

永磁同步电机 MTPA 弱磁控制方法研究

孙旭霞, 岳经凯

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:针对永磁同步电机在升速阶段电流过大和高速阶段稳定性差的问题,在分析永磁同步电机弱磁原理的基础上,选用 MTPA(最大转矩)弱磁控制策略,通过转矩控制达到减少升速时间的目标;利用修正电流值来控制弱磁从而实现增大调速范围。实验在 PSCAD 上建立仿真模型,通过对比永磁同步电机在不同运行阶段参数,结果验证了此方法的可行性和正确性。

关键词:永磁同步电机;弱磁;最大转矩;磁链

中图分类号:TM351

文献标识码:A

Research on the MTPA & Weak Magnetic Control of the Permanent Magnet Synchronous Motor

SUN Xu-xia, YUE Jing-kai

(The Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: For the permanent magnet synchronous motor's problems that are the overload of current in the acc stage and poor stability in high speed operation stage, based on the weak magnetic analysis of the permanent magnet synchronous motor, MTPA weak magnetic control strategy was chosen, and by controlling the torque to reduce acc time; Used fixed current value to control the weak magnetic so as to realize the increase speed range. The experiment established on the PSCAD simulation model, compared the parameters of the permanent magnet synchronous motor in different running stage, and the results verify the feasibility and correctness of this method.

Key words: permanent magnet synchronous motor; weak magnetic; maximum torque; flux

1 引言

永磁同步电动机具有工作可靠、可控性好、效率高、功率因数高等一系列优点,在工业中获得了广泛的应用。但电动机定子电流直轴分量所形成的去磁磁动势作用会导致永磁体性能变坏,是人们十分关注的一个实际问题;此外,随着电机转速的升高,由于供电电压的限制,也会影响电机的电磁转矩的性能,影响电机高速运行的范围及稳定性。因此,电机需要减弱磁场运行,由于永磁同步电机中励磁磁场是一定的,不可能直接将其减弱以获得弱磁控制,所以,只能利用直轴电流,减弱电动机的气隙磁场,已达到弱磁控制的效果。这便是永磁电机弱磁控制的基本思想^[1-3]。

常见的弱磁控制策略有公式计算法、查表法和梯度下降法^[4]等。公式计算法完全依赖于电机数学模型,只具有理论意义,很少在实际工程中应

用;查表法需要大量的实验数据,并且一张表只能对一种电机控制;梯度下降法计算量大,实现较复杂。本文采用修正电流值控制弱磁的方法,这种方法利用交、直轴电流和电压来修正电流,控制算法简单,响应速度快,鲁棒性好。

2 永磁电机模型及控制原理

在理想条件下,永磁同步电机 d, q 轴的稳态数学模型的电压方程^[5]为

$$\begin{cases} u_d = -\omega L_q i_q \\ u_q = \omega(\Psi_f + L_d i_d) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d, u_q 分别为定子电压矢量的 d, q 轴分量; i_d, i_q 分别为定子电流矢量的 d, q 轴分量; Ψ_f 为永磁磁链; ω 为转子电角频率; L_d, L_q 分别为 d, q 轴电感。

电磁转矩方程^[2]为

$$T_e = 1.5 p [\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

作者简介:孙旭霞(1963—),女,研究生,副教授,Email:sunxx@xaut.edu.cn

式中: T_e 为电磁转矩; Ψ_d, Ψ_q 分别为定子磁链的 d, q 轴分量; p 为极对数。

由于受逆变器产生的最大电压及电机本身的限制, 若想将转速拓展到额定值以上是不可能的。为此, 必须减小定子磁链, 即弱磁, 才能进一步提高转速。由于弱磁控制工作高速范围, 为了简单起见, 忽略定子电阻 R_s 电压压降。这样电机弱磁稳态运行时定子电压峰值为

$$\begin{aligned} |u_s| &= \omega_r |\Psi_s| \\ &= \omega_r \sqrt{(\Psi_{fs} + L_d i_{sd})^2 + (L_q i_{sq})^2} \end{aligned} \quad (3)$$

在确定直流母线电压的情况下, 逆变器所能输出的最大定子电压 U_{smax} 也是确定不变的; 而且由于电机工作时发热等原因, 在一定的温升允许情况下, 定子绕组允许流过的最大电流 I_{smax} 也是不变的。这样, 电机在弱磁工作区工作时定子电流 i_s 和端电压 u_s 也会受到如下条件限制^[6]

$$|i_s| \leq I_{smax} \quad |u_s| \leq U_{smax} \quad (4)$$

式中: I_{smax} 为定子电流允许的最大值; U_{smax} 为定子端电压允许最大值。

从上式可以看出, 电流限制为一个圆形:

$$i_{sd}^2 + i_{sq}^2 = I_{smax}^2 \quad (5)$$

只要控制定子电流在此圆的范围内, 即满足最大定子电流限制要求, 即定子电压限制为一个椭圆:

$$\frac{(\Psi_{fs}/L_d + i_{sd})^2}{(U_{smax}/\omega_r L_d)^2} + \frac{i_{sq}^2}{(U_{smax}/\omega_r L_q)^2} = 1 \quad (6)$$

