

基于 MTPA 的内置式永磁同步电机 转矩预测控制 *

张旭隆¹, 王 峰¹, 张 晓², 曹言敬¹

(1. 徐州工程学院 信电工程学院, 江苏 徐州 221111;

2. 中国矿业大学 电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 针对采用矢量控制方法的内置式永磁同步电机(IPMSM)存在解耦复杂、附加优化目标难以融入系统控制等问题,提出了一种基于最大转矩电流比(MTPA)的IPMSM转矩预测控制方法。在推导MTPA控制原理的基础上,分析了转矩预测的控制机理及性能指标函数。22 kW试验样机的仿真与试验结果表明,系统稳态及全局加减负载条件下调速性能良好、转矩动态响应迅速。该方法在重载条件下定子电流利用率显著提高,满足电动车辆驱动控制系统的性能和效率指标要求。

关键词: 内置式永磁同步电机; 最大转矩电流比; 转矩预测控制; 性能指标函数

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)03-0046-05

Torque Predictive Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on MTPA *

ZHANG Xulong¹, WANG Feng¹, ZHANG Xiao², CAO Yanjing¹

(1. Department of Information and Electrical Engineering, Xuzhou University of Technology,
Xuzhou 221111, China;

2. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221116, China)

Abstract: Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) adopting vector control method has decoupling complexity and difficulty of additional optimization goal integrated into system control, IPMSM torque predictive control method based on Maximum Torque per Current (MTPA) is proposed. On the basis of deducing MTPA principle, torque predictive control principle and performance index function are analyzed. 22 kW IPMSM prototype simulation and experimental results show that the system has good static and dynamic performance under load variation condition in full range of speed. The proposed method has higher stator current utilization rate under heavy load condition, and electric vehicle drive performance and efficiency index requirements are achieved.

Key words: interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM); maximum torque per ampere (MTPA); torque predictive control (TPC); performance index function

0 引 言

内置式永磁同步电机(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)以其体积小、

运行效率高、高转矩电流比、高功率密度等优点,在众多高控制精度和快速响应要求场合得到广泛应用^[1-3]。为充分利用磁阻效应来提高电机效率和改善调速特性,目前电动车辆驱动系统较多采

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(U1610113);江苏省高校自然科学基金项目(16KJB470017);徐州市应用基础研究计划项目(KC17077);徐州工程学院校青年项目(XKY2017224)

作者简介: 张旭隆(1984—),男,博士,副教授,研究方向为电机控制与电力电子变流技术。

用最大转矩电流比 (Maximum Torque Per Ampere, MTPA) 控制方法^[4-5]。

采用矢量控制方法的 IPMSM 系统需进行复杂解耦,其控制内环的转矩、磁链控制器受 PI 参数值影响较大;同时系统的附加优化目标难以计入系统控制指标。模型预测控制 (Model Predict Control, MPC) 具有高动态响应、多目标优化及灵活的非线性控制方式,使其在变流器及电机控制领域成为研究热点^[4-6]。

目前 MTPA 控制的主要方法有公式计算法、查表法、搜索法和辅助信号注入法等。公式计算法对参数变化过于敏感,不适合实际应用;搜索法控制稳定性略低,约束了其在实际系统中的应用;辅助信号注入法虽提高了参数鲁棒性,但控制过程复杂,实用性不足。查表法尽管运算量较大,但可保证系统的稳定性和可靠性,并且随着先进数字信号处理器和可编程门阵列芯片的升级换代, MPC 方法的运算能力已得到保证^[5-6]。

本文在简要推导 MTPA 控制原理的基础上,给出其数学意义和物理意义。详细分析了转矩预测控制 (Torque Predictive Control, TPC) 的控制机理及性能指标函数,提出了基于 MTPA 的转矩预测控制系统结构框图。仿真与试验结果验证了所提控制策略的可行性与有效性。

