

基于无权重 DMPTC 优化策略的 永磁同步电机调速系统

孙旭霞, 王若琪, 吴迪, 贺思俊, 韦明畅, 崔伟杰
(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM)模型预测转矩控制(MPTC)系统中存在的权重系数设计困难,以及稳态转矩、磁链脉动大的问题,提出了一种基于占空比优化的无权重模型预测转矩控制方法。首先建立PMSM 无权重 MPTC,每一控制周期内根据所定义的评估项计算交互误差,最小交互误差对应的电压矢量即为最优矢量,从而取消了权重系数设计。然后在无权重 MPTC 的基础上,引入占空比优化环节,所采用的占空比计算方法综合考虑了磁链和转矩因素,可有效抑制转矩、磁链脉动。仿真分析表明所提基于占空比优化的无权重模型预测转矩控制系统性能良好。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 权重系数; 占空比

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)08-0026-06

doi: 10.12177/emca.2023.085

PMSM Speed Control System Based on Weightless DMPTC Optimization Strategy

SUN Xuxia, WANG Ruoqi, WU Di, HE Sijun, WEI Mingyang, CUI Weijie

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the difficulty in designing weight coefficients, and the problems of large steady-state torque and flux ripple in permanent magnet synchronous motor (PMSM) model predictive torque control (MPTC) systems, a weightless model predictive torque control method based on duty cycle optimization is proposed. Firstly, a PMSM weightless MPTC is established, and interaction errors are calculated based on the defined evaluation term within each control cycle. The voltage vector corresponding to the minimum interaction error is the optimal vector, thus eliminating the weight coefficient design. Then, on the basis of the weightless MPTC, a duty cycle optimization link is introduced. The proposed duty cycle calculation method used comprehensively considers the factors of flux and torque, which can effectively suppress torque and flux ripple. The simulation results show that the performance of the proposed weightless model predictive torque control system based on duty cycle optimization is good.

Key words: permanent magnet synchronous motor(PMSM); model predictive torque control(MPTC); weight coefficient; duty cycle

0 引言

在传统能源智慧化改革的背景下,永磁同步电机作为一种节能的动力驱动装置被广泛应用于工业、制造业等各个领域。在电机和电力电子驱

动硬件装置固定的情况下,研究高性能控制策略是提升电机运行效率的重要途径^[1]。近年来,随着电力电子技术和驱动装置技术的发展,有限集模型预测转矩控制(FCS-MPTC)作为一种高性能控制策略,因其具有模型可预见性、可实现多变量

收稿日期: 2023-03-31; 收到修改稿日期: 2023-04-18

作者简介: 孙旭霞(1963—),女,博士,副教授,研究方向为智能电器及计算机控制。

控制、易处理非线性约束等优点,已成为电机控制领域的研究热点。

通常 FCS-MPTC 采用含转矩、磁链两个控制因素的目标函数来评估最优矢量,由于两者具有不同量纲,因此在构建目标函数时需设计合理的权重系数来调节两者的比重,而权重系数的确定缺乏理论依据,需要依靠大量试验得出,因此有必要研究一种无权重的 FCS-MPTC。文献[2-3]将传统 FCS-MPTC 的目标函数转换为仅包含定子磁链矢量或电压矢量单一控制变量的目标函数,消除了权重系数,但其解析推导过程比较复杂。文献[4]提出一种级联 MPTC 方法,通过依次评估两个单独的目标函数来选择最佳的电压矢量,整个过程无需电机模型的转换与推导即可实现无权重因子的调节,但是没有讨论交换目标函数执行顺序的可行性。

在实际 PMSM 调速系统中,由于硬件性能限制,采样周期不能无限减少,整个采样周期内施加的最优电压矢量可能导致过度调节,从而使电机稳态运行时会产生较大的转矩和磁链脉动。基于此,学者们提出了占空比优化的 MPTC 思想,并不断完善,以此来提高控制精度。文献[5]首次提出占空比优化 MPTC 的思想,采用转矩脉动最小化法计算占空比信息,试验验证了该策略可以显著降低稳态转矩脉动,但是无法抑制磁链脉动。文献[6]通过解析方法构造了仅包含电压矢量的目标函数,利用目标函数的几何意义提出了一种占空比计算方法,试验验证了所提方法的控制性能良好。文献[7]利用定子磁通矢量误差在有源电压矢量上的投影来确定所选取电压矢量的作用时间,使得仅包含磁链误差的目标函数值最小。上述通过几何关系在线确定有占空比信息的方法,其实现过程比较复杂,不利于工程应用。

