

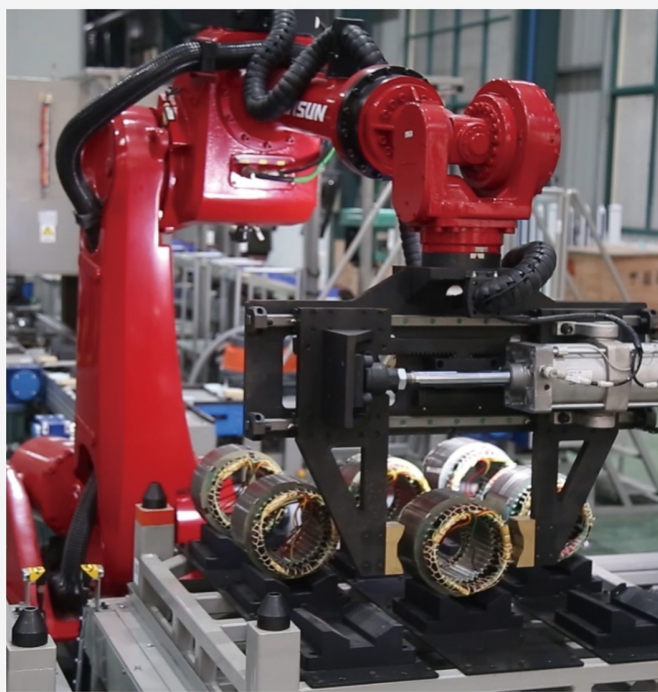
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 王孝宇, 刘子焜,
陈桂鑫, 刘东梅, 任超.
基于排序法的表贴式永磁同步电机模
型预测转矩控制
电机与控制应用, 2021, 48(11):6.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机·智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

基于排序法的表贴式永磁同步电机模型预测 转矩控制*

李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 王孝宇, 刘子焜, 陈桂鑫, 刘东梅, 任超
(长安大学汽车学院, 陕西西安 710064)

摘要: 为避免传统成本函数中权重系数的设计和调节, 采用排序法实现表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 模型预测转矩控制 (MPTC), 将不同量纲的控制变量转化为无量纲的排序得分, 从而消除权重系数, 并设计优先级解决排序法中的最优电压矢量不唯一的问题, 分析了不同优先级方案对系统控制性能的影响。仿真验证基于排序法 SPMSM MPTC 的可行性。

关键词: 表贴式永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 平均开关频率; 排序法

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)11-0006-08

doi: 10.12177/emca.2021.115

Model Predictive Torque Control for Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Ranking Approach*

LI Yaohua, QIN Hui, SU Jinshi, WANG Xiaoyu, LIU Zikun, CHEN Guixin,
LIU Dongmei, REN Chao

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to avoid the design and tuning of the weighting factors in conventional cost function, the ranking approach is used to implement the model predictive torque control (MPTC) for surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM). The control variables with different dimension are converted to dimensionless ranking scores, therefore, the weighting factors are eliminated. The priority rules are given to solve the problem that the optimal voltage vector is not unique for ranking approach, and the effects of different priorities on control performances are analyzed. Simulation results verify the effectiveness of the ranking approach in the SPMSM MPTC system.

Key words: surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM); model predictive torque control (MPTC); average switching frequency; ranking approach

0 引言

有限状态集模型预测控制 (FCS-MPC) 利用电力电子变换装置开关状态离散有限的特点, 通过遍历所有开关状态, 得到表征系统未来控制性能的成本函数, 并选择令成本函数最小的开关状态作为下一时刻的输出, 在永磁同步电机 (PMSM) 控制领域得到高度关注^[1-5]。成本函数

作为量化不同开关状态控制效果的指标, 构造灵活, 可将多个控制目标统一至成本函数中实现系统综合性能优化^[6]。但由于不同的控制变量具有不同的量纲和数量级, 成本函数不能简单将各自独立的控制性能相加求和, 需要设计和整定权重系数。权重系数的设计和整定目前没有成熟的理论和公式, 大多基于经验, 这也是模型预测控制的难点之一。文献[7]通过试凑法设计权重系数,

收稿日期: 2021-08-03; 收到修改稿日期: 2021-10-18

* 基金项目: 陕西省自然科学基金项目 (2021JM-163)

