

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.09.013

一种凸极式永磁同步电机闭环 MTPA 控制策略研究*

蔡国庆,姚文熙*,章 玮

(浙江大学 电力电子技术研究所,浙江 杭州 310027)

摘要:针对基速以下时采用最大转矩电流比控制的闭环矢量控制系统中,当给定转矩或负载转矩突变时,因电流调节器饱和而导致电机动态跟踪过程中实际工作状态脱离 MTPA 的问题,对凸极式永磁同步电机的 MTPA 控制、控制器饱和和限幅等方面进行了研究。提出了一种 d 轴电流环优先响应的控制器限幅策略,以优化系统动态跟踪过程中的电流跟踪轨迹提升稳定性;在此基础上,提出了一种采用 q 轴反馈电流在线修正 d 轴给定电流的闭环 MTPA 控制策略;利用 Matlab/Simulink 搭建了系统仿真模型,并利用基于 TMS320F28335 的电机控制系统对闭环 MTPA 控制策略进行了实验研究。研究表明:该控制策略在转矩突变时, d 轴给定电流可以实时修正,并迅速跟踪,维持电机在动态跟踪过程中实际电流矢量在 MTPA 附近。

关键词:矢量控制;最大转矩电流比控制;凸极式永磁同步电机;限幅

中图分类号:TH39;TM34

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)09-0970-05

Closed loop MTPA control of interior permanent magnet synchronous motor

CAI Guo-qing, YAO Wen-xi, ZHANG Wei

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem that the closed-loop vector control system which is designed to work in maximum torque per ampere (MTPA) state below the base speed, may no longer satisfies the MTPA state when a step torque command or load is applied, the MTPA control and saturation limiting of controller of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) were studied. The main cause is the saturation of current regulators, so a limiting strategy was proposed to optimize current track. On this basis, an improved MTPA control which take the d -axis current loop as the MTPA correction loop was proposed. Matlab/Simulink simulation model was built, and the performance of the control scheme was carried out through the experimental platform based on TMS320F28335. The result indicate that when a step torque is applied, the given current of d -axis is corrected according to the real current of q -axis, and the actual current trajectories in the dynamic process of the motor maintained near MTPA curve.

Key words: vector control; maximum torque per ampere control (MTPA); interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM); limiting

0 引 言

在众多可用于电动汽车驱动的电机中,永磁同步电机(PMSM)以其结构简单、运行可靠等显著优点,成为国内外学者研究的热点,尤其是具有优异调速性能的凸极式永磁同步电机(IPMSM),已经广泛应用于电

动汽车驱动系统的开发之中^[1]。

IPMSM 因磁路的不对称可以产生额外的磁阻转矩,为了充分利用磁阻转矩,减小铜损,通常采用最大转矩电流比(MTPA)控制。为了实现 MTPA 控制,文献[2]中利用电机参数直接计算 MTPA 工作点,但是电机参数受温度、磁饱和等因素的影响而变化^[3],为

收稿日期:2017-12-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677168)

作者简介:蔡国庆(1993-),男,安徽淮北人,硕士研究生,主要从事电动大巴汽车驱动系统设计方面的研究。E-mail:cguoqing1993@qq.com

通信联系人:姚文熙,男,副教授,硕士生导师。E-mail:ywxi@zju.edu.cn

了提升系统的鲁棒性,相关学者提出了几种改进的 MTPA 实现策略。文献[4]提出了一种非线性的磁链模型,拟合 MTPA 轨迹;文献[5]采用参数辨识得到更准确的参数,但计算量大、系统复杂;文献[6-8]中采用高频信号注入法,与电机参数无关,是现在研究的热点;文献[9]中查表法因结构简单,易于实现而在工程中被广泛采用。

但是,上述几种方法没有考虑电流动态跟踪特性。如果电机给定转矩突变,引起电流调节器输出电压饱和,会使电流控制器短时间内失控。对此,文献[10]提出了一种基于电压反馈调节的电流控制策略,在电压饱和时负向补偿 d 轴参考电流。该方法提升了转矩响应速度,但实际电流轨迹会脱离 MTPA 曲线。

为了实现永磁同步电机在基速以下工作,转矩突变时,电流动态跟随过程中的 MTPA 状态,提升系统稳定性,本文将提出一种闭环修正方式,并通过 Matlab 验证该方法的可行性。

1 IPMSM 数学模型

建立 $d-q$ 轴同步旋转坐标系。在基于转子磁场定向的矢量控制系统中,将 d 轴定位于转子磁链方向^[11],则 IPMSM 在该坐标系下的数学模型如图 1 所示。

