基于 JMAG 的永磁电机退磁分析

Demagnetization Analysis of Permanet Magnet Motor Based on JMAG

孙明冲 郝双晖 刘吉柱 宋益明
（哈尔滨工业大学 机电工程学院，哈尔滨 150001）

摘 要: 在永磁电机的设计中，经常出现永磁体退磁现象。永磁体退磁大多数是不可逆的，退磁将直接影响永磁电机的性能。利用磁路法进行永磁体退磁计算时，无法反映永磁体的实际工作状态。为此本文对永磁体材料的热稳定性进行计算，并利用 JMAG 软件对永磁电机的退磁现象进行了有限元分析，更加准确地反映了永磁的实际工作状态。

关键词: 退磁分析; 热稳定性; JMAG; 有限元分析

Abstract: Permanent magnet demagnetization phenomena offten appear in the design of Permanet Magnet Motor. Most of permanent magnet demagnetization is irreversible, and the demagnetization will influence the performance of the permanent magnet motor directly. The actual working condition of permanent magnet unable be reflected when calculating permanent magnet demagnetization by the method of magnetic circuit. So the permanent magnet thermal stability of the Permanent magnet materials was calculated in this paper, and then analyzed permanent magnet motor demagnetization phenomenon by using the JMAG software, the permanent actual working mode was reflected accurately.

Key words: Demagnetization analysis; Thermal stability; JMAG; Finite element analysis

1 引言

与传统电励磁电机相比，永磁电机具有结构简单、运行可靠、体积小、效率高、电机形状和尺寸灵活多样[1]等优点，近年来得到了广泛的应用。由于永磁体的引入，永磁体的选取和设计成了永磁电机设计中重要的一部分。在设计永磁电机中的永磁体时，需保证电机气隙中有足够大的气隙磁场和规定的电机性能指标，同时在规定的环境条件、工作温度和使用条件下应能保证磁性能的稳定性，还要有良好的经济性能。但在设计永磁电机时，经常出现永磁体退磁现象。永磁体退磁大多数是不可逆的，这将直接影响永磁电机的性能。永磁电机时有发生的退磁问题一直困扰着永磁电机生产厂家和用户，为了防止失磁现象的发生，往往在设计过程中将永磁体磁化方向长度留有较大的裕量，这样做的后果就是增加永磁体用量，进而提高永磁电机的制造成本。在以往的永磁电机设计中，永磁体的空载工作点、负载工作点、最大去磁工作点通常是按“路”的方法计算的。但是由“路”的方法计算时只考虑电枢磁动势对永磁体的平均去磁，而无法计及对永磁体的局部去磁，求得的只是平均工作点，所以不能准确反映永磁体的实际工作状态。为了防止由于永磁材料热稳定性差而造成永磁电机失磁，以及更加准确地反映永磁体的实际工作状态，本文利用有限元软件 JMAG 进行了退磁分析。

2 永磁体材料性能

永磁材料由于其固有特性，经过预先磁化（充磁）以后，不再需要外加能量就能在其周围空间建立磁场。目前永磁电机上应用最广泛的钕铁硼（NdFeB）永磁材料，具有较高的最大磁能积$(BH)_{max}$、剩磁 B_r 和矫顽力 H_c。其室温下剩余磁感应强度 B_r 已达到 1.61T，内禀矫顽力 H_{cj} 已经达到 2786kA/m(35kOe)，最大磁能积高达 444kJ/m3(55.5MG.Oe)。将 NdFeB 永磁材料应用在各种电机上，不但可以明显减轻电机的重量，使电机的外型尺寸减小，而且可以获得高效节能效果和提高电机的性能。

但烧结 NdFeB 永磁材料也有不足之处，就是温度特性差，具体体现在居里温度较低、温度系数高两方面[2]。烧结 NdFeB 材料的居里温度一般为 310～410℃左右，NdFeB 永磁材料温度系数中剩磁 Br 的温度系数 $a(B_r)$可达-0.13%/k，内禀矫顽力场的温度系数 $a(H_{cj})$达-(0.6-0.7)%/k。较高的温度系数造成其磁性能热稳定性较差，高温下使用时磁损失较大。一般 NdFeB 永磁材料在高温下使用时，其退磁曲线的下半部分要产生弯曲[3]，如图 1 所示。

