

永磁同步电机有限控制集模型预测转矩控制系统研究*

李耀华, 苏锦仕, 秦 辉, 刘 洋, 杨启东, 任佳越
(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 建立了基于定子磁链 x - y 坐标系的永磁同步电机(PMSM)有限控制集模型预测转矩控制(FCS-MPTC)系统, 仿真验证了系统的有效性和可行性。针对磁链和转矩预测模型较为复杂的问题, 提出了磁链和转矩的简化预测模型。理论分析、仿真和试验结果验证了 FCS-MPTC 的简化模型与常规模型控制效果相当, 可明显减小计算负担, 提高系统实时性能。将电压矢量幅值和角度作为 FCS-MPTC 的控制变量, 设计了变幅值变角度的备选电压矢量集合。仿真结果表明该备选电压矢量集合可有效减小稳态转矩脉动, 但动态性能不及传统备选电压矢量集合。基于不同备选电压矢量的特点, 提出了根据系统状态自适应动态变化的备选电压矢量策略。仿真结果表明, 该控制策略在静态下均可取得良好的控制性能。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测转矩控制(MPTC); 自适应控制; 转矩脉动

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)12-0008-08

Finite Control Set Model Predictive Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor System*

LI Yaohua, SU Jinshi, QIN Hui, LIU Yang, YANG Qidong, REN Jiayue
(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Finite control set (FCS) model predictive torque control (MPTC) system of permanent magnet synchronous motor (PMSM) was built based on stator flux x - y coordinates. Simulation results testified its effectiveness and feasibility. As stator flux and torque predictive models were complicated, simplified predictive models were given. Theoretical analysis, simulation and experiment results showed that FCS-MPTC system using simplified models could achieve equivalent control performances as using conventional predictive models, but simplified model could decrease calculation burden and improve real time performance. A candidate voltage vectors set was proposed with variable amplitude and angle which were used as control variables in FCS-MPTC. The proposed candidate voltage vectors set could suppress torque ripple at steady state, but its dynamic response was worse than that of conventional candidate voltage vectors set. Thus, an adaptive control strategy was proposed, which adaptively used different candidate voltage vectors sets at different states. Simulation results showed that the control strategy could achieve good control performance at both steady and dynamic states.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive torque control (MPTC); adaptive control; torque ripple

0 引 言

有限控制集(FCS)模型预测控制(MPC)充分

利用逆变器有限的开关状态, 基于控制系统预测模型, 遍历得到所有开关状态下的系统输出, 以选择令成本函数最小的开关状态作为输出^[1-5]。近

* 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。

年来,模型预测控制在永磁同步电机(PMSM)领域的应用得到了普遍的关注^[6-14]。

目前 PMSM 模型预测转矩控制(MPTC)大多基于转子磁链 d - q 坐标系或仅针对表贴式永磁同步电机(SPMSM)。本文建立了基于定子磁链 x - y 坐标系的 PMSM FCS-MPTC 系统,将 MPTC 由 SPMSM 领域拓展到内置式永磁同步电机(IPMSM)领域。仿真结果验证了 PMSM FCS-MPTC 系统的有效性和可行性。针对 IPMSM 磁链和转矩预测模型较为复杂、计算耗时较多等问题,提出了磁链和转矩简化预测模型。理论分析、仿真和试验结果验证了简化模型与常规模型控制效果相当,但可明显减小计算用时,提高系统实时性能。施加电压矢量幅值和角度均会影响下一时刻磁链和转矩的预测值,因此,将电压矢量幅值和角度作为模型预测控制的控制变量,设计了一种变幅值变角度的备选电压矢量集合。仿真结果表明,与传统备选电压矢量集合相比,该备选电压矢量集合可减小稳态时转矩脉动,但转矩动态性能较差,且受备选电压矢量角度限制,使得转矩动态变化下磁链产生较大的脉动,更适于静态使用。为此,针对不同备选电压矢量集合的特点,提出了根据系统状态自适应动态变化的备选电压矢量策略。仿真结果表明,该控制策略在静动态下均可取得良好的控制性能。

