

开绕组永磁同步电机非共母线双逆变器供电 模型预测电流控制方法

刘纪奥, 张 博*, 冯 威, 赵桂林
(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Model Predictive Current Control for Open-Winding PMSM with Non-Common Bus Dual Inverter Power Supply

LIU Ji'ao, ZHANG Bo*, FENG Wei, ZHAO Guilin

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

Abstract: [Objective] Aiming at the problem that the single vector model predictive current control (MPCC) of the non-common bus open-winding permanent magnet synchronous motor with DC bus voltage ratio of 3:1 needs to traverse all voltage vectors in the control set, which leads to a large computational burden, a finite control set predictive current control (FCS-MPC) strategy based on deadbeat control is proposed. By subdividing sectors, simplifying the control set, reducing the number of voltage vector traversals, and improving real-time performance. [Methods] Firstly, the position of the voltage vector corresponding to the sector was judged by establishing the sector discriminant. According to the voltage vector amplitude, the corresponding sector was divided into two sub-sectors. So as to simplify the control set while avoided the introduction of angle operation to increase the amount of calculation, affected the accuracy of judgment, and improved the computational efficiency. Then, the error between the reference value and the actual value of the dq axis current of the motor stator was used as the value function to continuously optimize and select the optimal voltage vector. [Results] To verify the effectiveness of the proposed FCS-MPC strategy, a comparative analysis was conducted through simulation. The results showed that the proposed method was similar to the traditional MPCC method in terms of steady-state performance, and the rotational speed fluctuation and current fluctuation of the two control methods were basically

the same. In terms of computational efficiency, compared with the traditional MPCC method, the iteration times of the voltage vector of the proposed MPCC method had been reduced from 49 times to 4~5 times, a reduction of 50%. The proposed method could effectively reduce the computational burden of the traditional control method.

[Conclusion] The simulation results show that the proposed method has a faster response speed and a shorter time than the traditional control method.

Key words: open-winding permanent magnet synchronous motor; deadbeat control; model predictive current control; optimal voltage vector

摘 要: 【目的】针对直流母线电压比为 3:1 的非共母线开绕组永磁同步电机单矢量模型预测电流控制 (MPCC) 需要遍历控制集中所有电压矢量, 导致计算负担较大的问题, 提出了一种基于无差拍控制的有限控制集模型预测控制 (FCS-MPC) 策略。通过细分扇区, 精简控制集, 减少电压矢量遍历次数, 提高实时性。【方法】首先, 通过建立扇区判别式, 判断电压矢量对应扇区位置; 再根据电压矢量幅值, 将相应扇区分为 2 个子扇区; 从而在精简控制集的同时也避免引入角度运算增加计算量, 影响判断准确性, 提升计算效率; 最后, 将电机定子 dq 轴电流参考值与实际值的误差作为价值函数不断滚动优化, 选择最优电压矢量。【结果】为验证所提方法的有效性, 通过仿真进行对比分析。结果表明, 所提 FCS-MPC 策略与传统 MPCC 方法在稳态性能方面大致相同, 两种控制方法的转速波动和电流波动基本一致; 在计算效率方面, 相较于传统 MPCC 方法, 所提 MPCC 方法的电压矢量的迭代次数由 49 次缩减为 4~5 次, 减少了 50%, 所提方法能够有效降低了传统控制方法的计算负担。【结论】所提方法比传统控制方法的响应速度更快, 所需遍历时间更短。

基金项目: 国家自然科学基金 (52177054, 52207064); 辽宁省应用基础研究计划项目 (2023JH2/101600001)

National Natural Science Foundation of China (52177054, 52207064); Liaoning Province Applied Basic Research Program Project (2023JH2/101600001)

关键词: 开绕组永磁同步电机;无差拍控制;模型预测电流控制;最优电压矢量

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有结构简单紧凑、效率高、功率密度高和可靠性高等优点,使其在前沿领域发挥着越来越重要的作用^[1-5]。开绕组永磁同步电机 (Open-Winding PMSM, OW-PMSM) 由双三相逆变器供电,可进一步提高额定功率、控制灵活性和容错能力^[6]。

由独立电压源供电的 OW-PMSM 驱动器可以阻塞驱动器中的零序电流路径,从而避免零序电流引起的损耗和转矩纹波^[7]。此外,通过改变电压源的电压比,可以增加电压电平的数量,增强控制灵活性^[8-9]。具有独立直流总线的 OW-PMSM 驱动器可以通过两个电源的电压合成产生三电平、四电平和五电平的多种输出效果,实现精确的矢量切换并降低相电流中的总谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion, THD)^[10-13]。

模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 具有动态响应快、实现简单及易处理非线性约束等特点,可以同时控制多个变量,在电机控制领域广受欢迎^[14-16]。有限控制集模型预测控制 (Finite Control Set MPC, FCS-MPC) 利用开关状态的离散和有限特性预测最佳离散向量,并计算所有可能性,使预定义的代价函数最小化^[17-18]。传统 FCS-MPC 策略在每个控制周期内仅应用一个固定的电压矢量,其幅值和相位角无法调整,限制了系统性能的进一步提升。同时,需对所有电压矢量进行逐一遍历,也使得计算复杂度显著增加^[19-20]。

一方面,一些研究通过增加每个周期的输出向量数量来提高控制精度。例如,文献[21]提出了一种基于双矢量的 FCS-MPC 策略,以提高三电平逆变器的控制性能。文献[22]提出了一种三向量 FCS-MPC 方法,该方法在每个周期中使用两个有源向量和一个零向量,以保证出色的稳定性。另一方面通过划分基本扇区来产生更多无谐波的候选电压矢量。文献[23]通过使用定子磁通矢量的扇区信息和扭矩误差来减少电压矢量的控制集。控制集中的电压矢量从 32 减少到 16,