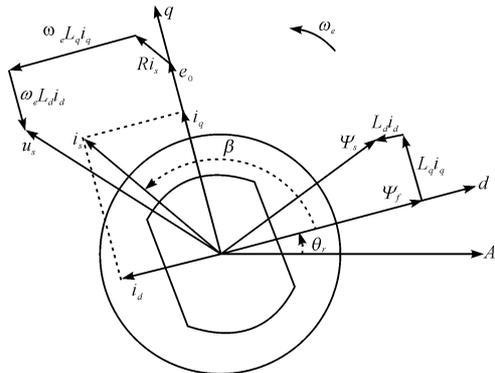


图1 同步旋转坐标系下 IPMSM 的稳态矢量图

在 $d-q$ 同步旋转坐标系下,凸极式永磁同步电机定子电压方程可表示为:

$$\begin{aligned} u_d &= Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} + e_d \\ u_q &= Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + e_q \end{aligned} \quad (1)$$

式中: u_d, u_q — $d-q$ 轴定子电压分量; i_d, i_q —定子电流分量; L_d, L_q — $d-q$ 轴等效电感; R —定子电阻; e_d, e_q — $d-q$ 轴耦合反电动势。

其值可表示为:

$$\begin{aligned} e_d &= -\omega_e L_q i_q \\ e_q &= \omega_e (\psi_f + L_d i_d) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ω_e —同步旋转坐标系下的电角频率; ψ_f —转子永磁体磁链值。

IPMSM 的转矩方程与运动方程如下:

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

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (4)$$

式中: P_n —电机极对数; T_e —电机输出电磁转矩; T_L —负载转矩; ω_m —电机机械角频率; B —机械摩擦系数;

2 MTPA 控制

对于 IPMSM,其转子为插入式结构,导致电动机气隙不均匀,有 $L_d < L_q$ 。由公式可知:电机参数不变的情况下,定子电流的两个分量共同决定电磁转矩的大小。对每一个 T_e ,都有无数组 i_d 和 i_q 与之对应,这就需要确定两个电流分量的分配原则,也就是定子电流的优化控制问题。

电机转速在基速以下,恒转矩区工作时,铜耗比重较大^[1]。若输出转矩不变,控制定子电流分量使定子电流幅值最小,就可以减小电机损耗。

在 $d-q$ 电流坐标系中,由转矩公式可以确定给定转矩对应的转矩曲线。转矩曲线上距离原点最近的点,即为该转矩下 MTPA 工作点,此时电流矢量幅值(距离原点位置)最小。将不同转矩曲线上 MTPA 点连在一起可以得到该电机的 MTPA 曲线。

为求 MTPA 曲线上 $d-q$ 轴电流的关系,转矩公式可变换为:

$$T_e = \frac{3}{2} P_n I_s \sin\beta [\psi_f + (L_d - L_q) I_s \cos\beta] \quad (5)$$

式中: I_s —同步旋转坐标系下给定电流幅值; β —电流矢量角。

电流幅值不变时,求输出转矩的极值,转矩对 β 的微分为零,即满足公式:

$$\frac{\partial T_e}{\partial \beta} = \frac{3}{2} P_n [\psi_f I_s \cos\beta + (L_d - L_q) I_s^2 \cos 2\beta] = 0 \quad (6)$$

由式可得:

$$\beta_{MTPA} = \cos^{-1} \left(\frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 I_s^2}}{4(L_d - L_q) I_s} \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} i_{d|MTPA} &= I_s \cos\beta_{MTPA} \\ i_{q|MTPA} &= I_s \sin\beta_{MTPA} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: β_{MTPA} —给定电流幅值 I_s 不变时,对应的 MTPA 状态的电流矢量角; $i_{d|MTPA}, i_{q|MTPA}$ —对应的 $d-q$ 轴电流分量。

化简上式,可以得到 MTPA 曲线上 $d - q$ 轴电流分量满足公式:

$$i_d = \frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_q^2}}{2(L_d - L_q)} \quad (9)$$

传统的 MTPA 控制策略,利用电机相关参数根据相关公式计算 $d - q$ 轴电流分量,并分别进行闭环控制。但实际电机控制系统中,电机参数受温度、磁饱和等因素的影响而非线性变化。而直接采用公式计算还带来了很大的计算量。工程上常采用查表法,表格数据可由离线实验获得。

