

# 永磁同步电机两步模型预测电流控制 精简控制集研究

李耀华\*, 种国臣, 郭伟超, 徐志雄, 王自臣, 高 赛, 王钦政,  
张鑫泉, 童瑞齐, 邓益志, 丁 红  
(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

## Research on Streamlined Control Sets for Two-Step Model Predictive Current Control in Permanent Magnet Synchronous Motors

LI Yaohua\*, CHONG Guochen, GUO Weichao, XU Zhixiong, WANG Zichen, GAO Sai,  
WANG Qinzheng, ZHANG Xinquan, TONG Ruiqi, DENG Yizhi, DING Hong  
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** [Objective] To address the heavy computational burden of traversing all voltage vectors in two-step model predictive current control (MPCC) for permanent magnet synchronous motor (PMSM), this study proposes three streamlined control sets. These sets reduce the number of voltage vector traversal by incorporating additional constraints, thereby improving real-time performance. [Methods] Firstly, the voltage vectors were classified into five categories based on the positive and negative signs of their projections on the  $dq$ -axis. Subsequently, the error between the reference and actual values of the motor stator  $dq$ -axis current was used as constraints. The selection patterns of these five voltage categories were analyzed for both the first and second steps of model prediction under the imposed constraints. By eliminating underutilized voltage vectors, streamlined control set 1 and streamlined control set 2 were proposed. Based on this, an additional constraint on the square root of the  $dq$ -axis current error was introduced to analyze the distribution of zero voltage vectors under different error bands, further simplifying the control set and leading to the proposal of streamlined control set 3. [Results] The simulation and real-time experimental results showed that streamlined control set 1 achieved identical performance to the traditional control set, reducing the voltage vector sequence to 36 and decreasing the runtime to 53.31% of the traditional

control set. Streamlined control set 2 and streamlined control set 3 showed performance comparable to traditional control set with their voltage vector sequences reduced to 9 and 4, respectively, and runtime reduced to 19.98% and 12.57% of the traditional control set's runtime. [Conclusion] The three proposed streamlined control sets based on error constraints and voltage distribution patterns can significantly reduce traversal times while maintaining comparable control performance. This approach effectively optimizes real-time performance and provides a new solution for reducing the computational burden in two-step MPCC.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor; model predictive current control; two-step control; streamlined control set; real-time performance

**摘要:** [目的] 针对永磁同步电机 (PMSM) 两步模型预测电流控制 (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, 提出了三种精简控制集, 通过增加约束条件减少电压矢量遍历次数, 提高实时性。 [方法] 首先, 根据电压矢量在  $dq$  轴上投影的正负情况, 将其分为五类; 然后, 将电机定子  $dq$  轴电流参考值与实际值的误差作为约束条件, 分析施加约束后模型预测第一步和第二步的五类电压的选择规律, 通过舍弃利用率较低的电压矢量, 提出了精简控制集一和精简控制集二; 在此基础上, 又引入了  $dq$  轴电流误差平方根约束, 分析不同误差带下零电压矢量的分布规律, 从而进一步精简控制集, 提出精简控制集三。 [结果] 仿真和实时性试验结果表明: 精简控制集一与传统控制集的性能完全一致, 其电压矢量序列减小至 36 个, 运行时长降低至传统

基金项目: 长安大学 2024 年研究生科研创新实践项目 (300103724044)

Scientific Innovation Practice Project of Postgraduates of Chang'an University 2024 (300103724044)

控制集运行时长的 53.31%; 精简控制集二、精简控制集三与传统控制集的性能基本相当, 其电压矢量序列分别减小至 9 个、4 个, 运行时长分别降低至传统控制集运行时长的 19.98%、12.57%。【结论】基于误差约束和电压分布规律所提出的三种精简控制集可在保持与传统控制集性能基本相当的同时, 显著减少遍历次数, 有效优化实时性能, 为减少两步 MPCC 的计算负担提供了一种新的解决方案。

**关键词:** 永磁同步电机; 模型预测电流控制; 两步控制; 精简控制集; 实时性

## 0 引言

有限控制集模型预测控制 (Finite Control Set-Model Predictive Control, FCS-MPC) 因其性能优越、结构简单以及灵活性好, 在永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 控制领域受到广泛关注<sup>[1-5]</sup>。PMSM 模型预测电流控制 (Model Predictive Current Control, MPCC) 以定子  $dq$  轴电流为控制对象, 无需权重系数, 易于实现, 因此成为研究热点<sup>[6-8]</sup>。近年来, 关于 PMSM MPCC 的研究集中于多矢量 MPCC、无模型预测电流控制、高阶 MPCC 及多步预测控制领域<sup>[9-13]</sup>。

与 FCS-MPC 相同, FCS-MPCC 需要遍历控制集中的所有电压矢量, 计算量大, 实时性差。特别对于多步 MPCC, 遍历次数随预测步长呈指数级变化, 实时性问题更加严重<sup>[14-15]</sup>。文献 [16-18] 采用多核处理器、现场可编程逻辑门阵列等提升计算性能, 减少运算耗时, 但增加了硬件成本。文献 [19] 提出磁链和转矩简化预测模型, 减少模型预测转矩计算量。文献 [20] 从减少开关切换次数出发精简控制集, 但对控制性能牺牲较大。针对多步预测, 文献 [21] 采用球形编码算法将成本函数转化为开关序列对应的矩阵二范数平方从而简化计算。文献 [22] 采用事件触发机制, 牺牲模型预测控制滚动优化特性, 减少多步预测计算量。文献 [23-24] 通过最优和次优变量来减小遍历次数。文献 [25-27] 通过增加定子磁链扇区等约束条件对模型预测转矩控制集进行精简。文献 [28] 采用神经网络取代预测控制算法, 在多步预测控制中可优化实时性能。

本文基于 PMSM 两步 MPCC, 对比不同开关频率下单步和两步 MPCC 的性能, 通过增加电流误差约束, 分析两步 MPCC 第一步和第二步的电压矢量选择规律, 从而提出三种精简控制集。仿真和实时性试验结果表明, 精简控制集可在保持与传统控制集性能基本相当的同时, 减少遍历次数, 有效优化实时性能。

## 1 PMSM 单步 MPCC

$d$ - $q$  坐标系下 PMSM 定子电压方程如式 (1) 所示:

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

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  和  $i_d$ 、 $i_q$  分别为定子  $d$ 、 $q$  轴电压和电流;  $R_s$  为定子电阻;  $L_d$ 、 $L_q$  分别为定子  $d$ 、 $q$  轴电感;  $\omega_e$  为转子电角速度;  $\psi_f$  为永磁体磁链。