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。

但需要前期大量的试验。文献[8]构造含权重系数的转矩误差方程,以转矩误差最小设计权重系数,但计算较为复杂。文献[9-12]采用模糊控制来设计和整定权重系数,但模糊论域及规则的设计需要一定的先验验证。文献[13]采用多种群粒子群算法实现权重系数的自整定,但也存在算法计算量较大的问题。文献[14-15]将磁链和转矩转换为两者的相对误差率,将磁链控制和转矩控制统一在同一量纲上,从而消除权重系数,但如果增加开关次数控制等无法实现类似转换的控制目标,依然需要权重系数。文献[16-17]通过无差拍控制可将磁链控制和转矩控制转换为理想电压矢量在定子磁链坐标系上投影分量的控制,从而消除权重系数。但如果要增加开关次数控制,则依然需要权重系数。文献[18-20]提出排序法思想,将不同控制目标的性能转换为无量纲排序得分,从而消除权重系数。

本文基于定子磁链坐标系的表贴式永磁同步电机(SPMSM)模型预测转矩控制(MPTC)系统,采用排序法将不同量纲的控制变量转化为无量纲的排序得分,从而消除权重系数,设计优先级解决排序法中的最优电压矢量不唯一的问题,分析了不同优先级方案对系统控制性能的影响,并仿真验证基于排序法的SPMSM MPTC的可行性。

1 传统 MPTC

定子磁链坐标系下,SPMSM 定子磁链幅值和转矩预测模型分别如式(1)和式(2)所示^[21-23]:

$$\begin{cases} \psi_s(k+1) = \psi_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \\ q = \frac{V_s(k) \cdot \Delta t}{\psi_s(k)} \end{cases} \quad (1)$$

$$T_e(k+1) = \frac{3p\psi_f\psi_s(k)}{2L_d} \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \cdot \sin\left[\delta(k) + \arcsin\left(\frac{q\sin\alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}}\right)\right] \quad (2)$$

式中: $\psi_s(k+1)$ 、 $T_e(k+1)$ 为下一时刻的定子磁链幅值和转矩; $\psi_s(k)$ 、 $T_e(k)$ 和 $\delta(k)$ 为当前时刻的定子磁链幅值、转矩和转矩角; $V_s(k)$ 和 α 为施加电压矢量的幅值及电压矢量与定子磁链的夹角; p 为电机极对数; ψ_f 为永磁体磁链; L_d 为 d 轴电感; Δt 为系统采样周期。

三相两电平电压源逆变器共有8种开关状态,分别对应7个基本电压矢量,如式(3)所示,其中零电压矢量 U_0 可由开关状态000或111生成,具体选择以开关次数最小为原则^[24-25]。

$$U_s \in \{U_0, U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\} \quad (3)$$

MPTC选择令成本函数最小的电压矢量为最优电压矢量。成本函数作为电压矢量控制效果的评价指标,直接反映系统控制控制目标。对于MPTC,首要控制目标为转矩和磁链,也可以包含开关次数等其他控制变量。考虑减小开关次数的MPTC成本函数如下:

$$g = |T_e(k+1) - T_e^*(k)| + \lambda_\psi |\psi_s(k+1) - \psi_s^*(k)| + \lambda_{sw} n_{sw} \quad (4)$$

式中: $T_e^*(k)$ 和 $\psi_s^*(k)$ 分别为当前时刻的转矩和定子磁链的参考值; n_{sw} 为施加电压矢量引起的开关切换次数。

由于磁链、转矩与开关次数均不是相同量纲,需要设定和调节权重系数 λ_ψ 和 λ_{sw} 。权重系数变化范围宽,且互相影响不同控制目标的性能,使得多个权重系数的设计和调整更为复杂。

2 基于排序法的 MPTC

为了避免权重系数的设计和调节,可采用基于排序法的MPTC,对各个控制目标的控制效果单独评价,并排序得分,从而不同控制目标的控制效果转换为无量纲且值域统一的排序得分,无需权重,直接相加。