在双闭环矢量控制系统中,MTPA 控制的基本框图如图 2 所示。

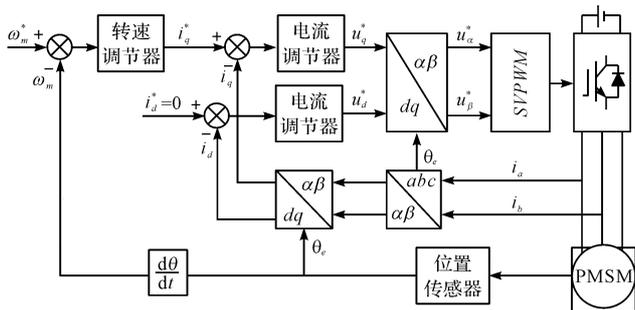


图 2 开环查表法 MTPA 控制框图

由图 2 可知:转速调节器的输出为转矩给定,经过 MTPA 策略得到给定 $d - q$ 轴电流给定。电流给定与反馈的差值经电流调节器(多为 PI 调节器)输出电压给定。理想情况下电压给定满足下式:

$$\begin{aligned} u_d^* &= K_{pd} \left(1 + \frac{K_{id}}{s} \right) (i_d^* - i_d) \\ u_q^* &= K_{pq} \left(1 + \frac{K_{iq}}{s} \right) (i_q^* - i_q) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $K_{pd}, K_{id}, K_{pq}, K_{iq}$ — $d - q$ 轴电流环 PI 调节器的比例和积分系数; i_d^*, i_q^* — $d - q$ 轴给定电流; i_d, i_q — $d - q$ 轴反馈电流; u_d^*, u_q^* — $d - q$ 轴电流环输出给定电压; $1/s$ —积分项。

若电压给定可由逆变器准确合成,忽略定子电阻压降,则 $d - q$ 轴电流斜率可由公式化简为:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{u_d^* - e_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{u_q^* - e_q}{L_q} \end{aligned} \quad (11)$$

电流环可以看成是一阶低通滤波器,稳态时无静态误差,因此满足 MTPA 状态。

但电流环响应需要时间,此外在实际的电机驱动系统中,逆变器输出受直流母线电压和 PWM 调制策略的限制。对于 SVPWM 调制,线性调制区,给定电压矢

量被限制在正六边形的内切圆内,电流环 PI 控制器输出存在限幅环节。当给定转矩突变时,电流偏差较大,容易引起控制器输出电压饱和而限幅。

典型的限幅如图 3 所示。

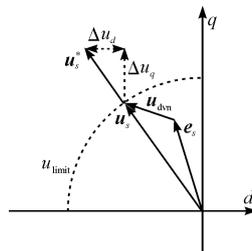


图 3 给定电压矢量限幅

u_s^* —PI 控制器输出电压矢量; e_s —电机反电动势矢量;
 u_s —限幅后实际输出电压矢量; U_{dyn} —近似为 $d - q$ 轴电感上电压矢量

经限幅后,实际输出电压分量减小,则由式可知 $d - q$ 轴电流斜率减小。电流跟踪过程中,实际电流矢量就有可能脱离 MTPA 曲线。

3 MTPA 控制的改进

为了保证动态过程的 MTPA,本研究对传统的开环查表法 MTPA 控制策略进行改进。

3.1 降低给定转矩变化率

从电流环输入的角度,避免电流调节的饱和。若降低给定转矩的变化率,电流环给定的突变减小。由式可知:PI 调节器输出与电流偏差相关,电流偏差小时,减弱了控制器的饱和。给定电流矢量在 MTPA 曲线上缓慢摆动,实际电流矢量也可以迅速跟踪给定电流矢量。

这种方法可以在一定程度实现动态过程的 MTPA,但是给定转矩的斜率影响动态效果,若斜率较大,饱和现象仍然存在;若斜率较小,会影响系统的转矩响应速度,在输出转矩需要突变的场合可能会造成系统故障,如刹车、上坡等。而且当系统的转动惯量较小时,电机转速变化较快,给定转矩变化较慢,还会出现明显的振荡现象。

3.2 闭环修正 MTPA

基于修正 d 轴电流给定和电流环矢量限幅策略,本研究提出一种闭环修正 MTPA 控制。

永磁同步电机系统具有强耦合性,当电压饱和时, $d - q$ 轴电流跟随同时受限,此时相当于全失控状态。尤其当解耦项精度不够时,实际电流矢量跟踪轨迹不定,容易造成系统的不稳定。