将式 (1) 改写为电流状态方程, 如式 (2) 所示:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (u_d - R_s i_d + \omega_e L_q i_q) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (u_q - R_s i_q - \omega_e L_d i_d - \omega_e \psi_f) \end{cases} \quad (2)$$

利用一阶前向欧拉离散将式 (2) 离散化, 可得定子  $d$ 、 $q$  轴电流预测方程, 如式 (3) 所示:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) i_d(k) + \\ T_s \left[ \frac{L_q}{L_d} \omega_e(k) i_q(k) + \frac{1}{L_d} u_d(k) \right] \\ i_q(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_q}\right) i_q(k) - \\ T_s \left[ \frac{L_d}{L_q} \omega_e(k) i_d(k) + \frac{\psi_f}{L_q} \omega_e(k) - \frac{1}{L_q} u_q(k) \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $i_d(k+1)$ 、 $i_q(k+1)$  分别为  $k+1$  时刻定子  $d$ 、 $q$  轴电流预测值;  $T_s$  为采样周期。

两电平电压源逆变器可生成 7 个基本电压矢量, 如式 (4) 所示。其中零电压矢量  $V_{zero}$  可由  $V_0(000)$  或  $V_7(111)$  生成, 从而构成 MPCC 的控制集。

$$\mathbf{V}_s \in \{\mathbf{V}_0, \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3, \mathbf{V}_4, \mathbf{V}_5, \mathbf{V}_6\} \quad (4)$$

定义成本函数如式(5)所示:

$$g = g_i + \lambda \cdot g_s \quad (5)$$

式中: $\lambda$  为权重系数; $g_i$  为电流控制项; $g_s$  为开关次数控制项; $g_i$  和  $g_s$  表达式为

$$g_i = [i_d(k+1) - i_d^*(k)]^2 + [i_q(k+1) - i_q^*(k)]^2 \quad (6)$$

$$g_s = 2 \times [|S_a(k) - S_a(k-1)| + |S_b(k) - S_b(k-1)| + |S_c(k) - S_c(k-1)|] \quad (7)$$

式中: $i_d^*(k)$  和  $i_q^*(k)$  分别为  $k$  时刻  $d$ 、 $q$  轴电流参考值; $S_a(k)$ 、 $S_b(k)$ 、 $S_c(k)$  和  $S_a(k-1)$ 、 $S_b(k-1)$ 、 $S_c(k-1)$  分别为当前时刻和上一时刻备选电压矢量对应的逆变器开关状态。

由于采样时间较短,可近似认为  $k$  时刻的电流参考值与  $k+1$  时刻的电流参考值相同,即  $i_{dq}^*(k) \approx i_{dq}^*(k+1)$ 。两电平逆变器开关状态有限, $g_s$  可根据上一时刻电压矢量直接查表得到,无需计算,开关次数表如表 1 所示, $\mathbf{V}_{zero}$  根据开关次数最小原则选择  $\mathbf{V}_0$  或  $\mathbf{V}_7$ <sup>[29]</sup>。

表 1 成本函数开关次数控制项  $g_s$

Tab. 1 Switching frequency term  $g_s$  in cost function

$V_s(k-1)$	$V_s(k)$						
	$V_{zero}$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$
$V_0$	0	2	4	2	4	2	4
$V_1$	2	0	2	4	6	4	2
$V_2$	2	2	0	2	4	6	4
$V_3$	2	4	2	0	2	4	6
$V_4$	2	6	4	2	0	2	4
$V_5$	2	4	6	4	2	0	2
$V_6$	2	2	4	6	4	2	0
$V_7$	0	4	2	4	2	4	2

MPCC 遍历控制集中的所有电压矢量,可得到 7 个成本函数,并输出使成本函数最小的电压矢量,从而实现对 PMSM 的控制。

## 2 PMSM 两步 MPCC

基于相同的电流预测模型,PMSM 两步 MPCC 在第一步预测电流的基础上预测第二步电流,第二步电流预测模型如式(8)所示:

$$\begin{cases} i_d(k+2) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) i_d(k+1) + \\ T_s \left[ \frac{L_q}{L_d} \omega_e(k+1) i_q(k+1) + \frac{1}{L_d} u_d(k+1) \right] \\ i_q(k+2) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_q}\right) i_q(k+1) - \\ T_s \left[ \frac{L_d}{L_q} \omega_e(k+1) i_d(k+1) + \right. \\ \left. \frac{\psi_f}{L_q} \omega_e(k+1) - \frac{1}{L_q} u_q(k+1) \right] \end{cases} \quad (8)$$

由于采样时间极短,可近似认为转子电角速度保持不变,即  $\omega_e(k+1) \approx \omega_e(k)$ 。

由于转子位置在每个时刻都会发生变化,需要计算第二步的转子电角度,如式(9)所示:

$$\theta_e(k+1) \approx \theta_e(k) + \omega_e T_s \quad (9)$$

基于第二步的转子电角度可得第二步施加电压矢量的  $d$ 、 $q$  轴分量,如式(10)所示:

$$\begin{bmatrix} u_d(k+1) \\ u_q(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos[\theta_e(k+1)] & \sin[\theta_e(k+1)] \\ -\sin[\theta_e(k+1)] & \cos[\theta_e(k+1)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

两步预测的成本函数如式(11)所示,同样由电流控制项和开关次数控制项组成。其中,下标 1 为第一步;下标 2 为第二步。

$$\begin{aligned} g &= g_1 + g_2 = (g_{i1} + \lambda \cdot g_{s1}) + \\ &(g_{i2} + \lambda \cdot g_{s2}) = [i_d(k+1) - i_d^*(k)]^2 + \\ &[i_q(k+1) - i_q^*(k)]^2 + [i_d(k+2) - i_d^*(k)]^2 + \\ &[i_q(k+2) - i_q^*(k)]^2 + \lambda \cdot (g_{s1} + g_{s2}) \end{aligned} \quad (11)$$

同理,由于采样时间极短,近似认为第二步的电流参考值与当前时刻的电流参考值相同,即  $i_{dq}^*(k) \approx i_{dq}^*(k+2)$ 。开关次数控制项计算方法与第一步相同,可基于第一步施加电压矢量查表直接得到。

对于两步 MPCC,控制集为  $7 \times 7 = 49$  个电压矢量序列。两步 MPCC 遍历控制集中的所有电压矢量,可得到 49 个成本函数,并输出使成本函数最小的电压矢量序列的第一个电压矢量,从而实

