

基于事件触发的永磁同步电机多步模型 预测转矩控制*

李耀华, 苏锦仕, 吴庭旭, 张鑫泉, 崔康东, 陈 昕, 徐志雄, 兰奋龙
(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 针对多步模型预测控制(MPC)计算量大的问题,将事件触发机制引入到永磁同步电机(PMSM)多步模型预测转矩控制(MPTC),建立基于转矩误差、磁链误差和连续触发次数的事件触发机制。当满足事件触发条件时,相应的采样周期无需多步预测计算,可从已有的控制序列中选择对应的电压矢量。仿真结果表明,基于事件触发的 PMSM MPTC 可行,由于事件触发时,牺牲滚动优化的特性,转矩和磁链脉动轻微增大,开关频率和平均运算量有所降低。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 多步预测; 事件触发

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)09-0017-05

doi: 10.12177/emca.2022.089

Multi-Step Model Prediction Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Event Triggering*

LI Yaohua, SU Jinshi, WU Tingxu, ZHANG Xinquan, CUI Kangjian, CHEN Xin,
XU Zhixiong, LAN Fenlong
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Multi-step model prediction control (MPC) of permanent magnet synchronous motor (PMSM) has a large computation. In order to solve the problem, the event trigger mechanism is introduced into PMSM multi-step model predictive torque control (MPTC). The event trigger mechanism is based on torque error, stator flux error and times of continuous event triggering. If the event is triggered, the MPTC uses the voltage vector of control sequence in the most recent multi-step prediction directly to calculate the sampling period and does not carry out the multi-step prediction. Simulation results show that the PMSM MPTC based on event trigger can work properly. Compared with conventional MPTC, the torque and stator flux ripples of PMSM MPTC increase mildly as rolling optimization is sacrificed when the event is triggered, but average switching frequency and computational burden decrease.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive torque control (MPTC); multi-step prediction; event trigger

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)有限控制集模型预测转矩控制(FCS-MPTC)遍历逆变器所有可用的开关状态,将其代入至磁链和转矩预测模型,计算得到未来

时刻的磁链和转矩值,设计体现控制性能的成本函数,通过输出令成本函数最小的电压矢量,实现MPTC^[1-5]。与直接转矩控制相比,MPTC通过成本函数定量评价选出控制性能最优的电压矢量,且容易实现多目标控制和非线性约束,但其存在计算量

收稿日期: 2022-06-17; 收到修改稿日期: 2022-07-18

* 基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2021JM-163);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。

大,实时性差的问题^[6]。对于多步预测,随着预测步长增加,需要遍历代入的电压矢量序列呈指数级增长,使得多步 MPTC 的实时性问题更加严重^[7-8]。

为了提高多步预测的实时性,文献[9]建立了转矩和磁链解耦的简化多步 MPC,使用查表法和加法运算进行多步预测,与含有平方根和三角函数的传统 MPC 相比,运算量减小。文献[10-11]提出一种两步预测的简化算法,在单个控制周期内仅考虑最优和次优开关状态,确保在 2 个控制周期内所选开关状态最优。文献[12]将预测时域分成 2 部分,对距离当前时刻较近的部分,使用较小的采样时间进行采样,对距离当前时刻较远的部分采用较大的采样时间进行采样。文献[13]通过确定参考电压所在的扇区,用扇区边界的 2 个电压矢量和零电压矢量组成控制集,将 7 个备选电压矢量精简至 3 个,减小需遍历的电压矢量序列个数,但其舍弃部分电压矢量序列,求得的最优解可能不是全局最优解。

本文将事件触发机制引入至 PMSM 多步 MPTC,预先设定触发事件,在每个采样时刻判断预定事件是否触发,以决定相应的采样周期是从最近序列中选择最优控制量,还是进行多步预测并选择最优控制量,通过部分牺牲模型预测的滚动优化特性来有效减小系统运算量,并仿真验证基于事件触发机制的 PMSM MPTC 可行性。