本文以两电平电压源逆变器驱动的表贴式永磁同步电机为研究对象,针对前述传统 FCS-MPTC 策略存在的问题,采用基于最小交互误差的方法来解决权重系数设计困难的问题,并在此基础上,引入占空比优化思想,来有效抑制电机稳态运行时的转矩、磁链脉动,最后对所提控制方法进行仿真分析。

1 PMSM FCS-MPTC 系统

在永磁同步电机 FCS-MPTC 控制系统中,模

型预测控制算法的实施首先是要建立电机预测模型。在 dq 两相转子磁链同步旋转坐标系下,FCS-MPTC 系统的电流、磁链和转矩的预测模型如下:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = Ai_d(k) + \omega_e T_s i_q(k) + Bu_d(k) \\ i_q(k+1) = Ai_q(k) - \omega_e T_s i_d(k) + Bu_q(k) - C \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A = 1 - R_s T_s / L_s$; $B = T_s / L_s$; $C = T_s \omega_r \psi_f / L_s$; R_s 为定子电阻; T_s 为采样周期; $L_s = L_d = L_q$ 代表直交轴电感; $i_d(k)$ 、 $i_q(k)$ 和 $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 分别为当前时刻直交轴定子电流和定子电压; $i_d(k+1)$ 、 $i_q(k+1)$ 为下一时刻电机电流预测值; ω_e 为电角速度。

$$\begin{cases} \psi_d(k+1) = L_d i_d(k+1) + \psi_f \\ \psi_q(k+1) = L_q i_q(k+1) \\ |\psi_s(k+1)| = \sqrt{\psi_d(k+1)^2 + \psi_q(k+1)^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ψ_f 为永磁体磁链; $|\psi_s(k+1)|$ 为电机磁链预测值。

$$T_e(k+1) = 1.5p\psi_f i_q(k+1) \quad (3)$$

式中: p 为极对数; $T_e(k+1)$ 为电机转矩预测值。

将两电平逆变器 8 种开关状态对应的电压矢量作为备选电压矢量,建立有限控制集,如式(4)所示:

$$FCS = \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\} \quad (4)$$

式中: V_0 代表(000)和(111)两种开关状态对应的零电压矢量。

预测过程结束后,需要对预测结果进行评估以选择最优电压矢量。以最小化转矩及磁链跟踪误差为控制目标,采用如式(5)所示的表达式对预测结果进行评估^[8]:

$$J = |T_e^{\text{ref}} - T_e(k+1)| + \lambda ||\psi_s^{\text{ref}}| - |\psi_s(k+1)|| \quad (5)$$

式中; λ 为权重系数; T_e^{ref} 、 ψ_s^{ref} 分别为当前时刻的转矩、磁链参考值。

FCS-MPTC 系统基于当前时刻电机变量,将 7 个基本电压矢量依次代入电机预测模型中,预测下一时刻的转矩值和磁链值,之后将预测值代入设计的目标函数,并对目标函数值进行排序,选择使目标函数值最小的电压矢量为下一时刻电机所需施加的最优电压矢量。图 1 所示为永磁同步电机 FCS-MPTC 系统结构框图。

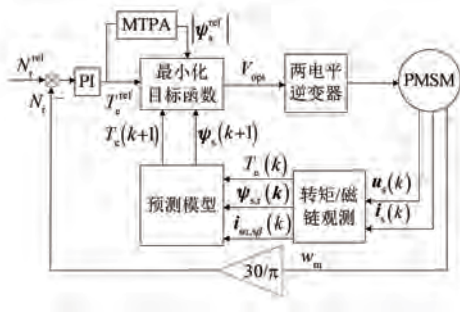


图1 永磁同步电机 FCS-MPTC 系统框图

2 基于最小交互误差的 MPTC 策略

由前述 FCS-MPTC 的控制原理可知,在进行最优电压矢量评估时,权重系数配置的合理与否将直接影响系统的控制性能,而权重系数的设计比较复杂困难,因此本文采用了一种基于最小交互误差的 MPTC 方法来取消权重系数的设计^[9]。相较于传统 FCS-MPTC,本文所采用的基于最小交互误差的 MPTC 策略仅对于目标函数部分进行了改进,其整体控制过程如图 2 所示。