1 PMSM FCS-MPTC 系统

定子磁链 x - y 坐标系下,忽略定子电阻压降,施加电压矢量一个采样周期后,PMSM 定子磁链变化如图 1 所示。

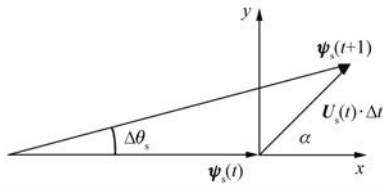


图 1 定子磁链变化

由图 1 可知,施加电压矢量一个采样周期后,下一时刻定子磁链幅值预测模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} \hat{\psi}_s(t+1) = \hat{\psi}_s(t) \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \\ q = \frac{\hat{U}_s(t) \cdot \Delta t}{\hat{\psi}_s(t)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\hat{\psi}_s(t)$ 、 $\hat{U}_s(t)$ ——当前时刻的定子磁链幅值及所施加的电压矢量幅值;

Δt ——采样周期。

由于采样周期极小,可以忽略转子运动对转矩角的影响。由图 1 可知,施加电压矢量一个采样周期后,下一时刻转矩角预测模型如式(2)所示:

$$\delta(t+1) \approx \delta(t) + \Delta\theta_s = \delta(t) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}} \quad (2)$$

式中: $\delta(t)$ ——当前时刻的转矩角;

$\Delta\theta_s$ ——施加电压矢量引起的定子磁链角位置变化。

PMSM 电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3p \hat{\psi}_s \psi_f}{2L_d} (\sin \delta - k \sin \delta \cos \delta) \quad (3)$$

其中: $k = \frac{(L_q - L_d)}{L_q \psi_f} \hat{\psi}_s$ 。

式中: p ——电机极对数;

ψ_f ——永磁体磁链;

L_d 、 L_q ——电机 d 、 q 轴电感。

当 $k=0$,即 $L_d=L_q$,代入式(3)即为 SPMSM 电磁转矩方程。

由式(1)~式(3),可得下一时刻的 PMSM 电磁转矩:

$$T_e(t+1) = \frac{3p \hat{\psi}_s(t+1) \psi_f}{2L_d} \cdot [\sin \delta(t+1) - k(t+1) \sin \delta(t+1) \cos \delta(t+1)] \quad (4)$$

将式(1)~式(2)代入式(4),可得 PMSM 电磁转矩预测模型:

$$T_e(t+1) = \frac{3p \hat{\psi}_s(t) \psi_f}{2L_d} \cdot \left\{ \sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha} \sin \left[\delta(t) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}} \right] - (1+q^2+2q\cos\alpha) \cdot k(t) \cdot \sin \left[\delta(t) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}} \right] \cos \left[\delta(t) + \arcsin \frac{q \sin \alpha}{\sqrt{1+q^2+2q\cos\alpha}} \right] \right\} \quad (5)$$

由 PMSM 磁链和转矩预测模型可知,下一时刻的定子磁链幅值和转矩由施加的电压矢量唯一决定。

定义成本函数 g 如式(6)所示:

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

(6)

式中: T_e^* 、 $\hat{\psi}_s^*$ ——转矩和磁链的参考值;
 $T_e(t+1)$ 、 $\hat{\psi}_s(t+1)$ ——下一时刻转矩和磁链预测值;

g_f ——磁链约束分量。

$$g_f = \begin{cases} 10\,000, & |\hat{\psi}_s(t+1) - \hat{\psi}_s^*| > 0.01 \\ 0, & |\hat{\psi}_s(t+1) - \hat{\psi}_s^*| \leq 0.01 \end{cases}$$

(7)

备选电压矢量集合为两电平电压源逆变器产生的 7 个基本电压矢量:

$$U_s \in \{U_0, U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\}$$

(8)

