生成 6 个不同的虚拟电压矢量。 d, q 轴的虚拟电压公式为

$$u_d = \frac{t_i}{T_s} u_{id} + \frac{t_j}{T_s} u_{jd} \quad (8)$$

$$u_q = \frac{t_i}{T_s} u_{iq} + \frac{t_j}{T_s} u_{jq} \quad (9)$$

基于式(2)~(3)构建的预测模型, 能够实时计算出每个候选虚拟电压矢量作用下的 d, q 轴电流预测值。随后, 利用式(10)定义的代价函数对所有候选矢量进行评估 (共需评估 6 次), 从中筛选出使代价函数值最小的最优矢量, 将其作为逆变器的开关指令。代价函数定义为

$$g_i = |i_s^* - i_s(k+1)| \quad (10)$$

式中: $i_s^* = i_d^* + j i_q^*$; i_d^* 和 i_q^* 分别表示 d, q 轴的电流指令值。

该控制策略有效缓解了传统模型预测电流控制中电流预测值与期望值偏差较大、系统稳态性能欠佳等问题。然而, 由于其计算复杂度高且对参数失配较为敏感, 限制了其在实际工程中的广泛应用^[9]。

1.2 优化三矢量模型预测电流控制方案

电流无差拍控制 (DBC) 是一种基于离散时间域的最优控制策略。它借助精确的数学模型, 在有限的控制周期内使电流跟踪误差迅速收敛, 从而实现电流对参考值的无滞后精确跟踪^[10]。在模型预测电流控制中引入电流无差拍控制, 能够实现单周期零误差跟踪与多目标优化的有机结合, 显著提升控制系统的动态性能^[11]。

本文提出了一种针对三矢量模型预测电流控制 (TV-MPCC) 的永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 优化控制策略, 即优化三矢量模型预测电流控制 (optimized three-vector model predictive current control, OTV-MPCC) 策略, 旨在降低其计算复杂度。该策略的核心在于将最小化电流跟踪误差的目标转化为最小化电压矢量跟踪误差的目标, 并构建一种全新的价值函数。此外, 通过起始电压矢量的扇区定位对备选电压矢量进行预筛选, 显著减少每个控制周期内所需的预测评估次数。优化三矢量模型预测电流控制流程图如图 1 所示。

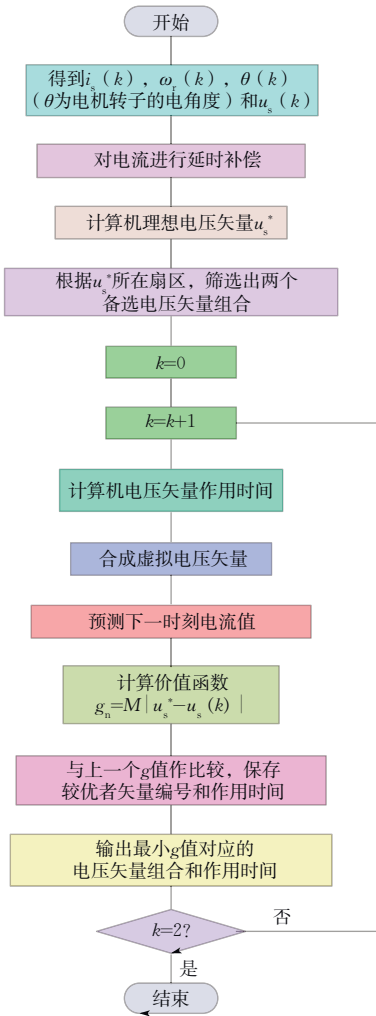


图 1 优化三矢量模型预测电流控制流程图

Fig.1 Flowchart of the optimized three-vector model predictive current control strategy

由式(2)可得

$$i_s(k+1) = i_{s0}(k) + \frac{T_s}{L_s} u_s(k) \quad (11)$$

其中,

$$i_{s0}(k) = \frac{(L_s - T_s R_s) i_s(k) + T_s E(k)}{L_s} \quad (12)$$

根据电流无差拍控制思想,下一采样时刻的定子预测电流应等于给定值,即

$$i_s(k+1) = i_s^* \quad (13)$$

结合式(12)和式(13),可推导出理想电压矢量为

$$u_s^* = \frac{L_s}{T_s} (i_s^* - i_{s0}(k)) \quad (14)$$

进一步地,依据式(11)~(14),代价函数可以等效为

$$g_u = \frac{T_s}{L_s} |(u_s^* - u_s(k))| \quad (15)$$

式中: T_s/L_s 是一个恒定的正值,定义为 $M=T_s/L_s$ 。

传统模型预测控制通常假设电感参数是恒定的,然而,在高负载等工况下,电感的饱和效应会导

致参数变化。因此,基于电流无差拍控制思想,将最小电流跟踪误差目标映射为最小电压矢量跟踪误差目标。考虑电感参数非线性变化后所构建的全新价值函数 g_n 为

$$g_n = M |u_s^* - u_s(k)| \quad (16)$$

1.3 备选电压矢量选择过程

当理想电压矢量位于扇区 I, 其与 6 个有效电压矢量 ($u_1 \sim u_6$) 对应的误差矢量为 $e_1 \sim e_6$, 这些误差矢量的幅值大小关系为 $|e_5| > |e_4| > |e_6| > |e_3| > |e_1| > |e_2|$ (图 2)。根据这一关系,可以确定起始电压矢量为 u_2 。接下来,依据开关切换次数最小化准则,第 2 个有效电压矢量被确定为 u_3 或 u_1 , 同时,根据开关管损耗最小化准则,零电压矢量 u_{20} 被确定为 u_0 或 u_7 。因此,当理想电压矢量 u_s^* 位于扇区 I 时,对应的备选电压矢量组合为 (u_2, u_1, u_0) 和 (u_2, u_3, u_7)。