1 PMSM 多步 MPTC

x - y 坐标系下,表贴式 PMSM k 时刻定子磁链矢量为 $\psi_s(k)$,施加电压矢量 $U_s(k)$ 后, $k+1$ 时刻定子磁链矢量为 $\psi_s(k+1)$ 如图 1 所示。

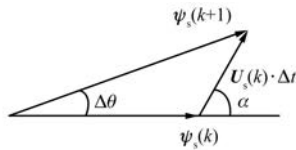


图 1 $k+1$ 时刻定子磁链矢量

由此可得 N 步预测中,PMSM 第 i 步的定子磁链幅值、定子磁链角度、转矩角和转矩的预测计算表达式分别如下^[14-15]:

$$\begin{aligned} \psi_s^N(k+i) &= \psi_s^N(k+i-1) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}, \\ q &= \frac{2U_{dc}T_s}{3\psi_s^N(k+i-1)} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \theta_s^N(k+i) &= \theta_s^N(k+i-1) + \\ &\arcsin \frac{q\sin\alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \delta^N(k+i) &= \delta^N(k+i-1) + \\ &\arcsin \frac{q\sin\alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T_e^N(k+i) &= \\ &\frac{3p\psi_f}{2L_d}\psi_s^N(k+i-1) \cdot \sin[\delta^N(k+i-1)] \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\psi_s^N(k+i)$ 、 $\theta_s^N(k+i)$ 、 $\delta^N(k+i)$ 、 $T_e^N(k+i)$ 分别为 N 步预测中第 i 步预测过程的定子磁链幅值、定子磁链角度、转矩角、电机转矩预测值, i 为正整数且 $1 \leq i \leq N$; α 为第 i 步施加电压矢量 $U_s(k)$ 与 x 轴夹角; U_{dc} 为直流母线电压; T_s 为采样周期; p 为电机极对数; ψ_f 为永磁体磁链; L_d 为 d 轴电感。

N 步预测的成本函数如下:

$$\begin{aligned} g &= \sum_{i=1}^N g_i = \sum_{i=1}^N \left\{ \left[\frac{T_e^*(k+i) - T_e^N(k+i)}{T_e^*(k+i)} \right]^2 + \right. \\ &\quad \left. \left[\frac{\psi_s^*(k+i) - \psi_s^N(k+i)}{\psi_s^*(k+i)} \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $T_e^N(k+i)$ 和 $T_e^*(k+i)$ 分别为第 i 步的电机转矩预测值和参考值; $\psi_s^N(k+i)$ 和 $\psi_s^*(k+i)$ 分别为第 i 步预测的定子磁链幅值预测值和参考值。

由于系统采样频率较高,可近似将 k 时刻参考值作为 $k+i$ 时刻参考值,即:

$$\begin{cases} T_e^*(k+i) \approx T_e^*(k), i=1,2,\dots,N \\ \psi_s^*(k+i) \approx \psi_s^*(k), i=1,2,\dots,N \end{cases} \quad (6)$$

PMSM 多步 MPTC 系统由式(1)~式(4)可计算得到施加电压矢量序列每一步的成本函数,由式(5)可求出施加电压矢量序列对应的成本函数,选择令成本函数最小的电压矢量序列作为最优序列,并将最优序列的第一个电压矢量作用于电机系统,下一时刻重新进行多步预测。以两电平三相逆变器为例,其可产生 7 个基本电压矢量,则 N 步 MPTC 需遍历代入的电压矢量序列数目为 7^N 。因此,随着步长的增大,多步预测的计算量将急剧增大。

2 基于事件触发的多步预测

为了减少多步预测的运算量,将事件触发机制引入至多步 MPTC 系统。预先设定反映转矩和定子

磁链误差的事件和相应阈值,在连续的采样周期内,如果预定事件得到触发时,则相应的采样周期内不进行多步预测计算,而是从最近的一次多步预测计算得到的最优控制序列中选择对应的电压矢量。