现对 PMSM 的控制。

基于 Matlab/Simulink 建立表贴式 PMSM 单步和两步 MPCC 仿真模型。采样周期为  $5 \times 10^{-5}$  s, 直流母线电压为 312 V, 转速环 PI 调节器增益  $k_p = 5$ 、 $k_i = 100$ , 输出限幅为  $[-30 \text{ A}, 30 \text{ A}]$ 。初始参考转速为 400 rpm, 2 s 时阶跃至  $-400 \text{ rpm}$ 。初始负载转矩为  $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 1 s 时阶跃至  $-10 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 3 s 时阶跃至  $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 仿真总时长为 4 s。仿真用 PMSM 参数如表 2 所示。

表 2 仿真用 PMSM 参数

Tab. 2 PMSM parameters for simulation

参数名称	参数值
定子电阻/ $\Omega$	0.2
$d$ 轴电感/H	0.008 5
$q$ 轴电感/H	0.008 5
转子磁链/Wb	0.175
极对数	4
转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.089
粘滞阻尼系数/ $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	0.005

为了量化电流脉动和开关频率以评估控制性能, 定义定子  $d$ 、 $q$  轴电流脉动均方根误差  $I_{d\_RMSE}$ 、 $I_{q\_RMSE}$  和平均开关频率  $f_{ave}$  分别如式 (12) ~ 式 (14) 所示:

$$I_{d\_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (i_d - i_d^*)^2}{n}} \quad (12)$$

$$I_{q\_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (i_q - i_q^*)^2}{n}} \quad (13)$$

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6 \times t} \quad (14)$$

式中:  $n$  为采样个数;  $t$  为仿真时长;  $N_{switching}$  为逆变器开关总次数。

通过调节权重系数  $\lambda$ , 可得不同开关频率。不同开关频率下, PMSM 单步与两步 MPCC 性能以及三相电流总谐波失真 (Total Harmonic Distortion, THD) 对比如表 3 和图 1 所示。

由仿真结果可知, 随着权重系数的增大, 单步 MPCC 开关频率降低, 控制性能随之严重恶化; 两步 MPCC 在开关频率降低的同时依然保持较好的控制性能。可见, 相较于单步 MPCC, 两步 MPCC

在低开开关频率时有明显优势。因此, 本文选取平均开关频率为 3 kHz 下的两步 MPCC 进行分析, 此时  $\lambda = 0.35$ 。

表 3 单步与两步 MPCC 性能对比

Tab. 3 Comparison of performance between one-step and two-step MPCC

$f_{ave}/\text{kHz}$	$\lambda$	步长	$I_{d\_RMSE}/\text{A}$	$I_{q\_RMSE}/\text{A}$	THD/%
6	0.009	单步	0.808 1	0.952 3	12.025 7
	0.009	两步	0.808 5	0.955 5	11.752 7
5	0.17	单步	0.823 4	0.977 1	12.502 5
	0.151 5	两步	0.781 9	0.935 6	11.747 4
4	0.408	单步	0.858 9	0.980 1	12.490 2
	0.26	两步	0.742 7	0.864 1	10.720
3	0.843	单步	1.057	1.181	15.849 6
	0.35	两步	0.692 3	0.804 3	10.276 6
2	1.821	单步	1.523	1.676	22.178 4
	0.685	两步	0.688 5	0.827 9	10.565 8
1	5.385	单步	3.269	3.741	49.240 7
	2	两步	0.825 3	0.998 9	12.337 5

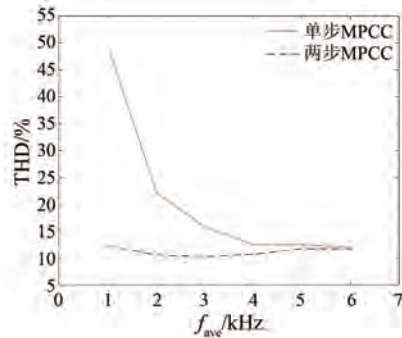


图 1 单步和两步 MPCC 三相电流 THD

Fig. 1 THD of three-phase current of one-step and two-step MPCC

### 3 电压矢量选择规律

由两步 MPCC 可知, 电压矢量序列数量直接决定 MPCC 的遍历次数, 同时影响控制性能。MPCC 对电压矢量的选择并不均衡。通过施加一定的约束, 可得到电压矢量的选择规律。

由电流状态方程可知, 施加电压矢量是否增大或减小  $dq$  轴电流由  $(u_d - R_s i_d + \omega_e L_q i_q)$  和  $(u_q - R_s i_q - \omega_e L_d i_d - \omega_e \psi_f)$  的正负决定。经统计, 不考虑零电压矢量, 当  $\lambda = 0.35$ , 两步 MPCC 第一步选择非零电压矢量共 33 591 次, 其中  $u_d$  与  $(u_d - R_s i_d +$

$\omega_e L_q i_q$ ) 正负同号共计 32 818 次, 占比 97.70%,  $u_q$  与  $(u_q - R_s i_q - \omega_e L_d i_d - \omega_e \psi_f)$  正负同号共计 32 024 次, 占比 95.34%; 第二步选择非零电压矢量共 12 353 次, 其中  $u_d$  与  $(u_d - R_s i_d + \omega_e L_q i_q)$  正负同号共计 12 052 次, 占比 97.56%,  $u_q$  与  $(u_q - R_s i_q - \omega_e L_d i_d - \omega_e \psi_f)$  正负同号共计 11 755 次, 占比 95.16%。统计结果表明, 绝大多数情况下, 电压矢量是否增大或减小  $d$ 、 $q$  轴电流可由  $u_d$ 、 $u_q$  的正负来判定。

由定子  $d$ 、 $q$  轴电流参考值与实际值误差的正负, 可得以下四种情况:  $d$ 、 $q$  轴电流误差均为正, 表明  $d$ 、 $q$  轴电流均需增大, 定义为  $i_{dq_{11}}$ ;  $d$  轴电流误差为正,  $q$  轴电流误差为负, 表明  $d$  轴电流需增大,  $q$  轴电流需减小, 定义为  $i_{dq_{10}}$ ;  $d$  轴电流误差为负,  $q$  轴电流误差为正, 表明  $d$  轴电流需减小,  $q$  轴电流需增大, 定义为  $i_{dq_{01}}$ ;  $d$ 、 $q$  轴电流误差均为负, 表明  $d$ 、 $q$  轴电流均需减小, 定义为  $i_{dq_{00}}$ 。

根据 7 个基本电压矢量  $dq$  轴分量的正负, 可得以下五类情况:  $u_d > 0$ 、 $u_q > 0$ , 定义为  $V_{s_{11}}$ ;  $u_d > 0$ 、 $u_q < 0$ , 定义为  $V_{s_{10}}$ ;  $u_d < 0$ 、 $u_q > 0$ , 定义为  $V_{s_{01}}$ ;  $u_d < 0$ 、 $u_q < 0$ , 定义为  $V_{s_{00}}$ ;  $u_d = 0$ 、 $u_q = 0$ , 定义为  $V_{s_{hold}}$ , 即零电压矢量  $V_{zero}$ 。

