

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*

李耀华¹, 王孝宇¹, 张勇², 陈桂鑫¹, 刘子焜¹, 刘东梅¹, 任超¹, 吴庭旭¹

(1. 长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064;

2. 双龙集团上海防爆电机盐城股份有限公司, 江苏 盐城 224007)

摘要: 针对表贴式永磁同步电机(PMSM)多步模型预测电流控制过程中运算量大的问题, 提出一种成本函数优化计算的多步模型预测控制。成本函数优化计算采用事件触发机制, 通过设置成本函数阈值动态精简多步预测的运算量。仿真结果表明: 成本函数优化计算的多步模型预测电流控制性能良好, 与传统方法完全等价, 控制效果相当。基于 STM32H743 单片机平台, 优化方法和传统方法单控制周期执行时间。试验结果表明: 对于多步预测, 优化算法可减少单控制周期执行时间, 两步预测减小至 77.71%, 三步预测减小至 53.95%, 四步预测减小至 39.76%, 五步预测减少至 33.48%, 在控制性能与传统方法相当条件下, 提高系统实时性能。

关键词: 永磁同步电机; 有限控制集; 多步预测; 成本函数优化计算; 事件触发

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)05-0017-09

doi: 10.12177/emca.2023.015

Cost Function Optimization Calculation for Multi-Step Model Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor*

LI Yaohua¹, WANG Xiaoyu¹, ZHANG Yong², CHEN Guixin¹, LIU Zikun¹, LIU Dongmei¹, REN Chao¹, WU Tingxu¹

(1. School of Automotive, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Shanghai Explosion Proof Motor Yancheng Corp., Ltd., Shuanglong Group, Yancheng 224007, China)

Abstract: Aiming at the problem of large amount of calculation in the process of multi-step model predictive current control of surface mounted permanent magnet synchronous motor (PMSM), a multi-step model predictive control with optimal calculation of cost function is proposed. The optimization calculation of cost function adopts the event trigger mechanism, and the calculation amount of multi-step prediction is dynamically reduced by setting the threshold of cost function. Simulation results show that the multi-step model predictive current control performance of cost function optimization calculation is good, which is completely equivalent to the traditional method, also the control effect is equivalent. Based on STM32H743 single chip microcomputer platform, the optimization method and traditional method single control cycle execution time. Experimental results show that for multi-step prediction, the optimization algorithm can reduce the single control cycle execution time, two-step prediction to 77.71%, three-step prediction to 53.95%, four-step prediction to 39.76% and five-step prediction to 33.48%. It is shown that the control performance is the same as traditional calculation method, but the real-time performance is improved.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); finite control set; multi-step prediction;

收稿日期: 2022-11-03; 收到修改稿日期: 2023-01-14

* 基金项目: 西安市碑林区科技计划项目(GX2252)

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。

cost function optimization calculation; event triggering

0 引言

永磁同步电机(PMSM)有限状态集模型预测电流控制(FCS-MPCC)利用逆变器开关状态离散和数量有限的特点,将逆变器所有可能的电压矢量遍历代入至电流预测模型,得到未来时刻的电流预测值,并设计实现多控制目标综合性能的成本函数,选择成本函数最小值时对应的电压矢量作用于下一时刻^[1-5]。模型预测多步电流控制可预测未来多个时刻的电流值,获取更长周期的预测信息。但随着预测步长的增长,遍历代入的电压矢量序列呈指数级别增长,计算量较大,实时性较差。因此,降低计算量就成为多步预测的研究重点^[6-7]。文献[8]提出一种两步模型预测控制算法,在第一步遍历 N 个备选控制量,从中选取最优和次优控制量,在此基础上再次遍历 N 个控制量进行第二步模型预测,从 $2N$ 个控制序列中选择最优控制序列。该模型预测控制算法仅基于第一步预测最优和次优电压矢量进行第二步遍历,会舍弃部分电压矢量序列,因此得到的电压矢量序列并不一定是全局最优。文献[9-10]提出两步模型预测控制精简策略:在第一步模型预测遍历 N 个备选控制量,保持相同控制量进行第二步模型预测,即相同的控制量连续作用于系统进行两步预测,得到 N 个控制量序列。该模型预测控制算法在第二步预测过程中逆变器开关切换次数相同,使得逆变器开关切换达不到控制效果。文献[11]提出优化的多步模型预测控制策略:在第一步遍历 N 个备选控制量,选取最优和次优控制量,将最优和次优控制量连续作用于系统进行两步模型预测,从2个控制量序列中选择最优控制量序列。该模型预测控制算法从2个电压矢量序列中选择最优电压矢量序列,具有较大的局限性。文献[12]提出了基于蚁群算法的模型预测控制方法,将连续时刻逆变器开关状态视为蚁群运动轨迹,并根据优化目标在较优路径上留下较强信息素作为正反馈以减少计算量。但该算法本身运算量较大,且只能求得局部最优解。文献[13]提出一种基于最小二乘法的PMSM多步预测控制方法,将控制算法转变成为一个最小二乘问题,以此来进行多步预测,但仍然