其中:基于开关次数最小来选择零电压矢量的开关状态^[15-16]。

PMSM 传统 FCS-MPTC 系统控制框图和流程图如图 2 和图 3 所示。

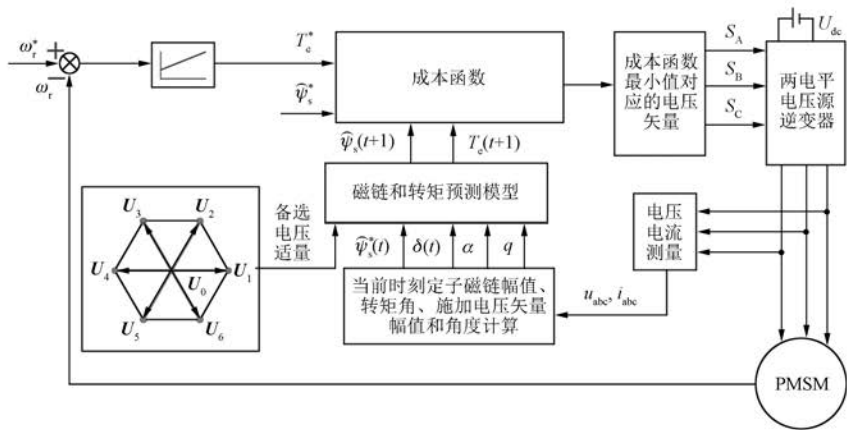


图 2 PMSM 传统 FCS-MPTC 系统结构图

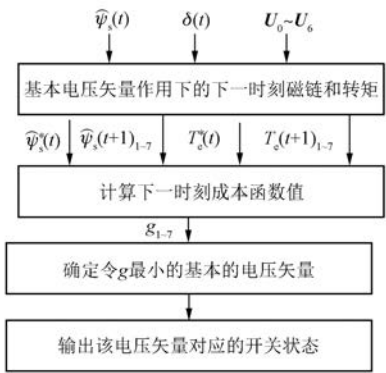


图 3 PMSM 传统 FCS-MPTC 流程图

基于 MATLAB/Simulink 建立基于预测控制的 IPMSM 直接转矩控制系统仿真模型。参考转速为 60 r/min,参考定子磁链幅值为 0.3 Wb;初始负载转矩值为 10 N·m,0.5 s 阶跃至 80 N·m。转速 PI 调节器参数 $K_p = 5$, $K_i = 100$,输出上下限为

$\pm 100\text{ N}\cdot\text{m}$ 。仿真采样周期为 $5\times 10^{-5}\text{ s}$,仿真时长为 1 s。仿真用 PMSM 为 IPMSM,参数如表 1 所示。传统 MPTC 下的 PMSM 转速、转矩、定子磁链幅值和定子磁链轨迹如图 4~图 7 所示。

表 1 仿真用 IPMSM 参数表

电机参数	参数值
定子电阻/ Ω	0.25
d 轴电感/H	0.003 3
q 轴电感/H	0.007 3
转子磁链幅值/Wb	0.226 4
极对数	3
转动惯量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.089
黏性阻尼/ $(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.005

定义转矩脉动均方根误差和磁链脉动均方根误差:

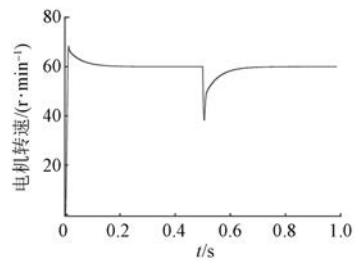


图4 传统 MPTC 下的电机转速

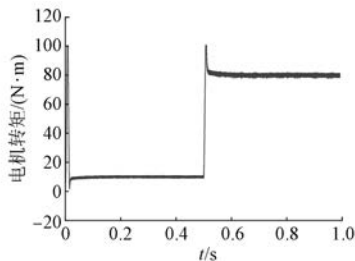


图5 传统 MPTC 下的电机转矩

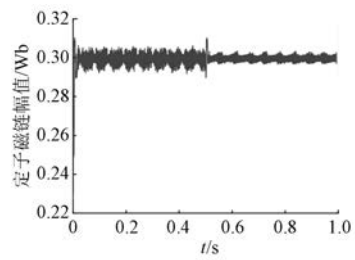


图6 传统 MPTC 下的定子磁链幅值

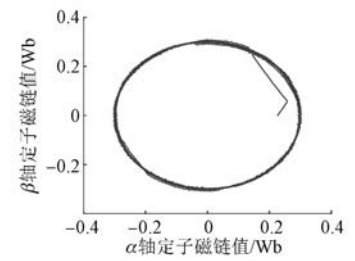


图7 传统 MPTC 下的定子磁链轨迹

$$T_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_e^*)^2}{n}} \quad (9)$$

$$\psi_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\psi_s - \psi_s^*)^2}{n}} \quad (10)$$