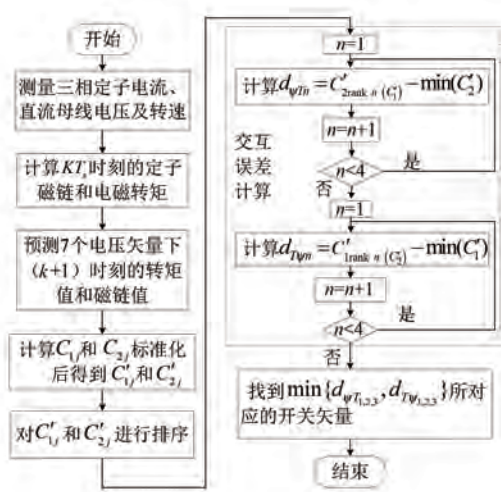


图2 基于最小交互误差的 MPTC 流程图

图 2 中所示的最小交互误差计算环节的步骤如下：

步骤 1: 根据电机预测模型预测 7 个开关矢量所对应的转矩值和磁链值；

步骤 2: 如式(6)所示,定义转矩和磁链两个控制目标的评估项 C'_{1j} 和 C'_{2j} ;

$$\begin{cases} C_{1j} = |T_e^{ref} - T_{e,j}^{k+1}|, \\ C_{2j} = ||\psi_s^{ref} - \psi_{s,j}^{k+1}||, \\ C'_{1j} = \frac{C_{1j} - \min C_1}{\max C_1 - \min C_1}, \\ C'_{2j} = \frac{C_{2j} - \min C_2}{\max C_2 - \min C_2}, \end{cases} \quad (j = 0, \dots, 6) \quad (6)$$

步骤 3: 分别对于 C'_{1j} 和 C'_{2j} 进行独立排序；

步骤 4: 分别选取排序后 C'_{1j} 和 C'_{2j} 的前 3 个值,根据式(7)进行交互误差的计算^[10];

$$\begin{cases} d_{\psi T_1} = C_{2rank1}(C'_{1j}) - \min(C'_{2j}) \\ d_{\psi T_2} = C_{2rank2}(C'_{1j}) - \min(C'_{2j}) \\ d_{\psi T_3} = C_{2rank3}(C'_{1j}) - \min(C'_{2j}) \\ d_{T\psi_1} = C_{1rank1}(C'_{2j}) - \min(C'_{1j}) \\ d_{T\psi_2} = C_{1rank2}(C'_{2j}) - \min(C'_{1j}) \\ d_{T\psi_3} = C_{1rank3}(C'_{2j}) - \min(C'_{1j}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $d_{\psi T_1} \sim d_{\psi T_3}$ 分别为排序后各级转矩误差对应的磁链交互误差; $d_{T\psi_1} \sim d_{T\psi_3}$ 分别为排序后各级磁链误差对应的转矩交互误差。

步骤 5: 根据步骤 4 的计算结果,选择最小交互误差所对应的电压矢量为最优矢量。

综上,基于最小交互误差的 MPTC 策略作为一种无权重控制方法,无需进行复杂的解析推导。相较于文献[4],该策略采用最小交互误差来均衡转矩控制目标和磁链控制目标的优先级,在每个采样周期内都对优化顺序进行动态评估,在无权重 MPTC 控制研究中通用性更强。

3 基于占空比优化的无权重 MPTC 系统

在前述基于最小交互误差的 MPTC 基础上,引入占空比优化环节来抑制 PMSM 稳态运行时的转矩、磁链脉动。所设计的控制系统中,对于转矩优先控制和磁链优先控制的情况分别采用不同方法确定最优电压矢量的占空比信息,使得有效电压矢量和零矢量共同作用于一个控制周期,从而提高控制过程的精确性。本文所设计的基于占空比优化的无权重 MPTC (无权重 DMPTC) 系统如图 3 所示。

参考第 2 小节,交互误差落在 $d_{\psi T_1} \sim d_{\psi T_3}$ 中代

表 1 PMSM 调速系统仿真参数

参数名称	参数值
直流母线电压/V	311
参考转速/(r·min ⁻¹)	1 000
极对数	4
定子电阻/Ω	1.3
定子电感/mH	8.5
永磁体磁链/Wb	0.175