采用遍历法求解,计算量并未减少。文献[14]对目标函数值预先设定上下限,对计算步数设定阈值,以简化多步预测控制过程,减少平均计算量。该算法虽然能够求得全局最优解,但仅限于线性问题,并不适用于求解将电流误差和开关状态作为成本函数的模型预测控制问题。文献[15-16]提出一种简化多步算法,与常规预测模型中使用的平方根和三角函数等复杂运算相比,该算法仅使用查找表和加法运算进行多步预测,避免对所有可能切换序列步骤进行探索。该算法应用于多步模型预测控制时并不能准确求得最优解。文献[17]提出精简备选电压集合的简化算法,但一定程度牺牲了系统性能。文献[18]基于事件触发原理精简计算量,但牺牲模型预测控制滚动优化的特征,转矩和磁链脉动有所增大。文献[19-20]提出球形编码算法,将球形编码算法应用于感应电机的多步模型预测电流控制,在球形编码算法过程中,球形半径不断缩小,使得求解最优开关序列的运算量减小。

本文建立表贴式PMSM有限集多步模型预测电流控制状态空间数学模型以及两电平三相电压源逆变器数学模型,对多步预测控制的成本函数计算方式进行优化,通过事件触发机制减少成本函数的冗余计算。结果表明:在成本函数优化计算的多步模型预测控制下,PMSM系统运行良好,运行效果与传统多步模型预测电流控制相当,计算量得到极大减小,从而提高多步预测控制的实时性。

1 表贴式PMSM多步模型预测电流控制

1.1 PMSM数学模型

转子旋转坐标系下,PMSM定子 d 轴和 q 轴电压方程如下所示:

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

式中: u_d 和 u_q 分别为定子电压矢量在 d 轴和 q 轴上的分量; i_d 和 i_q 分别为定子电流矢量在 d 轴和 q 轴上的分量; L_d 和 L_q 为定子电感在 d 轴和 q 轴

上的分量; ψ_f 为永磁体磁链; R_s 为定子电阻; ω_e 为电角速度。

由于采样周期 T_s 较短, 定子电流的导数可用一阶前向欧拉离散法表示, 如下所示:

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (2)$$

式中: $i_d(k)$ 和 $i_q(k)$ 分别为 k 时刻定子电流矢量在 d 轴和 q 轴的分量; $i_d(k+1)$ 和 $i_q(k+1)$ 分别为 $(k+1)$ 时刻定子电流矢量在 d 轴和 q 轴的分量; T_s 为采样周期。

由欧拉离散法则可求得下一时刻的定子 d 轴和 q 轴电流的预测值, 如下所示:

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

式中: $\omega_e(k)$ 为 k 时刻电角速度。

对于两电平三相电压源逆变器, 定义开关变量 S_a, S_b, S_c 取值 0 或 1, 分别表示上桥臂导通下桥臂关断和下桥臂导通上桥臂关断。

两电平三相电压源逆变器的开关状态 (S_{abc}) 共有 8 组, 对于不同的开关状态可以得到 8 个不同的基本电压矢量, 包括 6 个非零电压矢量 $U_1(100)$ 、 $U_2(110)$ 、 $U_3(010)$ 、 $U_4(011)$ 、 $U_5(001)$ 、 $U_6(101)$ 和 2 个零电压矢量 $U_0(000)$ 、 $U_7(111)$ 。

逆变器开关状态变量 $\mathbf{u} = [S_a \ S_b \ S_c]^T$ 与静止坐标系下基本电压矢量的 α 轴和 β 轴分量关系式如下所示:

$$[u_\alpha \ u_\beta]^T = \frac{2U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (4)$$

α - β 静止坐标系下, 8 种开关状态对应的基本电压矢量在 α 轴和 β 轴上的电压分量如表 1 所示。

表 1 基本电压矢量在静止坐标系下的分量

| 电压矢量 | S_{abc} | u_α | u_β |
|-------|-----------|--------------|--------------------|
| U_0 | 000 | 0 | 0 |
| U_1 | 100 | $2U_{dc}/3$ | 0 |
| U_2 | 110 | $U_{dc}/3$ | $U_{dc}/\sqrt{3}$ |
| U_3 | 010 | $-U_{dc}/3$ | $U_{dc}/\sqrt{3}$ |
| U_4 | 011 | $-2U_{dc}/3$ | 0 |
| U_5 | 001 | $-U_{dc}/3$ | $-U_{dc}/\sqrt{3}$ |
| U_6 | 101 | $U_{dc}/3$ | $-U_{dc}/\sqrt{3}$ |
| U_7 | 111 | 0 | 0 |