1 永磁同步电机 MTPA 控制原理

在 dq 坐标系下, PMSM 的电磁转矩为

$$T_e = \frac{3}{2}p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (1)$$

式中: p ——极对数。

dq 坐标系下将定子电流 i_s 分解,如图 1 所示。

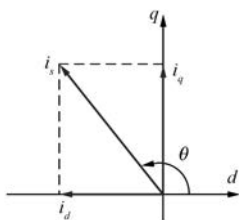


图 1 定子电流的 dq 轴分解

$$\begin{cases} i_d = I_s \cos\theta \\ i_q = I_s \sin\theta \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得:

$$T_e = \frac{3}{2}p[\psi_f I_s \sin\theta + (L_d - L_q)I_s^2 \sin\theta \cos\theta] \quad (3)$$

以 IPMSM 定子电流不变作为条件,其转矩分析如图 2 所示。由图 2 可知,电机的转矩值随电流矢量角度 θ 变化。在 90° 时磁场转矩达到最大值点,其幅值为 80% 的最大磁场转矩;在 135° 时磁阻转矩达到最大值点,其幅值为 36% 的最大磁场转矩;总体而言,电磁转矩最大值处在 $[90^\circ, 135^\circ]$, MTPA 方法控制对应点也即最大转矩电流比运行工作点。

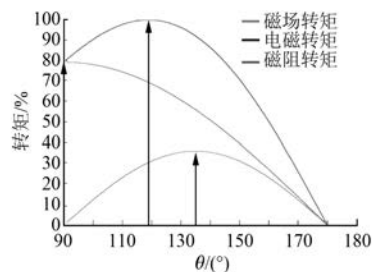


图 2 IPMSM 的输出转矩分析

由上述分析可知, MTPA 控制方法的运行点应满足:

$$\frac{\partial T_e}{\partial \theta} = \frac{3}{2}pI_s[\psi_f \cos\theta + (L_d - L_q)I_s \cos 2\theta] = 0 \quad (4)$$

联立式(2)和式(4)得:

$$i_d + \frac{L_d - L_q}{\psi_f}(i_d^2 - i_q^2) = 0 \quad (5)$$

由式(5)做出以 MTPA 控制时的运行轨迹如图 3 所示。由图 3 可知, MTPA 的运行点为多个电流圆与恒转矩曲线族的相切点, 众多相切点构成了 MTPA 轨迹, 该轨迹目标在于寻求最大的转矩电流比。

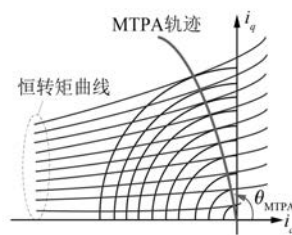


图 3 MTPA 控制的运行轨迹

2 IPMSM 转矩预测控制

2.1 控制机理

电动汽车加速过程中,追求转矩最大化以实现指令转速的快速跟踪,因此为实现高动态性能,需要使电机转矩快速输出至给定值;电动汽车稳态过程中追求电流最小化,即满足 MTPA 规律。此时,同样负载工况下电机功率最低,可实现电动汽车长续航里程要求。

TPC 的性能指标函数包含转矩跟踪目标、MTPA 区域收敛目标和约束限制目标,其具体实现如下:

(1) 转矩跟踪目标。该目标作为电机动态运行过程中的首要目标,主要用于实现减小转矩跟踪误差,其误差函数为

$$g_T = |T_e^{\text{ref}} - T_e^{k+1}| \quad (6)$$

式中: T_e^{ref} ——转矩参考值;

T_e^{k+1} —— $k+1$ 时刻的转矩预测值。

$$T_e^{k+1} = \frac{3}{2} P [\psi_f i_q^{k+1} + (L_d - L_q) i_d^{k+1} i_q^{k+1}] \quad (7)$$

(2) MTPA 区域收敛目标。当 IPMSM 定子电流处于 MTPA 轨迹时,电机保持恒转矩运行,且定子电流最小,其 MTPA 区域收敛函数为

$$g_{\text{MTPA}} = \left| i_d^{k+1} + \frac{L_d - L_q}{\psi_f} [(i_d^{k+1})^2 - (i_q^{k+1})^2] \right| \quad (8)$$