2.1 排序法

传统MPTC的控制变量为转矩和定子磁链,两者量纲和数量级上并不相同。排序法对磁链和转矩的控制效果分别评价,定义转矩偏差评价函数 g_T 和磁链误差评价函数 g_ψ ,分别如下:

$$g_T = |T_e(k+1) - T_e^*(k)| \quad (5)$$

$$g_\psi = |\psi_s(k+1) - \psi_s^*(k)| \quad (6)$$

基于遍历电压矢量求得的评价函数值,按从小到大的顺序进行排序,并按顺序分别对响应的电压矢量得分。评价函数最小对应的电压矢量得分为0,依次加1至6。如果2个电压矢量控制效果相同,排序并列,则得分相同,下一个电压矢量的得分加2。按照得分规则,将转矩和磁链的评价函数转换为转矩和磁链的排序得分。由于排序得分为无量纲数值,并且排序得分的值域相同,均

为 $[0, 6]$,不同控制目标的排序得分可直接相加,从而得到电压矢量的排序总得分:

$$R(U_i) = R_T(U_i) + R_\psi(U_i) \quad (7)$$

式中: $R(U_i)$ 为某电压矢量排序总得分; $R_T(U_i)$ 和 $R_\psi(U_i)$ 分别为其转矩控制和磁链控制的排序得分。

基于7个电压矢量的排序总得分,MPTC将最小排序总得分对应的电压矢量作为作用于下一时刻的最优电压矢量,表达式如下:

$$U_s(k+1) = \min_{\{U_0, U_1, \dots, U_6\}} [R(U_i)] \quad (8)$$

2.2 优先级设计

不同于成本函数为连续的数值,排序得分的数值是离散有限的,会出现不同电压矢量的排序结果总得分相同的情况。而且当多个电压矢量的排序结果总得分均为最小值,最优电压矢量不唯一。由于只能输出1个电压矢量,此时需要定义优先级来筛选得到唯一的输出电压矢量。表1给出电压矢量求解不唯一的示例。

表1 排序法最优电压矢量不唯一示例

U_s	g_T	g_ψ	R_T	R_ψ	R
U_0	0.856 9	0.005 1	3	3	6
U_1	2.050 0	0.006 6	6	4	10
U_2	1.866 1	0.014 8	5	6	11
U_3	0.673 1	0.013 1	2	5	7
U_4	0.336 2	0.003 3	1	1	2
U_5	0.152 3	0.004 6	0	2	2
U_6	1.040 7	0.003 0	4	0	4

由表1可知,电压矢量 U_4 在转矩控制排序得分和磁链排序得分均为1,排序总得分为2;电压矢量 U_5 在转矩控制排序得分为0和磁链排序得分均为2,排序总得分也为2,两者均为排序总得分的最小值,从而出现最优电压矢量不唯一。为了保证在每个控制周期均有唯一的输出电压矢量,需要排序法结束后进行判断排序总得分最小对应的电压矢量是否唯一。如果电压矢量唯一,则直接输出。如果不唯一,则通过设定优先级进一步筛选得到唯一的电压矢量。下文给出3种优先级方案。

(1) 转矩控制优先。当最优电压矢量不唯一时,选择转矩得分较小的电压矢量。

(2) 磁链控制优先。当最优电压矢量不唯一时,选择磁链得分较小的电压矢量。

(3) 开关次数优先。当最优电压矢量不唯一时,选择开关次数较小的电压矢量。但开关次数优先依然可能存在输出电压矢量不唯一的情况,则继续以转矩控制优先。

基于排序法的MPTC系统框图如图1所示。

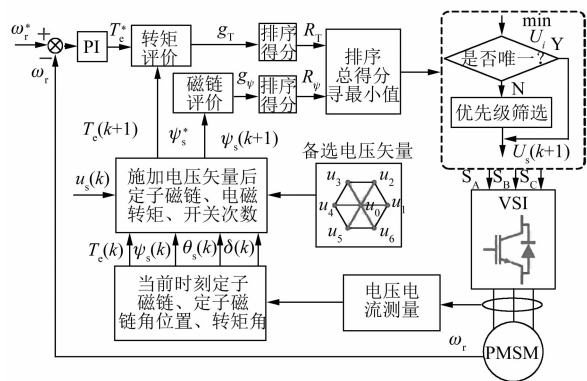


图1 基于排序法的MPTC系统框图

下文对基于排序法的MPTC进行仿真验证。当最优电压矢量不唯一时,分别采用转矩控制优先、磁链控制优先、开关次数优先3种优先级方案。仿真模型为离散模型,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 $K_p=5, K_i=100$,输出上下限为 $[-30 \text{ N}\cdot\text{m}, 30 \text{ N}\cdot\text{m}]$ 。参考转速初始为400 r/min,2 s时阶跃至-400 r/min。负载转矩初始为20 N·m,1 s时阶跃至-20 N·m,3 s时阶跃至20 N·m。仿真用SPMSM参数如表3所示。