因此模型转矩电流控制算法的计算时间大大减少。文献[24]通过使用参考电压矢量的分量来制定候选电压矢量的简化控制集。根据优化标准,选择控制集中存在且与参考向量匹配的电压矢量作为最优向量。这种方法大大减轻了控制器的计算负担。文献[25-26]中通过增加虚拟电压矢量或候选电压矢量来提高运算性能,但同时也增加了算法的复杂度。文献[27]为四电平 OW-PMSM 系统设计了一种两步级联向量选择方法,根据参考矢量所在的矢量区域,从 64 个电压矢量中选择 11 个来简化预测计算。

基于以上研究,本文提出了一种基于扇区划分的单矢量模型预测电流控制 (Model Predictive Current Control, MPCC) 策略,避免了遍历所有可能的电压矢量。经过三次计算确定电压矢量所在子扇区,再将扇区内包含的电压矢量作为控制集计算价值函数,经过最多 5 次代价函数计算即可确定最优电压矢量。仿真表明,改进后的 MPCC 策略与传统 MPCC 控制性能基本相当的同时,减少计算遍历次数,有效优化电机运行的实时性能。

1 OW-PMSM 模型

1.1 OW-PMSM 的拓扑结构

共母线型、非共母线型 OW-PMSM 拓扑分别如图 1、图 2 所示。图中, U_{dc} 为直流电源, $U_{dc1} = 3U_{dc2}$ 。

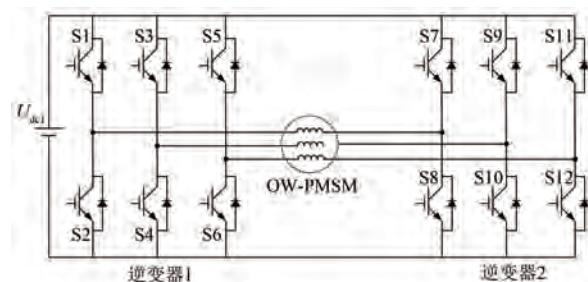


图 1 共母线型 OW-PMSM 拓扑

Fig. 1 Common bus type OW-PMSM topology

1.2 OW-PMSM 的数学模型

OW-PMSM 与传统 PMSM 系统建模相同,其在 $d-q$ 坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e i_q L_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e i_d L_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

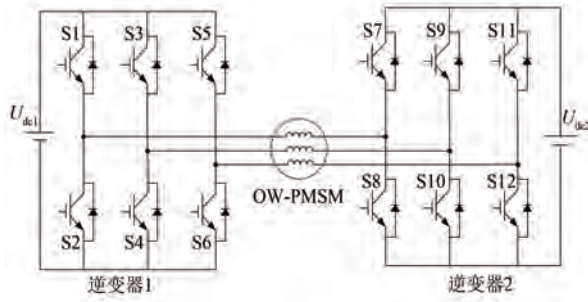


图 2 非共母线型 OW-PMSM 拓扑

Fig. 2 Non-common bus type OW-PMSM topology

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} [p \psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

机械运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = [p(T_e - T_L) - B\omega] \quad (4)$$

式中: u_d, u_q, i_d, i_q 和 L_d, L_q 分别为定子电压、电流和电感在 d 轴、 q 轴的分量; T_e 为电磁转矩; J 为转动惯量; p 为极对数; B 为粘滞摩擦系数; R 为电机绕组的电阻; ω_e 为转子电角速度; ω 为转子角速度; ψ_f 为永磁体磁链。

对式(1)进行前向欧拉离散化, 得到 k 时刻的定子 dq 轴电流预测值为

$$\begin{cases} i_d(k) = i_d(k-1) + \frac{T_s}{L_d} [u_d(k-1) - R i_d(k-1) + \omega_e(k-1) L_q i_q(k-1)] \\ i_q(k) = i_q(k-1) + \frac{T_s}{L_q} \{ u_q(k-1) - R i_q(k-1) - \omega_e(k-1) [L_d i_d(k-1) + \omega_e(k-1) \psi_f] \} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i_{dq}(k), i_{dq}(k-1)$ 分别为 $k, k-1$ 时刻 d, q 轴电流预测值、采样值; $u_{dq}(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻 d, q 轴电压值; T_s 为控制周期。

考虑到实际控制系统中信号的采样及其模数转换涉及一拍延迟。因此, 为了补偿引入的延迟,

执行一拍延迟补偿。一拍延迟补偿后, 式(5)可表示为

$$\begin{cases} i_d(k+1) = i_d(k) + \frac{T_s}{L_d} [u_d(k) - R i_d(k) + \omega_e(k) L_q i_q(k)] \\ i_q(k+1) = i_q(k) + \frac{T_s}{L_q} \{ u_q(k) - R i_q(k) - \omega_e(k) [L_d i_d(k) + \omega_e(k) \psi_f] \} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i_{dq}(k+1), i_{dq}(k)$ 分别为 $k, k-1$ 时刻补偿后、前的电流预测值; $u_{dq}(k)$ 为 k 时刻的电压值; $\omega_e(k)$ 为 $k-1$ 时刻的转子电角速度值, 同时也认为是 k 时刻的转速值。

在速度环比例积分 (Proportional-Integral, PI) 控制生成参考电流后, 即可进行无差拍参考电压的计算, 如式(7)所示:

$$\begin{cases} u_d(k+1) = R i_d(k+1) - \omega_e(k+1) L_q i_q(k+1) + \frac{L_d}{T_s} [i_d^*(k+2) - i_d(k+1)] \\ u_q(k+1) = R i_q(k+1) + \omega_e(k+1) [L_d i_d(k+1) + \psi_f] + \frac{L_q}{T_s} [i_q^*(k+2) - i_q(k+1)] \end{cases} \quad (7)$$