使式(8)的 g_{MTPA} 函数保持为零,也即实际定子电流与理想 MTPA 定子电流误差为零,IPMSM 可达到 MTPA 区域收敛目标。

(3) 约束限制目标。为保证 IPMSM 控制系统运行在逆变器最大输出电流范围之内,设定了约束限制目标,该控制目标仅在电流超出最大度时对其进行限幅,其限流函数为

$$g_{\text{Imax}} = \begin{cases} |I_{\text{max}} - \sqrt{(i_d^{k+1})^2 + (i_q^{k+1})^2}|, \\ 0, & \text{if } I_{\text{max}} > \sqrt{(i_d^{k+1})^2 + (i_q^{k+1})^2} \end{cases} \quad (9)$$

2.2 性能指标函数

从式(1)可知,在假设定子电流幅值不变的情况下,不论 q 轴电流是正值还是负值, $-i_d$ 产生的电磁转矩始终大于 $+i_d$ 产生的电磁转矩。

基于 MTPA 的转矩预测控制策略其性能指标

函数为

$$g(\min) = k_T \cdot g_T + k_{\text{MTPA}} \cdot g_{\text{MTPA}} + k_L \cdot g_L \quad (10)$$

其中,权值系数 k_T 对应转矩跟踪误差函数 g_T ;权值系数 k_{MTPA} 对应 MTPA 区域收敛函数 g_{MTPA} ;权值系数 k_L 对应约束限流函数 g_L 。权值系数的选择遵循 $k_L > k_T > k_{\text{MTPA}}$,而 $g_L = g_{\text{Imax}} + g_{\text{dir}}$,其中方向选择函数 g_{dir} 为

$$g_{\text{dir}} = \begin{cases} \left| 2 \frac{L_d - L_q}{\psi_f} i_d^{k+1} + 1 \right|, \\ 0, & \text{if } 2 \frac{L_d - L_q}{\psi_f} i_d^{k+1} + 1 > 0 \end{cases} \quad (11)$$

基于转矩预测控制方法的 MTPA 控制策略控制结构框图如图 4 所示。

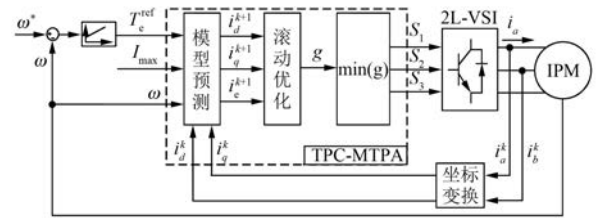


图 4 基于 MTPA 的转矩预测控制结构框图

3 仿真分析

利用 MATLAB 对基于 MTPA 的转矩预测控制策略进行性能分析研究。设计牵动汽车车体质量为 1 500 kg,车轮半径为 0.28 m,迎风面积为 2.4 m²,空气阻力系数为 0.3,传动比为 4.5,传动效率为 95%。驱动电机参数:定子电阻 $R_s = 0.636 \Omega$, d 轴等效电感 $L_d = 0.012 \text{ H}$, q 轴等效电感 $L_q = 0.02 \text{ H}$,永磁体磁链 $\psi_f = 0.088 \text{ Wb}$,极对数 $p = 4$,母线电压 $U_{\text{dc}} = 400 \text{ V}$,采样频率 $f = 10 \text{ kHz}$ 。

图 5 中给出了基于 MTPA 的转矩预测控制仿真运行波形。IPMSM 由零速空载加速运行,其负载转矩 T_L 包括阻尼转矩和惯性转矩两部分。其中,电动汽车加速运行时惯性负载较大,匀速运行时惯性负载为零,阻尼负载保持恒定,如图 5(a) 所示。对应的电磁转矩 T_e 在加速过程中保持额定,完成加速后随负载转矩逐步减小为 0。定子电流 i_{abc} 最大值达到限定值 18 A 时,验证了价值函数中最大电流约束的有效性。此外,从图 5(c) 可知,负载输出过程中 d 轴电流被调节为 $i_d =$

