

开发运用

电磁场分析在永磁同步电机设计中的运用

陈振强

(电机基础技术部,陕西 西安 710016)

摘要 随着计算机硬件和软件技术的迅猛发展,以及电磁场有限元分析及在永磁同步电机设计中的应用,本文就永磁同步电机电磁场分析、直轴交轴电感计算、功角特性计算、漏磁计算等进行了深入的分析研究。

关键词 电机场数值计算 直轴交轴电感计算 功角特性计算 漏磁计算

0 引言

稀土永磁同步电机作为节能减排、绿色能源及信息化等领域的发展焦点已成为众人研究的对象,广大电机研发人员对永磁风力发电机、超高效永磁同步电动机、交流永磁伺服电动机和特种永磁同步电机等电机的电磁场分析与关键参数计算都进行了深入研究。由于用户对电机性能的要求日益增高,电机结构日益新颖多样,因此,增加了设计及研究的复杂性。本文就准确计算电机的电磁场、交直流电感、漏磁系数、功角特性等进行阐述。

1 磁场分析

1.1 气隙磁场的计算

电机的气隙磁场分布和局部磁密准确计算直接关系到空载反电动势、漏磁系数和磁钢布置的优化结果,并且对于电机的运行状态及实施的控制方法都有很大的影响。所以在一个电机设计初期,尤其永磁同步电动机电磁场分布及磁密波形的准确计算为进一步优化电机结构提供数据支持至关重要。通过对气隙磁场中谐波的傅立叶分解求得基波含量,可以通过改变槽型尺寸、磁钢布局等优化电机磁路结构。对于细节的磁场分布,等效磁路法是力不从心的。目前市场上的电磁场分析软件 Maxwell、Magnet 等都可以用于电机电磁场的分析和计算。