定子 d 轴和 q 轴电压与 α 轴和 β 轴电压矢量的变换关系如下所示:

$$\begin{cases} u_d(k) = u_\alpha \cos[\theta_e(k)] + u_\beta \sin[\theta_e(k)] \\ u_q(k) = -u_\alpha \sin[\theta_e(k)] + u_\beta \cos[\theta_e(k)] \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\theta_e(k)$ 为 k 时刻转子位置角。

1.2 多步模型预测控制

多步有限集模型预测电流控制在当前 k 时刻预测未来多个时刻的 d 轴和 q 轴电流。 $(k+1)$ 时刻及之后时刻的速度不可知, 由于转子惯性常数较大, 在采样频率较高的条件下, 可近似认为转子转速保持不变。

对于多步预测, $(k+i)$ 时刻的转子角位置实时变化, 每一步均需计算下一时刻转子角位置值, 如下所示:

$$\theta_e(k+i) \approx \theta_e(k) + i \cdot \omega_e(k) \cdot T_s \quad (6)$$

式中: $\theta_e(k+i)$ 为第 i 步预测过程中的转子角位置, $1 < i < n$, n 为多步模型预测控制的预测步数。

由式(5)可知, 第 i 步预测的转子角位置和电压矢量在 d 轴和 q 轴上分量如下所示:

$$\begin{cases} u_d(k+i) = u_\alpha \cos[\theta_e(k+i)] + u_\beta \sin[\theta_e(k+i)] \\ u_q(k+i) = -u_\alpha \sin[\theta_e(k+i)] + u_\beta \cos[\theta_e(k+i)] \end{cases} \quad (7)$$

式中: $u_d(k+i)$ 和 $u_q(k+i)$ 为第 i 步预测过程中电压矢量在 d 轴和 q 轴上的分量; u_α 和 u_β 为电压矢量 \mathbf{U}_s 在静止坐标系下 α 轴和 β 轴电压分量。

因此, 多步模型预测控制第 $i(1 < i < n)$ 步的 d 、 q 轴电流预测值递推表达式如下所示:

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

式中： $i_d(k+i)$ 和 $i_q(k+i)$ 为第 i 步预测过程中 d 轴和 q 轴电流预测值； $i_d(k+i-1)$ 和 $i_q(k+i-1)$ 为第 $i-1$ 步预测过程中 d 轴和 q 轴电流预测值； $\omega_e(k)$ 为 k 时刻电角速度。

1.3 成本函数

多步模型预测电流控制成本函数 $g(n)$ 包含电流误差和开关损耗,如下所示:

$$g(n) = \sum_{i=1}^n [i_d(k+i) - i_d^*(k+i)]^2 + \sum_{i=1}^n [i_q(k+i) - i_q^*(k+i)]^2 \cdot \sum_{i=1}^n \lambda \| \mathbf{u}(k+i-1) - \mathbf{u}(k+i-2) \|_2^2 \quad (9)$$

式中： $i_d^*(k+i)$ 和 $i_q^*(k+i)$ 为 $k+i$ 时刻 d 轴和 q 轴电流参考值； λ 为权重系数。

式(9)中,成本函数中第一部分为 $1-n$ 步预测电流和参考电流之间的误差;第二部分为逆变器 $1-n$ 步与其上一步开关切换次数。由于在第 i 步预测过程中的 d 轴和 q 轴电流参考值是未知量,在采样频率较高时,采用第 k 时刻的 d 轴和 q 轴电流参考值代替,如下所示:

$$\begin{cases} i_d^*(k) \approx i_d^*(k+i), i=1,2,\dots,n \\ i_q^*(k) \approx i_q^*(k+i), i=1,2,\dots,n \end{cases} \quad (10)$$

式中： $i_d^*(k)$ 和 $i_q^*(k)$ 为 k 时刻 d 轴和 q 轴电流参考值。

因此, n 步模型预测电流控制的成本函数如下所示:

$$g(n) = \sum_{i=1}^n [i_d(k+i) - i_d^*(k)]^2 + [i_q(k+i) - i_q^*(k)]^2 \cdot$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda \| \mathbf{u}(k+i-1) - \mathbf{u}(k+i-2) \|_2^2 \quad (11)$$