-12 A,以实现 IPMSM 最大转矩电流比输出。该波形验证了价值函数中 MTPA 部分的可行性。为验证所提 MTPA 的转矩预测方法的抗扰能力,0.2 s 时刻在负载电机中突加阶跃负载,并持续 0.3 s。可以看出,图 5(a)中驱动电机快速完成负载转矩响应,对应的电机转速波动幅度较小,且快速恢复至程序设定值 $n=750\text{ r/min}$,见图 5(b)。

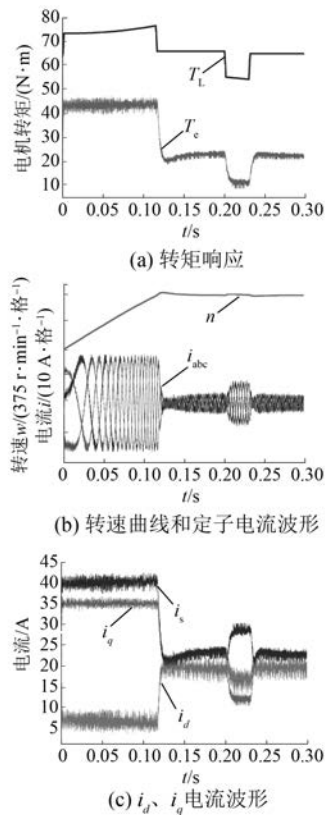


图5 基于 MTPA 的转矩预测控制运行波形

4 试验验证

22 kW 的 IPMSM 控制样机参数如表 1 所示。与 IPMSM 同轴对连的直流电机作为模拟负载,直流电机控制器为西门子的 6RA70。

表 1 IPMSM 样机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.167	q 轴电感/mH	31.7
极对数	3	永磁体磁链/Wb	1.23
d 轴电感/mH	4.5	粘滞摩擦系数/($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$)	0.000 4

与仿真过程类似,驱动电机由零速空载加速运行,负载电机模拟负载 T_L 包含:阻尼转矩和惯

性转矩。其中,阻尼负载以二次型函数随转速 n 缓慢增加,且当转速 n 运行至最大值时阻尼负载达到最大。惯性负载以阶跃型函数变化,且当匀速运行时惯性负载为零,阻尼负载保持恒定,如图 6 所示。相应的 IPMSM 电磁转矩 T_e 随负载电机快速完成响应,且当匀速后出现负载扰动时,TPC-MPTA 可维持电机转矩快速恢复,具有较强的抗扰动能力。

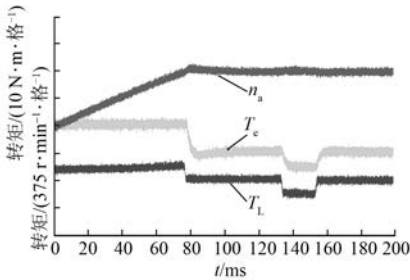


图6 TPC-MPTA 机械部分测试结果

图 7 中 TPC-MPTA 电气部分测试结果表明:IPMSM 的起动、加载到扰动的电流变化波形,起动时定子电流较大,待电机稳定运行后定子电流很小。在加载过程与减载过程中,定子电流响应迅速。

