

高效能同步磁阻电机数据驱动型 模型预测控制方法^{*}

曹晓冬, 徐 晴, 赵双双, 陈 飞, 朱 君

(国网江苏省电力有限公司营销服务中心, 江苏 南京 210019)

摘 要: 结合电力电子系统有限开关状态特性, 近年来有限状态集模型预测控制(FCS-MPC)利用被控对象离散预测模型在同步磁阻电机(SynRM)能效提升系统中得到广泛应用。然而, FCS-MPC 建模过程严重依赖电机数学模型, 电机参数精确性会直接影响系统控制效果。为解决上述问题, 提出一种数据驱动型模型预测控制(DD-MPC)方法。该方法不利用任何电机数学模型信息, 仅基于电机运行时的输入输出数据关系, 通过对数据的处理分析实现“边建模、边控制”。此外, 为保证 DD-MPC 系统的收敛性和稳定性, 设计了一种 DD-MPC 输入输出数据关系的高更新率实现方法, 利用最近输出的三电压矢量对应电流变化信息, 推演并更新全局电压矢量对应电流变化关系。最后, 基于 25 kW 样机对 DD-MPC 控制效果进行测试与分析。与传统 FCS-MPC 方法对比, 所提方法在保留 FCS-MPC 快速性和灵活性等优势的基础上, 可有效提升系统的鲁棒性和稳定性。

关键词: 同步磁阻电机; 数据驱动; 高更新率; 鲁棒性; 稳定性

中图分类号: TM352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)05-0014-06

doi: 10.12177/emca.2022.021

Data-Driven Model Predictive Control for High Performance Synchronous Reluctance Motor^{*}

CAO Xiaodong, XU Qing, ZHAO Shuangshuang, CHEN Fei, ZHU Jun

(Marketing Service Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: In recent years, using the discrete model of the object and considering the finite switching state characteristics of power electronic systems, finite control set model predictive control (FCS-MPC) has been widely used in synchronous reluctance motor (SynRM) drive system to promote the energy efficiency. However, the FCS-MPC modeling process heavily depends on the SynRM mathematical model, and the accuracy of motor parameters directly affects the control effect. To solve the above problems, a data-driven MPC (DD-MPC) method is proposed. This method does not need the SynRM mathematical model information. It only utilizes the input-output data relationship of the SynRM. So the “synchronization of modeling and control” is realized. In addition, in order to ensure the convergence and stability of DD-MPC system, a DD-MPC data relation with high update rate is designed. By analyzing the current change information corresponding to the recent three-voltage-vector output, the corresponding current change relation of the global voltage vectors is deduced and updated. Finally, the control effect of DD-MPC is tested and analyzed based on a 25 kW prototype. Compared with the traditional FCS-MPC, the proposed method can effectively improve the robustness and stability, while maintaining the rapidity and flexibility of FCS-MPC.

Key words: synchronous reluctance motor; data driven; high update rate; robustness; stability

收稿日期: 2022-02-09; 收到修改稿日期: 2022-04-28

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划“科技助力 2020”项目(SQ2020YFF0426410); 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2021057)

作者简介: 曹晓冬(1990—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力需求侧协调控制、电力电子技术。

0 引言

同步磁阻电机(SynRM)具有转矩密度高、高效节能等特点,近年来在地铁、航空等领域应用广泛^[1-3]。与此同时,各类高性能驱动方法应运而生,有限状态集模型预测控制(FCS-MPC)^[4]便是其中之一。该方法以 SynRM 时域状态空间模型为基础,结合微分方程泰勒级数展开^[5],从而建立 SynRM 系统离散预测模型。上述过程不可避免地涉及多个 SynRM 电气参数,如电阻、电感和磁链^[6],然而对于实际工程场景,考虑到复杂且恶劣的工作环境, SynRM 参数受工作点、环境温度等多因素影响^[7-9],离线参数计算或在线参数辨识难度较大^[10-12]。

基于此,本文提出一种数据驱动型模型预测控制(DD-MPC)方法,基于系统输入输出数据关系实现“边建模、边控制”,并设计了一种 DD-MPC 输入输出数据关系的高更新率实现方法,保证系统稳定收敛。基于 25 kW 样机对 DD-MPC 控制效果进行测试与分析,与传统 FCS-MPC 方法相比,该方法保留了 FCS-MPC 的快速性和灵活性,并可以有效提升系统的稳定性。