式中: $*$ 为参考值。

1.3 特殊电压比矢量图

若将双逆变器输出电压与传统单逆变器 PMSM 三相定子相电压方程相比, 可将其看成两个逆变器输出电压之差, 即:

$$u_s = u_{s2} - u_{s1} \quad (8)$$

式中: u_{s1}, u_{s2} 分别为逆变器 1、逆变器 2 单独作用的输出电压矢量。

因此, 双逆变器有 $8 \times 8 = 64$ 种可能的开关状态组合以及 49 种不同的空间电压矢量, 可以实现与五电平逆变器类似的控制效果。

采用图 2 的隔离电源 OW-PMSM 拓扑结构, 研究 $U_{dc1} = 3U_{dc2}$ 时的电压矢量分布情况, 如图 3 所示。图中, 逆变器 1 产生电压矢量分布在绿色区域, 逆变器 2 产生的电压矢量则分布在紫色区域, 则此时双逆变器合成的电压矢量分布在四个大小不同六边形上, 按颜色进行区分。

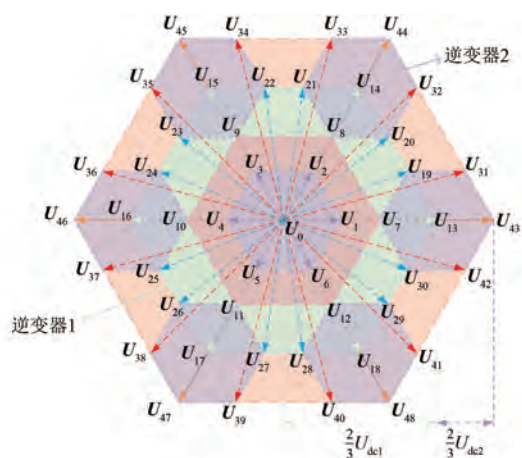
图3 双逆变器电压合成矢量图 ($U_{dc1} = 3U_{dc2}$)

Fig. 3 Double inverter voltage synthesis

2 非共母线双逆变器供电 MPCC 策略

传统单矢量 MPCC 依据所测得的瞬时定子电流找到定子电流空间矢量,延迟补偿后继续通过式(6)得到各基本电压矢量作用下的 dq 轴电流预测值,将预测值代入式(9)所示的价值函数中,选择使价值函数最小的电压矢量作为最优电压矢量,并在下一个采样间隔中,将所选的最佳电压矢量应用于 OW-PMSM。

$$g = [i_d(k+1) - i_d^*(k)]^2 + [i_q(k+1) - i_q^*(k)]^2 \quad (9)$$

在两逆变器直流电压比为 3:1 的 OW-PMSM 系统中,MPCC 需在每个采样周期内执行 49 次电流预测,以评估所有可用电压矢量。这一过程导致传统 MPCC 计算量庞大,对数字处理器造成显著负担^[28]。

为降低 MPCC 计算量,本文提出扇区划分法,将候选电压矢量从 49 个缩减至最多 5 个。具体流程:先根据速度环 PI 输出的参考电流计算无差拍参考电压,定位其所在 $\alpha\beta$ 平面扇区,筛选出邻近矢量;随后与传统 MPCC 一致,通过式(6)预测电流并评估价值函数,最终生成最优开关序列。该方法在保证控制精度的同时显著提升了运算效率。

2.1 一次扇区划分

一次扇区划分示意图如图 4 所示,用 u_α 和 u_β 表示参考电压矢量在 $\alpha\beta$ 轴上的分量,定义 U_x 、 U_y

和 U_z ^[29] 为

$$\begin{cases} U_x = u_\beta \\ U_y = \frac{\sqrt{3}}{2}u_\alpha - \frac{1}{2}u_\beta \\ U_z = -\frac{1}{2}u_\beta - \frac{\sqrt{3}}{2}u_\alpha \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{式中: } x = \begin{cases} 1, U_x > 0 \\ 0, U_x \leq 0 \end{cases}; y = \begin{cases} 1, U_y > 0 \\ 0, U_y \leq 0 \end{cases}; z = \begin{cases} 1, U_z > 0 \\ 0, U_z \leq 0 \end{cases};$$

$$P = 4z + 2y + x。$$

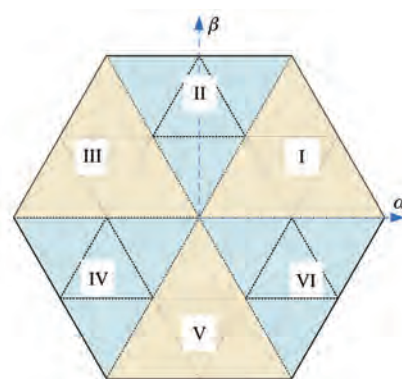


图4 一次扇区划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of 1st sector division

实际上,为避免引入角度运算增加计算量进而影响判断准确性,可采用式(10)选择扇区进行判断,扇区号 P 与扇区之间的关系如表 1 所示。

表 1 P 与扇区之间关系

Tab. 1 Relationship between P and sector						
P	3	1	5	4	6	2
扇区	I	II	III	IV	V	VI

2.2 二次扇区划分

二次扇区划分示意图如图 5 所示。由两逆变器合成的空间矢量将空间分成六个四边形区域,将其记为扇区 I、II、III、IV、V 和 VI。这六个扇区的分布与传统空间矢量脉宽调制相比,顺时针旋转了 30° ^[30]。定义:

$$\begin{cases} U_A = U_\alpha \\ U_B = -\frac{1}{2}U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta \\ U_C = -\frac{1}{2}U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta \end{cases} \quad (11)$$

式中: $A = \begin{cases} 1, U_A > 0 \\ 0, U_A \leq 0 \end{cases}; B = \begin{cases} 1, U_B > 0 \\ 0, U_B \leq 0 \end{cases}; C = \begin{cases} 1, U_C > 0 \\ 0, U_C \leq 0 \end{cases}; N = 4C + 2B + A。$