表2 仿真用SPMSM参数

电机参数	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/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.089
黏滞阻尼/ $(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.005

不同优先级下,基于排序法的MPTC波形分别如图2~图4所示。

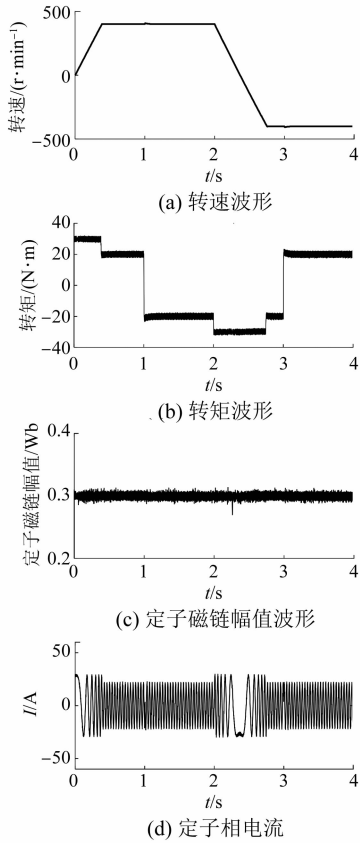


图 2 基于排序法的 MPTC 波形(转矩控制优先)

对比图 2~图 4 可知,当转矩控制优先时,转矩波形光滑,磁链波形有较多毛刺;当磁链控制优先时,转矩波形出现较多毛刺,磁链波形较为光滑,当开关次数优先时,转矩和磁链波形均有毛刺。这正是由不同的优先选择造成的。当某个控制目标优先选择时,则该控制目标控制性能有所提升,但会使得其他控制目标性能有所下降。

相同仿真条件下,建立基于传统成本函数的 MPTC 仿真模型进行验证,成本函数如下:

$$g = |T_e(k+1) - T_e^*(k)| + \lambda_\psi |\psi_s(k+1) - \psi_s^*(k)| \quad (9)$$

其中权重系数 λ_ψ 设定为 $\frac{3p\psi_f}{2L_d} = 123.53$ 。

基于传统成本函数的 MPTC 仿真结果如图 5 所示。

定义转矩脉动均方根误差(RMSE)、磁链脉动 RMSE 和平均开关频率分别如下:

$$T_{rip-RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (10)$$

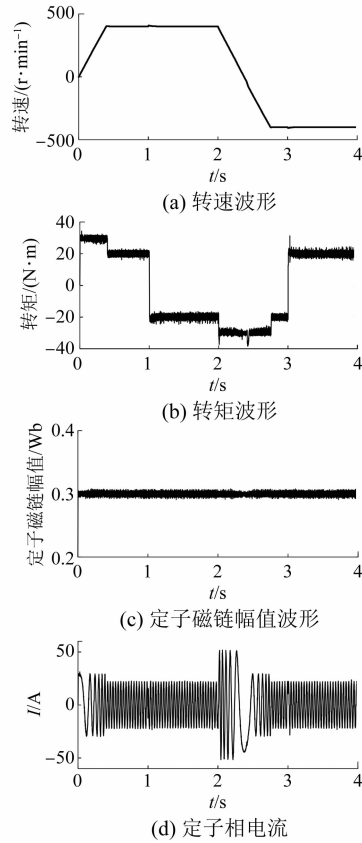


图 3 基于排序法的 MPTC 波形(磁链控制优先)

$$\psi_{rip-RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (11)$$

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6 \times t} \quad (12)$$

式中: n 为采样总个数; $N_{switching}$ 为逆变器开关总次数; t 为采样总时长。

不同控制策略下,PMSM MPTC 系统控制性能如表 3 所示。

表 3 PMSM MPTC 系统控制性能

控制策略	优先级方案	$T_{rip-RMSE}/(N \cdot m)$	$\psi_{rip-RMSE}/Wb$	f_{ave}/kHz	最优电压矢量不唯一占比/%
基于排序法 MPTC	转矩控制优先	1.003 1	0.003 4	5.52	19.45
	磁链控制优先	1.323 0	0.002 6	4.95	23.55
	开关次数优先	1.115 2	0.003 1	4.49	21.19
基于传统成本函数 MPTC		1.011 9	0.002 8	5.01	0

