

# DTC 与 MPTC 自适应切换的表贴式永磁同步电机控制策略\*

李耀华, 赵承辉, 秦玉贵, 周逸凡, 苏锦仕, 秦 晖  
(长安大学汽车学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 针对传统表贴式永磁同步电机(SPMSM)模型预测转矩控制(MPTC)备选电压矢量数目多, 计算负担较大等问题, 将传统 MPTC 的 7 个备选电压矢量精简为 1 个由开关表输出的电压矢量和 1 个零电压矢量。仿真结果表明: 该控制策略可有效减小转矩脉动和平均开关频率, 消除了转速阶跃下的磁链脉动, 并将 MPTC 的运算次数降低到 2 次或者 0 次, 减少了系统的运算负担。为了进一步提升系统动态特性, 提出根据系统状态将直接转矩控制(DTC)与 MPTC 自适应切换控制的策略。系统处于稳态时, 采用基于开关表的 MPTC; 系统处于动态时, 采用 DTC。仿真结果表明: 该策略结合了 MPTC 和 DTC 的优点, 在保持控制效果的同时, 提高了转矩动态响应, 消除了动态下磁链脉动。

**关键词:** 永磁同步电机; 模型预测转矩控制; 直接转矩控制; 开关表; 备选电压矢量  
**中图分类号:** TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)02-0009-05  
**doi:** 10.12177/emca.2019.123

## Control Strategy of Adaptive Switching Between DTC and MPTC for Surface Permanent Magnet Synchronous Motor\*

LI Yaohua, ZHAO Chenghui, QIN Yugui, ZHOU Yifan, SU Jinshi, QIN Hui  
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The traditional model predictive torque control (MPTC) of surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) uses all 7 voltage vectors generated by inverter as candidate voltage vectors, which brings large calculation burden. Based on switching table used in direct torque control (DTC), it is proposed to use a voltage vector generated by switching table and a zero voltage vector as candidate voltage vectors of MPTC. Simulation results show that the proposed strategy can decrease torque ripple and average switching frequency compared with traditional MPTC, and the calculation burden is reduced. twice to or once In order to improve the dynamic response, an adaptive control strategy is given: when the system is at steady state, the MPTC based on switching table is used; when the system is at dynamic state, DTC is used. Simulation results show that the proposed method combines the advantages of MPTC and DTC, improves torque dynamic response and suppress stator flux ripple at dynamic state.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive torque control (MPTC); direct torque control (DTC); switching table; candidate voltage vector

## 0 引 言

直接转矩控制(DTC)作为一种高性能电机控

制策略, 因结构简单、转矩动态响应快等优点受到了广泛关注<sup>[1-2]</sup>。DTC 根据定子磁链和转矩滞环比较器输出的控制信号及定子磁链扇区位置信

收稿日期: 2019-09-29; 收到修改稿日期: 2019-11-03

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51207012); 陕西省工业科技攻关项目(2016GY-069); 陕西省微特电机及驱动技术重点实验室开放基金项目(2013SSJ2002); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102228201)

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。

息,由开关表选择适当的电压矢量实现对定子磁链和转矩的闭环控制。由于 DTC 开关表自身限制,无法保证选择的电压矢量均可以满足转矩和磁链的控制要求<sup>[3-5]</sup>。同时,因为滞环比较器只考虑误差变化方向,DTC 在每个控制周期只施加单一的电压矢量,所以导致开关表选择的电压矢量仅能满足控制周期开始时刻的定性控制,并不是整个控制周期内的最优电压矢量。