$\lambda = 0.35$  时, 对于不同的  $dq$  轴电流误差正负情况, 两步 MPCC 的第一步和第二步电压矢量利用率统计情况分别如表 4 和表 5 所示。其中电压矢量利用率为在不同电流增减约束条件下, 上述 5 类电压矢量各自的占比。

表 4 第一步电压矢量利用率

$i_{dq}$	利用率/%				
	$V_{s_{11}}$	$V_{s_{10}}$	$V_{s_{01}}$	$V_{s_{00}}$	$V_{s_{hold}}$
$i_{dq_{11}}$	35.00	3.93	3.95	0	57.12
$i_{dq_{10}}$	4.02	33.46	0	3.42	59.10
$i_{dq_{01}}$	37.50	0	3.52	4.26	56.82
$i_{dq_{00}}$	0	3.30	4.65	33.08	58.97

表 5 第二步电压矢量利用率

$i_{dq}$	利用率/%				
	$V_{s_{11}}$	$V_{s_{10}}$	$V_{s_{01}}$	$V_{s_{00}}$	$V_{s_{hold}}$
$i_{dq_{11}}$	12.20	2.42	1.99	0	83.39
$i_{dq_{10}}$	2.16	10.73	0	2.07	85.04
$i_{dq_{01}}$	1.44	0	12.48	2.04	84.04
$i_{dq_{00}}$	0	1.41	2.14	10.68	85.77

由表 4 可知, 两步 MPCC 的第一步不选择  $u_{dq}$  正负与  $dq$  轴电流误差正负均相反的电压矢量。因此, 第一步控制集可完全舍弃该类电压矢量。由于转子旋转运动, 此时该类电压矢量数目不固定, 为 1 个或 2 个, 则第一步控制集备选电压矢量数量为 5 个或 6 个。由表 5 可知, 两步 MPCC 的第二步也不选择  $u_{dq}$  正负与  $dq$  轴电流误差正负均相反的电压矢量。因此, 第二步控制集可舍弃该类电压矢量, 第二步控制集备选电压矢量数量为 5 个或 6 个。

由表 4 还可知, 两步 MPCC 的第一步更多选择  $u_{dq}$  正负与  $dq$  轴电流误差正负均相同的电压矢量和零电压矢量。不同  $dq$  轴电流误差正负情况下, 两者利用率之和分别为 92.12%、92.56%、94.32% 和 92.05%。因此, 第一步控制集可只使用这两类电压矢量, 舍弃其余利用率较低的备选电压矢量, 从而将备选电压矢量数目减小至 2 个或 3 个。同理, 对于两步 MPCC 的第二步, 不同  $dq$  轴电流误差正负情况下,  $u_{dq}$  正负与定子  $dq$  轴电流误差正负均相同的电压矢量和零电压矢量的利用率之和分别为 95.59%、95.77%、96.52% 和 96.45%。因此, 第二步控制集也可只使用这两类电压矢量, 从而将备选电压矢量数目减小至 2 个或 3 个。

综上所述, 可得到两步 MPCC 的控制集的两精方案: 精简控制集一和精简控制集二, 其流程图分别如图 2 和图 3 所示。图中,  $j$  为备选电压矢量序号,  $j = 1, 2, \dots, 7$ 。

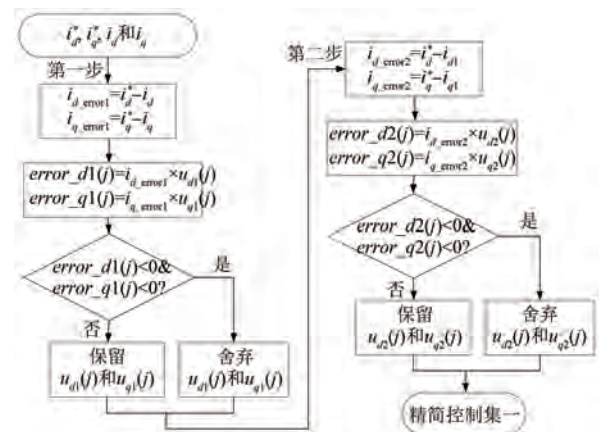


图 2 精简控制集一流程图

Fig. 2 Flowchart of streamlined control set 1

由图 2 可知, 精简控制集一的第一步和第二步控制集均舍弃  $u_{dq}$  正负与  $dq$  轴电流误差正负均

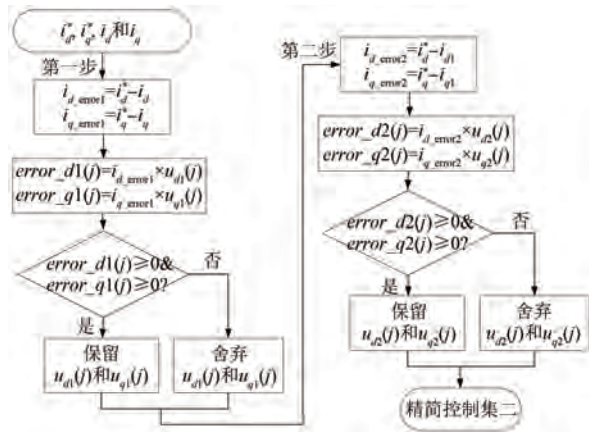


图 3 精简控制集二流程图

Fig. 3 Flowchart of streamlined control set 2

相反的电压矢量, 备选电压矢量序列最多为  $6 \times 6 = 36$  个。由图 3 可知, 精简控制集二的第一步和第二步控制集均仅采用  $u_{dq}$  正负与定子  $dq$  轴电流误差正负均相同的电压矢量以及零电压矢量, 备选电压矢量序列最多为  $3 \times 3 = 9$  个。