式中： n ——采样个数。

经计算,传统 MPTC 下的稳态转矩和磁链控制性能如表 2 所示。

表 2 传统 MPTC 下的稳态转矩和磁链控制性能

时间/s	转矩脉动 均方根误差/ (N·m)	转矩脉动 峰峰值/ (N·m)	磁链脉动 均方根误差/ Wb	磁链脉动 峰峰值/ Wb
0.05~0.45	0.372 9	1.717 6	0.002 3	0.013 9
0.60~1.00	0.828 1	4.006 9	0.001 1	0.006 7

仿真结果验证了基于定子 x - y 坐标系的 PMSM FCS-MPTC 系统可行性。

2 简化预测模型

上文给出的磁链和转矩预测模型较为复杂,计算量较大,因此需要对预测模型进行简化,以提高系统实时性能^[17-18]。

定义定子磁链幅值预测简化模型为

$$\hat{\psi}_s^*(t+1) = (1 + q \cos \alpha) \hat{\psi}_s(t) \quad (11)$$

定义定子磁链幅值预测常规模型与简化模型的相对误差为

$$\eta_{\psi_s} = \left| \frac{\hat{\psi}_s(t+1) - \hat{\psi}_s^*(t+1)}{\hat{\psi}_s(t+1)} \right| \times 100\% \quad (12)$$

当 $0 < q < 0.02$ 和 $0^\circ < \alpha < 360^\circ$ 时, η_{ψ_s} 随 α 和 q 的变化如图 8 所示。

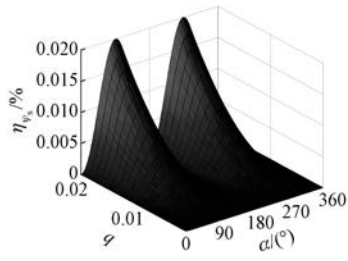


图8 η_{ψ_s} 随 α 和 q 的变化

由图 8 可知,定子磁链幅值预测简化模型的最大相对误差不大于 0.02%。

定义 PMSM 电磁转矩预测简化模型为

$$T_e^*(t+1) = \frac{3p \hat{\psi}_s(t) \psi_f}{2L_d} \cdot \{ \sin \delta(t) - k \sin \delta(t) \cos \delta(t) + q \sin [\alpha + \delta(t)] - k \cdot q \cdot \sin [\alpha + 2\delta(t)] \} \quad (13)$$

定义电磁转矩预测常规模型与简化模型的相对误差:

$$\eta_{T_e} = \left| \frac{T_e(t+1) - T_e^*(t+1)}{T_e(t+1)} \right| \times 100\%$$

(14)

当 $q=0.02, k=1, 15^\circ<\delta<120^\circ$ 和 $0^\circ<\alpha<360^\circ$ 时, η_{T_e} 随 α 和 δ 的变化如图 9 所示。

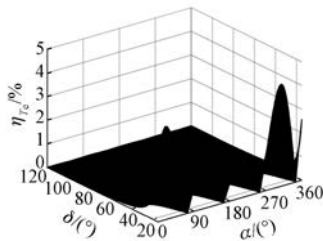


图 9 η_{T_e} 随 α 和 δ 的变化

图 9 表明,当 $15^\circ<\delta<120^\circ$ 时,转矩预测简化模型的最大相对误差不大于 5%。经测算,当 $q=0.02, k=1, 0^\circ<\delta<120^\circ$ 和 $0^\circ<\alpha<360^\circ$ 时,相对误差大于 5% 的数据也仅占 7.2%。