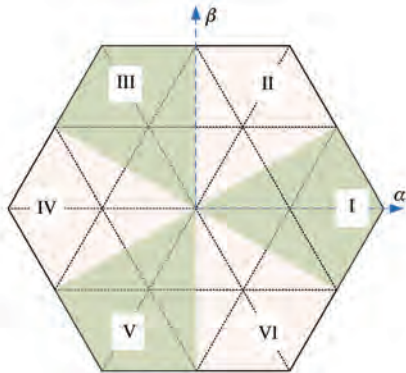


图 5 二次扇区划分示意图

Fig. 5 Schematic diagram of 2nd sector division

扇区号 N 与扇区之间的关系如表 2 所示。

表 2 N 与扇区之间的关系

Tab. 2 Relationship between N and sector						
N	1	3	2	6	4	5
扇区	I	II	III	IV	V	VI

经过两次扇区划分后,可以得到 12 种有效组合,其他任意组合均视为无效或未定义,表 3 为两次扇区划分的扇区号组合结果。

表 3 扇区号组合结果

Tab. 3 The combination result of sector numbers						
$N \setminus P$	1	2	3	4	5	6
1	0	12	1	0	0	0
2	4	0	0	0	5	0
3	3	0	2	0	0	0
4	0	0	0	8	0	9
5	0	11	0	0	0	10
6	0	0	0	7	6	0

两次扇区划分结果如图 6 所示。本文提出的两次扇区判断法通过组合扇区号确定参考电压矢量位置,其效果与基于 α 轴夹角 θ 的传统方法等效,但避免了复杂反三角运算。相较于反正切法,该方法计算更精准且高效。

2.3 幅值划分

根据 3:1 电压比的合成矢量分布特性,其作

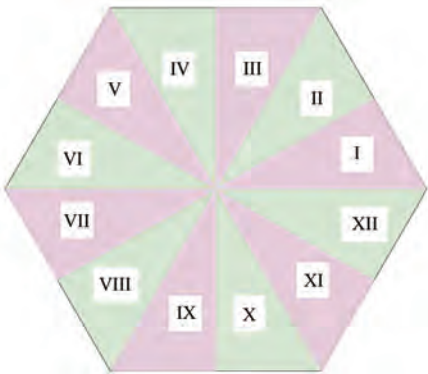


图 6 两次扇区划分结果

Fig. 6 The results of 2nd sector division

用区域可依幅值由内向外划分为四层,分别对应以原点 O 为中心的四个正六边形。通过两次扇区划分,候选电压矢量从 49 个缩减至 7 个。为进一步优化计算效率,本节基于高压侧逆变器输出矢量幅值进行二次筛选:内侧幅值小于 $(2/3)U_{dc1}$,外侧则大于 $(2/3)U_{dc1}$ 。

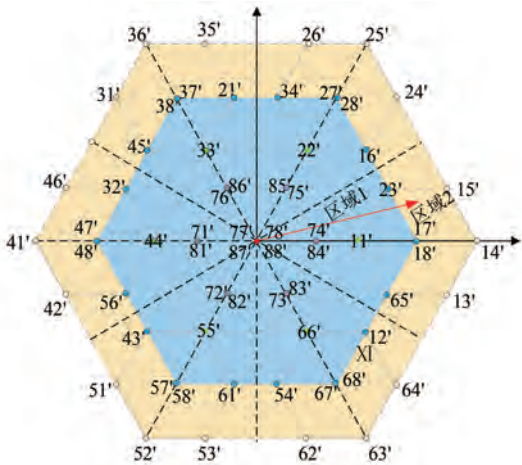


图 7 幅值扇区划分结果

Fig. 7 Results of amplitude sector division

幅值扇区划分结果如图 7 所示。当参考矢量 U_{ref} 落在扇区 1 的区域 2 时,此时根据 MPCC 原理,应选择与 U_{ref} 空间距离最小的矢量,只需要进行 4 次比较就能选出与参考电压矢量最为接近的最优电压矢量。当参考向量超出有效调制范围时,扇区分区不足以选择合适的候选向量,所提策略选择位于边界处最接近参考的两个向量作为候选向量。