## 4 精简控制集

### 4.1 传统控制集

基于第二节建立的仿真模型, 取  $\lambda = 0.35$ , 采用传统控制集的两步 MPCC 仿真波形如图 4~图 6 所示。

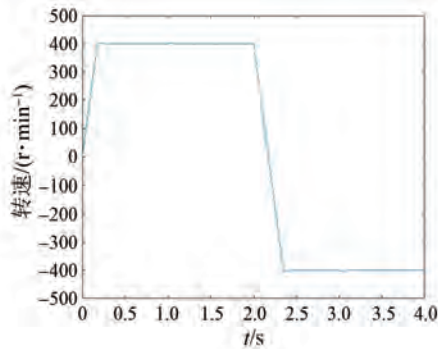


图 4 采用传统控制集的电机转速

Fig. 4 Motor speed with traditional control set

### 4.2 精简控制集一

电机参数和仿真条件不变, 取  $\lambda = 0.35$ , 采用精简控制集一的两步 MPCC 仿真波形如图 7~图 10 所示。

仿真结果表明, 采用精简控制集一的两步 MPCC 运行良好, 且 MPCC 不会选择与约束条件完全相反的电压矢量。

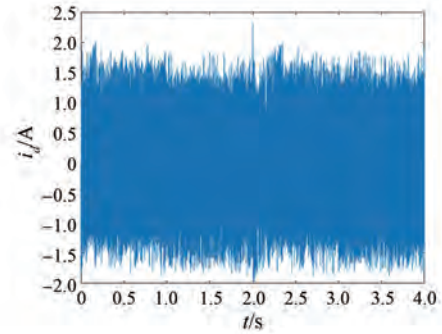


图 5 采用传统控制集的定子  $d$  轴电流

Fig. 5  $d$ -axis stator current with traditional control set

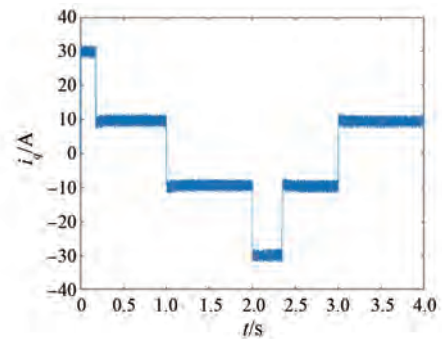


图 6 采用传统控制集的定子  $q$  轴电流

Fig. 6  $q$ -axis stator current with traditional control set

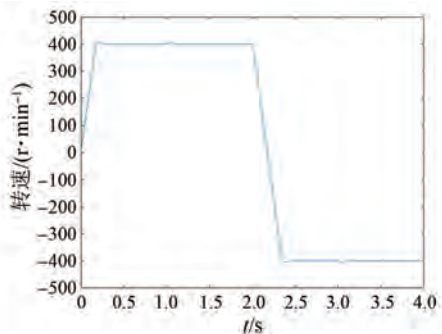


图 7 采用精简控制集一的电机转速

Fig. 7 Motor speed with streamlined control set 1

### 4.3 精简控制集二

电机参数和仿真条件不变, 取  $\lambda = 0.35$ , 采用精简控制集二的两步 MPCC 仿真波形如图 11~图 14 所示。

仿真结果表明, 采用精简控制集二的两步 MPCC 运行良好, 且 MPCC 只会选择零矢量以及与约束条件完全相同的电压矢量。

### 4.4 精简控制集三

由于定子电阻的影响, 施加零电压矢量会缓慢衰减电流。因此, 当电流误差较小时, MPCC 会

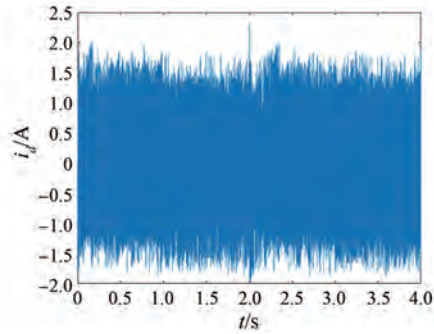


图 8 采用精简控制集一的定子  $d$  轴电流

Fig. 8  $d$ -axis stator current with streamlined control set 1

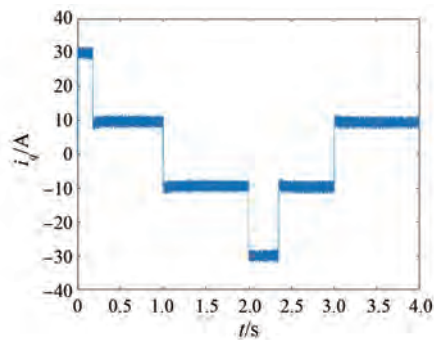


图 9 采用精简控制集一的定子  $q$  轴电流

Fig. 9  $q$ -axis stator current with streamlined control set I

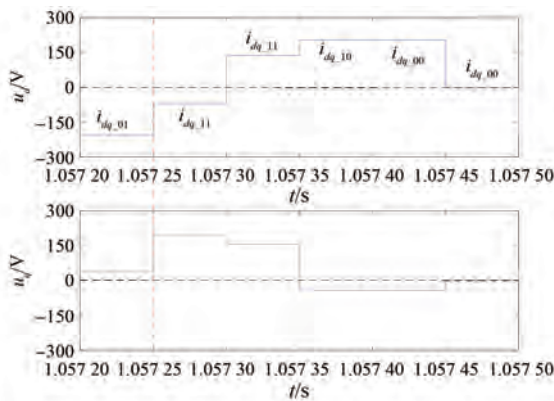


图 10 采用精简控制集一的最优电压矢量  $dq$  轴分量

Fig. 10  $dq$ -axis components of optimal voltage vector with streamlined control set 1

更多选择零电压矢量;当电流误差较大时,更多选择非零电压矢量。本文在精简控制集二的基础上,通过增加  $dq$  轴电流误差幅值约束以进一步精简控制集,提出精简控制集三。精简控制集三流程图如图 15 所示,其中,  $j$  为备选电压矢量序号,  $j=1,2,\dots,7$ 。

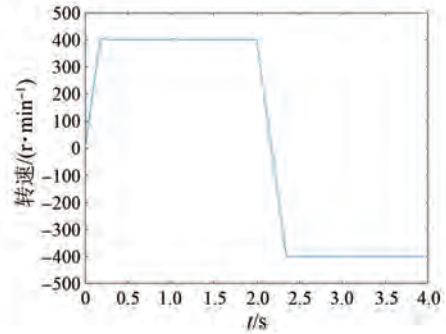


图 11 采用精简控制集二的电机转速

Fig. 11 Motor speed with streamlined control set 2

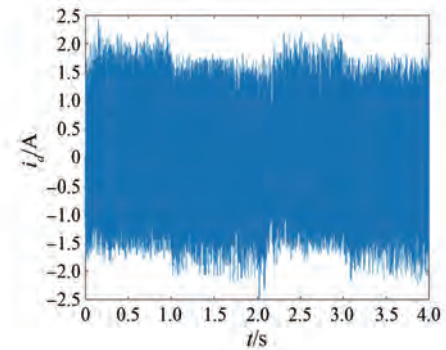


图 12 采用精简控制集二的定子  $d$  轴电流

Fig. 12  $d$ -axis stator current with streamlined control set 2

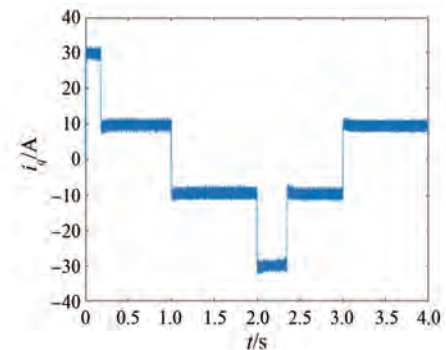


图 13 采用精简控制集二的定子  $q$  轴电流

Fig. 13  $q$ -axis stator current with streamlined control set 2

第一步、第二步  $dq$  轴电流误差平方根分别如式(15)、式(16)所示:

$$I_{dq1} = \sqrt{i_d^2 + (i_q - i_q^*)^2} \quad (15)$$

$$I_{dq2} = \sqrt{i_d(k+1)^2 + [i_q(k+1) - i_q^*]^2} \quad (16)$$

由图 15 可知,当第一步  $dq$  轴电流误差平方根小于阈值,选择零电压矢量,否则只选择  $u_{dq}$  正负与定子  $dq$  轴电流误差正负均相同的电压矢量。

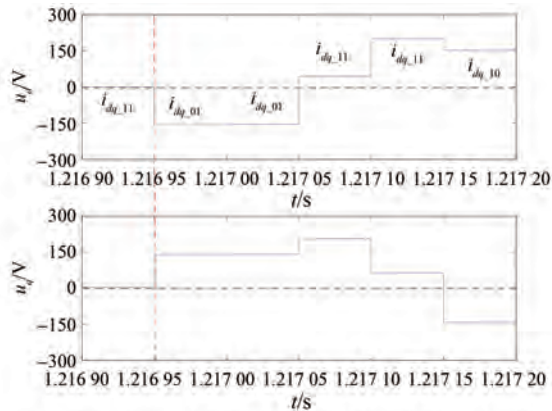


图 14 采用精简控制集二的最优电压矢量 dq 轴分量  
Fig. 14 dq-axis components of optimal voltage vector with streamlined control set 2

同理,当第二步 dq 轴电流误差平方根小于阈值,选择零电压矢量,否则也只选择  $u_{dq}$  正负与定子 dq 轴电流误差正负均相同的电压矢量。因此,精简控制集三备选电压矢量序列最多为  $2 \times 2 = 4$  个。

经统计,  $\lambda = 0.35$  时,当第一步 dq 轴电流误差平方根  $\leq 1$  A,基于精简控制集三的两步 MPCC 的第一步选择零电压矢量的占比为 78.91%;当电流误差平方根  $> 1$  A,第一步选择零电压矢量的占比仅为 12.86%。因此,第一步 dq 轴电流误差平方根阈值设为 1 A。同样地,第二步 dq 轴电流误差平方根阈值设为 1.5 A。

电机参数和仿真条件不变,取  $\lambda = 0.35$ ,采用精简控制集三的两步 MPCC 仿真波形如图 16~19 所示。

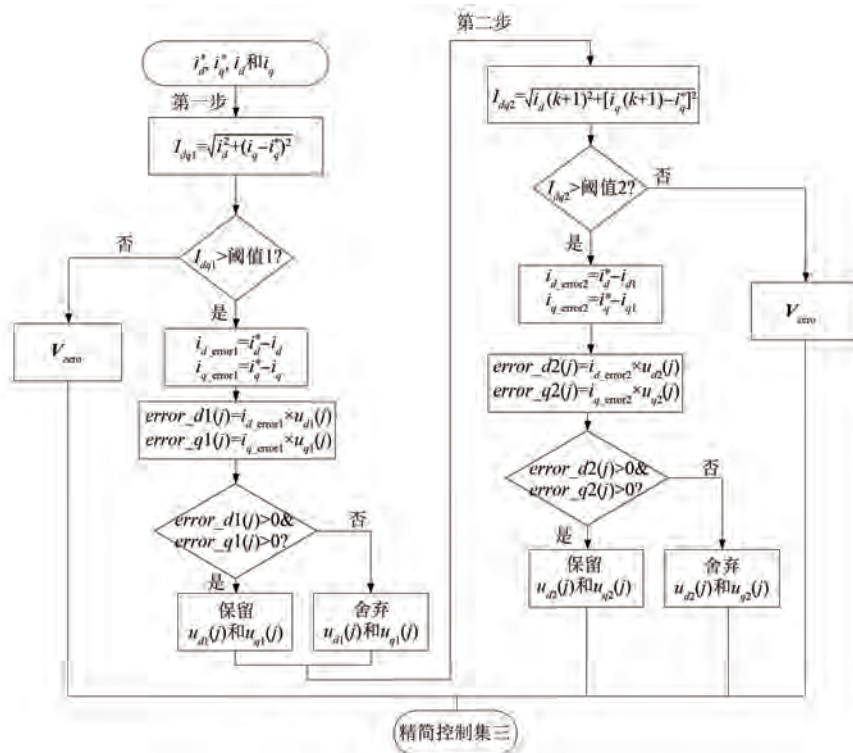


图 15 精简控制集三流程图

Fig. 15 Flowchart of streamlined control set 3

仿真结果表明,采用精简控制集三的两步 MPCC 运行良好,当第一步、第二步 dq 轴电流误差平方根小于阈值时,只选择零电压矢量;大于阈值时,只选择与约束条件完全相同的电压矢量。

#### 4.5 性能对比

采用传统控制集和三种精简控制集的 PMSM

两步 MPCC 的控制性能对比如表 6 所示,其中,  $N_{max}$  为备选电压矢量序列最大数目。

由表 6 可知,采用传统控制集及精简控制集一、二、三的 PMSM 两步 MPCC 的控制性能基本相当,但备选电压矢量序列最大数目由 49 个分别减小至 36 个、9 个和 4 个。