在相同仿真环境下,磁链和转矩预测模型采用简化模型,PMSM 转速、转矩、定子磁链幅值和定子磁链轨迹如图 10~图 13 所示。

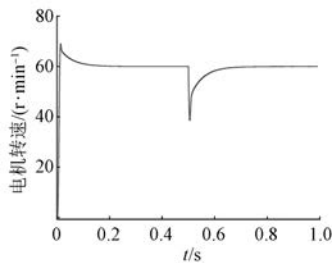


图 10 简化预测模型下的电机转速

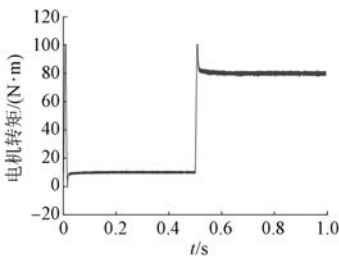


图 11 简化预测模型下的电机转矩

经计算,简化预测模型下的稳态转矩和磁链控制性能如表 3 所示。

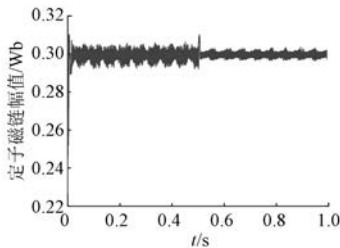


图 12 简化预测模型下的定子磁链幅值

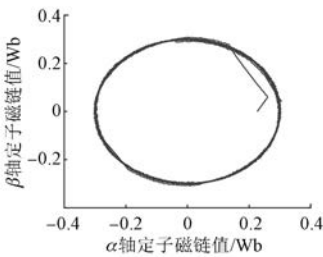


图 13 简化预测模型下的定子磁链轨迹

表 3 简化预测模型下的稳态转矩和磁链控制性能

时间/s	转矩脉动 均方根误差/ (N·m)	转矩脉动 峰峰值/ (N·m)	磁链脉动 均方根误差/ Wb	磁链脉动 峰峰值/ Wb
0.05~0.45	0.381 0	1.725 7	0.002 3	0.013 9
0.60~1.00	0.808 6	4.019 3	0.001 1	0.007 1

仿真结果验证了 PMSM FCS-MPTC 系统采用磁链和转矩简化预测模型的可行性。对比表 2 和表 3 可知,采用常规模型和简化模型的控制效果基本一致。

基于运算频率为 12 MHz 的 STC89C51 单片机平台,本文对磁链和转矩预测常规和简化模型进行代码编程计算,比较两者单步计算结果和运算用时。硬件验证参数:当前时刻定子磁链幅值为 0.300 067 Wb, $k=0.726\ 239$, 转矩角为 $19.970\ 65^\circ, q=0.013\ 33, \alpha$ 为 $177.958\ 8^\circ$, IPMSM 参数与表 1 所示相同。磁链和转矩预测常规和简化模型的计算结果和运算用时如表 4 所示。

表 4 磁链和转矩常规和简化模型的计算结果和运算用时

模型	计算结果	运算用时/ms
磁链常规模型	0.296 06 Wb	6.743
磁链简化模型	0.296 06 Wb	4.075
转矩常规模型	10.210 7 N·m	72.330
转矩简化模型	10.214 2 N·m	18.395

表 4 表明磁链和转矩预测常规和简化模型的计算结果基本相当,但简化模型减小了运算用时,从而有效提高了系统实时性能。

3 变幅值变角度备选电压矢量集合

理论上,图 14 所示的六边形区域的任何电压矢量均可作为 PMSM MPTC 的备选电压矢量。PMSM 磁链和转矩预测模型表明施加的电压矢量幅值和角度均会对磁链和转矩产生影响,即电压矢量的幅值和角度均可作为控制变量^[19-23]。

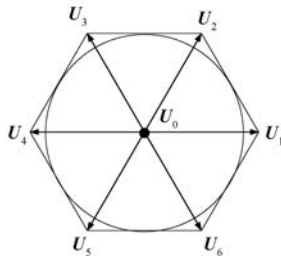


图 14 PMSM MPTC 电压矢量选择区域

为了简化计算和利用直流母线电压,本文将电压矢量选择区域设定为六边形的内切圆。以静止坐标系 α 轴作为起始位置,将内切圆 3 等分,并将内切圆半径 2 等分,从而得到 6 个幅值和角度均变化的非零电压矢量。这 6 个非零电压矢量需要基本电压矢量和零电压矢量采用空间矢量调制生成,但由于其在静止坐标系下的角度和幅值均固定,可通过查表得出合成电压矢量的占空比,避免空间矢量调制实时运算。零电压矢量对提高系统控制性能和减小开关频率具有重要的作用,因此,可得备选电压矢量集合:

$$U_s \in \left\{ U_0, \frac{\sqrt{3}}{6} \angle 0^\circ, \frac{\sqrt{3}}{3} \angle 0^\circ, \frac{\sqrt{3}}{6} \angle 120^\circ, \frac{\sqrt{3}}{3} \angle 120^\circ, \frac{\sqrt{3}}{6} \angle 240^\circ, \frac{\sqrt{3}}{3} \angle 240^\circ \right\} \quad (15)$$