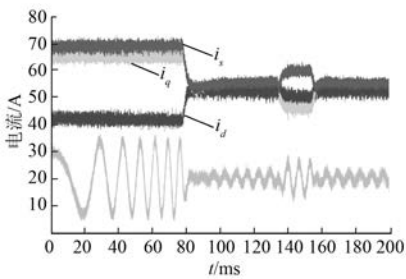


图7 TPC-MPTA 电气部分测试结果

在相同的负载条件下,图 8 为采用本文 TPC-MPTA 控制方法的电机带载稳态运行波形,图 9 为采用 MPC- $i_d=0$ 控制方法的电机带载稳态运行

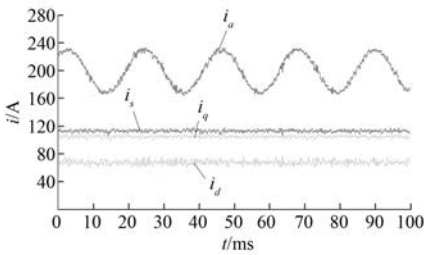
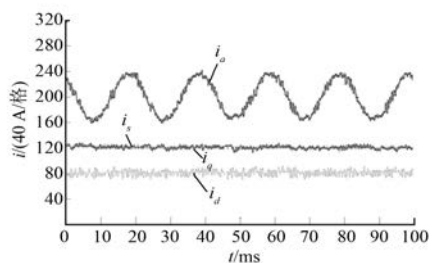


图8 TPC-MPTA 稳态运行波形

图9 MPC- $i_d=0$ 稳态运行波形

波形。由于 TPC-MTPA 控制充分利用了磁阻转矩,从而定子电流幅值较小;而 MPC- $i_d=0$ 控制所输出的电磁转矩全部由转矩 i_q 产生,从而定子电流幅值较大。由此对比结果表明,TPC-MTPA 控制定子电流利用率较高。

TPC-MTPA 和 MPC- $i_d=0$ 两种控制方法下的转矩特性试验统计图如图 10 所示。电机轻载条件下,定子电流幅值相近,其主要原因在于磁阻转矩所占比重较小;在电机逐渐加载至重载过程中,两种控制方法在定子电流幅值上的差值越来越大,因此在电机加载至重载过程中,本文所提 TPC-MTPA 控制方法相较于 MPC- $i_d=0$ 控制方法在定子电流利用率指标上优势明显。

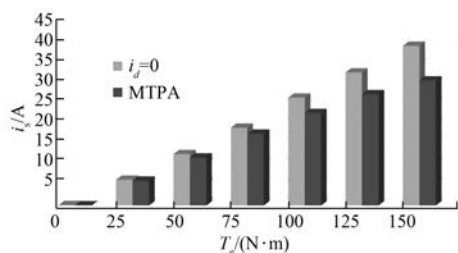


图10 转矩特性试验统计

5 结 语

本文以一台 22 kW IPMSM 为研究对

象,在推导 MTPA 控制原理的基础上,利用 MPC 的思想,提出了一种基于 MTPA 的 TPC 策略,通过转矩跟踪、MTPA 区域收敛及定子电流约束限制 3 个附加指标,给出了性能指标函数,实现了 IPMSM 转矩控制目标。仿真和试验结果验证了所提控制策略的可行性和有效性,系统动静态性能良好,相比 $i_d=0$ 控制方法,重载条件下定子电流利用率提高,尤其适用于电动车辆驱动应用场合,且控制算法实现简单,易于工程实现。

【参考文献】

- [1] 张文娟,冯焱径,黄守道,等.基于迭代法的内置式永磁同步电机最大转矩/电流控制[J].电工技术学报,2013,28(增刊1):402-407.
- [2] 徐向前,徐文静,杨士慧.基于预测模型的永磁同步电机直接转矩控制[J].电机与控制应用,2017,44(1):29-33.
- [3] 廖勇,伍泽东,刘刃.车用永磁同步电机的改进 MTPA 控制策略研究[J].电机与控制学报,2012,16(1):12-17.
- [4] KIM S, YOON Y D, SUL S K, et al. Maximum torque per ampere (MTPA) control of an IPM machine based on signal injection considering inductance saturation [J]. Power Electronics IEEE Transactions on, 2013, 28(1): 488-497.
- [5] 张伯泽,阮毅.内嵌式永磁同步电机最大转矩电流比控制研究[J].电机与控制应用,2015,42(2):13-15.
- [6] ZHU H, XIAO X, LI Y. Torque ripple reduction of the torque predictive control scheme for permanent-magnet synchronous motors [J]. Industrial Electronics IEEE Transactions on, 2012, 59(2): 871-877.

收稿日期: 2017-08-07

中文核心期刊 中国科技核心期刊 中国学术期刊(光盘版)

全国优秀科技期刊 华东优秀科技期刊

中国科学引文数据库来源期刊 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