1.2 电机局部磁密计算

1.2.1 定子轭部磁场计算

从磁场对称的中性线位置绘一条线如图 1 所示,磁密从槽底到铁心外表面分布曲线如图 2 所示。

1.2.2 定子齿磁密计算

从定子齿最窄 1/3 处绘一条线如图 3 所示,磁密从槽底到铁心外表面分布曲线如图 4 所示。

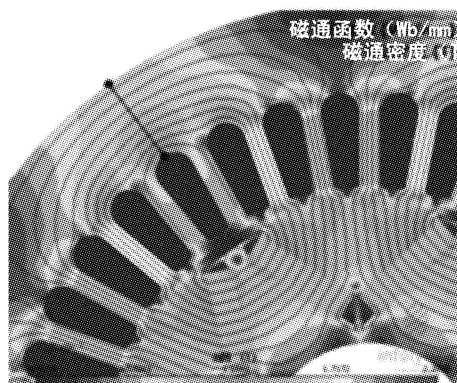


图 1 轭部磁密选取

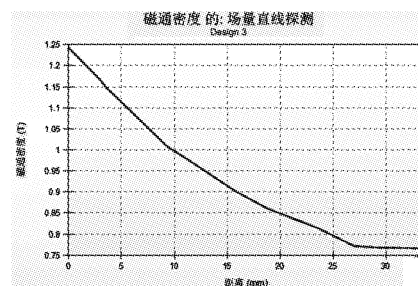


图 2 轭部磁密分布

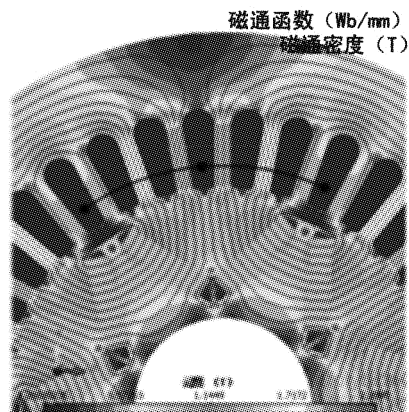


图 3 齿部磁密选取

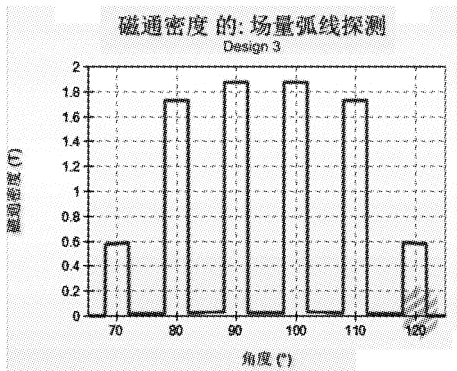


图4 定子齿磁密

1.2.3 转子极身磁密计算

从转子极身绘一条弧线如图5所示,磁密从槽底到铁心外表面分布曲线如图6所示。

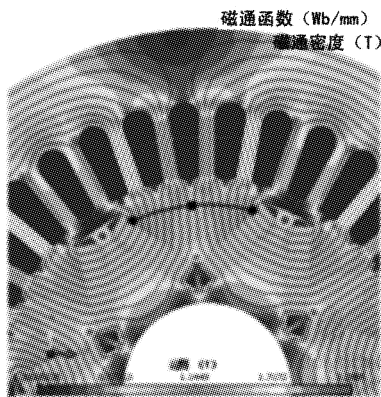


图5 转子极身磁密选取

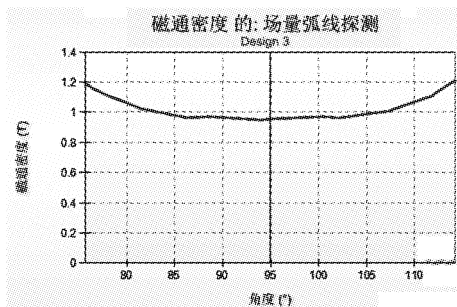


图6 转子极身磁密

1.2.4 转子轭磁密计算

从转子交轴中心绘一条线如图7所示,磁密从槽底到铁心外表面分布曲线如图8所示。

通过对电机空载磁场的分析,得到了电机气隙,定子轭、齿,转子轭、齿磁密的分布,通过对结果的分析,磁密在合适的设计范围内。

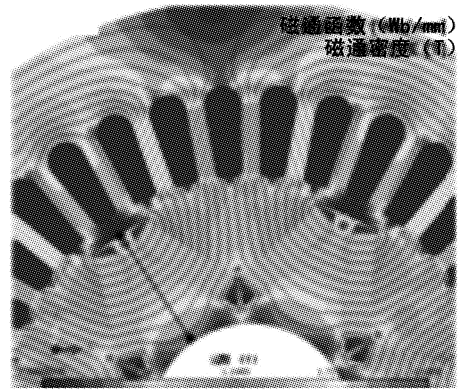


图7 转子轭磁密选取

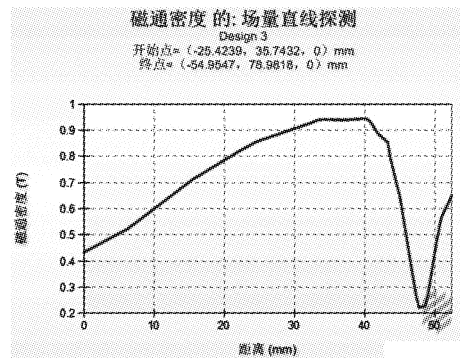


图8 转子轭磁密分布

2 空载漏磁分析与计算

在具体分析永磁同步电机的磁场分布时,两点间标量磁位(磁标势)的绝对值之差就是通过单位轴向长度内两点间的磁通量,根据空载漏磁系数的定义,漏磁系数 σ_0 为永磁体空载时的总磁通 Φ_m 与进入气隙的气隙主磁通 Φ_8 的比值,即

$$\sigma_0 = \frac{\Phi_m}{\Phi_8} = \frac{A_2 - A_1 + A_4 - A_3 + A_6 - A_5 + A_8 - A_7}{|A_{10} - A_9|} \dots\dots (1)$$