2 成本函数优化计算的 SMPSM 多步模型预测电流控制

传统成本函数计算包括电流预测过程、成本函数计算过程、成本函数寻优过程三个部分。对于 n 步模型预测电流控制,电流预测过程将基本电压矢量遍历,得到 8^n 组 n 步电流预测值和 n 步逆变器开关次数;成本函数计算过程将电流预测值和逆变器开关次数计算得到 8^n 个 n 步成本函数;成本函数寻优过程找寻 8^n 个成本函数中的最小值及其对应的最优电压矢量序列。

多步模型预测控制每一步预测过程是在上一步预测电流的基础上进行预测,对于多步电压矢量序列 $U_x^1 U_x^2 U_x^3 \dots U_x^i \dots U_x^n$ 和 $U_x^1 U_x^2 U_x^3 \dots U_x^i \dots U_x^n$,如果第 $1 \sim i$ 步电压矢量均相同,第 $i+1 \sim n$ 步电压矢量不同,则第 $1 \sim i$ 步的预测电流和逆变器开关次数相同。但传统成本函数计算,将 8^n 组 n 步电流预测值和 n 步逆变器开关次数计算得到 8^n 个 n 步成本函数,则对于前 $1 \sim i$ 步电压矢量相同的多步电压矢量序列,在计算对应成本函数时,前 $1 \sim i$ 步则产生冗余的成本函数计算。同时,成本函数是累计求和的过程,随着步数的增大而增大。因此,当电压矢量序列的成本函数计算至某一步时,数值已表明其不可能成为最小值,则无需进行之后的计算。因此,可通过优化成本函数计算来减少重复的成本函数计算和不必要的多步预测的运算。基于优化成本函数计算的 n 步模型预测控制流程如图1所示,其中, j 为对 $1 \sim 8$ 个基本电压矢量进行遍历的临时变量作为遍历序号。

由图1可知,相对于传统成本函数计算,成本函数计算具有如下两部分的优化:

(1) 在每一步预测过程中,将当前的预测电流和逆变器开关次数计算得到当前预测步的成本函数 g_i , n 步预测完成之后得到每一步预测的成本函数 g_1, g_2, \dots, g_n ,相加得到 n 步预测成本函数 $g = g_1 + g_2 + \dots + g_n$ 。在每一步预测计算当前预测步的成本函数,对于存在相同电压矢量的多步电压矢量序列,计算成本函数时将对应预测步的成本

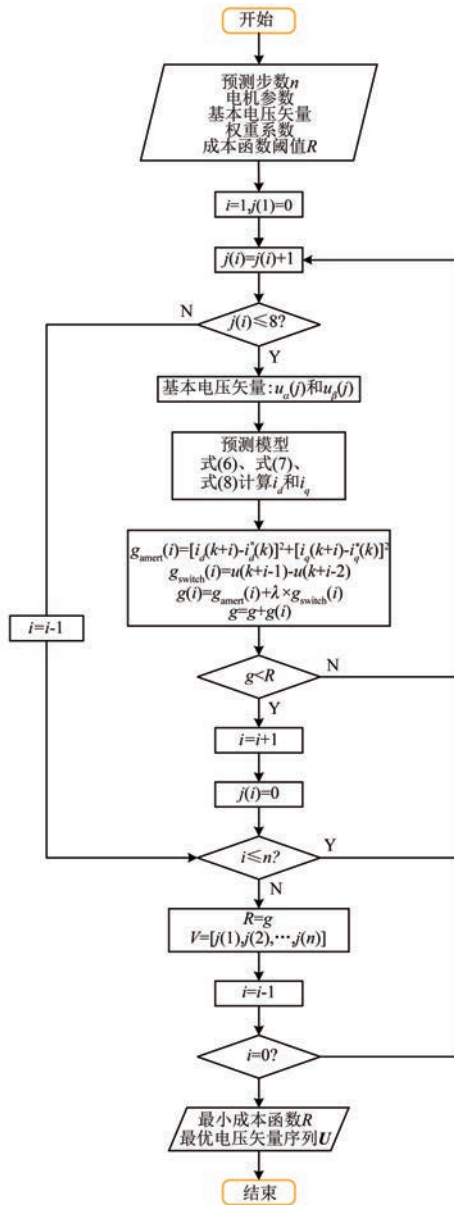


图 1 成本优化函数计算的模型预测算法流程图

函数相加即可,从而减少对预测电流误差和逆变器开关次数的重复计算。

(2) 设置多步成本函数阈值 R , 在每一步预测过程中, 将当前和之前预测步的成本函数相加, 与多步成本函数阈值 R 进行比较, 如果小于 R , 继续进行之后的预测; 如果大于 R , 则停止进行之后的预测。当达到 n 步预测时, 如果 n 步成本函数小于 R , 将 n 步成本函数值更新为新的多步成本函数阈值。该成本函数计算优化方式采用事件触发机制, 利用多步预测成本函数计算为累加和及最终选择电压矢量序列为最小成本函数的特