仿真结果表明无需权重系数的基于排序法

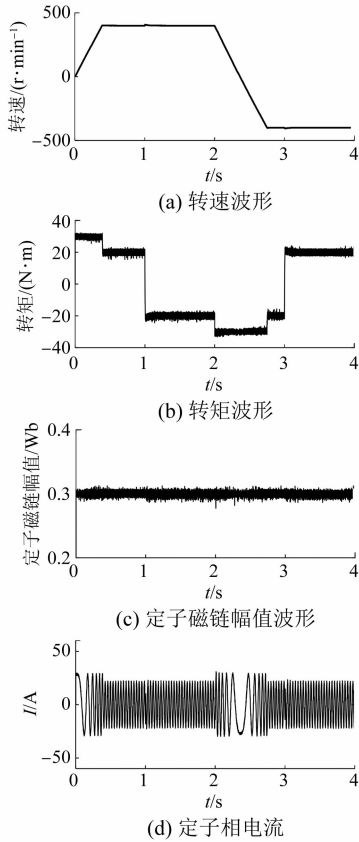


图4 基于排序法的MPTC波形(开关次数优先)

MPTC可行,但存在最优电压矢量不唯一的问题,必须设定优先级进行筛选。对于开关次数优先,依然存在最优电压矢量不唯一的情况,需要通过转矩优先二次筛选。经统计,此时最优电压矢量不唯一的情况有16 955次,需要二次筛选的情况有1 461次,占比8.62%。仿真结果表明不同优先级对控制性能有一定的影响。转矩控制优先下,转矩脉动最小;磁链控制优先下,磁链脉动最小;开关次数优先下,平均开关频率最低。基于传统成本函数的MPTC各控制目标性能居中。

3 考虑开关次数的排序法MPTC

MPTC的主要优势之一就是通过对柔性的成本函数实现多目标优化控制。因此,下文将开关次数也作为控制目标之一。不同于传统成本函数,排序法无需权重系数设计,增加控制目标并不影响权重系数设计的难度。但相较于传统成本函数,排序法增加了每个控制目标性能排序的计算量。因此,从算法实时性考虑,排序法的控制目标

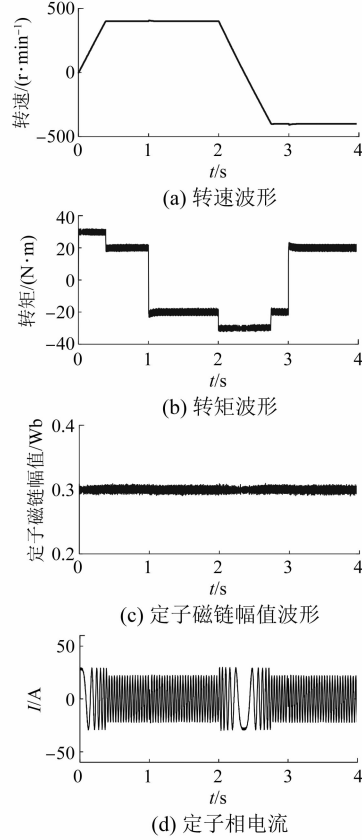


图5 基于传统成本函数的MPTC仿真波形

不宜过多。为了简化控制目标,下文将转矩控制和磁链控制合并为性能控制,定义成本函数如下:

$$g_{T\&\psi} = \sqrt{\left[\frac{T_e(k+1) - T_e^*(k)}{T_e^*(k)} \right]^2 + \left[\frac{\psi_s(k+1) - \psi_s^*(k)}{\psi_s^*(k)} \right]^2} \quad (13)$$

由于开关切换次数关系是确定的,开关次数的排序得分 R_{sw} 可通过查表确定,如表4所示。

表4 开关次数排序得分

当前开关状态	下一时刻施加电压矢量						
	U_0	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
000	0	1	4	1	4	1	4
100	1	0	1	4	6	4	1
110	1	1	0	1	4	6	4
010	1	4	1	0	1	4	6
011	1	6	4	1	0	1	4
001	1	4	6	4	1	0	1
101	1	1	4	6	4	1	0
111	0	4	1	4	1	4	1