1 FCS-MPC 电流预测过程

SynRM 调速系统预测电流控制的基本思想为:

- (1) 基于 SynRM 离散预测模型完成对各电压矢量所对应的转矩电流、磁链电流进行预测;
- (2) 根据调速系统控制目标,构建合理描述控制目标跟踪误差的价值函数 J ;
- (3) 进行在线滚动优化,满足 J 取值最小的电压矢量,将其作为最优电压矢量选定并输出。

为实现 SynRM 转矩、磁链高性能跟踪控制,本文设计价值函数 J ,表达式为

$$J = \| \mathbf{i}_{dq}^* - \hat{\mathbf{i}}_{dq}^z(k+N) \|^2, \quad z \in [0, \dots, 6] \quad (1)$$

式中: N 为预测时域,考虑到延时补偿需求取值, $N=2$; $\mathbf{i}_{dq}^*$ 为 d 、 q 轴电流期望值, $\mathbf{i}_{dq}^* = [i_d^*; i_q^*]$; $\hat{\mathbf{i}}_{dq}^z$ 为逆变器电压矢量 $\mathbf{u}^z$ 所对应的 d 、 q 轴电流预测值, $\hat{\mathbf{i}}_{dq}^z = [\hat{i}_d^z; \hat{i}_q^z]$ 。

$\mathbf{u}^z$ 表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{u}^z = \frac{2}{3} U_{dc} e^{j\frac{\pi}{3}(z-1)}, & z \in [1, \dots, 6] \\ \mathbf{u}^z = 0, & z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_{dc} 为逆变器直流母线电压。

图 1 给出了 SynRM 调速系统电流预测过程,式(1)中给出了描述转矩电流、磁链电流跟踪误差的简化二次型价值函数。可以看出,电流预测精度直接决定了预测电流控制的性能, FCS-MPC 与 DD-MPC 的核心差异也主要在此。为便于推演 DD-MPC 数据驱动原理,首先对 SynRM 数学模型进行分析:

$$\frac{d\mathbf{i}}{dt} = \begin{bmatrix} l_d & l_{dq} \\ l_{dq} & l_q \end{bmatrix}^{-1} \left(\mathbf{u} - R\mathbf{i} - \omega_{me} \begin{bmatrix} 0 & -L_q \\ L_d & 0 \end{bmatrix} \mathbf{i} \right) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{i}$ 为三相电流矢量; l_d 、 l_q 为 d 、 q 轴差模电感; l_{dq} 为 d 、 q 轴共模电感; ω_{me} 为电机机械角速度; L_d 、 L_q 为 d 、 q 轴等效电感; $\mathbf{u}$ 为定子端口电压; R 为定子等效电阻。

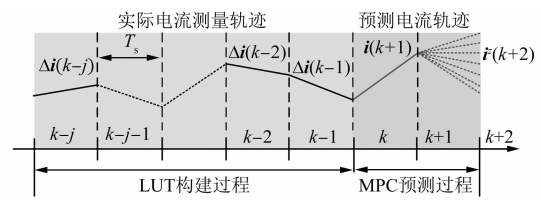


图1 电流预测过程分析

可以看出,式(3)中 SynRM 核心参数直接受工作点、环境温度等影响。以磁链参数为例,图 2 中给出了考虑饱和和效应影响的 SynRM 磁链变化规律,图中 I_n 为电机磁饱和额定电流。因此, FCS-MPC 为实现高精度电流预测需进行复杂的离线参数计算或在线参数辨识。

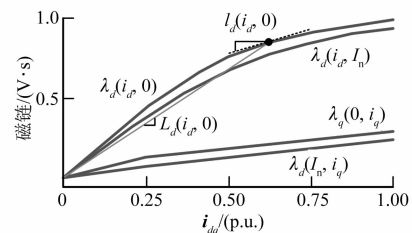


图2 考虑饱和和效应影响的 SynRM 磁链变化规律

假设式(3)中 SynRM 参数精确,根据前向差分原理,可将电压矢量 $\mathbf{u}^z$ 对应电流变化量预测值表示为

$$\Delta \hat{\mathbf{i}}^z(k+1) = \mathbf{A} \hat{\mathbf{i}}^z(k) + \mathbf{B} \mathbf{u}^z(k) \quad (4)$$