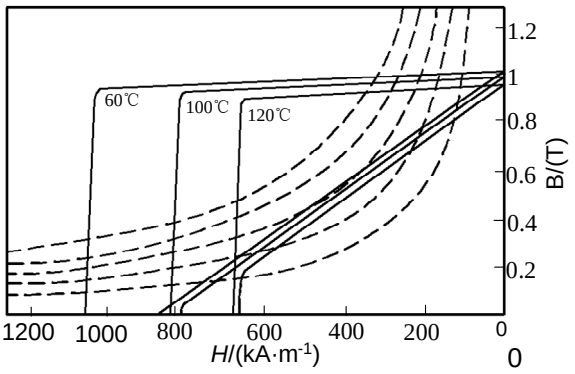


图 1 钕铁硼永磁体材料不同温度下的退磁曲线

从图中可以看出，烧结 NdFeB 永磁材料在常温或者较低温度下，退磁曲线为一直线。但在温度较高的情况下，退磁曲线的上半部分为直线，下半部分开始拐弯，开始拐弯的点称为拐点(又称为膝点)，如图 2 中 k 点即为某一温度下烧结钕铁硼材料退磁曲线的拐点。烧结 NdFeB 永磁材料的这种缺点增加了永磁电机设计中的复杂性，也降低了电机运行的可靠性[4]。永磁电机在运行时受到作用的退磁磁场强度是反复变化的。当对已充磁的永磁体施加退磁磁场强度时，磁通密度将会沿着图 2 中的退磁曲线 B_rk 下降。当退磁磁场强度不超过拐点 k 时，回复线与退磁曲线的直线段基本重合；当退磁磁场强度超过拐点 k 后，新的回复线 PR 就不再与退磁曲线重合了。这样当退磁磁场强度消失后，永磁体的剩余磁感应强度 B 将下降，这直接影响了电机的运行性能，这种现象称为不可逆退磁，又叫失磁[5]。出现退磁的主要原因有两个，一是在永磁电机的旋转中，由于涡流的存在和定子绕组的发热，导致永磁电机内部温度升高，温度升高后导致永磁体退磁；二是由于定子通入正弦电流，定子产生正弦磁场，当转子转动时，部分永磁体将受到定子产生的反向磁场的作用，导致永磁体退磁。

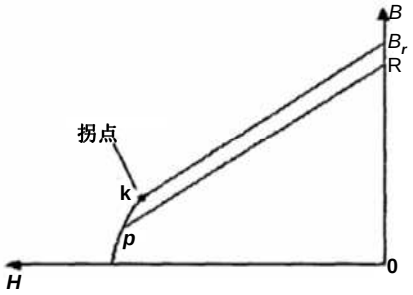


图 2 永磁材料拐点和回复曲线示意图

3 永磁体热稳定性计算

热稳定性是指永磁体由所处环境温度的改变而引起磁性能变化的程度，故又称温度稳定性。热稳定性的好坏，直接影响永磁体的退磁。在选定某一牌号之后，便知道了永磁体的具

体参数，根据永磁体在第二象限曲线的形状和特性，即可间接推算永磁体的热稳定性。

令室温 t_0 时剩磁为 B_{r0}，矫顽力为 H_{c0}，内察矫顽力为 H_{cj}，临界场强为 H_{k0}；工作温度 t 时相应参数为 B_{rt}、H_{ct}、H_{cjt}、H_{kt}。$\alpha(B_{rt})$ 和 $\alpha(H_{cj})$ 取绝对值，并简写为 α_B 和 α_H。