模型预测转矩控制(MPTC)基于电机系统预测模型,计算施加不同电压矢量后下一时刻电机磁链和转矩值,根据建立的成本函数,从备选电压矢量集中选择最优电压矢量,已成为研究的热点之一<sup>[6-11]</sup>。备选电压矢量集合作为模型预测控制转矩系统所有可能施加电压矢量的总合,决定了系统的性能。文献[12-15]从备选电压矢量幅值和相角出发,对备选电压矢量集合进行扩展,但扩展的电压矢量需要采用空间矢量调制,而且增加了模型预测控制的计算负担。MPTC 需要遍历备选电压矢量集中所有备选矢量,从而选择出最优矢量。因此,备选电压矢量数目的多少直接决定了系统的实时性能。文献[16]从减少开关次数出发,基于历史选择电压矢量,将备选电压矢量由 7 个减少至 4 个。文献[17]省略了部分预测计算价值较小的电压矢量,将备选电压矢量减少至 3 个。

本文分析了传统 MPTC 下对零电压矢量的使用情况,发现在多数情况下零电压矢量是 MPTC 选择的最优电压矢量,将零电压矢量与含零电压矢量开关表选择的电压矢量作为 MPTC 的备选电压矢量,从而将备选电压矢量减少至 2 个或 1 个。为了进一步提升系统动态特性,提出根据系统状态将 DTC 与 MPTC 自适应切换控制的策略,即:系统处于稳态时,采用基于开关表的 MPTC;系统处于动态时,采用 DTC。通过仿真,验证了本文所提控制策略的有效性和优越性。

### 1 传统 MPTC

表贴式永磁同步电机 (SPMSM) 磁链和转矩预测模型<sup>[11,13-15]</sup>为

$$\hat{\psi}_s(k+1) = \hat{\psi}_s(k) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \quad (1)$$

其中,  $q = \frac{\hat{U}_s(k) \cdot \Delta t}{\hat{\psi}_s(k)}$

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

式中:  $\hat{\psi}_s(k+1)$ 、 $T_e(k+1)$  为下一时刻的定子磁链幅值和转矩;  $\hat{\psi}_s(k)$ 、 $T_e(k)$ 、 $\delta(k)$  为当前时刻的定子磁链幅值、转矩和转矩角;  $\hat{U}_s(k)$ 、 $\alpha$  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;  $\psi_f$  为永磁体磁链;  $L_d$  为  $d$  轴电感;  $\Delta t$  为系统采样周期。

传统 MPTC 备选电压矢量集合采用逆变器产生的 7 个基本电压矢量为

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

式中:  $U_s$  为施加电压矢量;  $U_0 \sim U_6$  为逆变器产生的 7 个基本电压矢量。

零电压矢量可由 2 个开关状态 (111 或 000) 生成,具体选择以开关次数最小为原则<sup>[18]</sup>。

MPTC 成本函数<sup>[11,13-15]</sup>为

$$g = \sqrt{\left[\frac{T_e^* - T_e(k+1)}{T_e^*}\right]^2 + \left[\frac{\hat{\psi}_s^* - \hat{\psi}_s(k+1)}{\hat{\psi}_s^*}\right]^2} \quad (4)$$

式中:  $\hat{\psi}_s^*$ 、 $T_e^*$  为当前时刻的定子磁链和转矩的参考值。

传统 SPMSM MPTC 系统如图 1 所示。

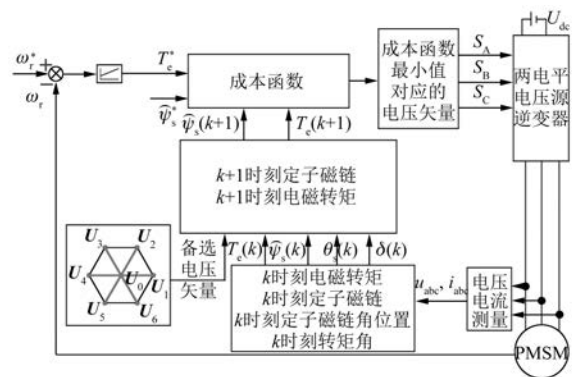


图 1 传统 SPMSM MPTC 系统

基于 MATLAB/Simulink 建立 SPMSM MPTC 仿真模型。仿真模型为离散模型,采样周期为  $5 \times 10^{-5}$  s。直流母线电压为 312 V,转速 PI 调节器参数为  $K_p = 5$ 、 $K_i = 100$ ,PI 调节器输出上下限为  $[-35, 35]$ 。参考转速为 60 r/min,1.0 s 时阶跃至 30 r/min。负载转矩初始为 10 N·m,0.5 s 时阶跃