其中,备选电压矢量个数也为 7 个,没有额外增加系统计算负担。

在相同仿真环境下,磁链和转矩预测模型采用简化模型,基于式 (15) 的新型备选电压矢量集合的 PMSM 转速、转矩、定子磁链幅值和定子磁链轨迹如图 15~图 18 所示。

经计算,新型备选电压矢量集合下的稳态转矩和磁链控制性能如表 5 所示。

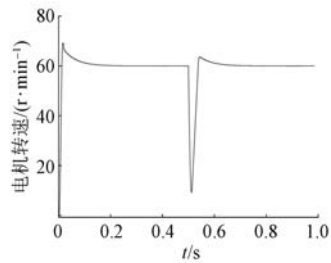


图 15 新型备选电压矢量集合下的电机转速

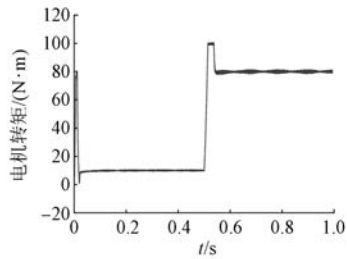


图 16 新型备选电压矢量集合下的电机转矩

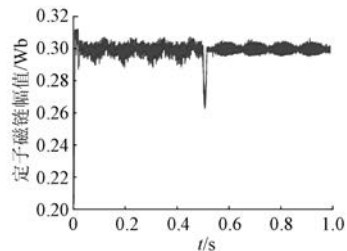


图 17 新型备选电压矢量集合下定子磁链幅值

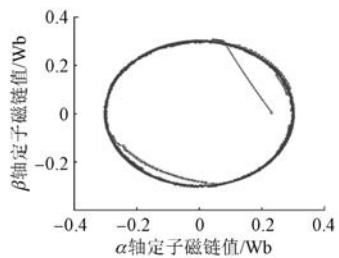


图 18 新型备选电压矢量集合下定子磁链轨迹

表 5 新型备选电压矢量集合下稳态转矩和磁链控制性能

时间/s	转矩脉动	转矩脉动	磁链脉动	磁链脉动
	均方根误差/ (N·m)	峰峰值/ (N·m)	均方根误差/ Wb	峰峰值/ Wb
0.05~0.45	0.191 1	1.047 5	0.002 9	0.018 9
0.60~1.00	0.616 2	3.026 4	0.001 7	0.011 1

基于式(8)的传统备选电压矢量集合与新型备选电压矢量集合控制下的转矩和定子磁链幅值对比如图 19~图 20 所示。

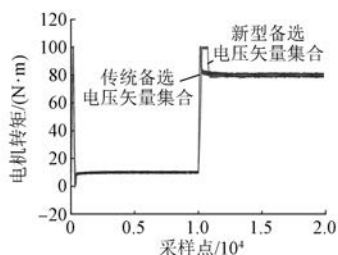


图 19 传统和新型备选电压矢量集合下的电机转矩

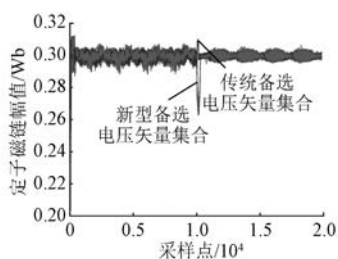


图 20 传统和新型备选电压矢量集合下的定子磁链幅值

由仿真结果可知,新型备选电压矢量集合可减小稳态时的转矩脉动,但转矩动态性能较差,且受备选电压矢量角度限制,使转矩动态变化下的磁链脉动较大。

4 自适应动态备选电压矢量集合

由上文分析可知,传统备选电压矢量集合转矩动态性能好,且在转矩动态变化下磁链不会产生较大的脉动,但稳态下的转矩脉动较大;新型备选电压矢量集合性能稳态性能较好,但动态性能较差。因此,与传统备选电压矢量集合固定的控制策略相比,本文提出自适应动态备选电压矢量集合控制策略,即当系统处于静态时,采用式(15)的新型备选电压矢量集合;当系统处于动态时,采用式(8)的传统备选电压矢量集合。自适应动态备选电压矢量集合控制策略如下。