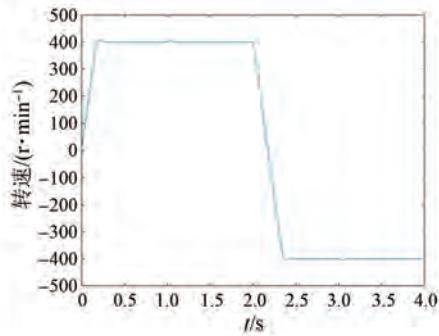


图 16 采用精简控制集三的电机电速

Fig. 16 Motor speed with streamlined control set 3

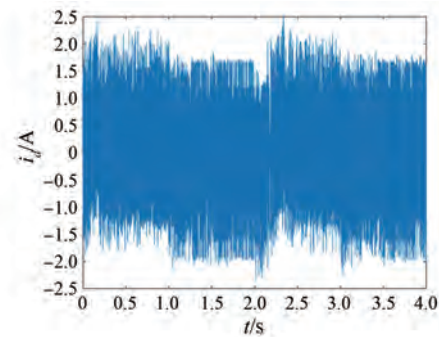


图 17 采用精简控制集三的定子 d 轴电流

Fig. 17 d-axis stator current with streamlined control set 3

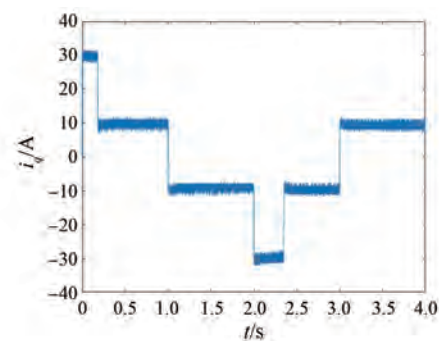


图 18 采用精简控制集三的定子 q 轴电流

Fig. 18 q-axis stator current with streamlined control set 3

表 6 采用不同控制集的两步 MPCC 的控制性能

Tab. 6 Control performance of two-step MPCC under different control sets

控制集	$f_{ave}/\text{kHz}$	$I_{d\_RMSE}/\text{A}$	$I_{q\_RMSE}/\text{A}$	$N_{max}$
传统控制集	3.003	0.692 3	0.804 3	49
精简控制集一	3.003	0.692 3	0.804 3	36
精简控制集二	3.831	0.754 7	0.849 0	9
精简控制集三	2.812	0.643 5	0.782 9	4

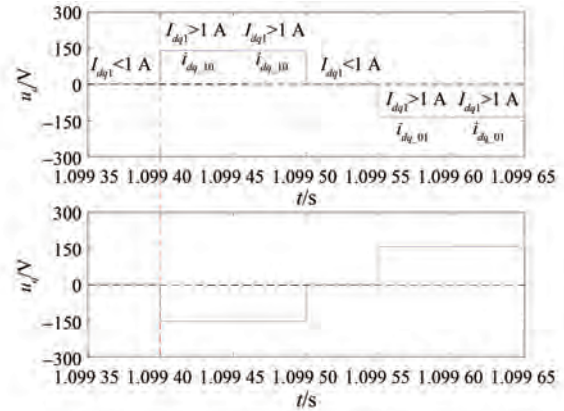


图 19 采用精简控制集三的最优电压矢量 dq 轴分量

Fig. 19 dq-axis components of optimal voltage vector with streamlined control set 3

## 5 实时性验证

电机参数不变,采用 STM32H743IIT6 单片机对采用传统控制集及精简控制集一、二、三的 PMSM 两步 MPCC 算法进行实时性验证。

由于算法实时性由计算量最恶劣的情况决定,单片机实时性验证输入数据均令备选电压矢量序列数目最多。单片机实时性验证输入数据如表 7 所示。输入数据下,精简控制集一的第一步和第二步控制集均为  $\{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_6\}$ , 共计 36 个电压矢量序列;精简控制集二的第一步和第二步控制集均为  $\{V_0, V_5, V_6\}$ , 共计 9 个电压矢量序列;精简控制集三的第一步控制集为  $\{V_1, V_6\}$ , 第二步控制集为  $\{V_4, V_5\}$ , 共计 4 个电压矢量序列。

将程序单步循环 10 000 次,采用不同控制集的 PMSM 两步 MPCC 算法的遍历次数和运行时长如表 8 所示。

由表 8 可知,三种精简控制集可在保持与传统控制集性能基本相当的同时,减少遍历次数。精简控制集一、二和三的运行时长分别降低至传统控制集运行时长的 53.31%、19.98% 和 12.57%。

## 6 结语

(1) 两步 MPCC 的第一步和第二步均不选择  $u_{dq}$  正负与  $dq$  轴电流误差正负均相反电压矢量。因此,控制集可舍弃该类电压矢量,从而将备选电压矢量数目减小至 5 个或 6 个。同时,第一

表 7 实时性验证输入数据

Tab. 7 Input data for real-time verification

控制集	$i_{d\_ref}/A$	$i_{q\_ref}/A$	$i_d/A$	$i_q/A$	$\theta_e/\text{rad}$	$\omega_e/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$S_a(k-1)$	$S_b(k-1)$	$S_c(k-1)$
传统控制集	0	9.792 7	-0.507 2	9.078 7	69.070 3	167.550 1	0	0	0
精简控制集一	0	9.787	1.150 7	8.506 5	86.587 9	167.548 5	1	0	0
精简控制集二	0	9.797	-1.332 2	8.578 5	66.712 3	167.557 9	0	0	1
精简控制集三	0	-30	2.494 5	-29.675 2	322.019 6	-155.681 6	1	0	1

表 8 采用不同控制集的两步 MPCC 运行时长

Tab. 8 Runtime of two-step MPCC under different control sets

控制集	遍历次数	运行时长/ms
传统控制集	49	669.696
精简控制集一	36	357.023
精简控制集二	9	133.794
精简控制集三	4	84.174

步和第二步均更多选择  $u_{dq}$  正负与  $dq$  轴电流误差正负均相同的电压矢量和零电压矢量。因此,控制集可只使用这两类电压矢量,从而将备选电压矢量数目减小至 2 个或 3 个。由于零电压矢量缓慢减小定子电流,当第一步和第二步  $dq$  轴电流误差平方根较小时,第一步和第二步均更多选择零电压矢量;反之,更多选择非零电压矢量。

(2) 基于不同约束条件下的电压矢量选择规律,提出三种精简控制集,将传统控制集的 49 个电压矢量序列分别减小至 36 个、9 个和 4 个。仿真和实时性试验结果表明,精简控制集可在保持与传统控制集性能基本相当的同时,减少遍历次数,将运行时长分别降低至传统控制集运行时长的 53.31%、19.98% 和 12.57%。