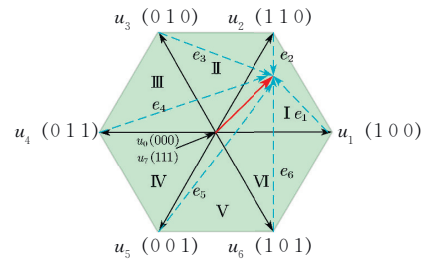


图 2 扇区-起始电压矢量映射关系示意图

Fig.2 Schematic of the sector-initial voltage vector mapping relationship

通过起始电压矢量的扇区定位,对备选电压矢量进行预筛选,筛选结果如表 1 所示。理想电压矢量 u_s^* 所在扇区对应备选电压矢量组合(依据前述确定准则)如表 2 所示。在依据表 2 确定 2 组备选电压矢量后,利用式(8)~(9),并结合相应电压矢量的作用时间,可以合成 2 个虚拟电压矢量。基于式(2)~(3),推导出这 2 个虚拟电压矢量作用下的预测电流。最终,利用式(16)定义的价值函数进行 2 次优化评估,以确定最优电压矢量组合,并将其施加于逆变器。

在传统三矢量模型预测电流控制策略中,每个采样周期需要完成 6 次寻优计算,以确定最优电压矢量组合^[12]。相比之下,本文提出的优化控制策略通过起始电压矢量的扇区定位对备选电压矢量进行预筛选,将备选电压矢量组合减少至 2 个。在每个采样周期内,仅需进行 2 次电流预测和价值函数的优化评估,即可确定最优的有效电压矢量组合。因此,该优化的模型预测控制策略显著降低了计算负担。

表 1 预筛选电压矢量数值列表

Tab. 1 List of candidate voltage vectors after preselection

起始电压矢量	第2有效电压矢量	零电压矢量
$u_1(100)$	$u_2(110)$	$u_7(111)$
	$u_6(101)$	$u_7(111)$
$u_2(110)$	$u_3(010)$	$u_0(000)$
	$u_1(100)$	$u_0(000)$
$u_3(010)$	$u_4(011)$	$u_7(111)$
	$u_2(110)$	$u_7(111)$
$u_4(011)$	$u_5(001)$	$u_0(000)$
	$u_3(010)$	$u_0(000)$
$u_5(001)$	$u_6(101)$	$u_7(111)$
	$u_4(011)$	$u_7(111)$
$u_6(101)$	$u_1(100)$	$u_0(000)$
	$u_5(001)$	$u_0(000)$

表 2 扇区-备选电压矢量组合映射表

Tab. 2 Lookup table for sector-based candidate voltage vector combinations

u_s^* 所在扇区	起始电压矢量 u_i	备选电压矢量组合
I	u_1	$(u_2, u_7), (u_6, u_7)$
II	u_2	$(u_3, u_0), (u_1, u_0)$
III	u_3	$(u_4, u_7), (u_2, u_7)$
IV	u_4	$(u_5, u_0), (u_3, u_0)$
V	u_5	$(u_6, u_7), (u_4, u_7)$
VI	u_6	$(u_1, u_0), (u_5, u_0)$

2 参数失配补偿

2.1 考虑动态扰动的电机数学模型建立

作为一类典型的控制策略,模型预测控制本质上是基于模型驱动的,其核心依赖于用精确的数学模型选择最优电压矢量。在该数学模型中,电机的参数(如电阻、电感和磁链)需要与实际参数保持一致,以确保系统的动态性能和稳态性能不出现偏差。然而,电机参数往往会受到多种因素的影响,例如,温度变化、磁饱和以及机械故障导致的气隙变化等,这些因素都可能引起电机参数的突变^[13]。当模型中的参数与实际参数存在失配时,预测电流将会出现误差,价值函数是基于预测电流构建的,因此,所选择的电压矢量也会变得不准确,从而导致系统的控制性能恶化。

鉴于永磁同步电机参数失配和未建模动态扰动

的显著影响,开展模型预测控制参数鲁棒性研究显得尤为必要。通过采用龙伯格状态观测器对由参数失配和未建模动态引发的扰动进行估计,并将该扰动估计值融入预测模型以实施补偿,可有效增强模型预测电流控制(model predictive current control, MPCC)策略的参数鲁棒性^[14]。

受永磁同步电机参数失配与未建模动态扰动的影响,式(1)所示的定子电流方程可表示为

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{1}{L_{s0}} [u_s - R_{s0}i_s - j\omega_r L_{s0}i_s - j\omega_r \psi_{f0} - f], \quad (17)$$

$$f = \frac{1}{L_{s0}} [\Delta R_s i_s + \Delta L_s \frac{di_s}{dt} + j\Delta L_s \omega_r i_s + j\Delta \psi_f j\omega_r + \epsilon]. \quad (18)$$

在稳态工况下,总扰动分量 f_d, f_q 均趋于零,即 f_d 和 f_q 收敛为 0。因此,有 $df_d/dt=0$ 和 $df_q/dt=0$ 。此时,SPMSM 的状态方程可以表示为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{s0}}{L_{s0}} - j\omega_r & -\frac{1}{L_{s0}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{s0}} \\ 0 \end{bmatrix} u, \quad (19)$$

$$u = u_d + j(u_q - \omega_r \psi_{f0}). \quad (20)$$

2.2 计及参数失配的电机数学模型建立

2.2.1 龙伯格观测器数学模型建立 依据式(19),龙伯格观测器的设计为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{s0}}{L_{s0}} - j\omega_r & -\frac{1}{L_{s0}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{s0}} \\ 1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s - \hat{i}_s \\ i_s - \hat{i}_s \end{bmatrix}. \quad (21)$$

式中: \hat{i}_s 为定子电流的估计值; \hat{f} 为扰动的估计值;

$\begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$ 为龙伯格状态观测器的增益矩阵。龙伯格观测器增益矩阵的确定过程如下:首先验证系统的可观性,然后配置观测器的期望极点,接着运用极点配置法(如阿克曼公式)计算增益矩阵,并最终验证观测器误差动态的稳定性。离散后的龙伯格观测器为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_s(k+1) \\ \hat{f}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{s0}}{L_{s0}} - j\omega_r & -\frac{1}{L_{s0}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_s(k+1) \\ \hat{f}(k+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{s0}} \\ 1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} k_{T1} & 0 \\ 0 & k_{T2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s(k) - \hat{i}_s(k) \\ i_s(k) - \hat{i}_s(k) \end{bmatrix}. \quad (22)$$