因此,电压矢量的排序总得分分为性能控制排序得分与开关次数控制排名之和,如下:

$$R(U_i) = R_{T\&\psi}(U_i) + R_{sw}(U_i) \quad (14)$$

考虑开关次数的排序法也存在最优电压矢量不唯一的可能,需要设计优先级唯一确定。优先级设计有如下 2 种方案:

(1) 性能控制优先。当最优电压矢量不唯一时,选择性能控制得分较小的电压矢量。

(2) 开关次数优先。最优电压矢量不唯一时,选择开关次数较小的电压矢量。

考虑开关次数的排序法 MPTC 系统框图如图 6 所示。

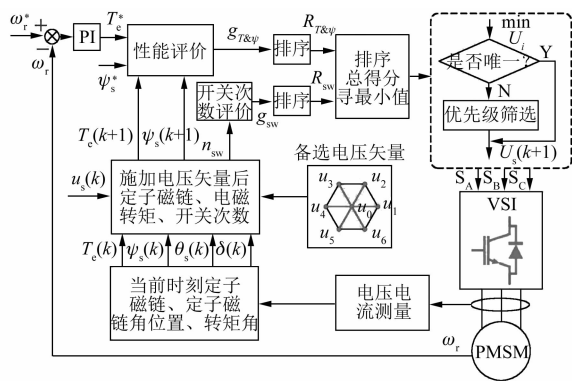


图 6 考虑开关次数的排序法 MPTC 系统框图

基于上文仿真模型对考虑开关次数的排序法 MPTC 进行仿真验证。当最优电压矢量不唯一时,分别采用性能控制优先和开关次数优先 2 种优先级方案。不同优先级下,考虑开关次数的排序法 MPTC 仿真结果分别如图 7、图 8 所示。

对比图 7 和图 8 可知,性能控制优先下,磁链和转矩波形光滑,开关次数优先下,磁链和转矩波形有较多毛刺。

相同仿真条件下,建立考虑开关次数的传统成本函数 MPTC 仿真模型进行验证,成本函数为

$$g = \lambda_{sw} n_{sw} + \sqrt{\left[\frac{T_e(k+1) - T_e^*(k)}{T_e^*(k)} \right]^2 + \left[\frac{\psi_s(k+1) - \psi_s^*(k)}{\psi_s^*(k)} \right]^2} \quad (15)$$

其中通过试验搜索法确定权重系数 λ_{sw} 为 0.006。

考虑开关次数的传统成本函数 MPTC 仿真结果如图 9 所示。

定义转矩和磁链综合控制性能评价函数 m_{ave} 为

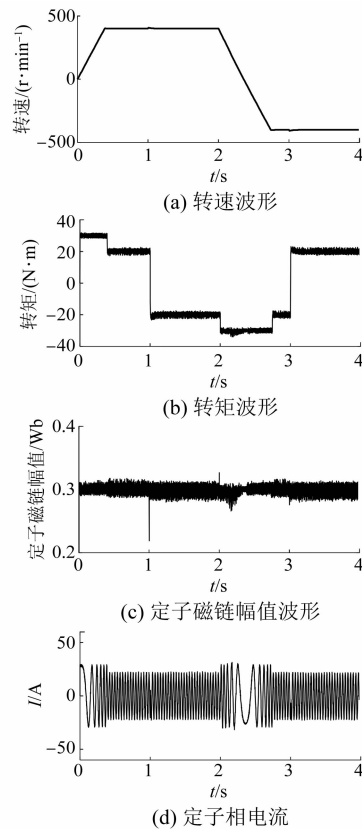


图 7 考虑开关次数的排序法 MPTC 波形 (性能控制优先)

$$m_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\left(\frac{T_e - T_e^*}{T_e^*} \right)^2 + \left(\frac{\psi_s - \psi_s^*}{\psi_s^*} \right)^2}}{n} \quad (16)$$

不同控制策略下,考虑开关次数的 MPTC 控制性能如表 5 所示。

表 5 考虑开关次数的 MPTC 系统控制性能

控制策略	优先级方案	$T_{rip-RMSE} / (N \cdot m)$	$\psi_{rip-RMSE} / Wb$	m_{ave}	f_{ave} / kHz	最优电压矢量不唯一占比/%
性能控制优先排序法	性能控制优先	0.819 5	0.005 4	0.033 2	3.29	21.36
	开关次数优先	1.263 1	0.009 8	0.050 8	2.39	29.74
传统成本函数		0.976 3	0.007 8	0.040 7	3.01	0