### 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

李耀华进行了方案设计、内容总结与论文撰写,种国臣、郭伟超、徐志雄和王自臣进行了仿真编程,高赛、王政钦进行了实时性试验,张鑫泉、董瑞齐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 Li Yaohua. The simulation programming was performed by Chong Guochen, Guo Weichao, Xu Zhixiong, and Wang Zichen. The real-time experiment was conducted by Gao Sai and Wang Zhengqin. The manuscript was revised by Zhang Xinquan and Dong Ruiqi. 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] KARAMANAKOS P, GEYER T. Guidelines for the design of finite control set model predictive controllers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 7434-7450.
- [4] 齐昕, 苏涛, 周珂, 等. 交流电机模型预测控制策略发展概述 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6408-6418.
- [5] QI X, SU T, ZHOU K, et al. Development of AC motor model predictive control strategy: An overview [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6408-6418.
- [5] 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.
- [ 6 ] 李自成, 王亚文, 王后能, 等. 基于有限集电流预测控制的永磁同步电机转矩脉动抑制[J]. *电机与控制应用*, 2020, 47(8): 13-18+28.
- LI Z C, WANG Y W, WANG H N, et al. Torque ripple suppression of permanent magnet synchronous motor based on finite set current predictive control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(8): 13-18+28.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 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 on permanent magnet synchronous motor current control techniques based on model predictive control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(9): 1-11.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 颜朝斌, 杨公德, 杨明发. 永磁同步电机新型模型预测电流控制[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(5): 91-100.
- YAN C B, YANG G D, YANG M F. New model predictive current control of permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(5): 91-100.
- [ 11 ] 李耀华, 种国臣, 刘子焜, 等. 基于二阶超局部模型的永磁同步电机两步无模型预测电流控制[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(12): 39-49.
- LI Y H, CHONG G C, LIU Z K, et al. Two-step model-free predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on second-order ultralocal model [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(12): 39-49.
- [ 12 ] 李耀华, 王孝宇, 吴庭旭, 等. 带 LC 滤波器的永磁同步电机多步模型预测电流控制[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(11): 21-30.
- LI Y H, WANG X Y, WU T X, et al. Multi-step model predictive current control of permanent magnet synchronous motor with LC filter [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(11): 21-30.
- [ 13 ] XU Y, SUN Y, HOU Y. Multi-step model predictive current control of permanent-magnet synchronous motor [J]. *Journal of Power Electronics*, 2020, 20: 176-187.
- [ 14 ] KARAMANAKOS P, GEYER T, OIKONMOU N, et al. Direct model predictive control: A review of strategies that achieve long prediction intervals for power electronics [J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2014, 8(1): 32-43.
- [ 15 ] GEYER T, QUEVEDO D. Performance of multistep finite control set model predictive control for power electronic [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(3): 1633-1644.
- [ 16 ] 刘涛, 习金生, 宋站锋, 等. 基于多核并行计算的永磁同步电机有限集模型预测控制策略[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(1): 107-119.
- LIU T, XI J S, SONG Z F, et al. Finite control set model predictive control of permanent magnet synchronous motor based on multi-core parallel computing [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(1): 107-119.
- [ 17 ] 王从刚, 何凤有, 曹晓东, 等. 基于 FPGA 的三电平逆变器模型预测电流控制策略数字实现[J]. *电机与控制应用*, 2013, 40(4): 47-50.
- WANG C G, HOU F Y, CAO X D, et al. Digital realization of model prediction current control method for three-level inverter based on FPGA [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2013, 40(4): 47-50.
- [ 18 ] YANG C Y, LIU K, HU M J, et al. FPGA-based extended control set model predictive current control with a simplified search strategy for permanent magnet synchronous motor [J]. *Electronics*, 2023, 12: 4726.

- [19] 李耀华, 师浩浩, 孟祥臻. 表面式永磁同步电机直接转矩控制系统简化预测控制策略[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(4): 96-103.  
LI Y H, SHI H H, MENG X Z. Simplified predictive control for direct torque control of surface permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(4): 96-103.
- [20] 周雅夫, 张霖, 王翰涛, 等. 车用永磁同步电机 FCS-MPC 方法研究[J]. 电力电子技术, 2019, 53(1): 42-45.  
ZHOU Y F, ZHANG L, WANG H T, et al. Research on FCS-MPC method of permanent magnet synchronous motor for vehicle [J]. Power Electronics, 2019, 53(1): 42-45.
- [21] 李耀华, 王孝宇, 陈桂鑫, 等. 永磁同步电机多步模型预测电流控制球形编码研究[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(9): 1683-1695.  
LI Y H, WANG X Y, CHEN G X, et al. Multi-step model predictive current control of permanent magnet synchronous motor based on sphere decoding [J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(9): 1683-1695.
- [22] 李耀华, 苏锦仕, 吴庭旭, 等. 基于事件触发的永磁同步电机多步模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(9): 17-21.  
LI Y H, SU J S, WU T X, et al. Multi-step model prediction torque control of permanent magnet synchronous motor based on event triggering [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(9): 17-21.
- [23] 沈坤, 章兢, 王坚. 一种多步预测的变流器有限控制集模型预测控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 37-44.  
SHEN K, ZHANG J, WANG J. A model predictive control scheme of multi-step prediction finite control set for converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 37-44.
- [24] 李耀华, 王孝宇, 刘子焜, 等. 表贴式永磁同步电机多步模型预测电流控制简化策略[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(6): 85-95.  
LI Y H, WANG X Y, LIU Z K, et al. Simplified multi-step predictive current control for surface permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(6): 85-95.
- [25] HABIBULLAH M, LU D D, XIAO D, et al. A simplified finite-state predictive direct torque control for induction motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3964-3975.
- [26] 李耀华, 刘子焜, 王孝宇, 等. 永磁同步电机模型预测转矩控制简化控制策略[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(10): 1793-1805.  
LI Y H, LIU Z K, WANG X Y, et al. Simplified control strategies of model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(10): 1793-1805.
- [27] 李耀华, 苏锦仕, 秦辉, 等. 表贴式永磁同步电机多步预测控制简化算法[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(11): 122-131.  
LI Y H, SU J S, QIN H, et al. Simplified multi-step predictive control for surface permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(11): 122-131.
- [28] 李耀华, 刘东梅, 陈桂鑫, 等. 基于神经网络的永磁同步电机模型预测电流控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(10): 109-122.  
LI Y H, LIU D M, CHEN G X, et al. Neural-network-based model predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(10): 109-122.
- [29] 李耀华, 杨启东, 曲亚飞. 自适应变电压矢量 PMSM 直接转矩控制开关表[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 73-83.  
LI Y H, YANG Q D, QU Y F, et al. Adaptive variable voltage vectors switching table in direct torque control for PMSM [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(9): 75-83.

收稿日期:2024-11-15

收到修改稿日期:2025-02-01

作者简介:

李耀华(1980-),男,博士,副教授,研究方向为电机电控与新能源汽车技术,nuaaliyaohua@126.com;

\*通信作者:李耀华(1980-),男,博士,副教授,研究方向为电机电控与新能源汽车技术,nuaaliyaohua@126.com。