从上式可以看出, 由于 U_{smax} 的限制, 电机不可能无限升速, 当电机角速度达到 ω_r 即 $\omega_r \Psi_s = U_{smax}$ 时, 如果要求继续升速, 就只能靠减弱气隙磁场来实现, 这就是所谓的弱磁调速。对于永磁同步电机, 永磁体产生的磁场是固定的, 无法调节, 只有通过调节定子电流来削弱磁场, 才能维持高速运行时电压方程的平衡。

3 永磁同步电机控制策略

当永磁同步电机永磁体产生的磁链和直交轴电感 L_d, L_q 确定后, 电机的电磁转矩 T_e 便取决于定子电流矢量 i_s , 而 i_s 大小的相位取决于 i_d 和 i_q 。因此只要控制 i_d 和 i_q 便可以控制电机的转矩。一定的转速和转矩对应于一定的 i_d 和 i_q 。分别比较电机的电流实际值 i_d 和 i_q 与给定值, 实现其转速和转矩控制。并且, i_d 和 i_q 独立控制, 便于实现各种先进控制策略。

为了能够获得最大转矩, 需要控制电机的定子电流。通过分析, 电机运行在 3 个区段^[6], 见图 1。

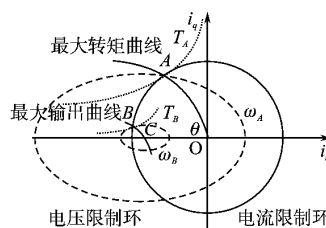


图 1 定子电流矢量运行轨迹

Fig. 1 The stator current vector running track

1) 恒转矩区。这种情况发生在电机运行在基速以下, 此时输出转矩的上限是一定的, 为额定转矩, 转矩矢量的控制策略一般采用 MTPA——最大转矩/电流控制, 如图 1 中 OA 段。 θ 为定子电流矢量与 d 轴的夹角, 则有:

$$\begin{cases} i_d = i_s \cos \theta \\ i_q = i_s \sin \theta \end{cases} \quad (7)$$

通过对式(2)偏导:

$$\frac{\partial T_e}{\partial \theta} = 1.5p[-\Psi_f i_d - (L_d - L_q)(i_d^2 - i_q^2)] = 0 \quad (8)$$

可得电流矢量的电流运行控制方程:

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

2) 弱磁区。当电机速度大于基速时, 受到电压和电流极限环的限制, 电机进入弱磁运行区域, 如图 1 中 AB 段所示。

电机运行于某一转速 ω_e 时, 由式可得弱磁运行是矢量控制方程:

$$i_d = \frac{\Psi_f}{L_d} + \sqrt{\left(\frac{U_{smax}}{L_d \omega_e}\right)^2 - \left(\frac{L_q i_q}{L_d}\right)^2} \quad (10)$$

$$i_q = \sqrt{I_{smax}^2 - i_d^2} \quad (11)$$

通过构造拉格朗日函数求偏导可以得出最大输出功率运行时的电流矢量控制方程:

$$i_d = -\frac{\Psi_f}{L_d} + \frac{\sqrt{(L_q \Psi_f)^2 + 8\left(\frac{U_{smax}}{\omega_e}\right)^2 (L_q - L_d)^2}}{4(L_q - L_d)L_d} \quad (12)$$

$$i_q = \sqrt{\frac{U_{smax}^2}{\omega_e^2} - (L_d i_d + \Psi_f)^2 / L_q} \quad (13)$$

3) 弱磁区域 2。电机作最大转矩弱磁运行时的电流矢量轨迹如图 1 中 BC 段所示。由式(12)、式(13)可求出电机达到最大输出功率点 B 时的转速为 ω_B , 从而可求出此时的转矩 T_B 。