假设温度变化过程中，$\mu_r=\mu_{r0}=\dfrac{B_{r0}}{H_{c0}}$ 不变，$Q=\dfrac{K_{k0}}{H_{cj0}}$ 不变，且临界场强 H_{Kt} 近似为拐点处的场强 H_{ckt}。则工作温度为 t 时，$B_{rt}=[1-\alpha B(t-t_0)]B_{r0}$。退磁曲线为直线时的计算矫顽力为，$H'_{ct}=\dfrac{B_{rt}}{\mu_0\mu_r}$。退磁曲线弯曲的拐点位置为（$B_{rkt}$，$H_{ckt}$），其中 $B_{rkt}=kB_{rt}$，$H_{ckt}=(1-k)H'_{ct}$，k 表示拐点处的磁密占相应温度下剩磁的百分比，表示拐点位置。

$$H_{cjt}=\frac{H_{kt}}{Q}=\frac{(1-k)H'_{ct}}{Q}=\frac{(1-k)B_{rt}}{\mu_0\mu_r Q}=\frac{(1-k)[1-\alpha_B(t-t_0)]B_{r0}}{\mu_0\mu_r Q} \tag{1}$$

$$H_{cj0}=\frac{H_{cjt}}{1-\alpha_H(t-t_0)}=\frac{(1-k)[1-\alpha_B(t-t_0)]B_{r0}}{\mu_0\mu_r Q[1-\alpha_H(t-t_0)]} \tag{2}$$

根据上式，可由已知参数推算出永磁体在某一温度下的拐点位置：

$$k=1-\frac{H_{cj0}\mu_0\mu_r Q[1-\alpha_H(t-t_0)]}{B_{r0}[1-\alpha_B(t-t_0)]} \tag{3}$$

4 JMAG 软件介绍和仿真模型的建立

根据以上分析，推算出永磁体的热稳定性，利用 JMAG 软件对永磁电机中的永磁体进行退磁分析仿真，根据分析结果可判断出永磁电机的退磁点，将为设计中防止永磁体退磁提供依据。

4.1 JMAG 软件介绍

JMAG 软件是电磁场分析的专业软件，可实现静态场、谐波场合轴对称场的 2D/3D 分析。该软件采用模块化构架，具有强大的耦合场分析功能，可进行电磁场合热、振动、电路、运动、控制的耦合分析，同时还支持与 Matlab/Simulink、PSIM 等第三方软件进行系统耦合仿真。由于 JMAG 软件中可以很方便地实现场路耦合分析，而且用户可以定义永磁体的属性，因此特别适用于永磁电机的分析和研究。

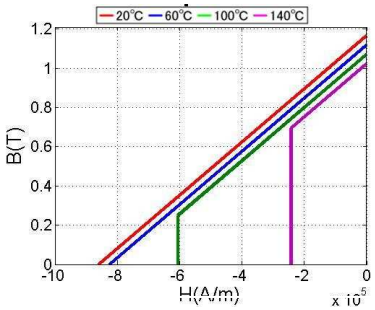


图 3 N35SH 永磁体的退磁曲线

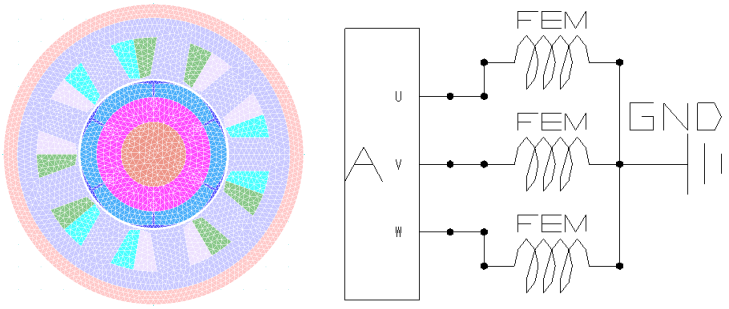
4.2 样机结构与参数

样机采用三相 9/6 结构，定转子材料为 DW470，采用三相交流供电，绕组采用星型接法。样机主要参数为：额定电压 380v，额定功率 18.5kw，额定转速 3000rpm，定子铁心外径 230mm，定子铁心内径 120mm，转子铁心外径 104mm，气隙长度 2mm，定子叠厚 180mm。本文选择的永磁体牌号为 N35SH，剩磁 B_r