输出电压矢量限幅策略如图 4 所示。

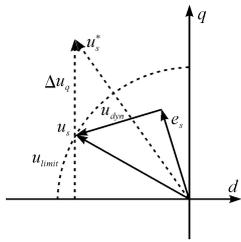


图 4 优先限 q 轴电压

在电压饱和时,优先限制 q 轴给定电压,也即尽量提供 d 轴给定电压,令 d 轴电流优先跟踪。这样在电压饱和时,电流环处于半失控状态,电流矢量跟踪轨迹明确。

在上述限幅策略的基础上,将 d 轴电流环作为 MTPA 修正环,其电流给定值根据 q 轴反馈电流和 MTPA 策略得到,结构如图 5 所示。

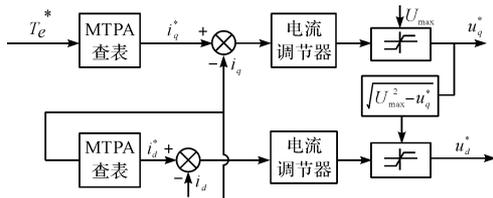


图 5 闭环查表法 MTPA

在给定转矩突变时, q 轴给定电流突变并保持不变,由于电压饱和, q 轴电流跟踪需要一定时间。随着 q 轴电流上升,通过 MTPA 策略查表得到的 d 轴电流给定及时修正,又由于采用上述优先限 q 轴的限幅策略, d 轴电流可以迅速跟踪,修正实际电流矢量至 MTPA 曲线。随着 q 轴电流跟踪到给定点,输出转矩也慢慢跟踪到给定转矩。

4 仿真和实验验证

为了验证闭环 MTPA 的可行性,本研究利用 Matlab/Simulink 对传统的查表法 MTPA 和本文提出的闭环 MTPA 分别进行了仿真。相关电机参数如表 1 所示。

表 1 电机相关参数

参数	符号	值
额定功率/kW	P_n	1
额定电压/V	U_n	220
额定电流/A	I_n	3
额定转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	ω_r	2 000
极对数	n_p	4
定子电阻/ Ω	R_s	1.23
d 轴电感初值/mH	L_d	8.64
q 轴电感初值/mH	L_q	12

仿真统一采用标么化系统,相关物理量简化为无量纲的常值,单位用 pu 表示。为了对比动态过程的 MTPA 特性,同时采用优先限制 q 轴电压的限幅策略做对比。

为了方便观察电流矢量轨迹,在恒转矩模式下工作,令负载转矩为 0.5 pu,给定转矩为 1 pu。仿真结果如图 6 所示。

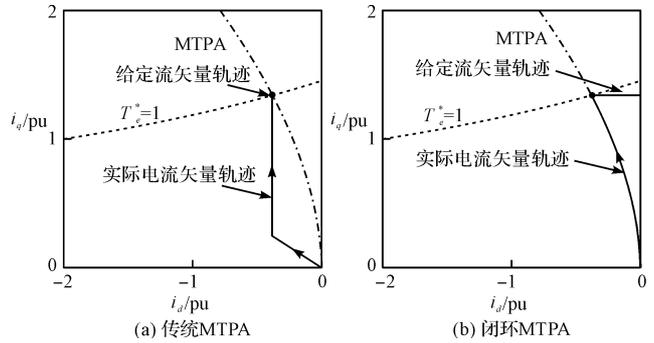


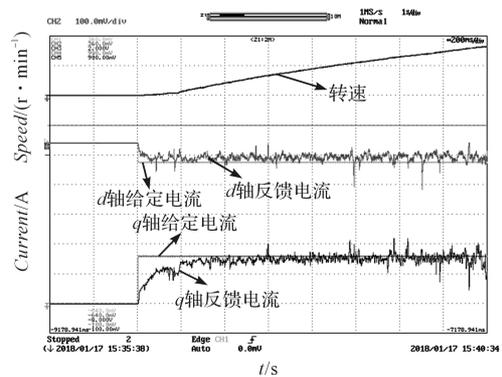
图 6 恒转矩模式下 $d-q$ 轴给定和反馈电流轨迹

由仿真结果可知:传统的查表法 MTPA 系统中,给定转矩恒定时,给定电流矢量恒定,为给定转矩曲线与 MTPA 曲线的交点。输出电压饱和时,因限幅策略的影响,实际电流轨迹如图 6(a) 中实线所示。动态过程中脱离 MTPA 状态,稳态时到达给定电流矢量。