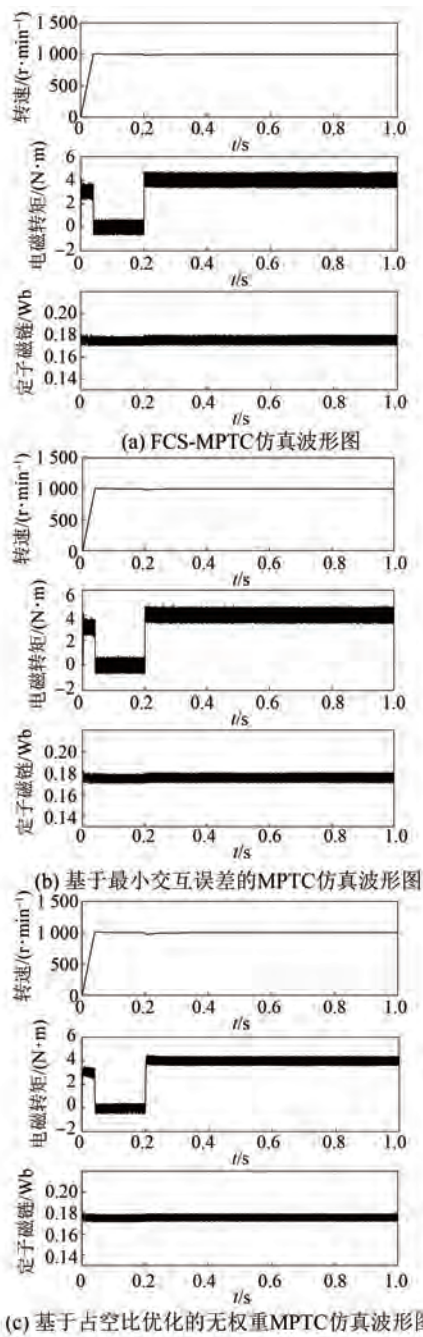


图 5 三种控制策略的转速、转矩以及磁链仿真波形好,验证了所设计控制方法的有效性。

为了进一步分析三种控制策略的控制性能,对三种控制策略进行了动态性能和稳态性能的对

比分析。
三种控制策略动态调节过程的局部放大效果如图 6 所示,当电磁转矩由 0 N·m 上升至 4 N·m 时,FCS-MPTC 和基于最小交互误差的 MPTC 的转矩动态调节时间分别为 0.78 ms 和 0.80 ms,而基于占空比优化的无权重 MPTC 系统的动态调节速度略有延迟,整个调节过程用时大约 1.21 ms 左右,三种控制策略的转矩波形几乎无超调。

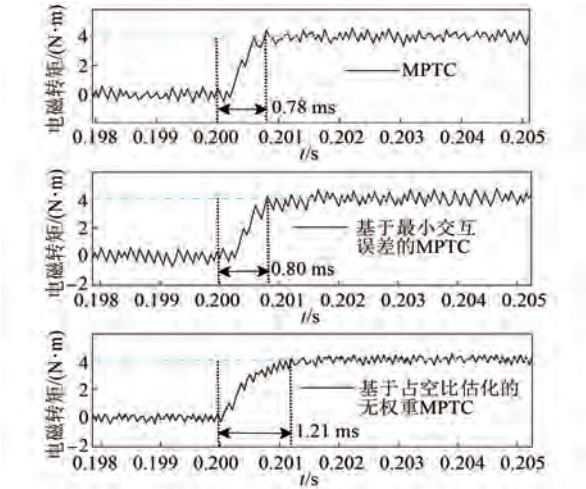


图 6 三种控制策略的动态性能实验结果

三种控制策略稳态波形的局部放大效果如图 7 所示。图 7(a)所示为转矩稳态波形图,可以直观地看出,基于占空比优化的无权重 MPTC 策略可以显著降低转矩脉动。图 7(b)所示为磁链稳态波形,可以看出,相较于 FCS-MPTC,基于最小交互误差的 MPTC 和基于占空比优化的无权重 MPTC 对于磁链脉动的抑制均有明显的效果,且占空比优化策略的效果更为显著。

为了进一步分析对比三种控制策略的稳态性能,采用式(16)来计算对应的转矩和磁链脉动,对比结果如表 2 所示。

$$\begin{cases} T_{rip} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [T_e(i) - T_e^{ref}]^2} \\ \psi_{rip} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [\psi_s(i) - \psi_s^{ref}]^2} \end{cases} \quad (16)$$