至 30 N·m。参考定子磁链幅值为 0.3 Wb。仿真总时长为 1.5 s。仿真用 SPMSM 参数如表 1 所示。传统 MPTC SPMSM 转矩和定子磁链幅值如图 2、图 3 所示。

表 1 仿真用 SPMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻/ $\Omega$	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

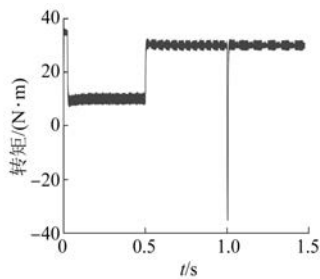


图 2 传统 MPTC SPMSM 转矩

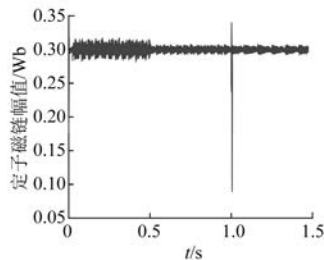


图 3 传统 MPTC SPMSM 定子磁链幅值

相同仿真条件下,基于开关表的 DTC 下的 SPMSM 转矩和定子磁链幅值如图 4、图 5 所示。

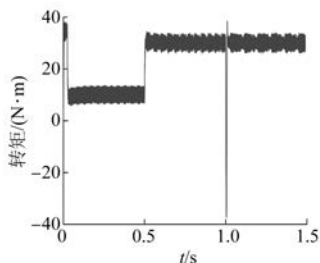


图 4 基于开关表的 DTC 下的 SPMSM 转矩

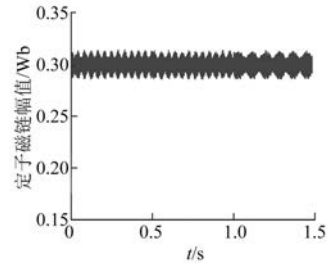


图 5 基于开关表的 DTC 下的 SPMSM 定子磁链幅值

定义稳态(0.1~1.0 s)转矩脉动均方根误差(RMSE)、稳态磁链脉动 RMSE 和平均开关频率<sup>[13-15]</sup>为

$$T_{rip\_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (5)$$

$$\psi_{rip\_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (6)$$

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6t} \quad (7)$$

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

基于开关表的 DTC 与传统 MPTC 下的 SPMSM 稳态转矩 RMSE、稳态磁链 RMSE 和平均开关频率仿真结果如表 2 所示。

表 2 SPMSM 稳态转矩 RMSE、稳态磁链 RMSE 和平均开关频率

控制策略	稳态转矩 RMSE / $(\text{N}\cdot\text{m})$	稳态磁链 RMSE/Wb	平均开关频率 /kHz
基于开关表的 DTC	1.596 3	0.005 2	5.14
传统 MPTC	0.900 5	0.003 7	4.70

对比仿真结果可知,与基于开关表的 DTC 相比,传统 MPTC 可有效减小磁链和转矩脉动。同时,因为传统 MPTC 使用零电压矢量,所以平均开关频率也有所降低。但传统 MPTC 需要遍历 7 个基本电压矢量,计算量大,且在转速阶跃下,传统 MPTC 牺牲了磁链控制性能,磁链脉动较大。