由仿真结果可知:

(1) 考虑开关次数的排序法 MPTC 可行,电机系统正常运行,可实现四象限运行。

(2) 最优电压矢量不唯一的情况同样存在,需要设定优先级来确定唯一输出电压矢量。

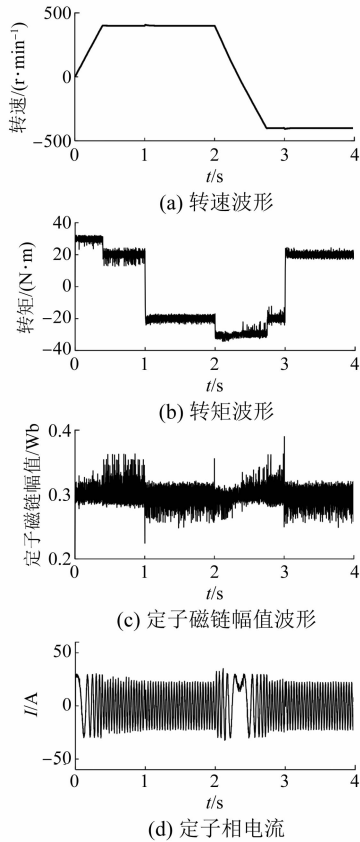


图 8 考虑开关次数的排序法 MPTC 波形(开关次数优先)

(3) 性能控制优先下,转矩和磁链脉动较小,但平均开关频率较大。开关次数优先下,平均开关频率显著降低,但转矩和磁链脉动增大。传统成本函数的 MPTC 的控制性能居中。

4 实时性分析

与传统 MPTC 相比,排序法采用无量纲的排序得分避免设计权重系数,但也增加了无量纲的排序得分和优先级处理。排序法 MPTC 计算可分为模型预测、排序得分和寻优 3 部分。对于模型预测,排序法 MPTC 和传统成本函数计算量相同。对于排序得分,传统 MPTC 无需计算,排序法 MPTC 的计算量与备选电压矢量和控制目标数目有关。假设备选电压矢量数目为 m ,控制目标数目为 n ,则排序法需要额外进行 n 次 m 个数据的排序得分,共需 $\frac{m \times (m-1) \times n}{2}$ 次数据比较和 1 次排序得分求和。对于寻优,传统 MPTC 与排序法 MPTC 计算量基本相同,均需进行 $(m-1)$ 次数据比较,但排序法 MPTC 需要额外进行最优电压矢量是

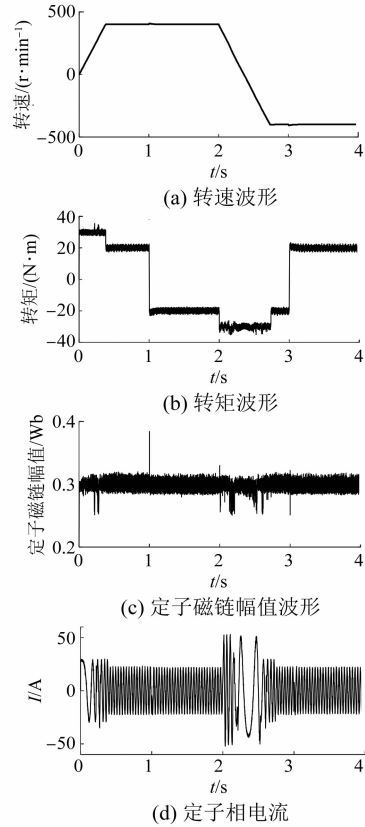


图 9 考虑开关次数的传统成本函数 MPTC 波形

否唯一的判断及当最优电压矢量不唯一时,按照设定的优先级筛选得到唯一电压矢量的计算。

由此可知,与传统 MPTC 相比,排序法 MPTC 增加系统计算负担。但将所有电压矢量遍历至预测模型计算下一时刻预测值的模型预测部分是所有计算最主要部分。因此,虽然排序法一定程度上增加系统计算负担,但相较于模型预测,排序得分和寻优部分额外增加的计算量较小,不会严重降低 MPTC 的实时性。由于排序法额外增加的计算量与备选电压矢量和控制目标数目正相关。当备选电压矢量数目较多及控制目标数量较多时,排序法一定程度上会影响模型预测控制的实时性。

