

内嵌式永磁同步电机最大转矩电流比控制研究

张伯泽, 阮毅

(上海大学, 上海 200072)

摘要: 对内嵌式永磁同步电机的最大转矩电流比(MTPA)控制进行了研究。根据内嵌式永磁同步电机在 dq 坐标系下的数学模型,用极值原理建立 dq 轴电流与电磁转矩的表达式,实现了内嵌式永磁同步电机的MTPA控制方法。该方法在相同的电磁转矩下,使输入电流幅值最小,减小了电机损耗,降低了逆变器的容量,提高了系统运行效率,改善了系统的动态性能。用仿真对内嵌式永磁同步电机的MTPA控制进行了验证。

关键词: 内嵌式永磁同步电机; 最大转矩电流比; 矢量控制

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2015)02-0013-03

Research on Interior Permanent Magnet Synchronous Motor MTPA Control

ZHANG Boze, RUAN Yi

(Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The research on maximum torque per ampere (MTPA) control of interior permanent magnetic synchronous motor (IPMSM) was presented. Based on the IPMSM math model in $d-q$ reference frame, the equations of d, q axis currents and magnetic torque were derived by using maximum principle. Thus, this method realized the IPMSM MTPA control. Under the condition of same magnetic torque, the IPMSM MTPA control could minimize the input current magnitude, decreased the IPMSM power loss and the inverter capacity, increased the system efficiency and improve the dynamic performance of system. At last, the simulation model verified the MTPA scheme above was correct.

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

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有结构简单、体积小、重量轻、损耗小、功率密度大等优点。与异步电动机相比,无需无功励磁电流,因而效率高、功率因数高、力矩惯量比大。PMSM 可实现控制精度高、动态性能好、调速范围宽等优越的调速控制^[1]。对于内嵌式永磁同步电机 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM),虽然 $i_d = 0$ 控制策略没有去磁作用,控制简单^[2],但该控制没有充分利用 IPMSM 磁阻转矩的作用,不是 IPMSM 的最优转矩控制。最大转矩电流比 (Maximum Torque Per Ampere, MTPA) 控制可以减少电机损耗,提高系统运行效率,改善系统的动态性能,实现

IPMSM 的最优转矩控制。文献 [3-8] 对 IPMSM 的 MTPA 控制进行了研究,但数学模型都认为转子磁链没有漏磁,是完全折算在定子侧的。本文在矢量变换控制的基础上,根据转子磁链折射到定子侧的实际情况,对 IPMSM 的 MTPA 控制进行了研究,即研究在相同的输入电流下如何使输出转矩最大;或者说,在相同的负载转矩下,如何使输入电流幅值最小,二者在本质上都是一致的。最后,本文对 $i_d = 0$ 控制和 MTPA 控制进行了对比仿真研究。仿真结果表明:在相同的电磁转矩下,MTPA 控制比 $i_d = 0$ 控制具有更小的输入电流幅值,动态性能更好。

1 IPMSM 的数学模型

在建立 IPMSM 的数学模型时,为使分析简

化,常作如下假设:忽略铁心饱和效应;不计涡流和磁滞损耗;转子上没有阻尼绕组;每相绕组中感应电动势波形为正弦波。

在以转子磁场定向的同步旋转 dq 坐标系中, PMSM 的数学模型为

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_{sd}}(-R_s i_{sd} + \omega_r \psi_{sq} + u_{sd}) \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_{sq}}(-R_s i_{sq} - \omega_r \psi_{sd} + u_{sq}) \end{cases} \quad (1)$$

其中,磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + L_{md} I_f \\ \psi_{sq} = L_{sq} i_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)整理可得

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_{sd}}(-R_s i_{sd} + \omega_r L_{sq} i_{sq} + u_{sd}) \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_{sq}}[-R_s i_{sq} - \omega_r (L_{sd} i_{sd} + L_{md} I_f) + u_{sq}] \end{cases} \quad (3)$$

电磁转矩为

$$T_e = n_p (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd}) = n_p [\psi_{sd} i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sq} i_{sd}] \quad (4)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} ——定子电压直、交轴分量;

i_{sd} 、 i_{sq} ——定子电流直、交轴分量;

L_{sd} 、 L_{sq} ——直、交轴电感;

L_{md} ——定子与转子永磁体在直轴上的互感;

R_s ——定子电阻;

n_p ——电动机极对数;

ω_r ——永磁同步电机转子角速度;

ψ_f ——转子永磁体产生的磁链。

因为本文采用的坐标变换前提是功率不变,所以式(4)中极对数 n_p 前的系数为 1。

2 MTPA 控制

从式(4)可知,当采用 $i_d = 0$ 控制策略时,其优点是控制简单,在实际中也得到了广泛应用。但是在相同的电磁转矩下, PMSM $i_d = 0$ 控制的定子电流并不是最小的。因此,采用 MTPA 控制方法,使电机在相同的电磁转矩下定子电流最小。该问题可以转化为定子电流 I_s 在式(4)条件下的数学极值问题,即

$$\begin{cases} \min I_s = \sqrt{i_{sd}^2 + i_{sq}^2} \\ \text{条件 } T_e = n_p [L_{md} I_f i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sq} i_{sd}] \end{cases} \quad (5)$$

使用辅助函数:

$$F = i_{sd}^2 + i_{sq}^2 + \lambda [n_p (L_{md} I_f i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sq} i_{sd}) - T_e] \quad (6)$$