点, 计算过程中不断减小成本函数阈值 R , 从而减少不必要的多步预测计算。以三步预测为例, 为简化计算, 设初始成本函数阈值为 $U_0 - U_0 - U_0$ 电压矢量序列对应的成本函数 R 。开始遍历第二步电压矢量 $U_0 - U_1$ 。第二步电压矢量序列对应的成本函数为 $g = g(U_0) + g(U_1)$ 。如果其大于阈值 R , 则无需进行第三步遍历, 开始遍历 $U_0 - U_2$ 。如果不大于阈值, 则继续遍历第三步电压矢量。如果第三步电压矢量序列对应的成本函数大于阈值, 则表明其并非最优电压矢量序列, 将其舍弃。如果第三步电压矢量序列对应的成本函数小于阈值, 则将其成本函数作为阈值, 继续遍历至所有开关序列, 并将最终阈值对应的电压矢量序列的第一个电压矢量作为输出。

3 仿真验证

对成本函数优化计算的 PMSM 多步模型预测电流控制进行仿真分析。基于 MATLAB/Simulink 建立 PMSM 模型预测电流控制系统的离散仿真模型, 采样周期为 5×10^{-5} s。直流母线电压为 312 V。转速 PI 调节器参数为 $K_p = 0.14$, $K_i = 7$, PI 调节器输出上下限为 $[-30, 30]$ 。权重系数为 $\lambda = 1$ 。参考转速初始为 750 r/min, 2 s 时阶跃至 -750 r/min, 参考转矩初始为 15 N·m, 1 s 时阶跃至 -15 N·m, 3 s 时再次阶跃至 15 N·m。仿真时长为 4 s, 采样周期为 5×10^{-5} s, 采样点数共计 80 000 个。

仿真用 PMSM 参数如表 2 所示。

表 2 仿真用表贴式 PMSM 参数

| 电机参数 | 参数值 |
|--|---------|
| 定子电阻/ Ω | 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/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | 0.008 9 |
| 黏滞阻尼/ $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$ | 0.005 |