以五步预测为例,假设在 k 时刻进行五步预测计算,则得到如图 2 所示的最优控制序列,即为最近控制序列,其中含有 5 个电压矢量,第 1 个控制量 U_2 作用于逆变器。在 $k+1$ 时刻,判断是否满足事件触发条件,如果满足触发条件,则直接将最近控制序列的第 2 个电压矢量 U_4 作为最优控制量直接作用于逆变器,无需多步预测。如果不满足,则进行多步预测。以此类推,如果事件连续触发,在 $k+5$ 时刻,由于最近控制序列的所有电压矢量均已被使用,则第 $k+5$ 采样时刻需要进行多步预测计算,重新更新控制序列。

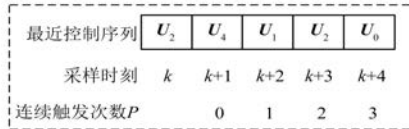


图 2 事件触发机制示例图

为了体现控制性能,将磁链误差和转矩误差设置为触发事件。将转矩误差绝对值 < 设定的阈值记为事件 E_T ,将磁链误差绝对值 < 设定的阈值记为事件 E_ψ ,分别如下所示:

$$E_T: |T_e^* - T_e| < \lambda_T \quad (7)$$

$$E_\psi: |\psi_s^* - \psi_s| < \lambda_\psi \quad (8)$$

式中: T_e^* 和 T_e 分别为采样时刻转矩期望值与实际值; ψ_s^* 和 ψ_s 分别为采样时刻定子磁链幅值期望值与实际值; λ_T 和 λ_ψ 分别为转矩误差和磁链误差的阈值,可根据实际需求设置。

当采样时刻转矩误差满足式(7)时, E_T 取值为 1,否则 E_T 取值为 0。当采样时刻磁链误差满足式(8)时, E_ψ 取值为 1,否则 E_ψ 取值为 0。

受最优控制序列的控制变量个数限制,连续触发次数应小于 $N-1$,即当最近控制序列的所有电压矢量均已被使用,此时必须进行多步预测。将连续触发次数 P 与预测步数 N 的关系记为事件 E_P :

$$E_P: P < N - 1 \quad (9)$$

$k+1$ 时刻,连续触发次数 P 初始值为 0,如果事件触发,则 $P+1$ 。以此类推,当 $k+N-1$ 时刻,事件依然触发,则 $P=N-1$ 。当 $k+N$ 时刻,则不满足式(9),事件不触发,需要在当前采样周期重新进行多步预测计算。

事件触发机制由 E_T 、 E_ψ 和 E_P 3 个基本事件组成,触发机制逻辑表达式如下:

$$E = E_T \wedge E_\psi \wedge E_P \quad (10)$$

当触发机制的输出值 E 为 1(True)时,表示事件触发机制被触发,对应的采样周期无需进行多步预测计算,直接从最近控制序列中选择对应的最优控制量。当触发机制的输出值 E 为 0(False)时,表示未达到触发条件,继续进行 N 步模型预测,更新最优控制序列,控制流程图如图 3 所示。