静态下:

$$\begin{cases} U_s \in \left[\frac{\sqrt{3}}{6} U_{dc}, \frac{\sqrt{3}}{3} U_{dc} \right], \\ \angle U_s \in [0^\circ, 120^\circ, 240^\circ] \end{cases} \quad (16)$$

动态下:

$$\begin{cases} U_s = \frac{2}{3} U_{dc}, \\ \angle U_s \in [0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ] \end{cases} \quad (17)$$

本文采用转矩误差作为系统静态判定条件。

静态下:

$$|T_e - T_e^*| \leq 3 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (18)$$

动态下:

$$|T_e - T_e^*| > 3 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (19)$$

在相同仿真环境下,磁链和转矩预测模型采用简化模型,基于式(16)、式(17)的自适应动态备选电压矢量集合的 PMSM 转速、转矩、定子磁链幅值和定子磁链轨迹如图 21~图 24 所示。

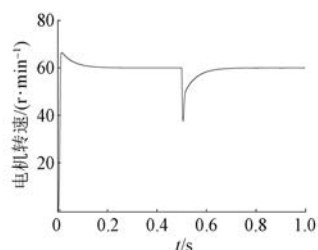


图 21 自适应动态备选电压矢量集合下的电机转速

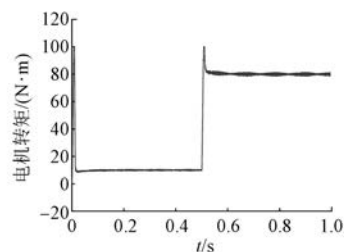


图 22 自适应动态备选电压矢量集合下的电机转矩

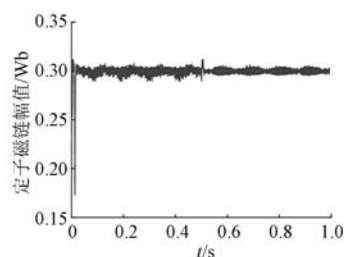


图 23 自适应动态备选电压矢量集合下的定子磁链幅值

经计算,自适应动态备选电压矢量集合下的稳态转矩和磁链控制性能如表 6 所示。

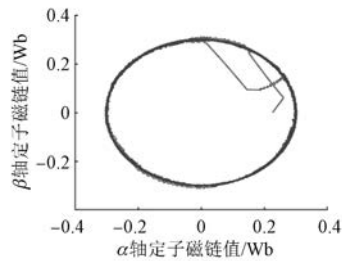


图 24 自适应动态备选电压矢量集合下的定子磁链轨迹

表 6 自适应动态备选电压矢量集合下的稳态转矩和磁链控制性能

时间/s	转矩脉动 均方根误差/ (N·m)	转矩脉动 峰峰值/ (N·m)	磁链脉动 均方根误差/ Wb	磁链脉动 峰峰值/ Wb
0.05~0.45	0.192 1	1.052 3	0.002 8	0.018 8
0.60~1.00	0.623 0	2.915 7	0.001 7	0.011 1

由仿真结果可知,自适应备选电压矢量集合静态性能均较好,且可有效抑制转矩动态变化下的磁链脉动。

5 结 语

本文建立了基于定子磁链 x - y 坐标系的 PMSM FCS-MPTC 系统,并对磁链和转矩预测模型进行了简化,设计了幅值和角度均变化的备选电压矢量集合,并针对不同备选电压矢量的特点,提出根据系统状态自适应变化的备选电压矢量策略,得出如下结论:

- (1) 基于定子磁链 x - y 坐标系的 PMSM FCS-MPTC 系统控制性能良好。
- (2) 基于磁链和转矩预测简化模型的 MPTC 系统控制效果与常规模型基本一致,且减小了运算时长,提高了系统的实时性能。
- (3) 电压矢量的幅值和角度均可作为控制变量。本文提出的变幅值变角度备选电压矢量集合可减小稳态时转矩脉动,但动态效果不及传统备选电压矢量集合。
- (4) 备选电压矢量集合应该根据系统的状态而变化。本文提出的自适应动态备选电压矢量集合控制策略静态控制性能均较好,且可抑制转矩动态变化下磁链脉动。

【参考文献】

[1] CORTES P, KAZMIERKOWSKI M, KENNELRM J, et al. Predictive control in power electronics and drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(12): 4312.