4 系统仿真及分析

图 2 为弱磁控制永磁同步电机的系统框图。

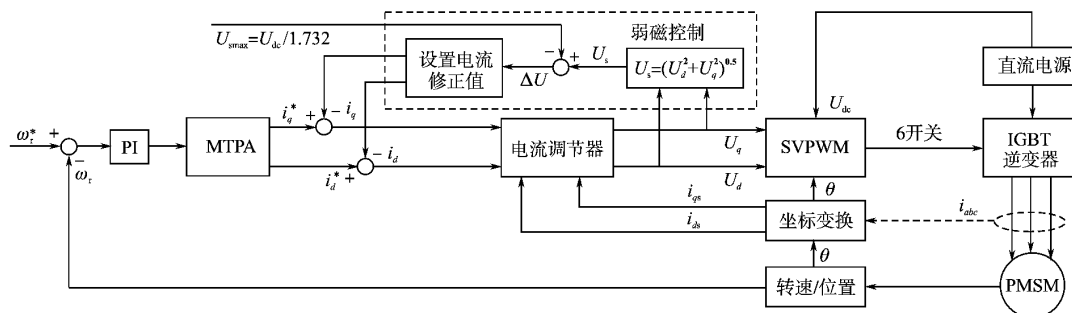


图 2 系统仿真框图

Fig. 2 System simulation block diagram

系统采用 PSCAD 进行仿真实验,所选用的电机参数为:额定电压 $U=310$ V,电阻 $R_s=0.86$ Ω ;直流互感 $L_d=11.3$ mH;交流互感 $L_q=11.3$ mH,转子感应磁链 $\Psi_r=0.205$ Wb,极对数 $p=4$,转动惯量 $J=0.005245$ kg \cdot m²。

仿真实验中,IGBT 逆变器输入的直流电压为 537 V,SVPWM 的输入频率为 8 000 Hz,电机的给定转速为 3 000 r/min,机械转矩为 6 N \cdot m。

图 3~图 6 是系统仿真波形。从图 3 可以看出电机在 0.08 s 之前为启动阶段,在 0.08~0.5 s 为额定转速 3 000 r/min 稳定运行阶段,在 0.5~0.57 s 为升速阶段,在 0.57~1 s 为转速 5 000 r/min 稳定运行阶段。

电机的转速稳定,定子三相电流及磁链的波形稳定;在第 4 阶段,电机以高于额定转速的速度稳定运行,在此阶段,系统处于弱磁控制,从图 4 可以看出,电机的定子电流波形稳定,并且没有随速度的升高而变大。

5 结论

本文通过对永磁同步电机弱磁控制原理的分析,建立了永磁同步电机 MTPA 弱磁控制系统。仿真结果表明,所设计的弱磁控制系统调速稳定,速度响应快。同时,电机无论是在升速、恒转速运行还是弱磁运行时,电流、磁链和转矩波形稳定,并且与理论分析相吻合,从而验证了该控制策略的正确性和可行性。

参考文献

- [1] 李训杰,耿连发.现代永磁电动机交流伺服系统的发展和应用[J].现代驱动与控制,2009(5):20-22.
- [2] Jahns T M. Flux Weakening Regime Operation of an Interior Permanent-magnet Synchronous Motor Drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987,23(4):681-689.
- [3] Bech M M, Frederiksen T S, Sandholdt P. Accurate Torque Control of Saturated Interior Permanent Magnet Synchronous Motors in the Field Weakening Region[C]// Industry Application Conference, 2005 40th IAS Annual Meeting, 2005(4):2526-2532.
- [4] 朱磊,温旭辉,赵峰,等.永磁同步电机弱磁失速控制及其应对策略研究[J].中国电机工程学报,2010,18(31):67-68.
- [5] 李珍国.交流电机控制基础[M].北京:化学工业出版社,2010.
- [6] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.

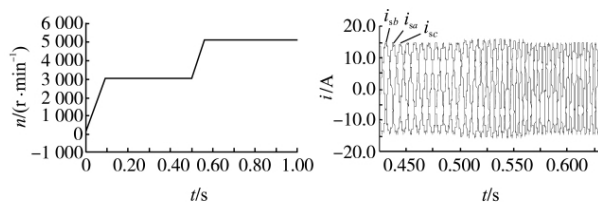


图 3 电机实际转速

Fig. 3 Actual motor speed

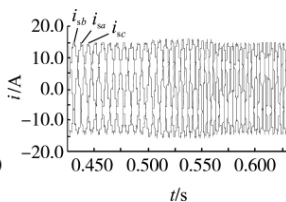


图 4 电机三相电流

Fig. 4 Stator current of the motor

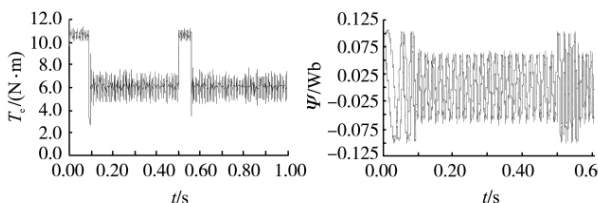


图 5 电机的电磁转矩

Fig. 5 The motor torque

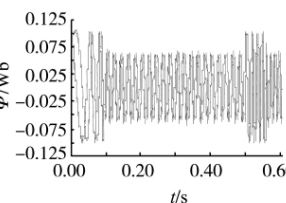


图 6 电机的 \$\alpha, \beta\$ 磁链

Fig. 6 The motor \$\alpha, \beta\$ flux

在第 1 和第 3 阶段,电机处于升速阶段,系统采用最大转矩控制,如图 5 所示,在这两个阶段电机电磁转矩最大,为 11 N \cdot m;在第 2 阶段,电机恒转矩、额定转速运行,从图 3~图 6 可以看出,

收稿日期:2011-10-31

修改稿日期:2012-06-10