为 1.19T，相对磁导率 μ_r 为 1.08，内禀矫顽力为 1592Ka/m，Q=0.95，aH=0.6%/k，aB=0.1%/k。由以上参数可以推导出此永磁体退磁曲线中的拐点，由拐点可画出不同温度下的退磁曲线，如下图 3 所示。

4.3 建立仿真模型

忽略电机端部效应，本文采用 JMAG 软件中的二维瞬态场分析模块，利用电机磁场分布分布对称性和周期性，设定自然边界条件和周期边界条件，建立样机的场路耦合有限元分析模型，如图 3 所示。其中 4（a）为剖分后的电机全模型，图 4（b）为样机功率主电路模型。



（a）永磁电机有限元模型　（b）永磁电机主电路模型

图 4 永磁电机场路耦合分析模型

4.4 仿真结果及分析

根据以上的分析，对电机内部加载不同的温度，温度分别为 60℃、100℃、60℃，温度加载的曲线如图 5 所示。额定时的电流为 45A，分别对电机加载 1 倍到 6 倍的过载电流，分析计算后的结果如图 6 所示。由图中可以看出在加载额定电流时，温度恢复到 60℃后扭矩可以恢复到高温加载前的大小；当加载的电流越来越大的时候，温度恢复到 60℃后扭矩无法恢复到原来大小。从图中可以看出，当加载 4 倍和 6 倍额定电流时，最后温度恢复后的扭矩值相近，说明 100℃时加载 4 倍以上过载电流时，永磁体的工作点已经低于拐点，永磁体出现了较大范围的不可逆退磁。

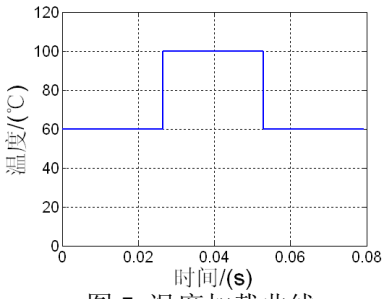


图 5 温度加载曲线

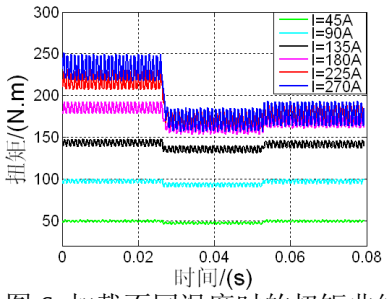


图 6 加载不同温度时的扭矩曲线

除了高温会引起永磁体不可逆退磁，反向磁场作用也会引起永磁体不可逆退磁。本文利用 JMAG 软件中的电路，搭建出不同时间加载不电流的电路，电路图如图 7 所示，图 7 中的开关通断顺序如图 8 所示（1：导通，0：关断）。在保证电机内部温度为 100℃的前提下，对电机加载不同电流，先加载额定电流，再加载过载电流，最后恢复到额定电流，分析结果如图 9 所示。由图中可以看出，当加载的过载电流越来越大时，过载时的转矩系数和恢复后的扭矩越来越小，且恢

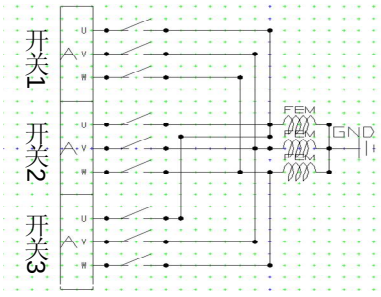


图 7 加载不同电流的电路图

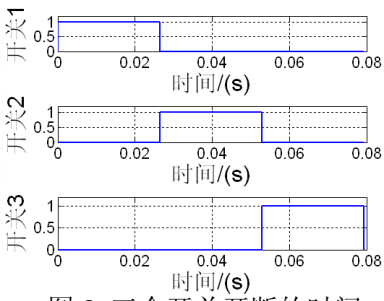


图 8 三个开关开断的时间

复后的转矩波动越来越大。从图中可以看出，当加载 4 倍过载电流和 5 倍过载电流后，加载电流恢复到额定时的转矩几乎相同，说明 4 倍以上额定电流时，永磁体工作点在拐点以下，永磁体出现了较大范围的的不可逆退磁。

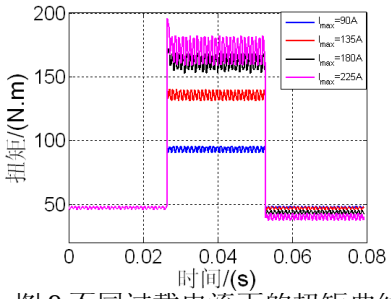


图 9 不同过载电流下的扭矩曲线

通过以上分析可知，100℃时加载 4 倍以上过载电流时，永磁体将出现大范围不可逆退磁。为了进一步验证高温和反向磁场引起的退磁现象，以及更加精确地反映永磁体退磁范围，本文对 100℃时加载不同过载电流后永磁体的退磁率进行了分析，分析结果如图 10 所示。从图中可以看出当加载额定电流时，永磁体几乎没有退磁；当加载 2 倍过载电流，永磁边缘出现微弱退磁；当加载 3 倍过载电流时，永磁体边缘出现局部退磁；当加载 4 倍过载电流时，永磁体出现大范围退磁；当加载 4 倍以上的过载电流时，永磁边缘几乎完全退磁。

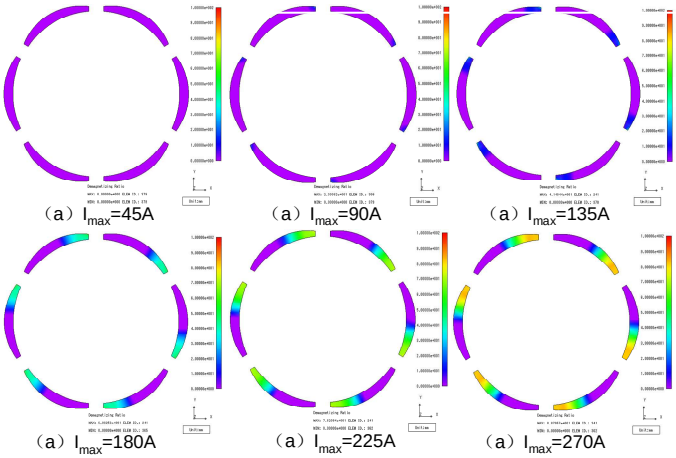


图 10 过载电流下永磁体的退磁率云图

5 结论

本文通过对永磁体热稳定性的计算，并利用 JMAG 有限元软件分析高温和强反向磁场时永磁电机的扭矩和永磁体退磁率，更加准确地反映了永磁体的工作状态，为永磁体尺寸的设计提供了依据。

6 参考文献

[1] Honsinger VB.The fields and Parameters of Interior Type AC Permanent Magnet Machines[J].IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1982,PAS-101(4):867-876.
[2]王步来, 顾伟.内置式永磁同步电动机经验设计. 微电机, 2005, 38(5): 93-95.
[3]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.
[4]D.N.Brown,B.Smith,B.M.Ma,P.Campbell.The Dependence of Magnetic Properties and Hot Workability of Rare Earth-Iron-Boride Magnets Upon Composition.IEEE Transactions on Magnetics,2004,40(4):538～540.
[5] M.Negrea,M.Rosu.Thermal Analysis of a Large Permanent Magnet Magnet Synchronous Motor for Different Permanent Magnet Rotor Configurations.2001(IEMDC 2001):777～781.

作者简介：郝双晖（1963-），男，教授，主要从事高精度位置检测技术，高精度伺服控制
孙明冲（1984-），男，硕士研究生，主要研究方向永磁同步电机及其控制技术。