图 8 为本文所提基于扇区判断的 MPCC 结构框图,图 9 为本文所提方法实现过程的流程图。

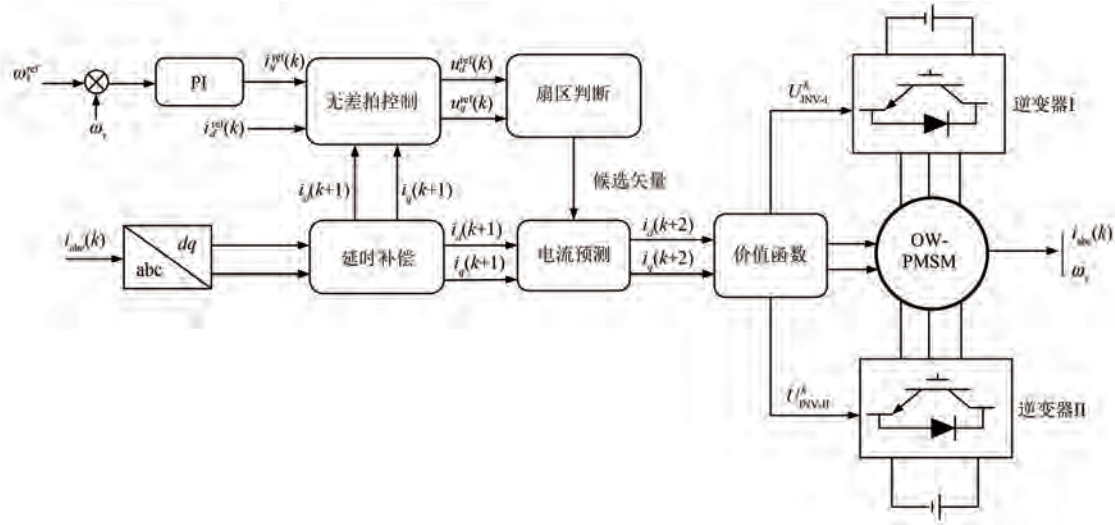


图 8 基于扇区判断的 MPCC 结构图

Fig. 8 MPCC structure diagram based on sector judgment

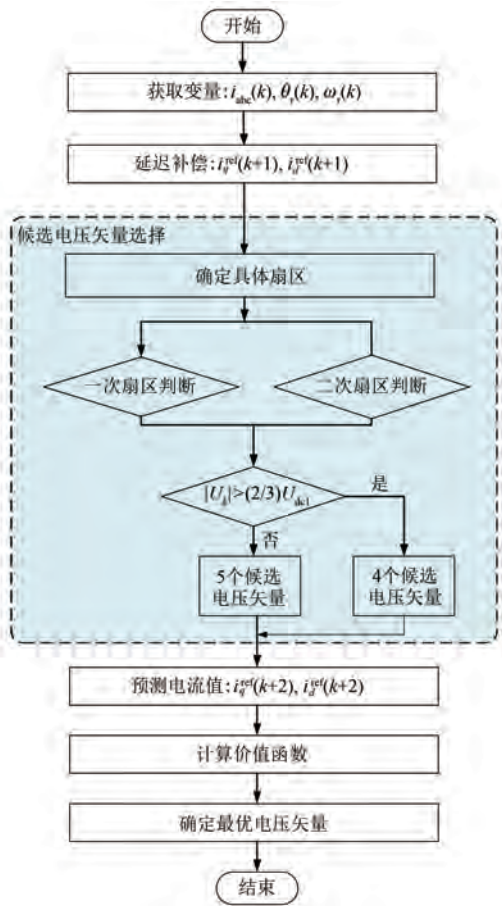


图 9 基于扇区判断模型预测控制流程图

Fig. 9 Based on sector judgment model prediction control flow chart

3 仿真分析

为验证所提出控制策略的有效性,本文在 Matlab/Simulink 平台上搭建了两种控制策略下的 PMSM 的 MPC 系统离散仿真模型,分别对传统单矢量控制策略与本文提出的基于扇区判断单矢量 MPCC 策略进行了空载起动、突加负载和转速突变三种工况下的仿真测试,以证明基于扇区划分的单矢量 MPCC 策略在提高系统动态性能、降低计算负担方面的有效性。PMSM 参数如表 4 所示,仿真中两种控制策略采用相同的转速环 PI 参数,采样频率均为 10 kHz,采用定步长计算,求解方法统一选用 ode4 算法。

表 4 PMSM 参数

Tab. 4 PMSM parameters

参数名称	参数值
电阻 R/Ω	0.985
d 轴电感 L_d/mH	5.25
q 轴电感 L_q/mH	12
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.182 7
极对数 p	4
高压侧直流电压 U_{dc1}/V	120
低压侧直流电压 U_{dc2}/V	40
控制周期 $T_s/\mu\text{s}$	100
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.000 1
粘滞摩擦系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.000 5

两种控制方法下转速与转矩波形如图 10 所示。由图 10 可知,两种方法均能实现快速起动和稳定跟踪,但改进 MPCC 在响应速度上表现更优。在设定目标转速 500 r/min 的条件下,改进后的 MPCC 起动阶段转速快速上升至 526 r/min,超调量达到 5%,经过 0.018 s 的波动后,其稳定在目标转速附近;传统 MPCC 在无超调情况下 0.052 s 达到目标转速并稳定,其到达目标转速所用时间几乎是改进方法的 3 倍,当

0.25 s 时加负载后,转速下跌至 458 r/min,之后迅速恢复至目标转速。空载起动时,两种方法转矩均迅速增大后回归在 0 附近上下波动,改进后的 MPCC 响应速度更快,稳态误差几乎一致,均为 0.1 N·m;在 0.25 s 处突加负载后,转矩均可迅速增加至给定值,改进后的 MPCC 依旧存在超调问题,可以看出加入扇区判断后响应速度和转矩更快一些,但也由此带来了超调问题。