## 2 基于开关表的 MPTC

由上文可知,传统 MPTC 从全部 7 个基本电压矢量中选取最优电压矢量,优化了系统控制性

能,但系统计算量较大。基于开关表的 DTC 使用电压矢量唯一,可实现系统正常运行,但磁链和转矩脉动较大。

对传统 MPTC 的电压矢量使用率情况分析可知,在上文仿真条件下,零电压矢量的使用率为 53.41%,即多数情况下,零电压矢量是 MPTC 选出的最优电压矢量。因此,本文提出一种基于开关表的 MPTC 方法。备选电压矢量由开关表决定的电压矢量  $U_{ST}$  和零电压矢量  $U_0$  组成,系统比较  $U_{ST}$  和  $U_0$  确定的成本函数,选择成本函数最小所对应的电压矢量作为最终输出。此时,MPTC 备选电压矢量集合仅有 2 个电压矢量。为了进一步减小计算负担和开关次数,本文使用含零电压矢

量的开关表,如表 3 所示<sup>[18-20]</sup>。当减小磁链和转矩时, $U_{ST}$  也为  $U_0$ ,则直接输出零电压矢量,无需通过 MPTC 计算。

表 3 含零电压矢量 SPMSM DTC 开关表

$\phi$	$\tau$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
1	1	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_1$
1	0	$U_6$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$
0	1	$U_3$	$U_4$	$U_5$	$U_6$	$U_1$	$U_2$
0	0	$U_0$	$U_0$	$U_0$	$U_0$	$U_0$	$U_0$

基于开关表的 SPMSM MPTC 系统如图 6 所示。

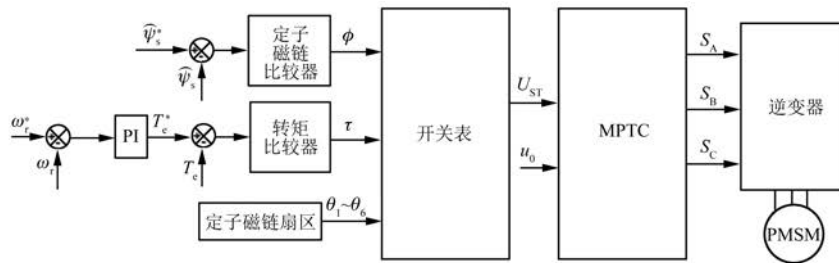


图 6 基于开关表的 SPMSM MPTC 系统

在相同仿真条件下,SPMSM 转矩、定子磁链幅值如图 7、图 8 所示。

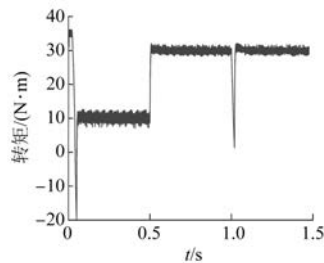


图 7 基于开关表的 MPTC 下的 SPMSM 转矩

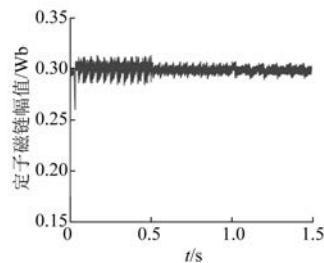


图 8 基于开关表的 MPTC 下的 SPMSM 定子磁链幅值

此时, SPMSM 稳态转矩 RMSE 为

0.680 8 N·m,稳态磁链 RMSE 为 0.004 0 Wb,平均开关频率为 1.52 kHz。

对比上文仿真结果可知,基于开关表的 MPTC 可有效减小转矩脉动和平均开关频率,消除了转速阶跃下的磁链脉动,且模型预测控制运算次数减少为 2 次或 0 次,提高了系统实时性能。但当系统动态减小转矩时,因为大量使用零电压矢量,所以将导致转矩动态性能较差和磁链脉动较大。