式中: $\begin{bmatrix} k_{T1} & 0 \\ 0 & k_{T2} \end{bmatrix}$ 为离散龙伯格状态观测器增益矩阵。

通过构建包含参数失配扰动的控制系统模型,龙伯格观测器能够同时对系统状态和等效干扰量的动态估计。将观测器输出的实时干扰识别值直接前馈注入控制器的执行端,形成针对参数误差源的开环补偿通道。这种补偿机制借助观测器的动态追踪能力和控制器的前馈修正作用,有效消除了由参数失配引起的低频扰动分量^[15]。

2.2.2 预测电流值优化 考虑龙伯格观测器所估计的扰动量后,式(4)和式(11)可重新整理为

$$s_z = \frac{di}{dt} \Big|_{u_s=0} = \frac{1}{L_s} [-R_s i_s - j\omega_r L_{s0} i_s - j\omega_r \psi_{f0} + \hat{f}], \quad (23)$$

$$i_{s0}(k) = \frac{(L_s - T_s R_s) i_s(k) + T_s (E(k) - \hat{f})}{L_s}. \quad (24)$$

由式(2)和式(18)得到计及龙伯格观测器所估计的扰动量后下一采样时刻的定子电流为

$$i_s(k+1) = i_s(k) + \frac{T_s}{L_s} [u_s(k) - R_s i_s(k) + E(k) - \hat{f}]. \quad (25)$$

将式(24)代入式(14),可推导出包含扰动补偿的理想电压矢量 u_s^* ,进而依据表 1 更新备选电压矢量组合。进一步地,将式(23)引入式(5)和式(6),求得包含扰动补偿的状态变量 s_i 和 s_j 。结合扰动补偿后的 s_i, s_j 和 s_z ,与式(7)联立求解,得到补偿后各电压矢量的作用时间。基于式(8)~(9),合成 2 个虚拟电压矢量后,利用式(3)和式(25)推导出其作用下的预测电流值。最终,通过价值函数进行 2 次优化评估,选定最优虚拟电压矢量并施加于逆变器,从而实现控制性能的提升。计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制策略流程如图 3 所示。

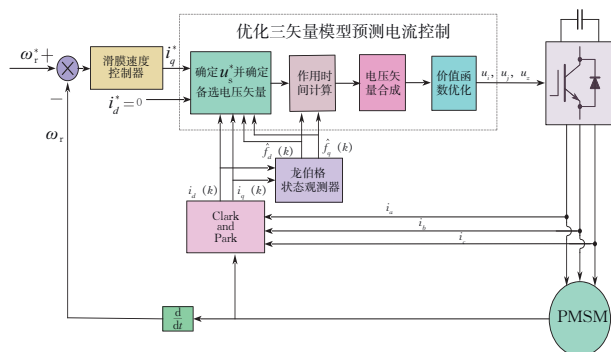


图 3 计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制策略流程
Fig.3 Flowchart of the MPC strategy for PMSMs considering parameter mismatch

3 仿真研究过程

在 Matlab/Simulink 环境中构建 SPMSM 的仿真模型,用于分析计及参数失配的优化三矢量模型预测电流控制系统的稳态性能、动态性能、算法计算量以及参数鲁棒性。SPMSM 的具体参数如表 3 所示。

表 3 表贴式永磁同步电机参数

Tab. 3 Parameters of the surface-mounted permanent magnet synchronous motor

参数	数值
定子电阻/ Ω	0.47
定子电感/mH	6.40
永磁体磁链/Wb	0.13
转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.002 5

计及参数失配的 SPMSM 模型预测控制系统仿真图如图 4 所示。该仿真模型的核心模块包括:PMSM 本体模块、坐标变换模块、信号调制模块、观测器模块,以及参数补偿模块。为了实现算法的紧凑集成,信号调制、观测器和参数补偿这三大算法核心被封装在 1 个子系统中,其内部逻辑均通过 Matlab Function 模块实现。

4 结果与分析

4.1 控制策略性能和计算量研究

在优化三矢量模型预测电流控制 (OTV-MPCC) 策略下,电机以 1 500 r/min 的转速空载启动。在 0.1 s 时刻,电机突加额定负载,随后在 0.3 s 时刻,电机转速提升至 2 400 r/min,最终在 0.5 s 时刻,电机转速降至 1 200 r/min。该过程的动态仿真波形如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,在优化三矢量模型预测电流控制策略下,表贴式永磁同步电机从空载启动至 1 000 r/min 仅耗时约 0.041 s;在突加额定负载后,系统恢复时间约为 0.053 s;从 1 000 r/min 加速至 2 400 r/min 的加速时间约为 0.062 s;而从 2 400 r/min 减速至 1 200 r/min 的减速时间约为 0.051 s。这一控制策略在启动、加载,以及变速工况下,因转速和电流均能快速跟踪给定参考值,展现出良好的动态响应能力。在空载和额定负载工况下,d 轴和 q 轴电流均表现出低纹波特性,这验证了所提策略的优良稳态性能。

