

定子焊槽对永磁电机空载反电势的影响

裴 锋, 薛 勇

(广州汽车集团股份有限公司, 广州 510640)

摘 要: 永磁电机空载反电势是验证电机设计是否合理的重要参数指标, 然而定子开焊槽影响了对电机空载反电势验证的准确性。以 6 极 36 槽永磁电机为例, 对焊槽引起的反电动势的谐波和不对称的影响进行了分析研究, 并针对分析结果给出了减小焊槽对电机反电势影响的方法。

关键词: 永磁电机; 焊槽; 反电势; 谐波; 不对称

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-7018(2015)06-0016-04

Influence of Stator Core Welding Slots on PM Motor's No-load of Back EMF

PEI Feng, XUE Yong

(Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 510640, China)

Abstract: The no-load back EMF of permanent magnet motor is the most essential to the analysis and design of motor. However, the accuracy of results is affected by welding slots on stator core. The aberrations and asymmetry of back EMF with a 6 poles and 36 slots of permanent magnet motor as an example was analyzed, and then some measures to minimize the influence of back EMF caused by welding slots were given.

Key words: permanent magnet motor; welding slots; back EMF; harmonic; asymmetry

0 引 言

电机定子铁心是由一定规格的硅钢片冲压成型, 采用设备整形叠装而成。为了将硅钢片紧固, 以保证电机工作状态下定子铁心的机械强度和刚性, 采用氩弧焊、激光焊等焊接方式将定子硅钢片迭装焊接, 为此需要在定子铁心叠片的外圆处开焊接槽, 如图 1 所示。



图 1 36 槽电机焊槽实物图

然而, 定子焊槽会使铁心磁路不平衡, 从而导致磁通及反电势波形产生畸变^[1], 甚至引起三相反电势不平衡。反电势的谐波分量会产生较大的齿槽转矩, 引起电机输出转矩的脉振, 严重地降低了电机的控制精度, 同时会使电机的铁心损耗增加, 降低整个系统的运行效率^[2-3]。此外, 永磁电机的空载反电势是衡量电机设计合理性的重要参数, 而反电势的畸变不仅会增加电机的空载损耗^[4-5], 也会影响电机实验结果与设计结果对比分析的准确性。

本文针对一台 6 极 36 槽样机出现的反电势畸变现象, 建立了与样机相同极槽配合及磁路结构的永磁电机模型, 其中, 电机部分设计参数如表 1 所示。通过理论推导及有限元分析研究定子铁心焊槽对三相反电势的影响, 并给出解决方法。

表 1 电机部分设计参数

参 数	值	参 数	值
相数	3	永磁体尺寸	160 mm × 34 mm × 5 mm
极对数 p	3	极弧系数	0.7
定子槽数	36	绕组排布	双层短距
定子外径	165 mm	定子内径	119 mm

1 定子不开焊槽时的三相反电势

一般来说, 定子的每个线圈除了感应基波电动势外, 还应感应一系列奇次谐波电动势, 这是由于电机的气隙磁通密度波形不是理想的正弦波造成的。此外, 电机定子内圆槽口也会影响气隙磁导, 进而感应出电动势齿谐波。为了便于分离出定子焊槽对永磁电机反电势的影响, 电机绕组的排布采用双层短距分布, 削弱由于气隙磁密非正弦而引起的部分谐波成分。为了便于分析, 研究电机空载反电势的谐波分量, 并预先优化好电机的极弧系数, 使电机气隙磁场的谐波初始分量达到较低水平。电机定子不开焊槽的仿真模型及反电势波形分别如图 2、图 3 所示。

以 A 相为例, 对其进行 FFT 变换如图 4 所示。图 4 表明, 电机相电压除了含有基波外, 其 5 次、7

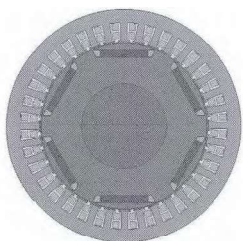


图 2 不开焊槽时电机仿真模型

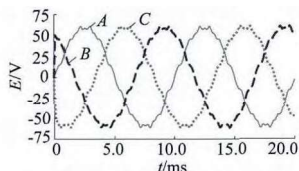


图 3 电机定子不开焊槽时三相反电势

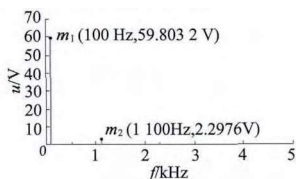


图 4 A 相反电势 FFT 分析

次谐波由于绕组的分布短距排布已经得到较好的削弱,其 3 次谐波也通过调整极弧系数降低到了较低的水平。不过,电机依然含有少量的 11 次谐波,这是由电机开槽引起的一阶齿谐波造成的。由于齿谐波的绕组因数与基波绕组因数一样,因此无法通过绕组排布将其削弱。

2 定子开焊槽时引起的反电势影响分析

2.1 定子焊槽对电机反电势谐波的影响

电机反电势的波形决定于磁通密度的分布波形。因此,研究定子轭部开槽对电机反电势影响,其本质是研究轭部开槽对电机气隙磁场的影响。

由于焊槽对气隙磁场的影响难以与电枢槽口等效分析。因此,可以通过有限元法计算出气隙磁场径向磁密的分布来确定其影响。为了使分析不失一般性,我们将电枢槽和焊槽对电机气隙磁导的影响统一表示成傅里叶级数形式。

以定子其中一个齿的中心线为角度 α 坐标的原点,设永磁体 N 极的中心偏离角度原点的角度为 θ ,定子内径与转子永磁体外径的距离为 $\delta(\alpha)$, $\delta(\alpha)$ 只与定子齿槽有关,与角度 θ 无关。如图 5 所示。

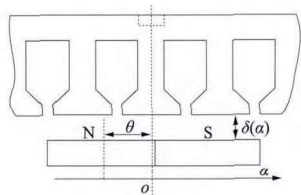


图 5 电机主极磁场谐波分析原理图

永磁体磁动势的傅里叶级数形式可以表示为下

式:

$$F(\alpha, \theta) = \sum_{\nu} F_{\nu} \cos [\nu(\alpha + \theta)] \quad (1)$$

式中: ν 为永磁体磁动势谐波次数; F_{ν} 为磁动势第 ν 次谐波的幅值。

假定定子轭部开槽引起的轭部饱和程度不变,则气隙磁导为 α 的函数,并且周期为一个齿距。

$d\alpha$ 微元对应的气隙磁导:

$$dG(\alpha) = \frac{\mu l}{\delta(\alpha)} d\alpha \quad (2)$$

式中: l 为电机铁心长度; D 为电机定子内径; μ 为电机铁心磁导率。

由于气隙是随齿槽变化的,因此,气隙磁导的傅里叶级数也可以表达:

$$dG(\alpha) = [\Lambda_0 + \sum_{\lambda} \Lambda_{\lambda} \cos(\lambda\alpha)] d\alpha \quad (3)$$

式中: Λ_0 为气隙磁导的恒定分量; Λ_{λ} 为气隙磁导 λ 次谐波分量的幅值。

永磁体一个极距内产生的气隙磁通:

$$\begin{aligned} \Phi &= \tau l \int_{-\pi/2}^{\pi/2} F(\alpha, \theta) [\Lambda_0 + \sum_{\lambda} \Lambda_{\lambda} \cos(\lambda\alpha)] d\alpha = \\ &\tau l \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [\sum_{\nu} A_{\nu} \cos \nu(\alpha + \theta)] [\Lambda_0 + \sum_{\lambda} \Lambda_{\lambda} \cos(\lambda\alpha)] d\alpha \end{aligned} \quad (4)$$

因此,气隙磁通主要由以下两部分构成:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 =$$

$$\begin{aligned} &\tau l \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [\sum_{\nu} A_{\nu} \cos \nu(\alpha + \theta)] \Lambda_0 d\alpha + \\ &\tau l \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [\sum_{\nu} A_{\nu} \cos \nu(\alpha + \theta)] [\sum_{\lambda} \Lambda_{\lambda} \cos(\lambda\alpha)] d\alpha \end{aligned} \quad (5)$$

根据式(5)可以知道, Φ_1 代表每极下气隙磁密由气隙磁导的恒定分量与磁动势作用产生的一系列奇次谐波磁通,谐波幅值随着频率的增大而逐渐递减; Φ_2 代表永磁体磁动势和气隙谐波磁导共同决定组成的一系列谐波磁通。

进一步计算可以发现,仅当 λ, ν 不同奇偶时 ($\nu = 1$ 除外),每极下的气隙磁通才会存在有效的谐波成分,谐波次数:

$$\mu = \lambda \pm \nu \quad (6)$$

如果电机开焊槽,根据电机焊槽的圆周对称性,焊槽数对电机气隙磁场的影响变化次数:

$$\nu = \frac{Z_e}{2p} \quad (7)$$

图 6、图 7、图 8 分别给出了开 12 个焊槽后电机气隙、轭部磁通不同程度的畸变。其中,焊槽的宽和

深分别为 6 mm 和 3.5 mm。

由于永磁体的磁阻较大,且焊槽在定子轭部不饱和时对磁导率影响较小,极下磁密畸变并不明显,极间的气隙磁密畸变比较明显。这种极间气隙磁密的畸变将会在不同相位的分布绕组的反电动势叠加中得到进一步的体现。

电机定子开焊槽后电机的三相反电势如图 9 所示。

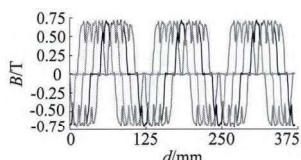


图 6 开焊槽前不同时刻气隙磁密波形

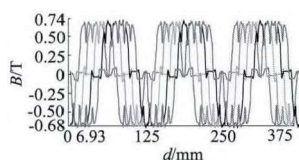


图 7 开焊槽后不同时刻气隙磁密波形

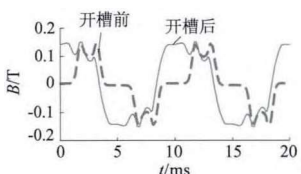


图 8 开焊槽后定子轭部磁密畸变

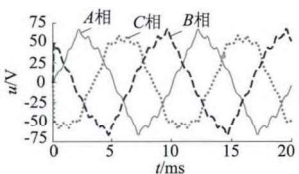


图 9 电机定子开焊槽时三相反电势

由图 9 可以看出,电机反电势存在明显的谐波成分,且三相反电势已经不再对称,对其中 A 相和 B 相进行 FFT 分析。

由图 10 和图 11 可以看出,电机轭部开槽后,电机反电势 3 次、5 次、7 次谐波有了明显增加。根据式(5)的分析可以知道,开焊槽后电机的基波幅值略有降低,说明定子开焊槽后气隙磁导的平均分量有所下降,然而由于开焊槽后气隙磁导的谐波分量有所增加,根据式(6)及式(7)可以计算得到电机的 3 次、5 次、7 次等奇次谐波将再一次出现。

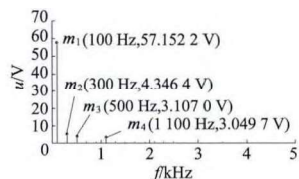


图 10 A 相反电势 FFT 分析

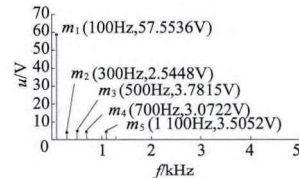


图 11 B 相反电势 FFT 分析

2.2 定子开槽对电机反电势不平衡的影响

图 9 表明,6 极 36 槽电机在定子轭部开 12 个焊槽后,电机反电势较没开焊槽前除了增加谐波成分外,电机三相反电势也出现了不平衡现象。研究发现这与电机三相磁路不对称有关。

在同一转子位置下,A 相双边匝数 $A(X)$ 和 C 相

的双边匝数 $C(Y)$ 与焊槽的相对位置是反向对称的,B 相则与 A, C 两相焊槽对称位置不同,如图 12 的曲线所示。

为了研究焊槽不同位置对电机反电势不平衡的影响,将电机的焊槽延圆周进行旋转。根据电机焊

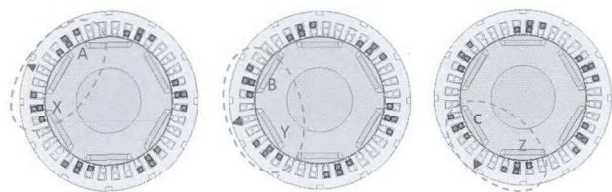


图 12 三相绕组的非对称磁路

槽及齿槽的结构对称性,机械旋转 10° 三相反电势为一个变化周期,因此只需要机械旋转 5° 即可代表所有的均布可能性。

图 13、图 14 表示 A, B 两相反电势随槽口位置变化情况。

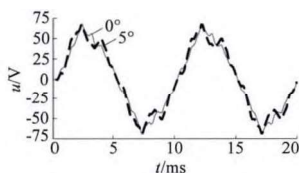


图 13 12 焊槽电机 A 相反电势变化图

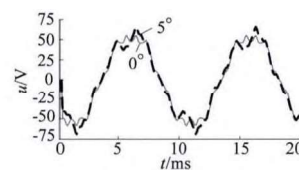


图 14 12 焊槽电机 B 相反电势变化图

图 13 及图 14 表明焊槽在不同角度下电机的反电势畸变会有不同。对于 6 极 36 槽电机而言,12 个焊槽均布对电机的反电势的不平衡影响是一直存在的,即电机的反电势不平衡是无法消除的。这是因为不管如何调节 12 个槽的角度,均无法同时满足三相的磁路对称。

因此,焊槽的数量选择对三相反电势的对称性和谐波削弱具有重要影响。研究发现,当焊槽数为 5 和 10 的时候,三相与焊槽的相对位置是近似相同的,电机的三相对称性较好,且此时根据式(7)可知,由于焊槽引起的谐波磁导为分数,不会与主极奇次谐波磁场作用引入反电势谐波。

以焊槽为 5 为例,分析电机三相绕组的磁路分布,结果如图 15 所示。



图 15 五焊槽三相绕组的对称磁路

其中,数字代表对称相绕组的序号,虚线代表槽下层单边到上层单边匝数。采用5焊槽的三相反电势波形及FFT变换如图16、图17所示。

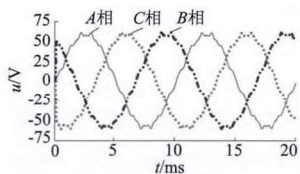


图16 定子开5个焊槽三相反电势

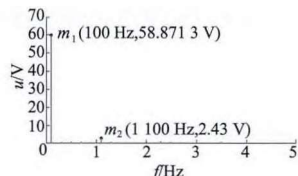


图17 定子开5个焊槽A相FFT变换

3 降低焊槽对电机反电势影响的措施

3.1 优化焊槽尺寸

根据前两部分的分析可以知道,焊槽会引起电机反电势的谐波增加及三相反电势的不平衡。实际工艺焊接时,更为关心焊槽的尺寸确定。以定子轭开12焊槽为例,研究焊槽宽度 w 及深度 h 对反电势波形畸变的影响。

图18、图19表明电机反电势随着槽口深度的增加畸变明显增大,随着槽口宽度变化并不明显。为了更准确地确定焊槽深度对反电势畸变的影响,定义槽口深度与定子轭的比值 l :

$$l = h/h_y \quad (8)$$

式中: h 为焊槽径向高度; h_y 为定子轭高。

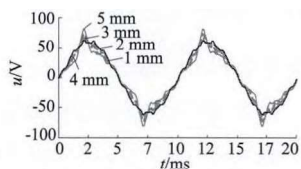


图18 电机A相反电势随 h 变化($w=6$ mm)

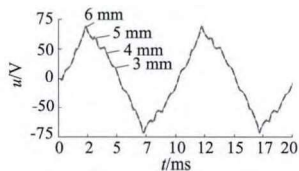


图19 电机A相反电势随 w 变化($h=3.5$ mm)

由图20可以看出,电机空载反电势的畸变程度随 l 值的变大而明显变大。因此,对于极数较多的电机,由于其轭部较薄,焊槽要设计得更浅宽。为

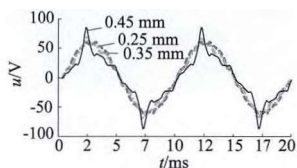


图20 不同 l 值电机反电势的畸变程度

了不影响加固焊装效果,可以采用多浅宽焊道的办法,抑或采用预留定子外径尺寸的办法来降低焊槽深度对电机反电势影响的敏感度。

3.2 选择合理的焊槽数量

根据上述分析可知,焊槽数目会影响电机反电势的谐波次数和磁路的对称性。

表2 不同焊槽数电机A相反电势结果对比

焊槽数	谐波次数	三相对称性	正弦畸变率
0	11	对称	3.8%
1	11	对称	4.2%
5	11	对称	4.1%
6	3, 5, 11	不对称	8.8%
10	11	对称	3.9%
12	3, 5, 11	不对称	10.7%
48	3, 11, 13	对称	8.6%

表2仅列出了幅值大于1V的谐波次数。根据表2及电机结构的对称性可知,焊槽越少和焊槽越多,理论上越有利于反电势的对称性;但同时要综合考虑焊槽数目对电机谐波的影响,由式(6)和式(7)可知,要尽量使焊槽数目引起的谐波磁导为分数次,避免因为定子开焊槽重新引入主极磁场的奇次谐波。

由于工艺上焊槽数目不可能很多,因此,对于6极36槽电机而言,综合考虑使用焊槽数5或10最为理想。

4 结 语

本文分析了永磁电机定子开焊槽对电机空载反电势的影响,详细阐述了电机定子轭部不合理开焊槽导致电机反电势谐波分量增加及三相反电势不对称的原因。这也表明,如果电机采用焊槽工艺对定子叠片进行固紧,那么在电机定子冲片设计时要充分考虑焊槽对电机的反电势的影响。最后根据原理分析,结合有限元仿真给出了降低焊槽对永磁电机空载反电势影响的方法。

参考文献

- [1] 张华,张猛,李光友,等.定子铁心焊槽对永磁电动机齿槽转矩的影响[J].微特电机,2012,40(10):26-28.
- [2] 张炳义,贾宇琪,李凯,等.一种表贴式永磁电机磁极结构优化研究[J].电机与控制学报,2014,18(5):43-48.
- [3] 李全武,窦满峰,李兆杰.改善永磁同步电机反电势波形的磁极宽度优化方法[J].微特电机,2012,40(9):6-8.
- [4] 唐任远.现代永磁电机[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [5] 李发海,朱东起.电机学[M].北京:科学出版社,2001.

作者简介:裴锋(1981-),男,博士研究生,研究领域为新能源汽车。