### 3 自适应切换控制策略

由上文可知,基于开关表的 MPTC 稳态性能最优,但动态响应慢,适用于稳态;DTC 动态响应快,但稳态转矩和磁链脉动较大,适用于动态。因此,本文结合两者优点,提出将 DTC 与 MPTC 自适应动态切换的控制策略。当系统处于稳态时,采用基于开关表的 MPTC,而当系统处于动态时,采用 DTC。为了提升系统动态性能,DTC 采用不含零电压矢量的开关表<sup>[21]</sup>。本文采用转矩误差绝对值来判断系统状态,当转矩误差绝对值大于

2 N·m, 系统处于动态; 否则, 系统处于稳态。

基于自适应动态切换控制下的 SPMSM 转矩和定子磁链幅值如图 9、图 10 所示。

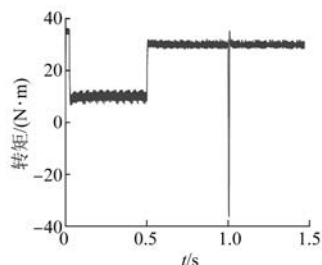


图 9 基于自适应动态切换控制下的 SPMSM 转矩

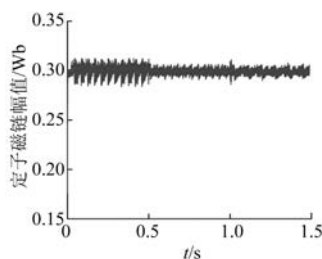


图 10 基于自适应动态切换控制下的 SPMSM 定子磁链幅值

此时, SPMSM 的稳态转矩 RMSE 为 0.687 9 N·m, 稳态磁链 RMSE 为 0.004 1 Wb, 平均开关频率为 1.58 kHz。

对比上文仿真结果可知, 在 DTC 与 MPTC 自适应动态切换控制下, 系统控制性能基本相当, 但提高了转矩动态响应, 消除了动态下的磁链脉动。

## 4 结 语

本文提出一种基于开关表的 MPTC 方法, 将传统 MPTC 的 7 个备选电压矢量精简为 1 个由开关表输出的电压矢量和 1 个零电压矢量, 从而将备选电压矢量减少至 2 个或 1 个。仿真结果表明: 该控制策略可有效减小转矩脉动和平均开关频率, 消除了转速阶跃下的磁链脉动, 且将模型预测控制的运算次数降低到 2 次或者 0 次, 减少了系统的运算负担。为了进一步提升系统动态特性, 提出根据系统状态将 DTC 与 MPTC 自适应切换控制的策略。系统处于稳态时, 采用基于开关表的 MPTC; 系统处于动态时, 采用 DTC。仿真结果表明: 该策略结合了 MPTC 和 DTC 的优点, 在

保持控制效果的同时, 提高了转矩动态响应, 消除了动态下的磁链脉动。

## 【参 考 文 献】

- [ 1 ] ZHONG L, RAHMAN M F, HU W Y, et al. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(3) : 528.
- [ 2 ] XU J, OUYANG M, TANG R. Direct torque control of permanent magnet synchronous traction motor in electrical vehicle drive [ J ]. 电工技术学报, 2006, 21(7) : 94.
- [ 3 ] 李耀华, 刘卫国. 永磁同步电机直接转矩控制不合理转矩脉动 [ J ]. 电机与控制学报, 2007, 11(2) : 148.
- [ 4 ] 李耀华, 马建, 刘晶郁, 等. 永磁同步电机直接转矩控制系统电压矢量选择区域 [ J ]. 长安大学学报 (自然科学版), 2012, 32(1) : 95.
- [ 5 ] 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.
- [ 6 ] CORTES P, KAZMIERKOWSKI M P, KENNEL R M, et al. Predictive control in power electronics and drives [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(12) : 4312.
- [ 7 ] RODRIGUEZ J, KENNEL R, 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.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 李耀华, 师浩浩, 孟祥臻, 等. 基于预测控制的 SPMSM 直接转矩控制最优电压矢量选择策略 [ J ]. 电机与控制应用, 2018, 45(6) : 21.

(下转第 26 页)