为了验证优化三矢量模型预测电流控制

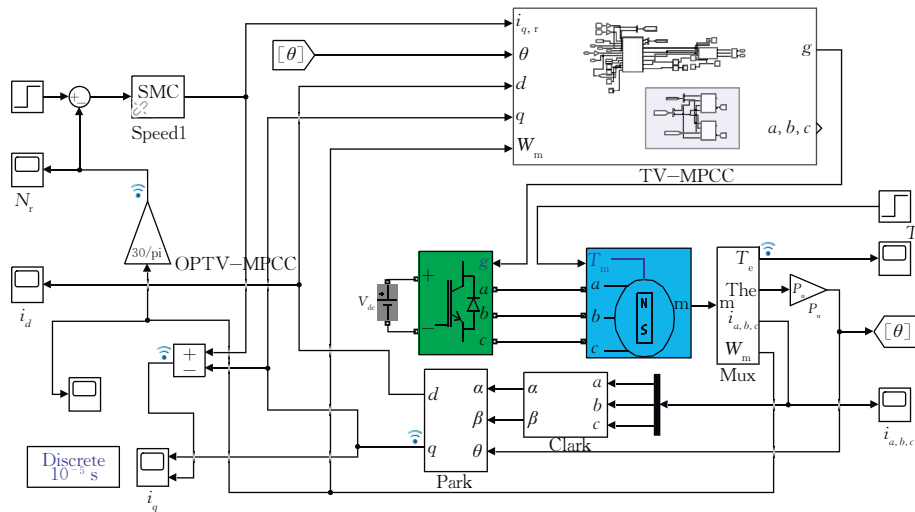


图 4 计及参数失配的表贴式永磁同步电机模型预测控制系统仿真图

Fig.4 Simulink implementation of the proposed SPMSM-MPC system accounting for parameter mismatch

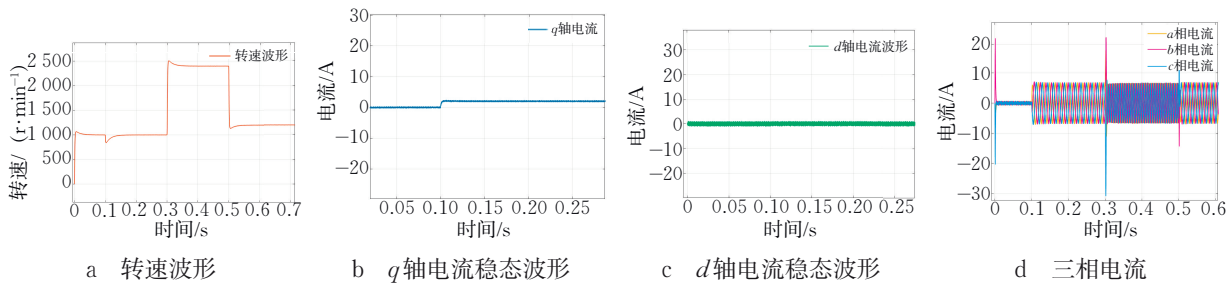


图 5 优化三矢量模型预测电流控制策略下起动-加载-变速仿真结果

Fig.5 Simulation results of the optimized three-vector MPCC strategy under start-up, load disturbance, and speed variation conditions

(OTV-MPCC)策略在降低计算复杂度方面的有效性,本研究利用 Matlab 提供的高精度计时工具 tic/toc,对传统和优化控制策略算法的实际执行时长进行了评估。具体方法是核心算法循环执行 5 000 次,然后取其平均值作为最终结果,相关数据如表 4 所示。

从表 4 中数据可以看出,TV-MPCC 策略的核心算法执行时间为 51.3 ms,而 OTV-MPCC 策略的核心算法执行时间为 31.7 ms。这表明优化控制策略的算法执行时间减少了约 38%。

综上所述,优化三矢量模型预测电流控制策略不仅有效降低了计算复杂度,还在多种工况下确保

表 4 传统与优化三矢量模型预测电流控制策略核心算法执行时间仿真结果

Tab. 4 Comparison of core algorithm execution times between conventional and optimized three-vector MPCC strategies

控制策略	计算次数	执行时间/ms
三矢量模型预测电流控制	5	51.3
优化三矢量模型预测控制	5	31.7

了转速和电流对参考值的快速跟踪,展现出优越的动态响应能力和稳态性能。

4.2 与现有主流方法的对比分析

4.2.1 升/降速响应时间对比 在与文献[5]中相同的电机参数条件下,对 SPMSM 进行空载启动测试,初始参考转速设定为 800 r/min,待电机稳定运行后,将转速指令阶跃至 400 r/min。图 6 展示了对应的转速与 q 轴电流动态响应波形。

本文提出的控制策略在升速过程中响应时间为 58 ms,而在降速过程中响应时间仅为 35 ms。相比之下,文献[5]中提及的传统模型预测电流控制(traditional model predictive current control, T-MPCC)、最优占空比模型预测电流控制(optimal duty cycle model predictive current control, ODC-MPCC)、TV-MPCC 策略在升速时的响应时间均为 75 ms,降速时的响应时间均为 38 ms。由此可见,本文提出的控制策略在起动-降速工况下,展现出更为迅速的响应能力,优于文献[5]中的控制策略。

4.2.2 突加/减负载响应时间对比 在维持转速恒定于 800 r/min 的条件下,首先对电机施加 2 N·m

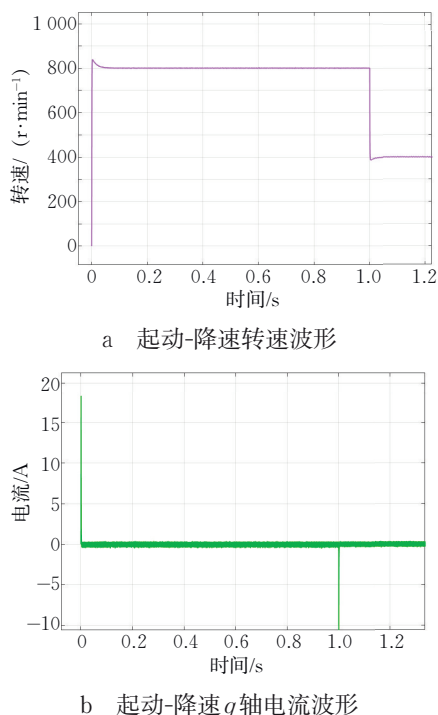


图 6 优化三矢量模型预测电流控制策略下起动-降速实验结果

Fig.6 Experimental results of the optimized three-vector MPCC during start-up and speed reduction

的负载,随后将负载突增至 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 。待系统稳定运行后,再将负载从 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 突减至 $0\text{ N}\cdot\text{m}$ 。这一过程中, q 轴电流的动态响应波形如图 7 所示。

在转速维持 800 r/min 不变时,本文提出的控制策略在突加负载(从 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 突增至 $5\text{ N}\cdot\text{m}$)时的响应时间为 32 ms ,而在突减负载(从 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 突减至 $0\text{ N}\cdot\text{m}$)时的响应时间为 38 ms 。在应对负载突变的过程中,本文所提出的控制策略与文献[5]中提到的 3 种控制策略(T-MPCC, ODC-MPCC, TV-MPCC)均展现出了良好的动态跟随性能。总体而言, q 轴电流的调整过程均能在 50 ms 内完成,且各策略的响应速度相当。

4.2.3 空载电流脉动对比 图 8 展示了在 1000 r/min 转速下,采用本文提出的控制策略,SPMSM 在空载稳态运行时的定子电流波形。为了更直观地说明仿真效果,在仿真模型中加入了 To Workspace 模块,并将 q 轴电流信号连接到该模块。通过基于标准差的计算,将文献[5]中提出的控制策略(T-MPCC, ODC-MPCC 和 TV-MPCC)与本文所提策略的交、直轴电流脉动进行对比,对比结果汇总于表 5 中。

定量对比结果清晰地揭示了本文提出的 OTV-MPCC 策略在抑制电流脉动方面的显著优势。与 T-MPCC 策略相比,OTV-MPCC 策略的 d 轴电流

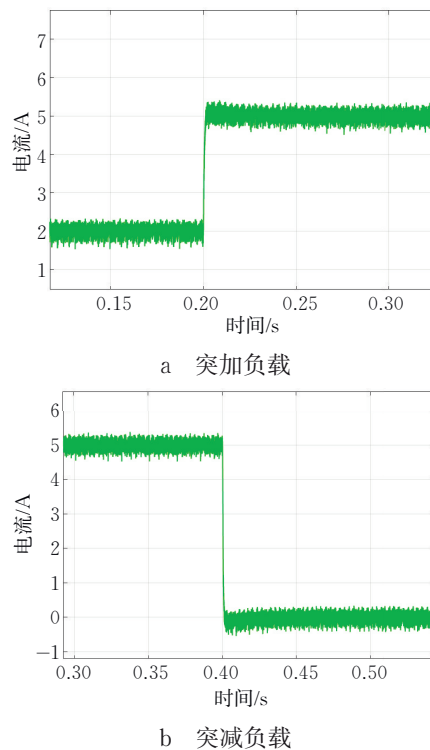


图 7 优化三矢量模型预测电流控制策略下突加负载和突减负载仿真结果

Fig.7 Dynamic response of the optimized three-vector MPCC to step load increases and decreases

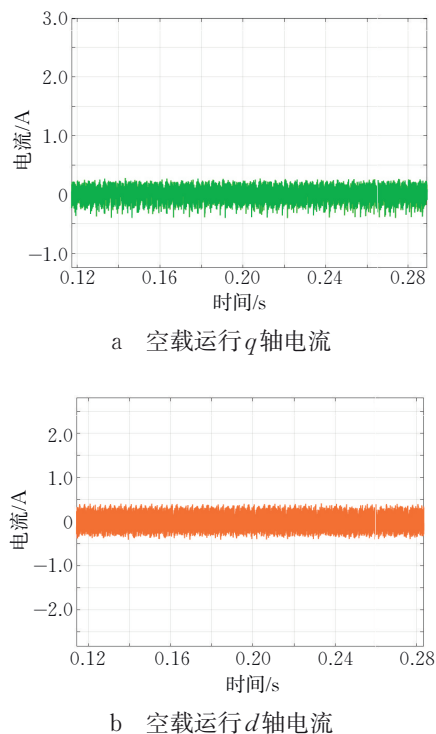


图 8 优化三矢量模型预测电流控制策略下 SPMSM 空载稳定运行仿真结果

Fig.8 No-load steady-state performance of the SPMSM with the proposed optimized three-vector MPCC

表5 4种控制策略下SPMSM空载且转速为1000 r/min时的电流脉动对比

Tab. 5 Comparison of current ripple for four control strategies under SPMSM no-load operation at 1000 r/min

控制策略	$\Delta i_d/A$	$\Delta i_q/A$
T-MPCC	1.10	1.36
ODC-MPCC	0.69	0.41
TV-MPCC	0.21	0.24
OTV-MPCC(本文)	0.17	0.19

脉动降低了 0.93 A, 降幅达 84.5%; q 轴电流脉动降低了 1.17 A, 降幅达 86.0%。相较于 TV-MPCC 策略, OTV-MPCC 策略进一步降低了 d 轴电流脉动 0.04 A (降幅为 19.0%) 和 q 轴电流脉动 0.05 A (降幅为 20.8%)。这些数据充分证明了 OTV-MPCC 策略在抑制电流脉动方面全面优于现有方法。

4.2.4 恒转速、变负载电流脉动研究 本研究在电机额定转速 800 r/min 的条件下, 针对空载、3.5, 5.0, 7.15 N·m 等不同负载工况进行了仿真实验, 系统地评估了 OTV-MPCC 策略对电流脉动的抑制能力。如图 9 所示, 在固定转速下, 不同负载工况中 OTV-MPCC 策略的电流脉动水平均低于 TV-MPCC 策略。随着负载的增加, OTV-MPCC 策略在 d 轴和 q 轴上的电流脉动始终得到有效抑制, 并持续保持较小的幅值。

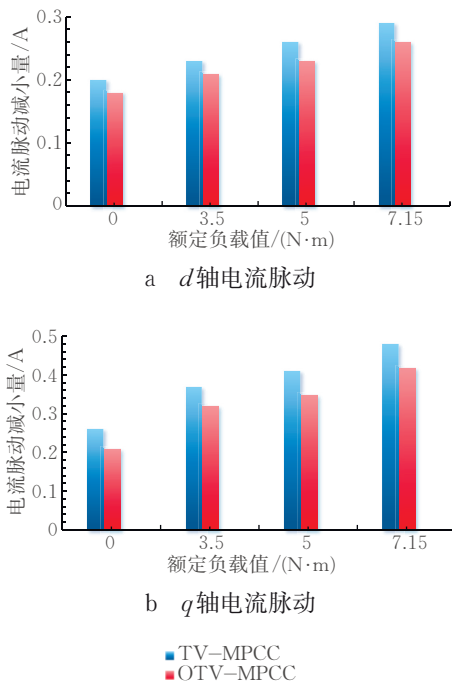


图9 恒转速、不同负载 d, q 轴电流脉动对比

Fig.9 Comparative analysis of d - q axis current ripple at constant speed under different load torques

4.3 参数鲁棒性研究

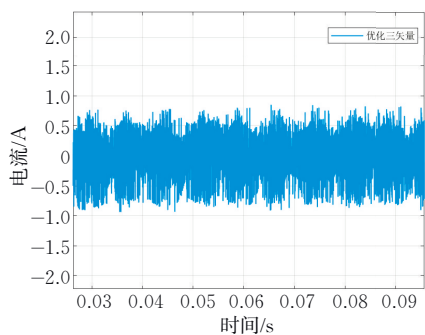
电阻参数失配通过电流预测方程引入系统性偏差, 导致 q 轴电流跟踪出现稳态偏移。这种偏移会进一步引发电磁转矩脉动和转速低频振荡。在模型预测控制的滚动优化过程中, 积分环节会持续放大这些误差, 从而恶化系统的动态响应速度。同时, 由于铜耗计算不准确, 可能会触发逆变器过温保护的误动作。这些因素共同作用, 最终导致系统稳态精度下降, 并可能因效率降低而使功率密度降低, 形成连锁效应^[16]。

根据文献[17]的研究结果, 电机的 3 个关键参数(电阻 R , 电感 L 和磁链 ψ)中任何一个参数的失配都会导致预测电流出现误差。在这些参数失配中, 电感失配对系统性能的影响最为显著, 磁链失配次之, 而电阻参数失配的影响相对较小。因此, 本文主要聚焦于定子电感参数的研究, 以期通过优化电感参数的建模和补偿, 显著提升系统的整体性能。

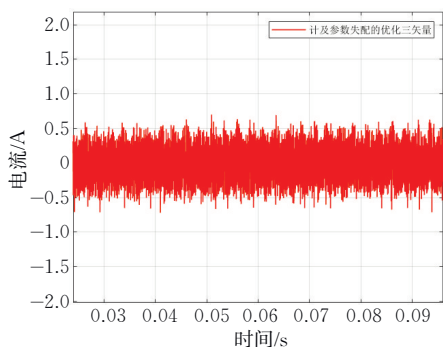
当定子电阻和永磁体磁链均取额定值时, 定子电感分别设置为 6.4 mH (初始值), 9.6 mH (初始值的 150%) 和 3.2 mH (初始值的 50%)。在相同工况下, 计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制策略与优化三矢量模型预测电流控制策略的转速及 q 轴电流响应波形分别如图 10~图 15 所示。

通过对比图 10 与图 11 可以发现, 在计及参数失配的 PMSM 模型预测控制策略下, q 轴电流的波动幅度控制在 ± 0.5 A 以内, 启动时转速超调量为 6.8%, 加载时下冲为 16%, 升速时转速超调量为 4.5%, 减速时下冲为 5.8%。相对而言, 在未考虑参数鲁棒性的优化三矢量模型预测电流控制策略下, q 轴电流波动幅度达到 ± 0.95 A, 启动时转速超调量为 11.4%, 加载时下冲为 16.4%, 升速时转速超调量为 7.5%, 减速时下冲为 11.2%。由此可见, 考虑参数失配的永磁同步电机模型预测控制策略在控制性能上表现得更为优越。

当定子电感突变为 150% 时(图 12 与图 13), 计及参数失配的 PMSM 模型预测控制策略下, q 轴电流波动幅度为 ± 0.55 A, 启动时转速超调量为 7.3%, 加载时下冲为 15.9%, 升速时转速超调量为 5.3%, 减速时下冲为 6.3%。相比之下, 在未考虑参数鲁棒性的优化三矢量模型预测电流控制策略下, q 轴电流波动幅度为 ± 0.75 A, 启动时转速超调量为 11.7%, 加载时下冲为 16.6%, 升速时转速超调量为 8.5%, 减速时下冲为 11.8%。综合对比可见, 计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制策略在控制性

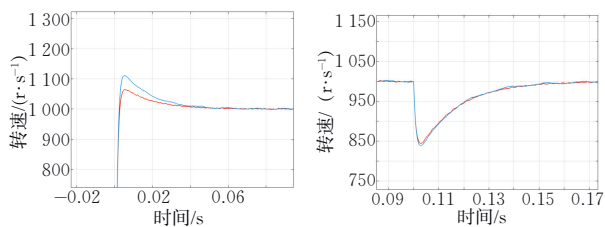


a 优化三矢量模型预测电流控制



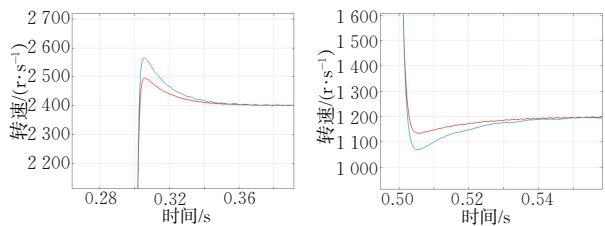
b 计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制

图 10 定子电感为初始值时 q 轴电流对比
Fig.10 Comparison of q -axis current with nominal stator inductance



a 起动阶段

b 加载阶段



c 升速阶段

d 降速阶段

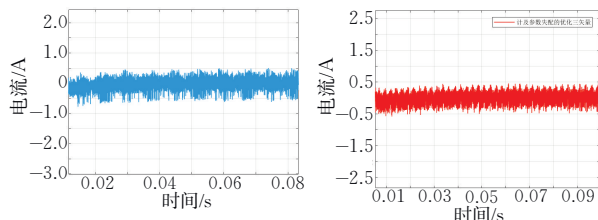
— 优化三矢量模型预测电流控制
— 计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制

图 11 定子电感为初始值时 q 轴转速对比

Fig.11 Comparison of q -axis speed response with nominal stator inductance

能上表现更为出色,能够有效抑制电流波动和转速超调,展现出更优的动态响应和稳定性。

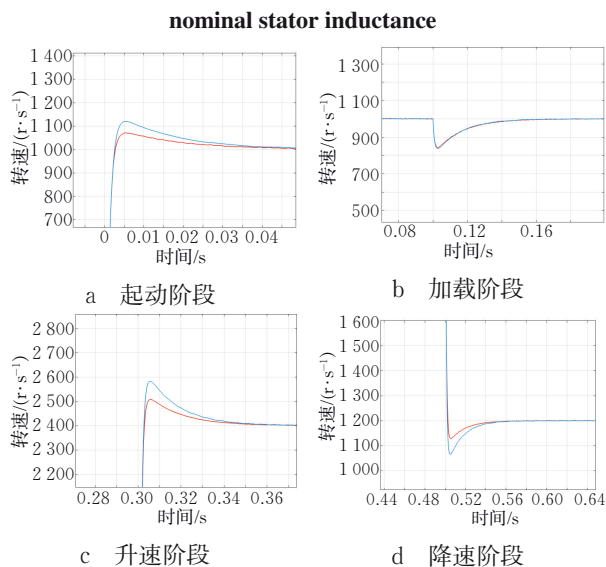
当定子电感参数突变为 50% 时(图 14 与图 15),采用计及参数失配的 PMSM 模型预测控制策略, q 轴电流波动幅度为 ± 1.3 A,起动时转速超调



a 优化三矢量模型预测电流控制

b 计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制

图 12 定子电感为初始值 150% 时 q 轴电流对比
Fig.12 Comparison of q -axis current with 150% nominal stator inductance



a 起动阶段

b 加载阶段

— 优化三矢量模型预测电流控制
— 计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制

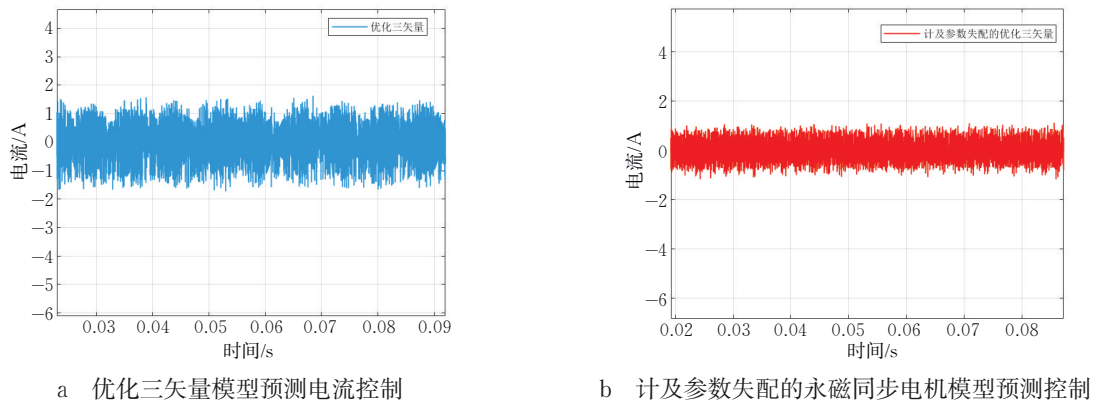
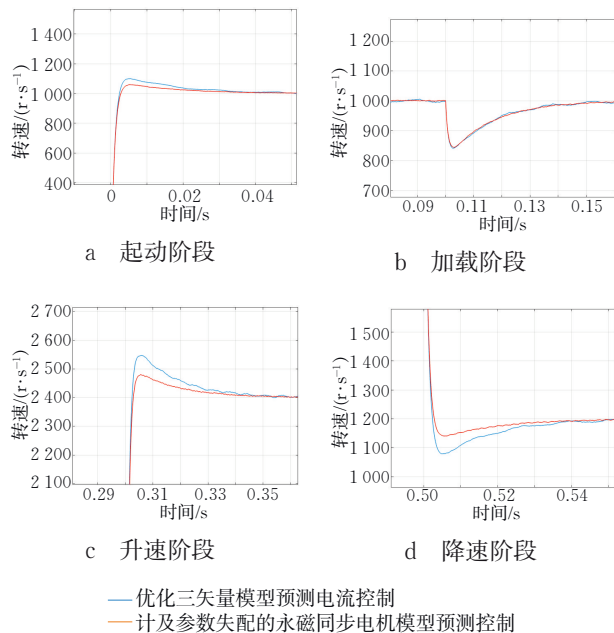
图 13 定子电感为初始值 150% 时 q 轴转速对比

Fig.13 Comparison of q -axis speed response with 150% nominal stator inductance

量为 6%,加载时下冲为 16.3%,升速时转速超调量为 3.7%,减速时下冲为 5.3%。相比之下,在未考虑参数失配的优化三矢量模型预测电流控制策略下, q 轴电流波动幅度达到 ± 1.95 A,起动时转速超调量为 9.9%,加载时下冲为 16.5%,升速时转速超调量为 6.4%,减速时下冲为 10.3%,且转速波形出现明显畸变。由此可见,考虑参数失配的永磁同步电机模型预测控制策略能够更有效地抑制参数失配带来的影响,显著降低电流波动和转速超调,保持系统运行的稳定性和动态性能。

5 结论和展望

本文的核心贡献在于提出了一种计及参数失配的永磁同步电机模型预测控制策略。该策略通过优化算法设计,有效降低了计算复杂度,并显著增强了参数鲁棒性,从而克服了传统 TV-MPCC 策略的固有挑战。通过在起动-加载-升速-降速工况下的仿

图 14 定子电感为初始值 50% 时 q 轴电流对比Fig.14 Comparison of q -axis current with 50% nominal stator inductance图 15 定子电感为初始值 50% 时 q 轴转速对比Fig.15 Comparison of q -axis speed response with 50% nominal stator inductance

真研究,验证了所提方案的有效性和可行性,主要结论如下:

(1)将最小电流跟踪误差目标映射为最小电压矢量跟踪误差目标,并建立了全新的价值函数。这一改进不仅简化了问题,还提高了控制精度。

(2)通过起始电压矢量的扇区定位,对备选电压矢量进行预筛选,显著减少了每个控制周期内的预测评估次数。这一改进有效降低了计算复杂度,提高了控制策略的实时性。

(3)引入龙伯格状态观测器,对由电机参数失配和未建模动态产生的扰动进行估计,并将扰动估计量融入预测模型实施补偿。这一机制显著提升了控制系统的参数鲁棒性,使其在面对参数变化和动态

扰动时仍能保持良好的性能。

与传统 TV-MPCC 相比,本文提出的策略(OTV-MPCC)在不改变硬件的前提下,通过纯算法优化实现了处理器运算量的显著减小和参数鲁棒性的显著提升,展现出良好的工程应用潜力。

尽管本文提出的控制策略在降低计算复杂度和增强参数鲁棒性方面取得了进展,但仍存在一些待改进之处,例如,当前策略的开关频率较高,且尚未对速度外环进行优化,这些问题可能导致开关损耗急剧增加,进而降低系统效率,同时可能引发电流饱和和与积分饱和现象。未来将针对开关频率问题进行进一步优化,在代价函数中增加开关频率约束项,对开关变化进行改进;在速度外环采用模型预测控制策略,形成级联模型预测控制,给出更合理、带前瞻性的电流指令,以抑制电流饱和的问题,从而进一步提升转速响应能力。

参考文献:

- [1] Ma C W, Li H Y, Yao X L, et al. An improved model-free predictive current control with advanced current gradient updating mechanism[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 11968-11979.
- [2] Siami M, Khaburi D A, Abbaszadeh A, et al. Robustness improvement of predictive current control using prediction error correction for permanent-magnet synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3458-3466.
- [3] 王秀平,蔡旭,曲春雨,等.基于龙伯格观测器的 PMSM 双矢量模型预测控制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2024, 43(4): 486-493.
- [4] 赵法强,汪建波,袁汉凯.基于滑模观测器扰动抑制的永磁同步电机模型预测控制方法[J]. 微电机, 2021, 54(8): 92-97.

- [5] 文字良, 陈春阳, 曾小凡, 等. 一种基于预测误差校正的永磁同步电机模型预测电流控制方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(4): 1778-1787.
- [6] Hu Y F, Liu K, Hua W, et al. First-order model based inductance identification with least square method for high-speed sensorless control of permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(7): 8719-8729.
- [7] 徐艳平, 王极兵, 张保程, 等. 永磁同步电机三矢量模型预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 980-988.
- [8] Wang F X, Li S H, Mei X Z, et al. Model-based predictive direct control strategies for electrical drives: An experimental evaluation of PTC and PCC methods[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(3): 671-681.
- [9] 李祥林, 薛志伟, 阎学雨, 等. 基于电压矢量快速筛选的永磁同步电机三矢量模型预测转矩控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1666-1678.
- [10] 陈跃峰, 李佳耀. 基于改进死区补偿方法的永磁同步电机无差拍电流预测控制[J/OL]. 电源学报, 1-13 (2025-01-21) [2025-06-07]. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20250121.1517.008>.
- [11] 范佩樟, 刘凌, 靳东松, 等. 永磁同步电机的无差拍电流预测控制优化算法[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(4): 29-38.
- [12] Park S Y, Kwak S. Comparative study of three model predictive current control methods with two vectors for three-phase DC/AC VSIs[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(7): 1284-1297.
- [13] 李健, 牛峰, 黄晓艳, 等. 永磁同步电机有限控集模型预测电流控制预测误差分析[J]. 电机与控制学报, 2019(4): 1-7.
- [14] Zhang X G, Zhang L, Zhang Y C. Model predictive current control for PMSM drives with parameter robustness improvement [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1645-1657.
- [15] 董小斌, 林立, 周建华, 等. 基于降阶龙伯格观测器的PMSM模型预测控制[J]. 电气传动自动化, 2024, 46(3): 1-5.
- [16] 徐岸非, 朱雪松, 袁雷. 考虑相位补偿和参数失配的永磁同步电机混合模型磁链观测器[J]. 电源学报, 1-15 (2025-02-25) [2025-06-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20250225.1141.004.html>.
- [17] 肖虎, 吴公平, 龙卓, 等. 参数失配下永磁同步电机无模型定子磁链滑模控制[J]. 电工技术学报, 2025, 40(12): 3883-3894.

Model Predictive Control Strategy for Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Parameter Mismatch

LIU Haorui, WANG Jinmei*, LIU Yongqiang

(School of Electronics and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: To address the limited computational efficiency and inadequate parameter robustness of three-vector model predictive current control for permanent magnet synchronous motors (PMSMs), this study proposed a model predictive control strategy that explicitly accounts for parameter mismatch. Leveraging deadbeat current control, it mapped the objective of minimizing current-tracking error to minimizing voltage-vector tracking error and formulated a new cost function. Sector identification of the initial voltage vector was used to preselect candidate voltage vectors, substantially reducing the number of predictive evaluations per control cycle. A Luenberger state observer is employed to estimate and compensate disturbances arising from parameter mismatch within the model, effectively attenuating their impact on control performance. The proposed strategy is evaluated on a surface-mounted PMSM via simulations under start-up, load application, acceleration, and deceleration scenarios. Results show that the method reduces real-time computational burden and enhances system stability while preserving the desired dynamic and steady-state performance.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; model predictive current control; optimized three-vector selection; parameter mismatch; Simulink

(责任编辑 李 琼)