式中: T_{rip} 、 ψ_{rip} 分别代表转矩脉动和磁链脉动; m 为采样总个数; $T_e(i)$ 、 $\psi_s(i)$ 分别表示第 i 次采样时的转矩和磁链实际值。

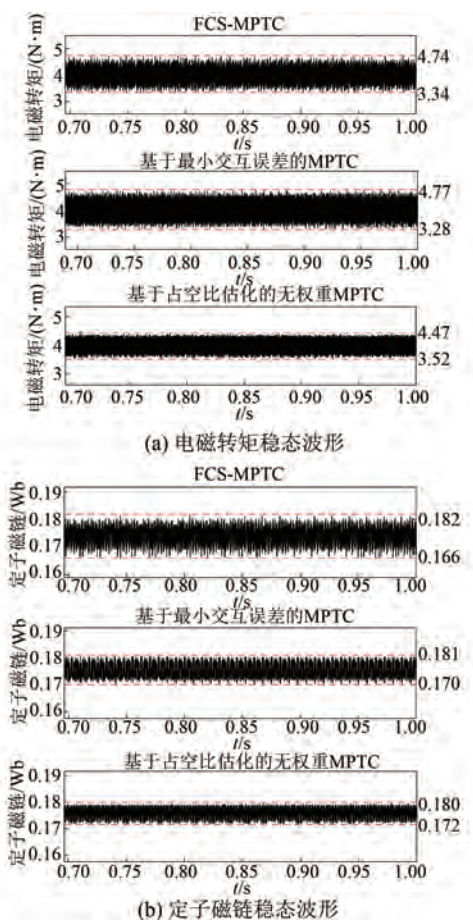


图7 三种控制策略的稳态波形

由表2可以看出,电机稳态运行时,所设计的基于占空比优化的无权重MPTC策略,可有效降低电磁转矩脉动和定子磁链脉动,相较于FCS-MPTC,其转矩控制性能约提升22.5%,磁链控制性能约提升30.3%;相较于基于最小交互误差的MPTC,其转矩控制性能约提升24.2%,磁链控制性能约提升11.5%。

表2 转矩、磁链脉动对比表

控制策略	转矩脉动 T_{rip}	磁链脉动 ψ_{rip}
FCS-MPTC	0.286 2	0.003 3
交互误差-MPTC	0.292 5	0.002 6
无权重DMPTC	0.221 7	0.002 3

5 结 语

本文主要围绕永磁同步电机FCS-MPTC策略权重系数设计问题和电机稳态运行时转矩、磁链脉动大的问题展开研究。

(1) 采用了一种无权重的控制方法,即基于

最小交互误差的MPTC策略,在每一采样周期内可通过计算最小交互误差动态选择转矩、磁链两个控制目标的控制优先级,所采用的控制策略在无权重模型预测控制研究中通用性更强,提升了模型预测控制方法在实际工况的适应性。

(2) 在前述基础上,引入占空比优化环节对电机稳态性能进行改善,根据被控变量控制优先级的不同,分别采用不同的占空比计算方法,所采用的优化方法综合考虑了转矩和磁链控制目标,也更加契合所采用的无权重MPTC策略。

【参考文献】

[1] 胡育文. 永磁同步电机直接转矩控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2015.

[2] 张永昌,杨海涛. 感应电机模型预测磁链控制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(3):719.

[3] 张晓光,张亮,侯本帅. 永磁同步电机优化模型预测转矩控制[J]. 中国电机工程学报,2017,37(16):4800.

[4] NORAMBUENA M, RODRIGUEZ J. A very simple strategy for high-quality performance of AC machines using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1):794.

[5] ZHANG Y, YANG H. Torque ripple reduction of model predictive torque control of induction motor drives[C]//2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2013.

[6] 殷芳博,花为. 基于电压矢量优化的磁通反向永磁电机模型预测转矩控制[J]. 中国电机工程学报,2017,37(22):6524.

[7] LI X, XUE Z. Low-complexity multi-vector-based model predictive torque control for PMSM with voltage pre-selection [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10):11726.

[8] 张晓光. 永磁同步电机模型预测控制[M]. 北京:机械工业出版社,2022.

[9] DAVARI S A, NORAMBUENA M, NEKOUKAR V, et al. Even-handed sequential predictive torque and flux control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(9):7334.

[10] 张永昌. 感应电机模型预测控制[M]. 北京:机械工业出版社,2020.

[11] 李政学,张永昌,李正熙,等. 基于简单占空比调节的异步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报,2015,30(1):72.