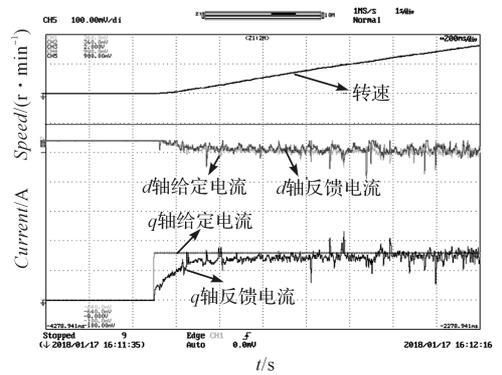
改进后系统实际电流矢量轨迹和给定电流矢量轨迹如图 6(b) 中所示。给定转矩突变后, q 轴电流给定先随之突变。实际 q 轴电流增大后,反馈给 d 轴,修正其给定电流,并因限幅策略的作用而迅速响应,使实际电流矢量修正至 MTPA 曲线上。

为了进一步验证闭环修正 MTPA 的可行性,本研究搭建基于 TMS320F28335 的电机控制实验平台,并进行了实验。

空载下给定 0.1 pu 转矩让电机加速,加速阶段观察 $d-q$ 轴电流波形如图 7 所示。



(a) 传统 MTPA



(b) 闭环 MTPA

图 7 转矩模式下实验波形

由实验结果可以看出:传统 MTPA 与闭环 MTPA 的转速响应基本一致,但闭环 MTPA 的 d 轴给定电流随 q 轴电流上升后才开始下降,而不是直接随给定转矩而突变。实际跟踪过程中,闭环 MTPA 的 d 轴反馈电流基本可以实时跟踪给定,若 MTPA 策略准确,则动态跟随过程中保持 MTPA 状态。

5 结束语

针对永磁同步电机,根据其数学模型,本文分析了基速以下时采用 MTPA 控制的原理,并设计了基于转子磁场定向的矢量控制方案;针对实际矢量控制系统中,因转矩突变而使电流控制器输出饱和,导致动态跟随过程中电流环全失控状态,设计了一种 d 轴电流优先响应的饱和限幅策略,提升了动态过程的稳定性;为了优化电流动态过程跟随轨迹,又设计了一种闭环 MTPA 策略,其将 d 轴电流环设计为 MTPA 修正环,其电流给定根据 q 轴反馈电流实时修正,使其满足 MTPA 关系,由于 d 轴可以优先响应,动态饱和过程中,实际电流矢量被维持在 MTPA 曲线附近。

本文利用 Matlab/Simulink 建立了系统仿真模型,并搭建了基于 TMS320F28335 的电机控制系统。仿真研究结果证明了控制策略的正确性。

参考文献 (References):

- [1] 吴 芳. 内置式永磁同步电机最大转矩电流比控制策略研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2013.
- [2] LEE Y, HA J I. Control method of monoinverter dual parallel drive system with interior permanent magnet synchronous machines[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2016, 31(10):7077-7086.
- [3] ZHU D, LIU G, WANG J, et al. A comparison of two MTPA algorithms for an interior permanent magnet synchronous motor drives[C]. International Conference on Electrical Ma-

chines and Systems, New York: IEEE,2017.

- [4] MIAO Y, PREINDL M, GE H, et al. MTPA fitting and torque estimation technique based on a new flux-linkage model for interior permanent magnet synchronous machines [C]. IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. New York: IEEE, 2016.
- [5] LIU Q, HAMEYER K. High performance adaptive torque control for an IPMSM with real time MTPA operation[J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2016, 32(2): 571-581.
- [6] 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]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2013, 28(1):488-497.
- [7] SUN T, WANG J, KOC M. On accuracy of virtual signal Injection based MTPA operation of interior permanent magnet synchronous machine drives [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2016, 32(9):7405-7408.
- [8] LIU G, WANG J, ZHAO W, et al. A novel MTPA control strategy for IPMSM drives by space vector signal injection [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2017, 64(12):9243-9252.
- [9] JUNG S Y, HONG J, NAM K. Current minimizing torque control of the IPMSM using ferrari's method [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2013, 28(12):5603-5617.
- [10] KWON Y C, KIM S, SUL S K. Voltage feedback current control scheme for improved transient performance of permanent magnet synchronous machine drives [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2012, 59(9): 3373-3382.
- [11] 王成元,夏加宽,孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

蔡国庆,姚文熙,章 玮. 一种凸极式永磁同步电机闭环 MTPA 控制策略研究[J]. 机电工程,2018,35(9):970-974.

CAI Guo-qing, YAO Wen-xi, ZHANG Wei. Closed loop MTPA control of interior permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(9):970-974.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn