

基于 ANSYS 的永磁同步电机退磁仿真分析

宋磊, 宋英杰

(潍坊理工学院, 山东 潍坊 261023)

摘要: 文章以永磁同步电动机为研究对象, 对其常见的永磁体退磁问题提出了一种有限元退磁仿真思路, 在实际恶劣工况下对电机进行退磁分析。首先, 利用有限元模拟恶劣工况, 通过仿真电机永磁体的磁密云图, 得到最小磁密值位置。然后, 通过对最小磁密处永磁体工作点的监测, 得到永磁体的退磁回复曲线。仿真结果发现, 永磁体工作点低于拐点, 未能沿着 BH 曲线返回, 而是沿着新的回复曲线上, 故电机在恶劣工况下永磁体会发生局部不可逆退磁情况。

关键词: 有限元; 退磁曲线; N38SH; 永磁体

中图分类号: TM351; TM341

文献标识码: A

文章编号: 1674-1064 (2022) 04-001-03

DOI: 10.12310/j.issn.1674-1064.2022.04.001

永磁体作为永磁电机的重要组成部分, 担负着为电机提供磁场的重任。然而永磁体一旦发生退磁, 将对电机性能产生很大影响, 甚至毁坏电机。故电机永磁体的最大退磁点的寻找是尤为重要的, 也是设计电机时的一个重要环节。为保证电机的长期高效运行, 必须确保电机在恶劣工况下不会发生不可逆退磁的情况。因此, 文章将通过有限元分析法, 分析电机在恶劣工况下的退磁情况。

1 永磁体退磁分析方法

1.1 等效磁路法分析

等效磁路法的概念是把永磁体作为电路中的磁通源, 对外提供电路的磁动势与磁通。对外磁路中电机各部位的磁道进行计算, 并通过反复迭代计算, 最终确定电机永磁体的负载工作点 b_{mh} 。

$$b_{mh} = \frac{\lambda_n(1-f'_{adh})}{\lambda_n+1} \quad (1)$$

这里 b_{mh} 的取值高于最高温度下的永磁体材料退磁的拐点值, 以计算最小的去磁动势的标么值 f'_{adh} 。然后, 将电机的永磁体磁化方向长度 h_m 和矫顽力 H_c 值带入计算公式:

$$f'_{adh} = \frac{1.35k_{ad}k_{dp}NI_{adh}}{\rho\sigma_0H_ch_m} \quad (2)$$

由此, 求得电机去磁电流的最小值 I_{adh} 。

以电机磁路法得到的最小去磁电流, 能够反映电机不同尺寸结构下的永磁体的抗退磁能力大小。这样, 就可以进行电机永磁体牌号选择与尺寸设计。但是, 这种方法计算的是电机永磁体的工作点平均值^[1], 进而忽略了电机在大电流工况下磁路饱和后对电机永磁体的局部退磁的影响。大电流工况下的铁心各部位磁通密度增加, 电机的漏磁系数会发生相应的改变, 磁

路的磁阻也会增大。所以, 这一方法是在磁导和漏磁系数不变的情况下计算的, 这样的计算精度会有误差, 需要依靠工作人员的丰富经验进行修正, 具有很大的局限性。

1.2 有限元法分析

以有限元法计算电机磁场的麦克斯韦方程式如下^[2]:

$$\left. \begin{aligned} G: \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - J + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \\ \Gamma_1: A=A_0 \\ \Gamma_2: v_1 \frac{\partial A}{\partial n} - v_2 \frac{\partial A}{\partial n} = \delta_c \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, G是软件的求解区域;

Γ_1 、 Γ_2 分别为电机的定子边界和永磁体部分的边界;

J_s 是传导电流的密度;

v_1 、 v_2 分别是电机的磁阻率;

A是仿真模型的矢量磁位;

μ 是永磁体的磁导率;

H_c 是电机永磁体矫顽力;

$\delta_c = H_c n$;

n是电机永磁体的边界外单位法向矢量。

在仿真分析时, 通过有限元方法分析电机在运行情况下的转子磁场的退磁情况。再仿真为得到电机的不可逆退磁情况, 将永磁体材料的非线性BH曲线作为输入值, 然后进行反复迭代计算, 得出电机的最小磁密工作点值。最后, 通过场计算器得出电机永磁体材料的回复曲线, 从而判断永磁体的退磁情况。对于有限元的计算方法, 能够精确得出仿真结果和图形, 但是仿真过程较慢, 一般需要较为复杂的设置过程与较高的准确模型。

2 永磁体退磁机理

文章涉及的电机, 使用永久性磁铁励磁, 通电线圈会对转子上的永磁体形成去磁效应。电机在正常运转时, 由于电机

运转电流较小, 定子绕组产生的磁场强度并不足以令永磁体退磁; 但是, 当电机发生过载等情况时, 会引起电流突然增加, 电励磁绕组增加励磁, 从而导致永磁体发生不可逆退磁, 使电机的可靠性和效率等降低。因此, 在电机的各种工况下, 需避免永磁体发生不可逆退磁。