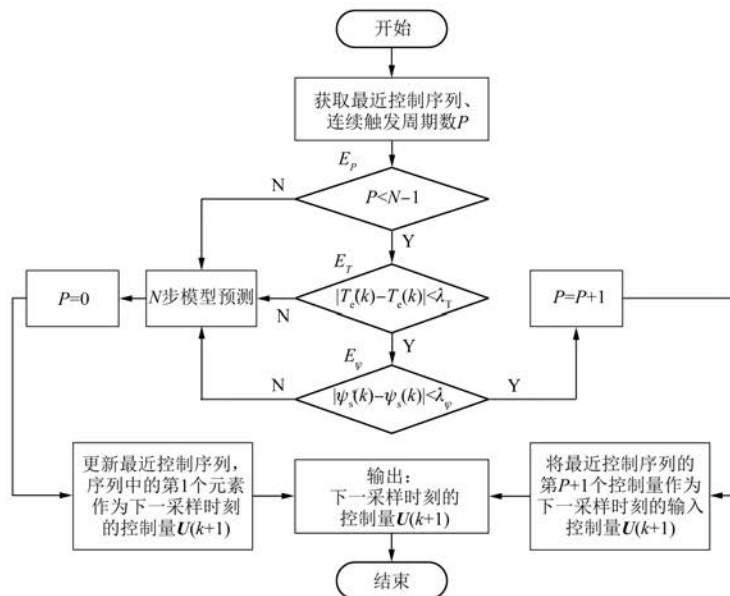


图 3 事件触发机制流程图

3 仿真验证

基于 MATLAB/Simulink 建立表贴式 PMSM 传统 MPTC 和事件触发机制的 MPTC 的仿真模型。仿真用表贴式 PMSM 参数如表 1 所示。

表 1 仿真用表贴式 PMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	02
d 轴电感 L_d/H	0.008 5
q 轴电感 L_q/H	0.008 5
转子磁链 ψ_f/Wb	0.175
极对数 p	4
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.089
黏滞阻尼 $F/(N \cdot m \cdot s)$	0.005

仿真时长 2 s, 采样周期 T_s 为 50 μs 。直流母线电压 U_{dc} 为 312 V。初始参考转速为 500 r/min, 1 s 时阶跃至 750 r/min, 1.5 s 时阶跃至 500 r/min。初始负载转矩 10 N·m, 1 s 时阶跃至 20 N·m。参考定子磁链幅值 0.3 Wb。转速环 PI 参数 $K_p = 10, K_i = 5 \times 10^{-5}$ 。转矩误差绝对值事件触发阈值为 0.8 N·m, 定子磁链幅值误差绝对值事件触发阈值为 0.008 Wb。

以预测步数 $N=5$ 为例, 传统 MPTC 和采用事件触发机制 MPTC 仿真波形如图 4~图 9 所示。

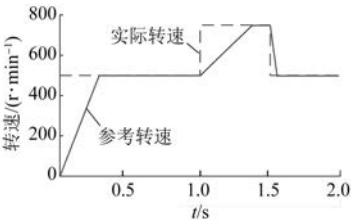


图 4 传统 MPTC 电机转速

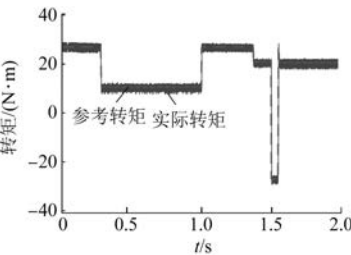


图 5 传统 MPTC 电机转矩

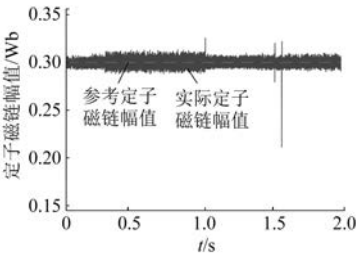


图 6 传统 MPTC 定子磁链幅值

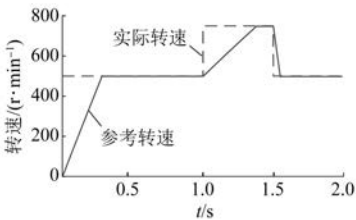


图 7 事件触发机制的 MPTC 电机转速

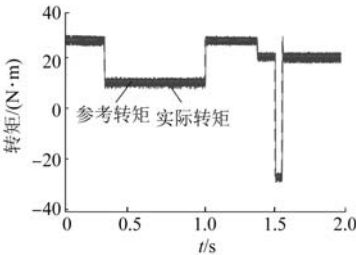


图 8 事件触发机制的 MPTC 电机转矩

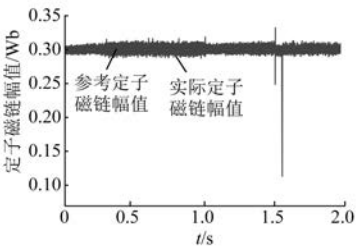


图 9 事件触发机制的 MPTC 定子磁链幅值

采用转矩脉动均方根误差 (RMSE)、磁链脉动 RMSE、系统平均开关频率对电机控制效果进行评价:

$$T_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \tag{11}$$

$$\psi_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (12)$$

$$f_{\text{ave}} = \frac{N_{\text{sw}}}{6 \times t} \quad (13)$$

式中: T_e 和 T_e^* 分别为转矩实际值与参考值; ψ_s 和 ψ_s^* 分别为定子磁链幅值的实际值与参考值; n 为采样周期个数; N_{sw} 为仿真过程中逆变器开关总次数; t 为仿真总时长。

当预测步数 $N=5$, 传统 MPTC 和采用事件触发机制的 MPTC 控制性能如表 2 所示。

表 2 不同策略下的 MPTC 控制性能

控制策略	$T_{\text{RMSE}}/(N \cdot \text{m})$	$\psi_{\text{RMSE}}/\text{Wb}$	$f_{\text{ave}}/\text{kHz}$
传统 MPTC	1.455 6	0.004 5	5.67
事件触发机制 MPTC	1.470 1	0.006 2	3.72

当转矩和磁链误差较小时, 采用事件触发机制 MPTC 直接从之前采样周期得到的多步电压矢量序列中选择对应的电压矢量, 牺牲了 MPC 滚动优化的特性, 控制性能受到影响。由仿真结果可知, 采用事件触发机制的 MPTC 转矩和磁链脉动均有所增大, 但幅度较小, 且平均开关频率有所降低。

对于多步预测, 每一步均需采用式(1)~式(4)所示的预测模型进行预测计算。每使用一次预测模型代表一次预测计算。对于传统 MPTC, 每个采样周期的预测计算次数固定, 对于采用事件触发机制的 MPTC, 预测计算次数并不固定。因此, 统计仿真时长内每个采样周期的预测计算次数, 并求和除以总采样周期, 可得平均预测计算次数。

对于五步预测, 传统 MPTC 的每个采样周期的预测计算次数为 $7+7^2+7^3+7^4+7^5=19\ 607$ 次。经统计, 采用事件触发机制的 MPTC E_T 、 E_ψ 和 E_P 同时触发的采样周期共有 20 991 个, 此时无需多步预测, 直接使用最近序列对应的电压矢量, 预测计算为 0 次。因此, 采用事件触发机制的五步 MPTC 的平均预测计算次数为 9 317.99 次, 运算量减小至传统 MPTC 的 47.52%, 说明事件触发机制可有效降低系统运算量。

4 结 语

本文以转矩误差、磁链误差和连续触发次数作为基本触发事件, 建立基于事件触发的 PMSM

多步 MPTC 系统。当满足事件触发条件时, 相应的采样周期无需进行多步预测计算, 而是从已有的控制序列中选择对应的电压矢量, 以减小运算量。仿真结果表明, 采用事件触发机制的 MPTC 可行, 由于其牺牲了 MPC 滚动优化的特性, 转矩和磁链脉动均有轻微增大, 但开关频率和平均运算量得到有效降低。

【参考文献】

- [1] KOURO S, CORTES P, VARGAS R, et al. Model predictive control—a simple and powerful method to control power converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 1826.
- [2] 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 Informatics, 2013, 9(2): 1003.
- [3] 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.
- [4] KARAMANAKOS P, LIEGMANN E, GEYER T, et al. Model predictive control of power electronic systems: methods, results, and challenges [J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, 1: 95.
- [5] 李耀华, 苏锦仕, 秦辉, 等. 永磁同步电机有限控制集模型预测转矩控制系统研究 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(12): 8.
- [6] 李耀华, 刘子焜, 刘东梅, 等. 永磁同步电机直接转矩控制与模型预测转矩控制比较研究 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48(7): 18.
- [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] 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.

(下转第 36 页)