以五步预测为例, 在上文仿真条件下, 基于成本函数优化计算的 PMSM 五步模型预测电流控制仿真波形如图 2~图 8 所示。

仿真波形表明: 基于成本函数优化计算的

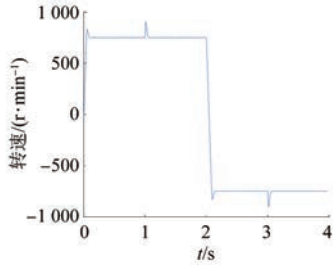


图2 电机转速

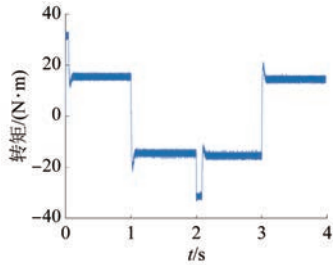


图3 电机转矩

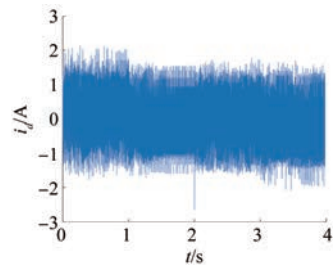


图4 电机 d 轴电流

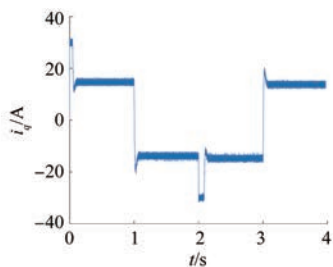


图5 电机 q 轴电流

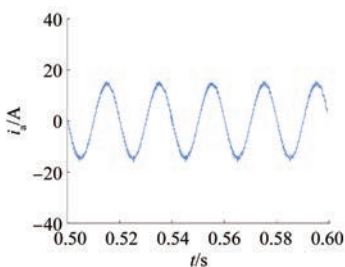


图6 电机 a 相定子电流

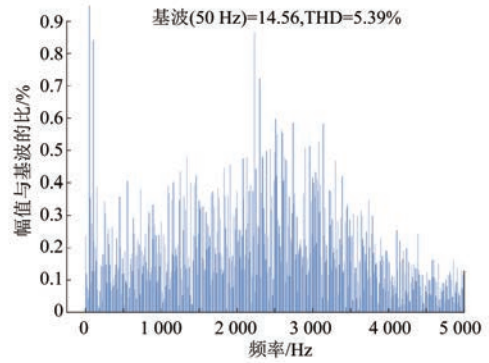


图7 电机 a 相定子电流 FFT

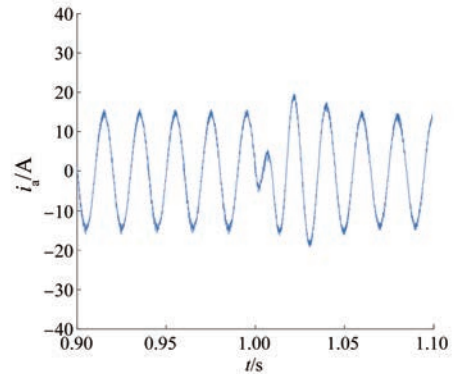


图8 0.9~1.1 s 电机 a 相定子电流

PMSM 五步模型预测控制运行良好,可实现四象限运行,可较好追踪参考转速和负载转矩的变化,定子 dq 轴电流波动较小,定子电流波形为正弦分布波形,电流谐波含量较小。施加负载转矩时,定子电流迅速改变以达到追踪负载转矩的效果。

dq 轴定子电流标准差如下:

$$\sigma_{i_d} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (i_{dn} - \bar{i}_d)^2} \quad (12)$$

$$\sigma_{i_q} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (i_{qn} - \bar{i}_q)^2} \quad (13)$$

系统平均开关频率如下:

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

式中: σ_{i_d} 、 σ_{i_q} 分别为定子 d 轴和 q 轴电流分量标准差; N 为总数据个数; \bar{i}_d 、 \bar{i}_q 分别为定子 d 轴和 q 轴电流的平均值; $N_{switching}$ 为开关次数; t 为仿真时间。

不同预测步长的基于成本函数优化计算模型预测控制的仿真结果如表 3 所示。

表 3 结果表明,对于成本函数优化计算的多

步模型预测控制,不同预测步数控制下,电机系统均正常运行,控制性能良好。基于成本函数优化计算的与传统成本函数计算方式的模型预测电流控制两者完全等价,控制效果完全相同。

对于多步预测,在最苛刻条件下,优化成本函数计算与传统成本函数计算的计算次数如表 4 和

表 5 所示。此时,优化成本函数遍历所有的电压矢量序列。由表 4 可知,优化成本函数通过减少重复的成本函数计算,可有效减小成本函数计算次数,两步预测减小至 56.25%,三步预测减小至 38.02%,四步预测减小至 28.36%,五步预测减小至 22.86%。

表 3 基于传统和优化成本函数计算的多步模型预测控制与传统多步模型预测控制仿真结果

| 步长 | 策略 | σ_{i_d}/A | | | σ_{i_q}/A | | a 相电流 THD/% | f_{ave}/kHz |
|----|------|------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|----------------|---------------|
| | | 0~4.0 s | 0.2~0.8 s | 1.2~1.8 s | 2.2~2.8 s | 3.2~3.8 s | | |
| 1 | 传统计算 | 0.669 8 | 0.662 6 | 0.639 7 | 0.624 1 | 0.652 5 | 5.72 | 3.82 |
| | 优化计算 | 0.669 8 | 0.662 6 | 0.639 7 | 0.624 1 | 0.652 5 | 5.72 | 3.82 |
| 2 | 传统计算 | 0.584 7 | 0.607 2 | 0.618 1 | 0.600 8 | 0.594 3 | 5.28 | 3.35 |
| | 优化计算 | 0.584 7 | 0.607 2 | 0.618 1 | 0.600 8 | 0.594 3 | 5.28 | 3.35 |
| 3 | 传统计算 | 0.622 1 | 0.656 4 | 0.636 4 | 0.649 5 | 0.649 4 | 5.66 | 3.57 |
| | 优化计算 | 0.622 1 | 0.656 4 | 0.636 4 | 0.649 5 | 0.649 4 | 5.66 | 3.57 |
| 4 | 传统计算 | 0.615 0 | 0.619 8 | 0.623 6 | 0.632 7 | 0.629 8 | 5.47 | 3.53 |
| | 优化计算 | 0.615 0 | 0.619 8 | 0.623 6 | 0.632 7 | 0.629 8 | 5.47 | 3.53 |
| 5 | 传统计算 | 0.608 7 | 0.624 4 | 0.631 2 | 0.619 3 | 0.628 1 | 5.39 | 3.46 |
| | 优化计算 | 0.608 7 | 0.624 4 | 0.631 2 | 0.619 3 | 0.628 1 | 5.39 | 3.46 |