式中:参数矩阵 $\mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}$ 可由式(3)推导得出,此处不再赘述。

2 DD-MPC 电流预测过程

与基于参数模型的 FCS-MPC 电流变化量计算过程不同,DD-MPC 仅考虑电压矢量对应电流变化量间的输入输出关系,不涉及任何 SynRM 参数。DD-MPC 具体实现过程如下。

(1) 在 k 控制周期起始时刻,根据电压矢量 $\mathbf{u}^{k-1}$ 作用前后 SynRM 电流值,求解 $\mathbf{u}^z(k-1)$ 对应电流变化量:

$$\Delta \hat{\mathbf{i}}^z(k) = \hat{\mathbf{i}}^z(k) - \hat{\mathbf{i}}^z(k-1) \quad (5)$$

式中: $\hat{\mathbf{i}}^z(k)$ 、 $\hat{\mathbf{i}}^z(k-1)$ 分别为第 k 和 $k-1$ 周期起始时刻电流采样值。

在完成式(5)计算后,分别将对应的 d 、 q 轴电流变化量更新至查找表(LUT),同时反复重复上述 LUT 更新过程,经多个控制周期后,可构建覆盖全部 7 个电压矢量 $\mathbf{u}^z$ 对应电流变化量 $\Delta \hat{\mathbf{i}}^z$ 的完整 LUT。

(2) 根据价值函数 J 表达式可知,DD-MPC 需在每个控制周期完成对 7 个电压矢量对应的 $k+1$ 和 $k+2$ 时刻电流矢量的预测,即:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{i}}^z(k+1) = \hat{\mathbf{i}}^z(k) + \Delta \hat{\mathbf{i}}^z(k) \\ \hat{\mathbf{i}}^z(k+2) = \hat{\mathbf{i}}^z(k+1) + \Delta \hat{\mathbf{i}}^z(k+1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\hat{\mathbf{i}}^z(k+1)$ 、 $\hat{\mathbf{i}}^z(k+2)$ 分别表示 $k+1$ 、 $k+2$ 时刻电流矢量预测值; $\Delta \hat{\mathbf{i}}^z(k)$ 、 $\Delta \hat{\mathbf{i}}^z(k+1)$ 分别表示第 k 、 $k+1$ 周期电流变化量,均可通过查询 LUT 直接获得。

进一步分析式(5)中电流变化量 $\Delta \hat{\mathbf{i}}^z(k)$ 可知,其可被分解为两部分,即

$$\Delta \hat{\mathbf{i}}^z(k) = \delta \hat{\mathbf{i}}^0(k) + \delta \hat{\mathbf{i}}^z(k) \quad (7)$$

式中: $\delta \hat{\mathbf{i}}^0$ 为零电压矢量驱动下 SynRM 的电流变化量自然增长量, $\delta \hat{\mathbf{i}}^0 = [\delta \hat{i}_d^0; \delta \hat{i}_q^0]$; $\delta \hat{\mathbf{i}}^z$ 为有效电压矢量驱动下 SynRM 的电流变化量强制增长量, $\delta \hat{\mathbf{i}}^z = [\delta \hat{i}_d^z; \delta \hat{i}_q^z]$ 。

考虑到式(5)中电流变化量 $\Delta \hat{\mathbf{i}}^z(k)$ 由 SynRM 实际运行采样差值得到,显然当 SynRM 运行于不同工作点时,各电压矢量 $\mathbf{u}^z$ 对应的电流变化量 $\Delta \hat{\mathbf{i}}^z$ 存在差异,图 3 中定性给出了 SynRM 处于不同转子位置时 $\mathbf{u}^z$ 和 $\Delta \hat{\mathbf{i}}^z$ 矢量关系图,其中图 3

(a) 为 $\theta_{me} = 0$ 、图 3(b) 为 $\theta_{me} = \pi/3$ 。可以看出,不同转子位置下有效电压矢量所对应的 $\delta \hat{\mathbf{i}}^z$ 整体呈椭圆变化趋势,但矢量幅值和方向均有所差异,即 $\delta \hat{\mathbf{i}}^z = f(\mathbf{i}, z, \theta_{me})$ 。同理,零矢量对应电流变化量自然增长量满足 $\delta \hat{\mathbf{i}}^0 = f(\mathbf{i}, \omega_{me})$ 。