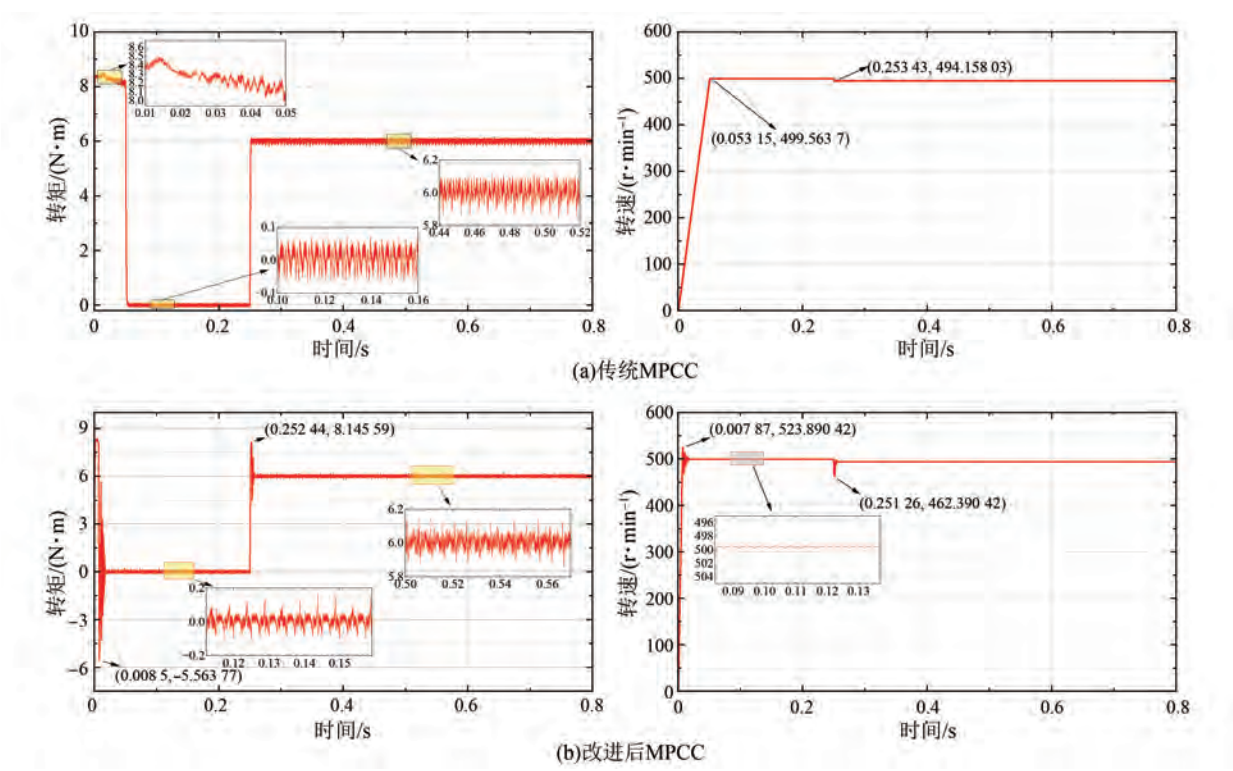


图 10 两种控制方法下转速与转矩波形

Fig. 10 Speed and torque waveforms under two control methods

两种控制方法下的 dq 轴电流仿真波形如图 11 所示。由图 11 可知,传统 MPCC 下的 d 轴电流起始突增至 0.5 A,之后迅速达到稳态值 0 附近;改进后的 d 轴电流起始突增至 1.4 A 且上下波动较大,稳定后两者的稳态误差都在 0.1 A 左右。加入负载后两种方法下的 d 轴电流均保持在 0.2 A 附近,稳态误差为 10% 左右; q 轴电流变化趋势与转矩一致,起始阶段波动较大,之后维持在 0 附近;加载瞬间, q 轴电流值瞬间增大至 7.8 A,超调量为 30%,之后稳定在目标值 6 附近。

本文所提 MPCC 控制策略的扇区判断过程如

图 12 所示。当扇区号 P 为 3 且扇区号 N 为 3 时,依据表 3 的结果,电压所在子扇区应为 2,与仿真结果一致,证明方法的正确性。图 12(d) 表明空载起动时电机转矩较大,电压幅值落在区域 2,稳定后所需转矩为 0,电压也为 0,属于图 7 中的区域 1;0.25 s 突加负载后,转矩迅速增大,电压幅值也增大,此时电压处于区域 2,并为维持速度,电压幅值将一直位于区域 2。

