

永磁无刷力矩电动机峰值转矩能力的研究

孙立志 王 强 陆永平

(哈尔滨工业大学 哈尔滨 150001)

Study on Peak Torque Capability of Permanent Magnet Brushless Torque Motor

Sun L izhi Wang Q iang Lu Yongp ing

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

【摘 要】 在考虑了永磁无刷力矩电动机峰值极限转矩主要制约因素的基础上, 分别讨论了正弦波及方波驱动方式下的力矩电动机峰值极限电流及转矩, 并针对正弦波驱动方式下的该类电机分析了影响峰值转矩能力的主要因素, 文中还进行了数值计算并加以实验验证。

【关键词】 永磁无刷力矩电动机 峰值转矩能力

【Abstract】 This paper considers the major constraints to the peak torque capability of permanent magnet brushless torque motor (PMBLTM), discusses peak current limit and peak torque limit of sine-wave PMBLTM and square-wave one respectively, and analyzes the influence of some factors on the peak torque capability of PMBLTM. Numerical calculation and experiments are made according to a sample motor.

【Keywords】 permanent magnet brushless torque motor peak torque capability

1 前 言

在一些控制系统中, 常常需要所使用的力矩电动机产生瞬时峰值转矩, 从而以较大的加速度来驱动负载, 由于使用 NdFeB 表面磁钢的无刷力矩电动机具有高转矩——惯量比、高过载能力^[1], 所以非常适合此种运行状态。

一般来讲, 当不考虑驱动器容量限制, 仅就电动机本体而言时, 限制永磁电机电流增长的主要因素为绕组和磁钢的温升极限, 以及由于电枢反应磁场过强引起的磁钢不可逆去磁效应。只有在电机的负载因数较大时, 温升约束才成为最终极限电枢电流的制约因素, 而且对内转子永磁电机而言主要是绕组温升的限制, 对外转子永磁电机磁钢温升也要考虑。由温升极限确定的极限电流接近于稳定温升达到温升极限时的连续堵转电流, 电磁转矩极限也

为相应的连续堵转转矩, 而永磁无刷力矩电动机在提供瞬时峰值转矩时, 过载时间极短, 电机中的温升不会过高, 而由电枢磁场过强所造成的磁钢不可逆去磁效应则成为限制峰值转矩进一步增大的主要因素。

本文在首先考虑磁钢去磁约束的基础上, 推导了线性及饱和情况下永磁无刷力矩电动机瞬时极限电流及转矩表达式, 并讨论了气隙高度、磁钢厚度等因素对峰值极限转矩的影响, 并且利用有限元方法进行了数值计算并对其加以实验验证。

2 电枢反应磁场极限场强

NdFeB 磁钢去磁曲线如图1所示。当反向去磁磁势增大到一定程度, 使得磁钢中磁密反向超过 B_D 时, 永久磁钢就会产生不可逆失磁现象。

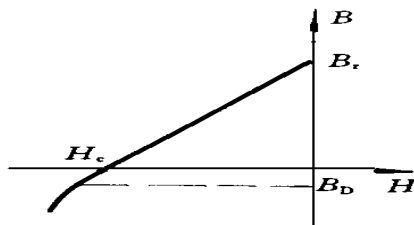


图1 NdFeB 磁钢去磁曲线

考虑表面磁钢结构, 磁钢跨距如 2α 电角度的情况 如图2所示。

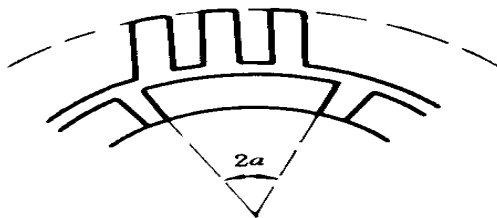


图2 永磁电机截面示意图

对于正弦波驱动的永磁无刷力矩电动机, 由于采用了磁场定向控制技术, 电机中只存在交轴电枢反应, 因而磁钢前半极下的磁场将有所增强, 而在后半极下, 电枢反应磁场恰与永磁磁场方向相反,

本文1996年4月22日收到

微特电机 1997年第1期

永磁磁场将有所削弱。当电枢反应增强到一定程度之后,磁钢后半极中的磁密将有可能降低到 B_D 以下,此时磁钢后端将首先产生失磁现象,随着电枢反应的进一步增强,失磁区域将进一步扩大。

对于方波驱动的永磁无刷力矩电动机,电枢磁势波在空间的运动不同于正弦波方式的匀速前进,而是跳跃式的。这样,在每一个换流状态中,定、转子磁场之间都具有相对移动,它们之间的电角度在 90° 处上下波动,其波动幅度与换流方式有关。例如对于三相星形桥式驱动的永磁无刷力矩电动机,在每相导通 120° ;同时有两相导通的方式下,电机中存在六种磁状态,此时定、转子磁势之间的电角度保持在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 之间,因而方波电机面临更大的失磁危险。

永磁磁钢中的磁感应强度 \vec{B}_m 满足式(1):

$$\vec{B}_m = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}_m + \vec{M}_0) \quad (1)$$

式中: \vec{H} 为外加磁场的磁场强度,在电机中即为电枢反应磁场在该点处的场强; \vec{M}_m 为磁钢材料的感应磁化强度,且正比于 \vec{H} ; \vec{M}_0 为剩余磁化强度,对NdFeB磁钢而言,在数值上等于矫顽力之值。

当考虑磁钢为径向磁化的情况时,式(1)可以改由标量表示,并且等号后第一、二项可以合并,式(1)变为:

$$B_m = \mu_0\mu_r H + \mu_0 M_0 \quad (2)$$

式中: μ_r - 相对磁导率,对NdFeB磁钢,该值为1.05。
为保证不产生失磁现象,应有式(3)成立:

$$B_m \geq B_D \quad (3)$$

综合式(2)、(3)考虑,电枢反应磁场在磁钢中任一点处的场强应满足:

$$H \geq \frac{M_0}{\mu_r} - \frac{B_D}{\mu_0\mu_r} = H_L \quad (4)$$

很明显,由于不等号之后各值均为常数,电枢反应磁场的极限磁场强度 H_L 就NdFeB磁钢而言是一恒值。

3 峰值极限电流

从磁路观点而言,电枢反应磁场在磁钢中所产生的最大磁场强度为:

$$H = \frac{F \Delta_a p}{\pi \mu_0 \mu_r R L} \quad (5)$$

式中: F - 电枢反应去磁磁势,对正弦波方式: $F = F_a \sin \alpha$; 对于方波电机: $F = F_a$

F_a - 电枢反应磁势幅值;

Δ_a - 每极下总磁导;

p - 电机极对数;

R - 转子铁芯外径(内转子电机);

L - 电枢铁芯的计算长度。

由于使用NdFeB磁钢的永磁无刷电动机具有良好的线性度^[2],可以考虑线性的情况。这时,可以忽略铁芯中的磁压降及漏磁场,式(5)可以简化为:

$$H = \frac{F}{h_m + k_c g} \quad (6)$$

式中: h_m - 磁钢径向厚度;

g - 气隙径向高度;

k_c - 卡特系数。

因而电枢反应磁势的极限幅值就可以表示如下:

$$\text{对正弦波方式: } F_{a1} = H_L (h_m + k_c g) / \sin \alpha \quad (7)$$

$$\text{对方波方式: } F_{aL} = H_L (h_m + k_c g) \quad (8)$$

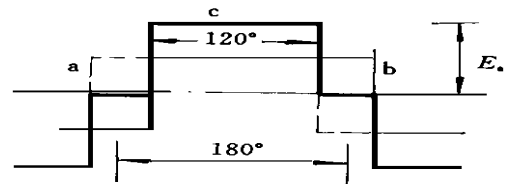
对于正弦波驱动方式,相应的峰值极限电流可以很方便地得到:

$$I_{aL} = \frac{\pi p H_L (h_m + k_c g)}{2 m N \sin \alpha} \quad (9)$$

式中: m - 相数;

N - 每相有效串联匝数。

对于方波驱动方式,其峰值极限电流与电动机的驱动换流方式有关。图3所示为二相导通三相星形六状态^[3]时合成电枢磁势的情况。由于最大合成电枢反应幅值为2倍的单相磁势幅值,极限电流 I_{aL} 可以表示为:



a, b- 单相磁势; c- 合成磁势

图3 方波电机电枢磁势示意图

$$I_{aL} = \frac{p H_L (h_m + k_c g)}{2 N} \quad (10)$$

由上述各式可知,峰值极限电流与电机的有效高度,即磁钢径向厚度与考虑开槽效应后的气隙值之和成正比。此外,正弦方式的峰值极限电流还与相数、每极每相有效串联匝数成反比。

取磁钢磁势 F_m (即 $h_m \cdot M_0$)为基值,极限电枢反应标么值可以表示为(α 取 90° 情形):

$$F_{aL}^* = (1 + \frac{k_c g}{h_m}) \cdot (\frac{1}{\mu_r} - \frac{B_D}{B_r}) \quad (11)$$

式中: B_r - 剩余磁通密度,NdFeB磁钢为1.2T;

B_D - 对NdFeB磁钢温度在120℃时为一0.2T(温度降低时, B_D 值进一步降低)。

而在电机设计中,空载气隙平均磁密 B_{av} 可以表示为

$$B_{av} = \frac{h_m}{h_m + k_g g} B_r \quad (12)$$

因而式(1)可以化为:

$$F_{al} = \frac{B_r}{B_{av}} \left(\frac{1}{\mu_r} - \frac{B_D}{B_r} \right) \cdot F_m \quad (13)$$

当空载平均气隙磁密取0.8T时,由式(13)可以推理:

$$F_{al} = 1.7 F_m \quad (14)$$

即在线性情况下,电枢反应磁势幅值在1.7倍磁钢磁势之内时,一般不会产生失磁现象。

实质上,在电枢反应增大到极限值之前,电机中必然会出现磁路饱和现象以及交、直轴之间的交叉耦合现象,从而使问题复杂化,但在考虑峰值极限转矩时,由于磁钢磁势基本不发生变化,交叉耦合效应可以忽略。这时可以引入饱和系数 S (计算方法见文献[4]),并考虑漏磁作用,可以得到饱和情况下极限电枢反应表达式:

$$F_{al} = \frac{\mu_0 T H_L R L}{p (\Lambda_a + S_d \Lambda_m)} \quad (15)$$

相应可以确定出峰值极限电流。

磁饱和及交叉耦合效应的出现势必削弱电枢反应磁场,从而电枢电流的峰值极限将会有所提高。所以式(14)又可改为:

$$F_{al} = 1.7 F_m \quad (16)$$

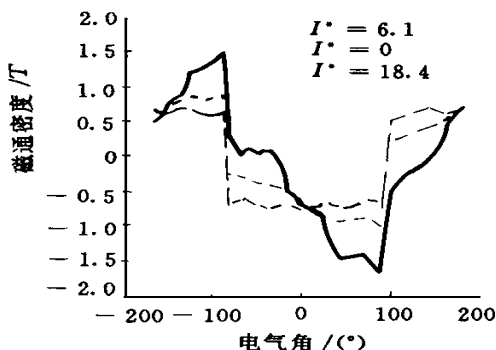


图4 磁钢内部磁密分布示意图

针对一台参数如下节所述的样机,利用一非线性有限元软件包,计算了当该电机电枢电流达到峰值极限值($I^* = 18.2$,基值取为电机的连续堵转电流3.36A)时磁钢中磁密的分布情况,如图4所示。

可以看到:磁密过零点已不再保持在磁钢分界面处,但反向磁密尚未达到-0.2T,基本不会失磁。

4峰值转矩能力

首先考虑正弦波驱动永磁无刷力矩电机的情況。线性情况下,由派克方程可知,永磁电机电磁转矩可以表示为:

$$T_{em} = p \Psi_m i_q - (L_g - L_d) i_d i_q \quad (17)$$

式中: Ψ_m -空载磁钢主磁通。

由于电机采用了表面磁钢结构,可以认为是隐极情况,又由于磁场定向技术的应用,电磁转矩可以表示为

$$T_{em} = p \Psi_m i_a \quad (18)$$

综合上节结论,可以推得线性情况下的极限转矩为

$$\begin{aligned} T_L &= \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{p D L}{N m \sin \alpha} \cdot (\mu_0 M_0^2 - M_0 B_D) \cdot h_m \\ &= C_1 C_2 \frac{p D L}{N m \sin \alpha} h_m \end{aligned} \quad (19)$$

很明显,线性情况下峰值极限转矩与磁钢径向厚度成正比。

当计及饱和及交叉耦合效应时, Ψ_m 必然下降,然而极限电流却有所增大。这时,忽略交、直轴磁阻间的差异时,有下式成立:

$$\begin{aligned} T_L &= p \Psi_m i_{al} \\ &= p F_m \cdot \Lambda_m i_{al} \\ &= F_m \cdot B_{al} \end{aligned} \quad (20)$$

B_{al} 为极限电枢反应磁密,就NdFeB电机而言为一恒值。可以知道,在饱和情况下极限转矩与线性情况下基本相同,但是却以提高电枢电流为前提的。

然而,过度的饱和必然使得该极限电枢电流值远远超出驱动器的限额,所以当考虑驱动器容量时,极限电磁转矩是与电机的线性度成正比的。而影响电机线性度的最主要因素是磁钢厚度、气隙高度的选择。在永磁电机中气隙与磁钢厚度的比值需要维持在一定比值左右,以维持合理的空载气隙磁密。

图5显示了 H_m/g 比值为3.5时电机出力情况受磁钢厚度不同的影响。可见当 H_m 小于0.5倍极矩时,随电枢电流的增大,电磁转矩系数下降较大,而当 H_m 大于10倍极矩时,电机线性度较佳,继续增大 H_m 值,效果不再明显,可见,当需要此类电机提供峰值转矩时,磁钢厚度应在1~1.2倍极矩之内为佳。