式中: λ ——拉格朗日因子。

将式(6)对 i_{sd} 、 i_{sq} 和 λ 分别求偏导并令其为零,则有

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial i_{sd}} = 2i_{sd} + \lambda n_p (L_{sd} - L_{sq}) i_{sq} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial i_{sq}} = 2i_{sq} + \lambda n_p [L_{md} I_f + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd}] = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = n_p [L_{md} I_f i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sq} i_{sd} - T_e] = 0 \end{cases} \quad (7)$$

求解式(7),可得

$$i_{sd} = \frac{L_{md} I_f}{2(L_{sq} - L_{sd})} + \sqrt{\left(\frac{L_{md} I_f}{4(L_{sq} - L_{sd})}\right)^2 + i_{sq}^2} \quad (8)$$

在 IPMSM 的矢量控制中, q 轴电流参考分量由速度环通过 PI 积分得到,代入式(8)即可得到 IPMSM MTPA 控制中的 d 轴电流分量。

3 仿真研究

为了研究 IPMSM 的 MTPA 控制方法,利用 MATLAB/Simulink 搭建仿真系统。IPMSM 的参数如表 1 所示。

表 1 IPMSM 的参数

参数名称	参数取值
定子电阻/ Ω	0.63
定子 d 轴电感/H	0.012
定子 q 轴电感/H	0.018
定、转子 d 轴互感/H	0.010
极对数	3
永磁体磁链/Wb	0.278
转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.000 6
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 200

在 $t = 0.25 \text{ s}$ 时刻突加 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载,仿真结果如图 1~图 4 所示。

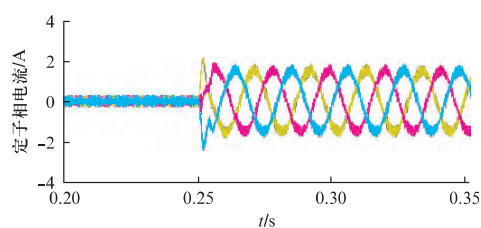
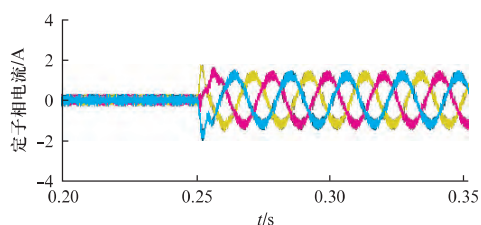
图1 采用 $i_d = 0$ 控制时电机三相电流波形

图2 采用 MTPA 控制时电机三相电流波形

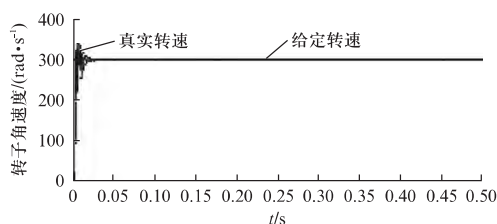


图3 采用 MTPA 控制时电机转速波形

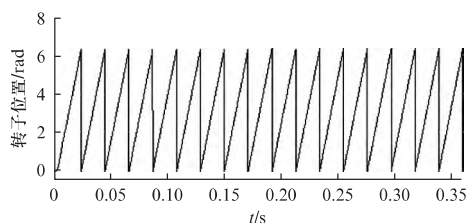


图4 采用 MTPA 控制时电机转子位置波形

从图1与图2的对比可看出,在相同的电磁转矩下,IPMSM的MTPA控制比 $i_d = 0$ 控制的输入电流幅值更小。

4 结 语

本文对IPMSM的MTPA控制进行了研究。该算法在相同的电磁转矩下,使电机输入电流幅

值最小,减小了电机损耗,降低了逆变器的容量,提高了系统运行效率,改善了系统的动态性能。本文对 $i_d = 0$ 控制和MTPA控制进行了仿真研究对比,仿真结果表明:在相同的电磁转矩下,MTPA控制比 $i_d = 0$ 控制具有更小的输入电流幅值。

【参 考 文 献】

- [1] JAHNS T M, KLIMAN G B, NEUMANN T W. Interior permanent magnet synchronous motors for adjustable-speed drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1986, 22(4): 738-747.
- [2] YOUNG K D, UTKIN V I, OZGUNER U. A control engineer's guide to sliding mode control [J]. IEEE transactions on Control Systems Technology, 1999, 7(3): 328-342.
- [3] ALFIO C, GIUSEPPE S, GIACOMO S, et al. Steady-state and transient operation of IPMSMs under maximum-torque-per ampere control [J]. IEEE transactions on Industry Applications, 2010, 46(1): 121-129.
- [4] CASEY B B, HOQUE M A, RAHMAN A. Simplified fuzzy logic based MTPA speed control of IPMSM drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(6): 1529-1535.
- [5] 郭庆鼎, 陈启飞, 刘春芳. 永磁同步电机最大转矩电流比控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(1): 1-5.
- [6] 李长红, 陈明俊, 吴小役. PMSM调速系统中最大转矩电流比控制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 169-174.
- [7] 李军, 余家俊. 基于分段曲线拟合的IPMSM最大转矩电流比控制研究[J]. 四川大学学报, 2012, 44(1): 307-311.
- [8] 李耀华, 刘晶郁. 永磁同步电机矢量控制系统MTPA控制实现[J]. 电气传动自动化, 2011, 33(4): 9-11.

收稿日期: 2014-06-09

[期刊荣誉]

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