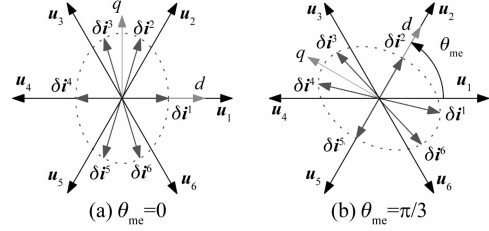


图 3 不同转子位置时电流变化量矢量关系

3 LUT 高更新率实现方法

前文介绍了 DD-MPC 电流预测过程,其预测精度与电流变化量更新频率密切相关,但实际系统运行时,不可避免地会出现某个电压矢量多个控制周期未被选中,引起 LUT 更新“停滞效应”。为此,下文设计了一种 DD-MPC 输入输出数据关系的高更新率实现方法,利用最近输出的三电压矢量对应电流变化信息,推演并更新全局电压矢量对应电流变化关系。具体包含两部分:(1) 电压三矢量识别;(2) 电流变化量重建。

图 4 中给出了 DD-MPC 查找表高更新率执行流程,下文将对上述两部分逐一展开介绍。

3.1 电压三矢量识别

从图 4 执行流程中可以看出,在完成 $k-1$ 控制周期电压矢量对应电流变化量 $\Delta \hat{\mathbf{i}}^z(k)$ 计算的基础上,所提方法并非直接将其更新至 LUT 中,而是通过选取最近的三矢量,旨在推演出全部电压矢量对应电流变化量信息,从而实现 LUT 全局更新。

3.2 电流变化量重建

假定最近一次更新的电压矢量 $\mathbf{u}^z(t_1)$ 中 $z=1$,其最近三电压矢量序列组合关系如图 5 所示,分为以下 5 种典型方式。

(1) 三个连续的有效电压矢量,如图 5(a),对应电流变化关系为

$$\begin{cases} \Delta \hat{\mathbf{i}}^0 = \Delta \hat{\mathbf{i}}^1 + \Delta \hat{\mathbf{i}}^3 - \Delta \hat{\mathbf{i}}^2; \Delta \hat{\mathbf{i}}^4 = 2\Delta \hat{\mathbf{i}}^0 - \Delta \hat{\mathbf{i}}^1 \\ \Delta \hat{\mathbf{i}}^5 = 2\Delta \hat{\mathbf{i}}^0 - \Delta \hat{\mathbf{i}}^2; \Delta \hat{\mathbf{i}}^6 = 2\Delta \hat{\mathbf{i}}^0 - \Delta \hat{\mathbf{i}}^3 \end{cases} \quad (8)$$

(2) 三个有效电压矢量,其中两个反向,如图 5(b),对应电流变化关系为

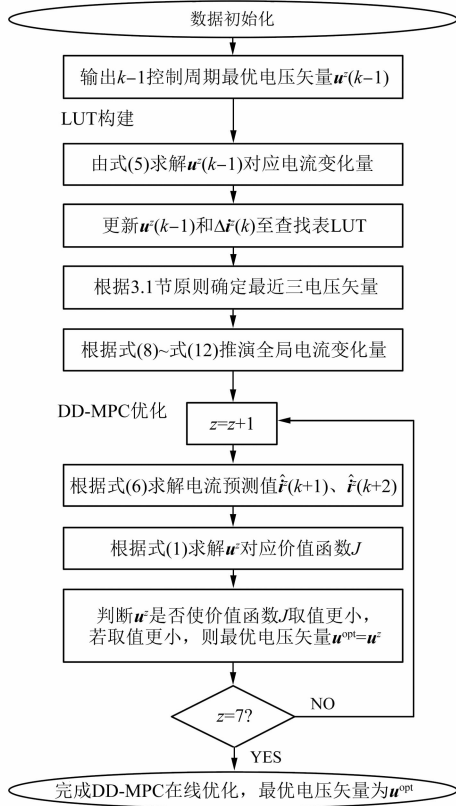


图4 DD-MPC 查找表高更新率实现流程

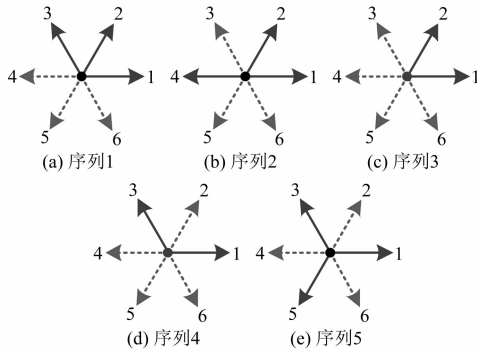


图5 最近三电压矢量序列组合关系

$$\begin{cases} \Delta i^0 = \frac{1}{2}(\Delta i^1 + \Delta i^4); \Delta i^3 = \Delta i^2 + \Delta i^4 - \Delta i^0 \\ \Delta i^5 = 2\Delta i^0 - \Delta i^2; \Delta i^6 = 2\Delta i^0 - \Delta i^3 \end{cases} \quad (9)$$

(3) 两个连续的有效电压矢量, 一个零电压矢量, 如图 5(c), 对应电流变化关系为

$$\begin{cases} \Delta i^4 = 2\Delta i^0 - \Delta i^1; \Delta i^3 = \Delta i^2 + \Delta i^4 - \Delta i^0 \\ \Delta i^5 = 2\Delta i^0 - \Delta i^2; \Delta i^6 = 2\Delta i^0 - \Delta i^3 \end{cases} \quad (10)$$

(4) 两个非连续的有效电压矢量, 一个零电

压矢量, 如图 5(d), 对应电流变化关系为

$$\begin{cases} \Delta i^4 = 2\Delta i^0 - \Delta i^1; \Delta i^2 = \Delta i^1 + \Delta i^3 - \Delta i^0 \\ \Delta i^5 = 2\Delta i^0 - \Delta i^2; \Delta i^6 = 2\Delta i^0 - \Delta i^3 \end{cases} \quad (11)$$

(5) 三个非连续的有效电压矢量, 如图 5(e), 对应电流变化关系为

$$\begin{cases} \Delta i^0 = \frac{1}{3}(\Delta i^1 + \Delta i^3 + \Delta i^5); \Delta i^2 = 2\Delta i^0 - \Delta i^5 \\ \Delta i^4 = 2\Delta i^0 - \Delta i^1; \Delta i^6 = 2\Delta i^0 - \Delta i^3 \end{cases} \quad (12)$$

至此, 式(8)~式(12)可完成全局电流变化量计算, 从而提高全局电流变化量更新频率。此外, 当最近一次更新的电压矢量 $u^z(t_1)$, $z=2\sim 6$ 时, 计算原理与 $z=1$ 类似, 此处不再赘述。

4 试验验证与分析

图 6 给出了 DD-MPC 软硬件系统架构。图 6(a) 为控制软件框图, 包含转速外环、MTPA 运算单元以及 DD-MPC, 其中 DD-MPC 在 k 时刻电流采样值基础上, 逐一完成三矢量序列识别、变化量重建以及 LUT 更新, 进而实现 $k+1$ 和 $k+2$ 时刻电流预测。图 6(b) 为测试平台硬件, 参数为, 电机极对数 4, 定子电阻 5.2Ω , d 轴等效电感 1.2 mH , q 轴等效电感 0.4 mH , 额定电压 380 V , 额定电流 25 A 。

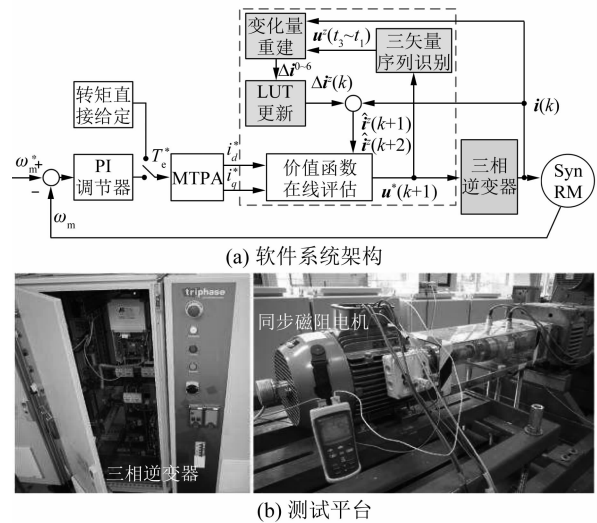


图6 DD-MPC 软硬件系统架构

首先, 进行 DD-MPC 稳态运行效果测试。图 7 给出了 FCS-MPC 与 DD-MPC 稳态电流控制效

果对比结果,其中 0.04 s 时刻 SynRM 调速系统电流预测过程由“参数模型”切换为“数据驱动模型”。FCS-MPC 受限于参数失配问题,稳态电流正弦度尚可,但存在较大纹波,而此时 DD-MPC 由于不依赖任何电机参数,稳态电流品质得到有效改善。此外,若 SynRM 参数受工作点、环境温度等因素进一步影响,FCS-MPC 对应稳态运行效果将进一步恶化,甚至 FCS-MPC 系统失稳后无法运行。

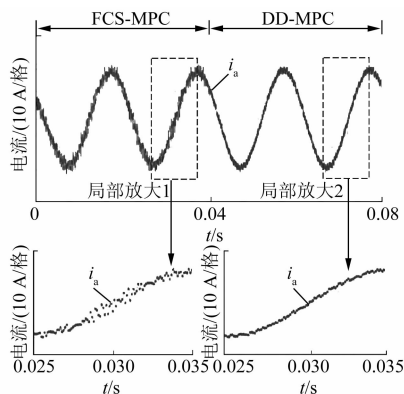


图7 FCS-MPC 与 DD-MPC 稳态电流控制效果对比结果

其次,进行 DD-MPC 动态运行效果测试。图 8 给出了 FCS-MPC 和 DD-MPC 动态电流控制效果对比结果。0~1 s 时电机处于额定转速下轻载运行,1 s 时负载突增至重载,可以看出 FCS-MPC 和 DD-MPC 均具备快速转矩响应性能,两者响应时间均小于 5 ms 且无动态调制振荡现象。进一步对比可知,由于 DD-MPC 直接对 SynRM 暂态运行过程进行在线建模,其固有的内在自学习特征保证了大扰动情况下系统响应的快速性,具体表

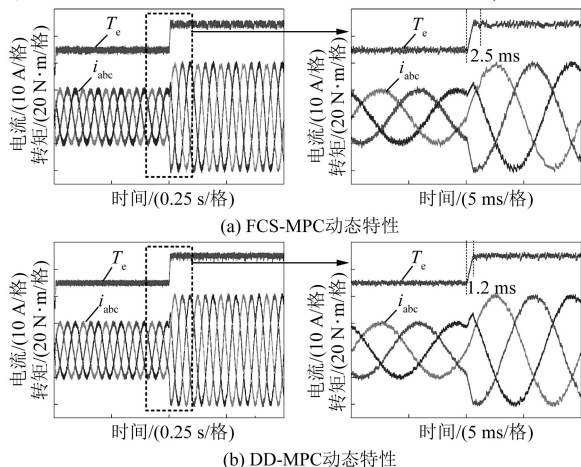


图8 FCS-MPC 与 DD-MPC 动态电流控制效果对比结果

现为 FCS-MPC 和 DD-MPC 两者响应时间分别为 2.5 ms 和 1.2 ms,响应性能提升了约 1 倍,且该特征不随时变参数变化。

最后,进行 DD-MPC LUT 高更新率实现方法有效性论证。图 9 给出了有无快速更新机制 LUT 电流变化量对比结果。图 9(a)中由于 DD-MPC 未引入快速更新机制,有效电压矢量对应电流变化量 δi^1 存在多处阶跃跳变,说明此时 LUT 中存储的电流变化量与前一控制周期实际发生值存在较大预测误差,零电压矢量对应电流变化量 δi^0 则较为平滑。图 9(b)中引入快速更新机制后, δi^1 和 δi^0 均较为平滑,LUT 存储变化量误差得到有效抑制。

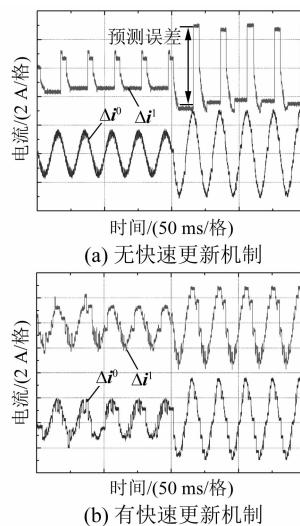


图9 有无快速更新机制 LUT 电流变化量对比结果

进一步对 SynRM 全速域范围内 DD-MPC 更新率情况进行统计,对比结果如图 10 所示。可以看出,随着 SynRM 转速增加,LUT 时间整体呈缩减趋势,同时在全速域范围内引入快速更新机制后 LUT 更新时间均有所提升,从而论证了所提 LUT 高更新率实现方法的有效性。

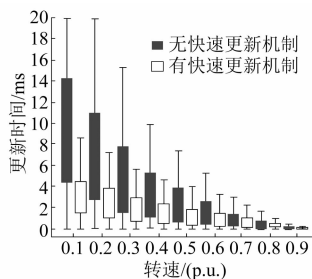


图10 快速更新机制投入前后统计对比结果

5 结 语

本文针对复杂环境下高效能 SynRM 参数失配引起的控制系统性能弱化问题,研究了一种数据驱动型模型预测控制方法,并基于 25 kW 测试样机对所提方法进行论证与分析,具体结论如下:

(1) DD-MPC 采用“数据驱动模型”代替传统 FCS-MPC 中的“参数模型”,整个调速过程不依赖任何 SynRM 参数,表现出较强的鲁棒性和稳定性。

(2) 快速更新机制的引入,可有效提升 LUT 在线更新频率,提升了 DD-MPC 在电机调速系统全速域范围的适用性。

(3) 所提 DD-MPC 方法仅依赖被控对象的输入电压矢量和电流变化量关联关系,可推广应用至同类型电力电子系统中。

【参 考 文 献】

- [1] 丁杰,尹亮. 地铁车辆永磁同步电机振动噪声测试及特性分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(9): 103.
- [2] 李岩,苏学军,李运. 基于航空高压直流电源系统的永磁同步电机起动发电系统设计[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(1): 60.
- [3] ZOU J, XU W, ZHU J, et al. Low-complexity finite control set model predictive control with current limit for linear induction machines[J]. IEEE Transactions

- on Industrial Electronics, 2018, 65(12): 9243.
- [4] 席裕庚,李德伟,林姝. 模型预测控制:现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222.
- [5] TARISCIOTTI L, FORMENTINI A, GAETA A, et al. Model predictive control for shunt active filters with fixed switching frequency[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 296.
- [6] 曹晓冬,杨世海,支亚薇,等. 基于有限状态自动机的电力电子混杂系统建模[J]. 电力电子技术, 2019, 53(6): 17.
- [7] 齐歌,张宁,高帅军. 双三相隔齿绕永磁同步电机容错性能分析[J]. 微特电机, 2019, 47(10): 11.
- [8] 王瑾,李岩,贾建国,等. 反电动势和凸极率对高效永磁同步磁阻电机稳态特性影响分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4688.
- [9] 李洋洋,张懿,戴磊,等. 基于 LMI 算法的永磁同步电机混沌控制[J]. 微特电机, 2021, 49(1): 40.
- [10] LIN C, LIU T, YU J, et al. Model-free predictive current control for interior permanent-magnet synchronous motor drives based on current difference detection technique [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 667.
- [11] 李宏韬. PMSM 驱动系统无模型预测控制[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.
- [12] LIN C, YU J, LAI Y, et al. Improved model-free predictive current control for synchronous reluctance motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3942.

• 下期论文预告 •

基于迭代滑模和扰动观测器的永磁同步电机转速控制

摘 要: 为了提高永磁同步电机(PMSM)控制系统的转速跟踪精度和鲁棒性,抑制其周期性转矩脉动,提出了一种基于积分滑模控制和迭代学习方法的 PMSM 单环控制策略。控制器采用单环滑模控制策略替代了传统的转速-电流级联控制,简化了控制系统的结构,提高了系统动态响应,通过引入迭代学习控制有效抑制了因电流谐波而导致的转矩脉动,提高了转速稳态控制精度。此外,针对系统存在的外部负载扰动、模型和参数不确定性等,设计了双重扰动观测器估计系统扰动量,提高了系统的鲁棒性。最后,针对所提复合控制策略进行了试验验证。试验结果表明,所提出的控制方法具有良好的动态性能、抗干扰能力和稳态控制精度。