同时,对不同控制策略的性能进行对比分析,结果如表 5 所示。传统 MPCC、改进后 MPCC 控制策略的仿真运行时间如表 6 所示。

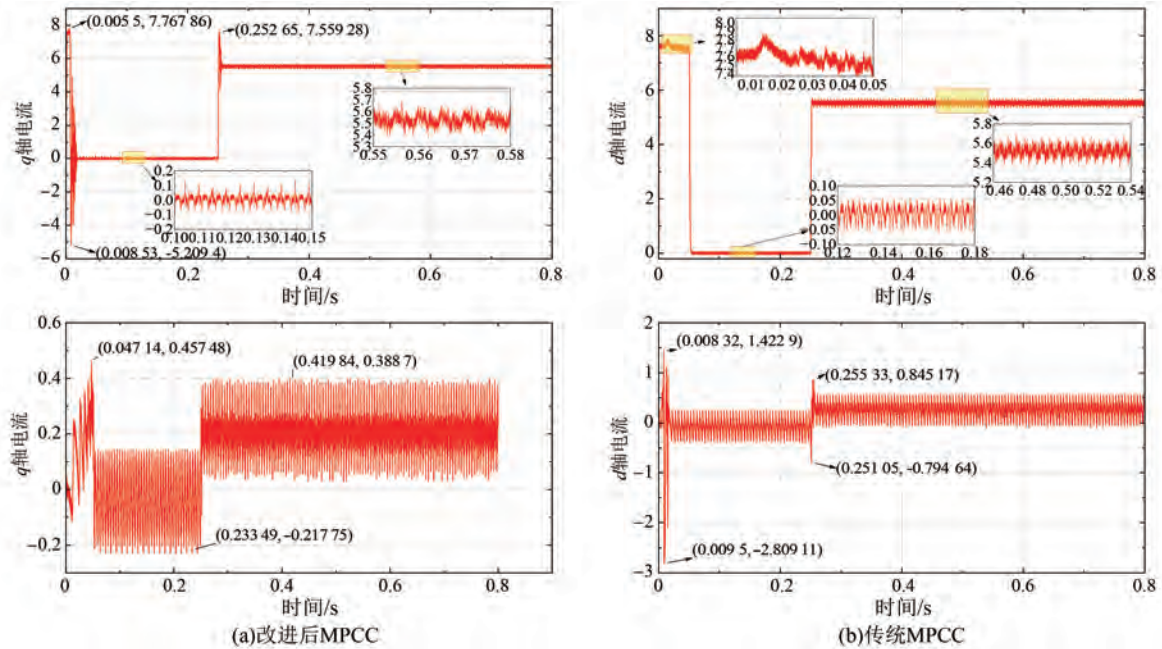


图 11 两种控制方法下的电流波形

Fig. 11 Current waveforms under two control methods

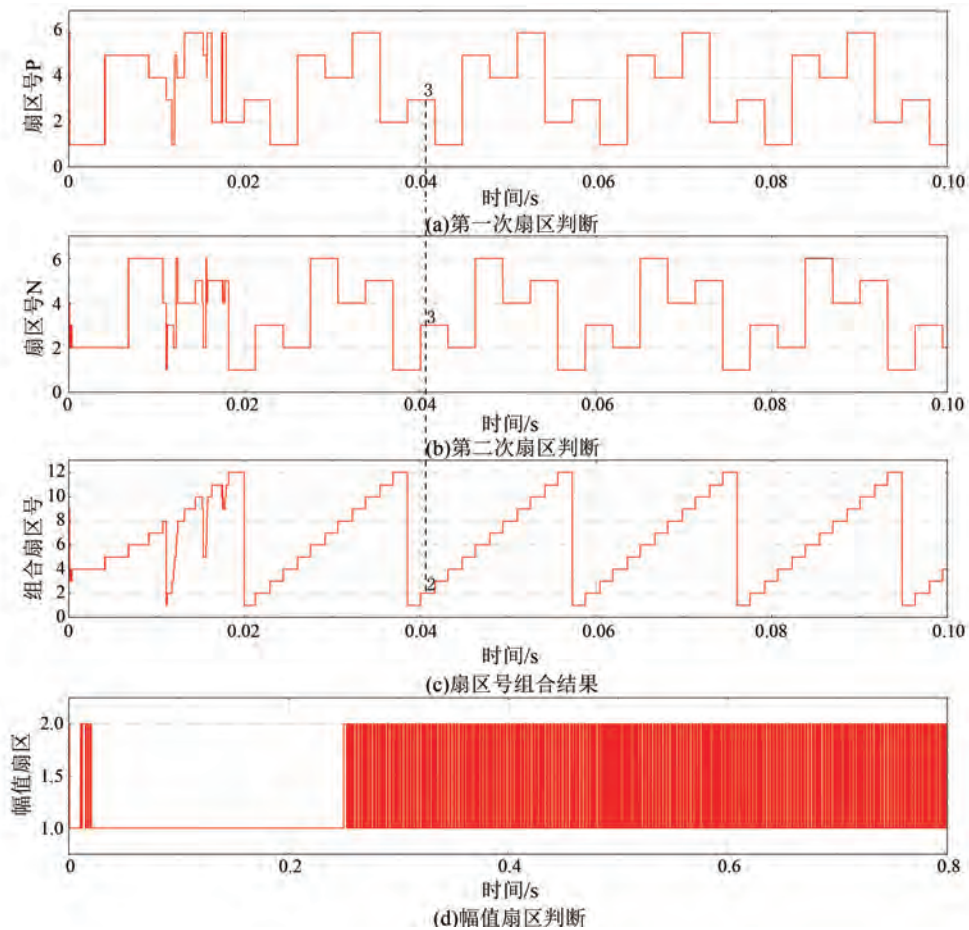


图 12 本文所提 MPCC 控制策略的扇区判断过程

Fig. 12 The sector judgment process of MPCC control strategy proposed in this paper

表 5 传统 MPCC、MPCC^[23]、MPCC^[24] 和本文提出的 MPCC 比较

Tab. 5 Comparison of traditional MPCC, MPCC^[23], MPCC^[24] and the proposed MPCC

	传统 MPCC	MPCC ^[23]	MPCC ^[24]	本文提出的 MPCC
用于减少向量数目的变量	无	转矩误差和定子磁链矢量的扇区信息	参考电压矢量的扇区信息	电压幅值和电压矢量扇区信息
控制集中电压矢量个数	49	16	9	4~5
遍历时间减少百分比	无	29	43	50
稳态响应	未改变	未改变	未改变	未改变
价值函数中使用的控制变量	定子 dq 轴电流	定子磁通、转矩和 x - y 轴电流	$\alpha\beta$ 轴定子电压	某一时刻定子电流和定子电压
依赖的永磁同步电机参数	R_s 、 L_s 和 ψ_f	R_s 、 L_s 和 ψ_f	R_s 、 L_s 和 ψ_f	L_s 和 ψ_f 和 R_s

表 6 两种控制策略的仿真程序运行时间

Tab. 6 Simulating program runtime at two control strategies

控制策略	程序运行时间/us
传统 MPCC	240
改进后 MPCC	130

4 结语

本文提出了一种 OW-PMSM 非共母线双逆变器供电 MPCC 方法。该方法以电压无差为基准,在代入代价函数前,根据给出的扇区判断法确定有源电压矢量所在扇区位置,选出最优电压矢量。

综上所述,基于扇区划分的 MPCC 策略应用于 3:1 特殊电压比,将电压矢量的迭代次数由 49 次缩减为 4~5 次,减少 50%,能够有效降低计算负担,具有很好的动态性能,可作为这类特殊拓扑结构下优选的控制方法。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

张博、刘纪奥和冯威进行了方案设计、内容总结与论文撰写,刘纪奥、冯威、赵桂林进行了仿真编程,张博和冯威参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Zhang Bo,

Liu Ji'ao and Feng Wei. The simulation programming was conducted by Liu Ji'ao, Feng Wei and Zhao Guilin. The manuscript was revised by Zhang Bo and Feng Wei. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

[1] RODRIGUEZ J, GARICA 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): 3927-3941.

[2] RODRIGUEZ J, GARICA C, MORA A, et al. Latest advances of model predictive control in electrical drives-Part II: Applications and benchmarking with classical control methods [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5047-5061.

[3] 王治国, 郑泽东, 李永东. 交流电机模型预测控制综述[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(11): 14-30.

WANG Z G, ZHENG Z D, LI Y D, et al. A review of model predictive control for AC motor [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(11): 14-30.

[4] 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): 17-25.

LI Y H, WANG X Y, ZHANG Y, et al. Cost function optimization calculation for multi-step model predictive current control of permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(5): 17-25.