表 4 传统成本函数计算

| 步数 | 传统成本函数计算 | | | | | 总次数 |
|----|----------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | g_1 | g_2 | g_3 | g_4 | g_5 | |
| 1 | 8 | - | - | - | - | 8 |
| 2 | 64 | 64 | - | - | - | 128 |
| 3 | 512 | 512 | 512 | - | - | 1 536 |
| 4 | 4 096 | 4 096 | 4 096 | 4 096 | - | 16 384 |
| 5 | 32 768 | 32 768 | 32 768 | 32 768 | 32 768 | 163 840 |

表 5 优化成本函数计算

| 步数 | 优化成本函数计算 | | | | | 总次数 |
|----|----------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | g_1 | g_2 | g_3 | g_4 | g_5 | |
| 1 | 8 | - | - | - | - | 8 |
| 2 | 8 | 64 | - | - | - | 72 |
| 3 | 8 | 64 | 512 | - | - | 584 |
| 4 | 8 | 64 | 512 | 4 096 | - | 4 680 |
| 5 | 8 | 64 | 512 | 4 096 | 32 768 | 37 448 |

优化成本函数计算在减少重复成本函数计算的基础上采用事件触发机制,通过对比多步成本函数阈值,对每一步成本函数进行判断,以此去除冗余的预测过程,以达到精简多步预测的目的。

由于采用事件触发机制,对于成本函数计算简化具有一定的随机性。以五步模型预测控制为例,在各个控制周期内成本函数总计算次数散点图如图 9 所示。

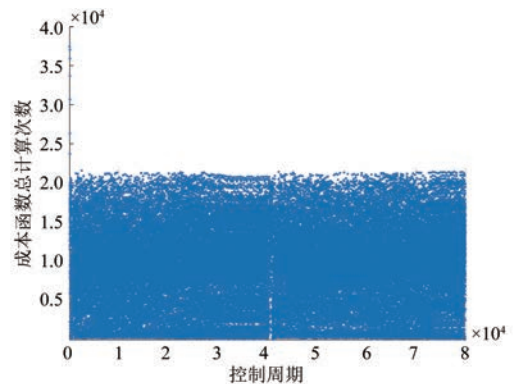


图 9 五步模型预测控制优化成本函数计算总次数

由图 9 可知,优化的成本函数计算对计算量的减小虽然具有一定的随机性,但从整体结果来看,成本函数计算总次数大大减少,使得整个运行时间范围内预测过程得到精简。

4 硬件实时性验证

基于 STM32H743 单片机平台分别对传统成

本函数、改进成本函数和优化成本函数的多步模型预测电流控制进行单步实时性验证。

对于优化成本函数的多步模型预测控制,在仿真过程中选择计算最苛刻的控制周期,即成本函数计算次数最大的控制周期,将该控制周期的状态量和电机参数作为单步实时性试验的输入参

数,将该控制周期的逆变器状态输出作为单步实时性试验的输出。多步模型预测电流控制单步实时性试验成本函数包含为电流误差和开关次数,权重系数 λ 为 1。单步实时性试验的输入参数如表 6 所示。

表 6 单控制周期实时性验证输入数据

| 预测步数 | i_d/A | i_q/A | i_{d-ref}/A | i_{q-ref}/A | $\omega_e/(rad \cdot s^{-1})$ | θ_e/rad | 上一时刻逆变器开关状态 |
|------|----------|-----------|---------------|---------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| 1 | 1.195 7 | -13.404 0 | 0 | -30 | 314.062 1 | 623.670 6 | 111 |
| 2 | -0.462 8 | -13.493 9 | 0 | -30 | 314.043 2 | 623.704 1 | 010 |
| 3 | -0.355 4 | -12.690 6 | 0 | -30 | 313.990 9 | 623.718 7 | 010 |
| 4 | 0.259 4 | -13.807 3 | 0 | -30 | 314.054 9 | 623.719 6 | 010 |
| 5 | 0.997 0 | -13.997 3 | 0 | -30 | 314.053 9 | 623.704 6 | 111 |

采用传统成本函数计算和优化成本函数计算的多步模型预测控制的单步实时性验证如表 7 所示。

表 7 多步模型预测控制策略的单步执行时间 ms

| MPCC 策略 | 传统成本函数计算 | 优化成本函数计算 |
|---------|----------|----------|
| 单步 | 0.035 | 0.035 |
| 二步 | 0.166 | 0.129 |
| 三步 | 1.303 | 0.703 |
| 四步 | 12.639 | 5.025 |
| 五步 | 118.344 | 39.625 |

由实时性验证结果可知,在优化成本函数计算最苛刻的条件下,与传统成本函数计算相比,对于单步预测球形编码并没有减少执行时间。但对多步预测来说,优化成本函数计算可降低执行时间,并且随着预测步数的增加,执行时间大幅减少,两步模型预测执行时间减小至 77.71%,三步模型预测执行时间减小至 53.95%,四步模型预测执行时间减小至 39.76%,五步模型预测执行时间减少至 33.48%。优化成本函数计算和传统成本函数计算的预测电流控制最终选择的最优开关序列完全一致也表明两者本质完全等价。

5 结 语

成本函数优化计算利用多步成本函数累加的性质,采用依次遍历计算方式,减少重复的预测成本函数计算,并利用多步预测成本函数计算为累加递增求和及最终选择电压矢量序列为最小成本

函数的特点,采用事件触发机制,减少冗余的多步预测计算。仿真结果表明,在成本函数优化计算的多步模型预测电流控制下,PMSM 系统运行良好,可实现四象限运行。基于成本函数优化计算的与传统成本函数计算方式的模型预测电流控制两者完全等价,控制效果完全相同。单控制周期执行时间实时性试验数据表明在成本函数优化计算最苛刻的条件下,与传统模型预测控制相比,成本函数优化计算两步预测执行时间减小至 77.71%,三步预测减小至 53.95%,四步预测减小至 39.76%,五步预测减少至 33.48%。

【参 考 文 献】

- [1] CORTES P, KAZMIERKOWSKI M P, KENNEL R M, et al. Predictive control in power electronics and drives[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2008, 55(12): 4312.
- [2] RODRIGUEZ J, KENNEL R M, ESPINOZA J R, et al. High-performance control strategies for electrical drives: an experimental assessment [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 812.
- [3] RODRIGUEZ J, KAZMIERKOWSKI M P, ESPINOZA J R, et al. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 9(2): 1003.
- [4] KOURO S, PEREZ M A, RODRIGUEZ J, et al. Model predictive control: MPC's role in the evolution of power electronics[J]. IEEE Industrial Electronics

- Magazine, 2015, 9(4): 8.
- [5] 柳志飞, 杜贵平, 杜发达. 有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 58.
- [6] 郑则东, 王奎, 李永东, 等. 采用模型预测控制的交流电机电流控制器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 118.
- [7] KARAMANAKOS P, GEYER T, OIKONOMOU 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.
- [8] GEYER T, QUEVEDO D E. Performance of multistep finite control set model predictive control for power electronics [J]. IEEE Transactions on power electronics, 2015, 30(3): 1633.
- [9] 沈坤, 章兢, 王坚. 一种多步预测的交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.
- [10] NGO B Q V, RODRIGUEZ-AYERBE P, OLARU S. Model predictive control with two-step horizon for three-level neutral-point clamped inverter [C]//2015 20th International Conference on Process Control, 2015.
- [11] 郭鹏, 何志兴, 罗安, 等. 基于多步模型预测控制的模块化多电平换流器环流控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 137.
- [12] 韩星屹, 罗响, 赵继敏. 基于蚁群算法的永磁同步电机多步模型预测控制[J]. 计算机仿真, 2021, 38(1): 187.
- [13] 张闻涛, 杨玮林. 基于最小二乘法的永磁同步电机多步预测控制[J]. 电子测量技术, 2020, 43(6): 58.
- [14] GEYER T. Computationally efficient model predictive direct torque control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 2804.
- [15] XIA C, ZHOU Z, WANG Z, et al. Computationally efficient multi-step direct predictive torque control for surface-mounted permanent magnet synchronous motor [J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(5): 805.
- [16] HASSIBI B, VIKALO H. On the sphere-decoding algorithm I. expected complexity [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(8): 2806.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] VIKALO H, HASSIBI B. On the sphere-decoding algorithm II. generalizations, second-order statistics, and applications to communications [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(8): 2819.
- [20] GEYER T, QUEVEDO D E. Multistep finite control set model predictive control for power electronics [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6836.

[主要栏目]

- 控制与应用技术
- 研究与设计
- 故障诊断与保护
- 新能源发电与局域电网
- 新能源汽车技术
- 发电机组及其控制
- 测试技术与测控系统
- 材料与工艺
- 电机生产及质量管理
- 电力电子变流器技术
- 智能制造
- 节能应用
- 实用技术成果