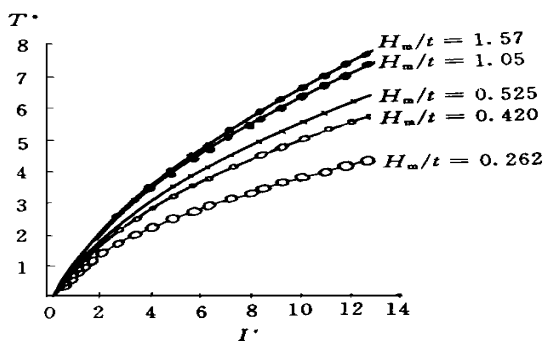


图5 不同磁钢厚度时的电机过载曲线

对于方波电机,以图3为例,由于电枢反应磁场为矩形波,当该电机具有同正弦方式相同的磁势幅值 F_a 时,通过傅立叶分解可知此时基波幅值为 $1/1F_a$,另外,由于永磁磁场为梯形波,电机中还可能存在一系列有功同步谐波转矩,因此方波电机具有更高的峰值极限转矩,而且该类电机峰值转矩能力同样受磁钢气隙径向高度的影响。

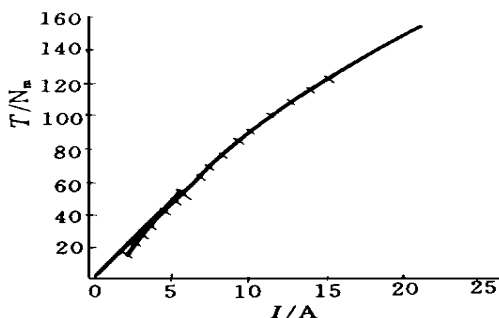


图6 实验结果

5 实验验证

针对一台 $h_m = 7\text{mm}$ 、 $g = 2\text{mm}$ 、 $N = 37$ 匝、 $p = 10$ 、 $z = 81$ 、 $m = 3$ 、 $D = 171\text{mm}$ 、 $L = 38\text{mm}$ 的正

(上接第19页)

根据表中数据,我们可以得出以下结论:

(1) 从有限元法得到的磁密波形可看出该波形畸变较大,利用求磁密平均值(方法1),计算出每极磁通和磁密值,再计算电机主要技术指标与实测值相差较大。一方面说明谐波对电机性能的影响是不可忽略的;另一方面也说明若使用该种方法将失去有限元法高精度解的意义。

(2) 由谐波分析计算出的每极磁通和磁密值(方法2),再计算电机主要技术指标与实测值相比是相当吻合的,说明该方法准确度较高,是可

弦波永磁无刷力矩电机,其长期运行使得稳定温升恰为温升极限的连续堵转电流,为 3.36A ,图6为该电机的过载曲线,与数值计算结果吻合极好。

6 结 论

从以上分析中可以得到以下结论:

(1) 线性情况下,对于表面磁钢结构的NdFeB永磁电机来讲,峰值极限电流的大小与电机有效气隙高度成反比。对于正弦波驱动方式来讲,还与相数、每极每相有效串联匝数及磁极一半所张角度的正弦值成反比。对于方波驱动方式,该值与驱动换流方式有关。

(2) 考虑到饱和情况,对于表面磁钢结构的永磁电机,可以过流至电枢反应幅值大于1.7倍磁钢磁势幅值。

(3) 峰值极限转矩与磁钢厚度成正比。

(4) 当磁钢厚度选在1~1.2倍极矩值的时候,电机具有较强的峰值转矩能力。

(5) 方波驱动的永磁无刷力矩电动机具有高于正弦方式的峰值转矩能力。

参 考 文 献

- 1 Slemmon GR. On the design of high performance surface mounted permanent magnet motors IEEE Trans 1994, 30(1): 134-140
- 2 Sebastin J, Slemmon GR. Transient torque and short circuit capabilities of variable speed permanent magnet motors IEEE Trans Magnetics, 1987, 23(5): 3619-3621
- 3 叶金虎等. 无刷直流电动机 北京: 科学出版社, 1982
- 4 Elserifi AM. Saturation representation in synchronous machine models Electric Machine and Power system, 1992, 20(4): 355-369

取的,这是因为谐波分析法在对气隙磁场的分析中能够正确的分解出各次谐波分量对气隙磁场的“贡献”。

参 考 文 献

- 1 华中工学院电机与电器教研室编 电机学 北京: 中国工业出版社, 1961
- 2 程福秀, 林金铭主编 现代电机设计 北京: 机械工业出版社, 1992

第一作者简介: 刘向群, 女, 1942年生, 副教授

Liu Xiangqun, female, born in 1942, associate professor