[5] 李耀华, 邓益志, 童瑞齐, 等. 永磁同步电机低共

- 模电压和低复杂度无差拍预测控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(10): 19-28.
- LI Y H, DENG Y Z, TONG R Q, et al. Deadbeat predictive control with low common-mode voltage and low complexity for PMSM [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(10): 19-28.
- [6] LU L L, MAO Y, WANG X Q, et al. Maximum-torque optimization control of dual three-phase PMSM in low-frequency and static operations [J]. *IEEE Journal of Power Electronics*, 2023, 11(5): 5268-5278.
- [7] 安一凡, 储剑波, 唐旭. 基于参考电流斜率的永磁同步电机三矢量模型预测电流控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 22-29+73.
- AN Y F, CHU J B, TANG X. Three-vector model predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on reference current slope [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(11): 22-29+73.
- [8] SHEN J W, WANG X Q, XIAO D X, et al. Online switching strategy between dual three-phase PMSM and open-winding PMSM [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 10(1): 1519-1529.
- [9] CHEN M, SUN D. A unified space vector pulse width modulation for dual two-level inverter system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 32(2): 889-893.
- [10] AMERISE A, MENGONI M, ZARRI L, et al. Open-end windings induction motor drive with floating capacitor bridge at variable DC-link voltage [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(3): 2741-2749.
- [11] XU T, WANG X Q, XIAO D X, et al. A novel two-mode inverter-based open-winding PMSM drive and its modulation strategies [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(7): 8762-8774.
- [12] WANG M Z, SUN D, KE W H, et al. A universal lookup table-based direct torque control for OW-PMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 36(6): 6188-6191.
- [13] CHEN Y C, WANG X Q, MENG X, et al. A universal model predictive control strategy for dual inverters fed OW-PMSM drives [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(6): 7575-7585.
- [14] YANG Y, PAN J Y, WEN H Q, et al. Computationally efficient model predictive control with fixed switching frequency of five-level ANPC converters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(12): 11903-11914.
- [15] 颜学龙, 谢刚, 孙天夫, 等. 基于模型预测控制的永磁同步电机电流控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 1-11.
- YAN X L, XIE G, SUN T F, et al. Review of current control technology of permanent magnet synchronous motor based on model predictive control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(9): 1-11.
- [16] 苏晓杨, 兰志勇, 蔡兵兵. 永磁同步电机模型预测电流控制比较研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(10): 7-13.
- SU X Y, LAN Z Y, CAI B B. A comparative research of model predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(10): 7-13.
- [17] 常勇, 包广清, 杨梅, 等. 模型预测控制在永磁同步电机系统中的应用发展综述[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(8): 11-17.
- CHANG Y, BAO G Q, YANG M, et al. Application and development of model predictive control in permanent magnet synchronous motor system [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(8): 11-17.
- [18] 杨狂彪, 陈鼎新, 石坚. 低复杂度永磁同步电机双矢量模型预测控制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 87-96.
- YANG K B, CHEN D X, SHI J. Low complexity dual vector model predictive control strategy for permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(1): 87-96.
- [19] 朱芮, 吴迪, 陈继峰, 等. 电机系统模型预测控制研究综述[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(8): 1-10+30.
- ZHU R, WU D, CHEN J F, et al. A review of research on motor system model predictive control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(8): 1-10+30.
- [20] 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 Y P, ZHANG B C, ZHOU Q. Two-vector based model predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32 (20): 222-230.
- [21] 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.
- XU Y P, WANG J B, ZHANG B C, et al. Three-vector-based model predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 980-988.
- [22] ZHOU H B, HUANG L S, YANG J, et al. Low-complexity double-vector model predictive control with minimum root mean square error for three-phase three-level inverters [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11 (6): 5809-5819.
- [23] SABBIR M S H, HABIBULLAH M. Selective voltage vector based predictive torque control of five-phase induction motor drive [C]//2020 11th International Conference on Electrical and Computer Engineering, Dhaka, 2020.
- [24] SAEED M S R, SONG W, YU B, et al. Low-complexity deadbeat model predictive current control for open-winding PMSM drive with zero-sequence current suppression [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7 (4): 2671-2682.
- [25] TAO T, ZHAO W X, HE Y, et al. Multivector predictive current control for five-phase PM motor by using hybrid duty modulation technology [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(4): 1603-1612.
- [26] YANG Q F, KARAMANAKOS P, TIAN W, et al. Computationally efficient fixed switching frequency direct model predictive control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37 (3): 2761-2777.
- [27] MUSUNURU N S P, SRIRAMA S. Cascaded predictive control of a single power supply-driven four-level open-end winding induction motor drive without weighting factors [J]. IEEE Journal of Power Electronics, 2021, 9(3): 2858-2867.
- [28] 张晓光, 闫康, 张文涵. 开绕组永磁同步电机混合双矢量模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 96-106.
- ZHANG X G, YAN K, ZHANG W H. Hybrid dual-vector model predictive control for open-winding permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 96-106.
- [29] SOMASEKHAR V T, GOPAKUMAR K, SHIVAKUMAR E G. A space vector modulation scheme for a dual two-level inverter fed open-end winding induction motor drive for the elimination of zero-sequence currents [J]. EPE Journal, 2002, 12 (2): 1-19.
- [30] AN Q T, LIU J, PENG Z, et al. Dual-space vector control of open-end winding permanent magnet synchronous motor drive fed by dual inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (12): 8329-8342.

收稿日期:2025-06-25

收到修改稿日期:2025-07-20

作者简介:

刘纪奥(2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机模型预测控制, 1151560847@qq.com;

* 通信作者:张 博(1987-), 男, 博士, 教授, 研究方向为高能效电力装备设计、电机系统容错控制及状态监测技术, solomon@sut.edu.cn。