[2] RODRIGUEZ J, KENNEL R M, 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.

[3] RODURGUZE 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.

[4] 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.

[5] 柳志非, 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.

[6] PREINDL M, BOLOGNANI S. Model predictive control with finite control set for PMSM drive systems, Part 1: maximum torque per ampere operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 1912.

[7] PREINDL M, BOLOGNANI S. Model predictive control with finite control set for PMSM drive systems, Part 2: field weakening operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 648.

[8] 牛峰, 李奎, 王尧. 永磁同步电机模型预测直接转矩控制 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19(12): 60.

[9] 周雅夫, 张霖, 王翰涛, 等. 车用永磁同步电机 FCS-MPC 方法研究 [J]. 电力电子技术, 2019, 53(1): 42.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 牛峰, 韩振铎, 黄晓艳, 等. 永磁同步电机模型预测磁链控制 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23(3): 34.

(下转第 46 页)

5 结 语

本文验证了利用改进的 I/F 控制算法和 SMO 协同使用的全速域 PMSM 无位置传感器调速的可行性。根据相关的数学模型和实际的算法调试验证得到的相关仿真及试验数据可知,该算法提高了系统的调速能力和稳定性,提高了 SMO 的观测精度。

【参考文献】

- [1] 张乘玮,沈汉林,唐其鹏.一种高效的 PMSM 无位置传感器 I/F 控制方法[J].微特电机,2017,45(10): 48.
- [2] 刘栋良,王家军,崔丽丽.永磁同步电机参数自适应调速控制[J].电工技术学报,2011,26(8): 159.
- [3] BOLDEA I, PAICU M C, ANDREESCU G D, et al. Active flux DTFC-SVM sensorless control of IPMSM [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(2): 314.
- [4] 谷善茂,何凤有,谭国俊,等.永磁同步电动机无传感器控制技术现状与发展[J].电工技术学报, 2009, 24(11): 14.
- [5] ELBULUK M, LI C. Sliding mode observer for wide-speed sensorless control of PMSM drives [C] // 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003.
- [6] 肖烨然,刘刚,宋欣达,等.基于改进滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器 I/F 起动方法[J].电力自动化设备,2015,35(8): 95.
- [7] 张文斌,黄华.永磁同步电机 I/F 控制策略转矩匹配特性研究[J].船电技术,2016,36(9): 19.
- [8] DONG Q D, RAFAQ M S, HAN H C, et al. Online parameter estimation technique for adaptive control applications of interior PM synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 1438.
- [9] 薛树功,魏利胜,凌有铸.基于扩展卡尔曼滤波的永磁同步电机无传感器矢量控制[J].电机与控制应用,2011,38(8): 15.
- [10] 宋丹,吴春华,孙承波,等.基于滑模观测器的永磁同步电机控制系统研究[J].电力电子技术,2007, 41(3): 9.
- [11] 收稿日期: 2019-08-20
-
- (上接第 15 页)
- [13] 夏长亮,仇旭东,王志强,等.基于矢量作用时间的新型预测转矩控制[J].中国电机工程学报,2016, 36(11): 3045.
- [14] 张晓光,张亮,侯本帅.永磁同步电机优化 MPTC [J].中国电机工程学报,2017,37(16): 4800.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 李耀华,任佳越,师浩浩,等.表贴式永磁同步电机直接转矩控制变角度预测控制[J].电机与控制应用,2018,45(12): 19.
- [20] 李耀华,任佳越,师浩浩,等.表贴式永磁同步电机直接转矩控制变幅值预测控制研究[J].电机与控制应用,2019,46(1): 9.
- [21] 李耀华,孟祥臻,师浩浩,等.基于双变量预测控制的表贴式永磁同步电机直接转矩控制系统[J].电机与控制应用,2019,46(6): 15.
- [22] 谢云辉,郑常宝,胡存刚,等.永磁同步电机模型预测的优化控制策略[J].电力电子技术,2019, 53(7): 39.
- [23] 颜学龙,谢刚,孙天夫,等.基于模型预测控制的永磁同步电机电流控制技术综述[J].电机与控制应用,2019,46(9): 1.
- [11] 收稿日期: 2019-09-20