永磁材料的特性会受温度等因素的影响, 永磁体在不同温度下的退磁曲线是不相同的, 矫顽力、剩磁等的参数也不一样。永磁体的热稳定性指的是, 电机永磁体磁性能受温度变化影响程度的大小。假设电机永磁体在正常室温下, 温度 t_0 时刻的剩磁密度为 B_{r0} , 温度变化后的 t_1 时刻, 剩磁密度 B_{r1} 为:

$$B_{r1} = B_{r0} * (1 - \frac{\Delta T}{100}) [1 - \frac{\alpha_{Br}}{100} (t_1 - t_0)] \quad (4)$$

$$\alpha_{Br} = \frac{B_{r1} - B'_{r0}}{B'_{r0}(t_1 - t_0)} * 100\% \quad (5)$$

其中, α_{Br} 是永磁材料剩磁密度随着温度发生退磁变化的程度。

式(4)中, ΔT 是温度恢复之后, 剩磁密度的不可逆磁损失, 如图2所示。其表达式为:

$$\Delta T = \frac{B'_{r0} - B_{r0}}{B_{r0}} * 100\% \quad (6)$$

由式(6)可知, 永磁体的剩磁随温度增大而减小, 因此在进行永磁退磁分析时, 应分析恶劣工况下的情况。

3 永磁体工作点的确定

永磁体工作点的大小可以判定永磁体是否退磁。为确保电机不失磁, 研究永磁体工作点是极其重要的。永磁体内的单元不同, 对应的工作点也不同, 进而失磁与否, 与电机永磁体冲磁方向上每个单元的磁密大小相关^[3]。因此, 需要求解该单元磁化方向的磁密作为工作点, 其表达式为:

$$B_p = B_c \cos \theta \quad (7)$$

其中, θ 是永磁体磁化方向与该单元磁密矢量的夹角。

电机永磁体的工作点中, a点的 θ_1 小于 90° , 该处工作点为负; b点的 θ_1 大于 90° , 该处工作点为正。通过判定永磁体最小工作点是否在拐点之下, 判断电机是否发生不可逆退磁现象。

N35SH型号的永磁材料, 在常温下的剩余磁感应强度Br为1.2T, 矫顽力可达892kA/m, 最大磁能积可达379kJ/m³。假设文章涉及电机退磁是在150℃下仿真的, 该品牌的磁钢材料在150℃下的工作拐点在0.44T左右^[4]。

不可逆退磁是通过仿真使电机的电枢电流发生过流时, 分析永磁体的最小磁密值是否低于该温度下对应永磁材料的拐点磁密值, 进而判断出电机是否发生不可逆退磁, 并分析对应磁密工作点的退磁曲线能否恢复初始状态^[5]。

4 退磁模型设定及流程

为保证电机的可靠运行, 现模拟该公司这类电机实际运行

时出现的电机失控现象, 进行恶劣工况下的退磁校验。文章电机所用的永磁体是N35SH钕铁硼烧结永磁材料, 其最大工作温度为150℃, 居里温度在320℃。永磁电机永磁体的退磁一般是由d轴上的电流导致的, 而q轴电流既不起到去磁作用, 也不起到助磁作用。因此, 为了模拟恶劣状况下的退磁情况, 在d轴上施加与d轴正方向相反的电流矢量, 即去磁电流。考虑到电机的控制器功率的限制, 将dq轴的合成电流矢量幅值设置为其额定电流矢量幅值的2.5倍。

5 永磁体退磁状况分析

仿真分析后^[2], 通过分析各时间点的磁密云图中的最小磁密值, 进而找到仿真周期内的最小磁密值。最小磁密点永磁体的磁密云图如图1所示, 最小磁密为0.3295 T, 这台电机至少有部分磁钢工作点低于150℃下永磁体退磁曲线的拐点值^[6-8], 发生了退磁。

为了更好地观察永磁体在该情况下是否发生不可逆退磁, 在前文观察到的永磁体最小磁密处插入一段线如图2所示, 监测该处退磁情况, 检测线方向与永磁体的冲磁方向要保持一致。