5 结语

本文采用基于排序法的 MPTC 策略,通过对各个控制目标独立评价排序,将不同量纲的控制变量转化为无量纲的排序得分,从而消除权重系数,并设计优先级解决排序法中的最优电压矢量不唯一的问题,分析了不同优先级方案对系统控制性能的影响,分析了排序法 MPTC 的实时性。仿真结果表

明:排序法 MPTC 可行,系统运行良好,实现无需权重系数的多目标控制。由于排序得分离散有限,会带来最优电压矢量不唯一的问题,需要设计优先级进行筛选。优先级方案对系统有一定的影响,优先级最高的控制目标控制性能最优。

【参考文献】

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 李耀华,杨启东,刘洋,等. 表面式永磁同步电机模型预测直接转矩控制备选电压矢量集合研究 [J]. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 87.
- [4] 李耀华,杨启东,秦玉贵,等. 基于模糊控制的永磁同步电机动态有限状态集 MPTC [J]. 电机与控制学报, 2021, 25(9): 94.
- [5] 李耀华,刘子焜,刘东梅,等. 永磁同步电机直接转矩控制与 MPTC 比较研究 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48(7): 18.
- [6] 李耀华,秦辉,苏锦仕,等. 表贴式永磁同步电机有限集 MPTC 成本函数研究 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 12.
- [7] CORTES P, KOURO S, LA ROCCA B, et al. Guidelines for weighting factors design in model predictive control of power converters and drives [C] // 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology, 2009.
- [8] DAVARI S A, KHABURI D A, KENNEL R. An improved FCS-MPC algorithm for an induction motor with an imposed optimized weighting factor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1540.
- [9] 涂文聪,骆光照,刘卫国. 基于模糊动态代价函数的永磁同步电机有限控制集模型预测电流控制 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 89.
- [10] 李耀华,秦辉,苏锦仕,等. 永磁同步电机模糊自适应变开关次数权重系数 MPTC [J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2): 102.
- [11] 李耀华,秦辉,苏锦仕,等. 基于模糊控制的动态权重系数表贴式永磁同步电机 MPTC 系统 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 1.
- [12] JUSTO J J, MWASILU F, KIM E, et al. Fuzzy model predictive direct torque control of IPMSMs for electric vehicle applications [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4): 1542.
- [13] 李家祥,汪凤翔,柯栋梁,等. 基于粒子群算法的永磁同步电机模型预测控制权重系数设计 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 50.
- [14] 李耀华,苏锦仕,秦辉,等. 永磁同步电机有限状态集 MPTC 系统研究 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(12): 8.
- [15] 李耀华,刘洋,孟祥臻. 一种表面式永磁同步电机有限状态集模型预测直接转矩控制 [J]. 电机与控制学报, 2020, 24(8): 33.
- [16] 李耀华,周逸凡,赵乘辉,等. 表贴式永磁同步电机磁链和转矩无差拍控制系统 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47(1): 1.
- [17] 李耀华,周逸凡,赵乘辉,等. 基于拓展电压矢量集合的表贴式永磁同步电机磁链和转矩无差拍控制 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47(10): 7.
- [18] ROJAS C A, RODRIGUEZ J, VILLARROEL F, et al. Predictive torque and flux control without weighting factors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 681.
- [19] ESWAR K M R, KUMAR K V P, KUMAR T V. Modified predictive torque and flux control for open end winding induction motor drive based on ranking method [J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(4): 463.
- [20] 夏超英,田聪颖,张耀华,等. 基于多目标排序的无刷双馈电机预测控制 [J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 1.
- [21] 李耀华,马建,刘晶郁,等. 永磁同步电机直接转矩控制电压矢量选择区域 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012, 32(1): 95.
- [22] 李耀华,马建,刘晶郁,等. 电动汽车用永磁同步电机直接转矩控制电压矢量选择策略 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16(4): 43.
- [23] 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.
- [24] 李耀华,曲亚飞,师浩浩,等. 一种基于开关次数最小的含零电压矢量永磁同步电机直接转矩控制开关表 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(2): 34.
- [25] 李耀华,杨启东,曲亚飞,等. 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): 75.