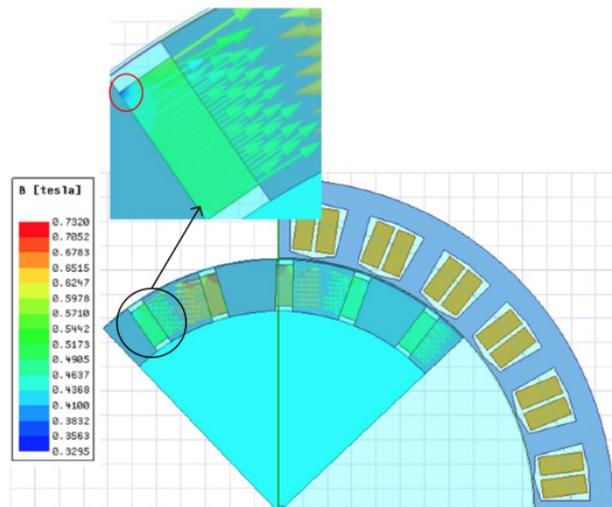


图1 永磁体最小磁密值及磁力线分布

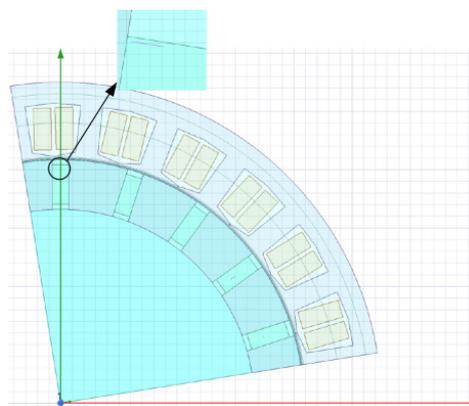


图2 永磁体退磁工作点监测建模
为获得该处磁密工作点运动轨迹, 通过场计算器计算得出

如图3所示的永磁体退磁回复曲线。从图中可知,永磁体磁密出现小于拐点值,在低于拐点值后未能沿BH曲线返回,而是沿着另一曲线上升。故在加上最恶劣工况条件后,永磁体发生了不可逆退磁。

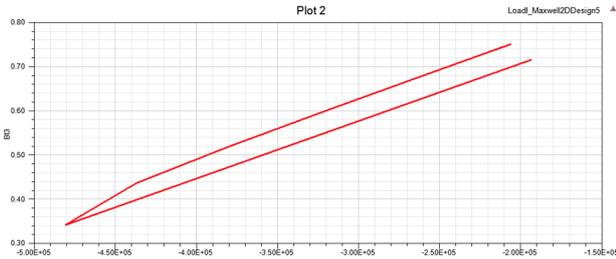


图3 永磁体退磁回复曲线

由于电机的空载反电势的试验测试精度相对较高,反电势的对比较为直观,如图4所示。因此,以下分析对比退磁前后电机反电势的影响情况,通过在退磁模型上复制原模型的工作点,然后计算退磁后的反电势。

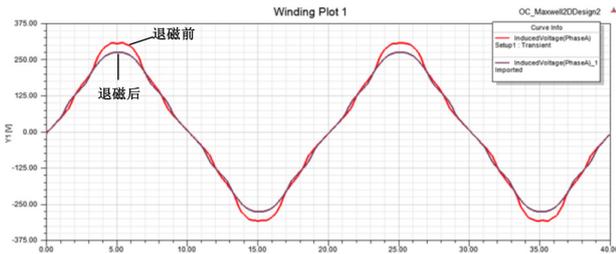


图4 退磁前后反电势对比图

从图4可以看出,退磁后电机空载反电势的幅值小于正常运行状态下空载反电势的幅值。这是因为电机永磁体发生退磁后,永磁体的励磁能力降低,电机内的磁场减小。此外,电机的空载反电势与空载主磁通和剩余磁通密度成正比关系。电机一旦发生退磁之后,电机永磁体的工作点下移,空载时的主磁通降低,进而会导致电机空载反电势的降低。

为了解退磁大小,可将电机退磁前后反电势比值定义为电机的退磁比例系数K,公式为:

$$K = \left(1 - \frac{E'_0}{E_0}\right) \times 100\% \quad (8)$$

通过式(8)可知,反电势从304.5613 V下降至275.5411 V,

退磁比例为9.5%。

6 结语

文章主要是比较永磁体各处的最小磁通密度值与退磁曲线中拐点磁密值,判断电机是否会发生退磁,然后通过监视最小磁密处的工作点运动轨迹判定是否是不可逆退磁。

首先,根据电机所用控制器输出的最大电流限制,加入电枢电流为2.5倍额定电流且电枢电流为去磁方向,进行电机在150℃下的仿真分析。

然后,通过提取该仿真的各时间段下的磁密云图的最小磁密,比较拐点磁密值,得出永磁体会发生局部退磁的位置,通过场计算器仿真最小磁密处的退磁工作点的运动情况,判定该电机在退磁条件下会发生局部不可逆退磁。

最后,仿真分析退磁前后的反电势对比,得出退磁比例情况。

参考文献

- [1] 唐旭,王秀和,徐定旺.异步起动永磁同步电动机起动过程中永磁体平均工作点的解析计算[J].电机与控制学报,2017(5):8-14.
- [2] 赵博,张洪亮.Ansoft 12在工程电磁场中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [3] Say,M.G.The Performance and Design of Alternating-Current Machines[J].Students Quarterly Journal,1937(27):145-146.
- [4] 唐任远等.现代永磁电机理论与设计[M].第一版.北京:机械工业出版社,1997..
- [5] 盛剑霓.工程电磁场数值分析[M].西安:西安交通大学出版社,1991.
- [6] 黄坚,郭中醒.实用电机设计计算手册[M].上海:上海科学技术出版社,2014.
- [7] 张榴晨,徐松.有限元法在电磁计算中的应用[M].北京:中国铁道出版社,1996.
- [8] 刘麦.考虑温度特性的永磁电机建模及退磁分析[J].南方农机,2021(5):23-24,33.