其中 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}$ 为图9中各点的磁位值。

$$\sigma_0 = \frac{0.09600126723001}{0.04097975138389 + 0.04098284690695} = 1.171287689675511 = 1.17$$

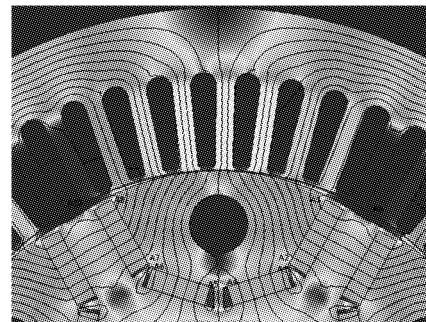


图9 空载磁场分布

3 负载磁场的计算

永磁同步电机在负载状态时,由定子三相交流电流建立的磁场和由转子永磁体建立的磁场相互作用,形成了合成磁场,电磁转矩和感应电势都与之有关。在永磁同步电机实际运行过程中,定子磁场和转子磁场在形成的稳定电磁转矩作用下克服负载转矩进行电机启动、加速。为了很好地计算电机在实际运行过程中电机的出力情况,对于标准的 I_u, I_v, I_w 三相对称电流,则有 $I_u + I_v + I_w = 0$ 。根据波形特点及相互关系,取三相电流的 1 个特征点, $I_u = I_{max}, I_v = -I_{max}/2, I_w = -I_{max}/2$ 。

通过负载、转速电压建立的方程确定电流提前角,通过绕组电流激励和永磁体夹角的设定,仿真负载电磁场分布如图 10 所示。

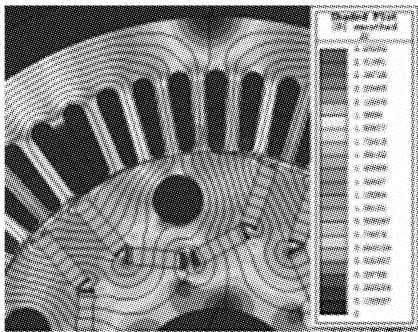


图 10 气隙磁场分布

4 直轴、交轴同步电抗计算

永磁同步电机采用磁钢励磁,减少了励磁绕组,降低了励磁损耗,具有高效节能、启动响应快等优点。电动汽车永磁同步电机一般采用内置式布置,磁钢布置灵活,并且通常情况下电机磁路比较饱和。所以永磁同步电机的磁极结构比较复杂,由于局部的饱和,在计算直交轴电抗时,等效磁路的方法无法完成对交直轴电抗的准确计算。而且由于交直轴在电机中的共用磁路,因而对它们之间的交叉饱和更是无能为力。近年来随着计算机和电磁场有限元分析技术的提高,在永磁同步电机的设计中广泛采用电磁场有限元的方法,此方法采用对实际空间、材料、磁势的严格模拟,是能准确计算出交直轴电抗。交直轴电抗的准确计算可准确把握电机的处理情况,尤其在弱磁、增磁等复杂工况下把握电机的运行状态。并且,作为电机的重用参数,准确提供交直轴电抗会为变频器的控制算法对电机的有效控制提供重要的数据支持。

常用的计算方法是磁通法,对于直轴电抗 X_{ad} ,先求出空载时的气隙基波磁通 Φ_o ,再求出直流电流 I_d 与永磁体共同作用产生的磁通 Φ_d ,得:

$$X_{ad} = \frac{4.44fNK_{dp}(\Phi_o - \Phi_d)}{I_d} \dots\dots\dots (2)$$

对于交轴电抗,则:

$$X_{aq} = \frac{4.44fNK_{dp}\Phi_{aq}}{I_q} \dots\dots\dots (3)$$

在实际分析中,选中 U 绕组中心线与转子某磁极中心共线,在 U 绕组中加 I_{max} ,其他绕组 $I_{max}/2$,如此计算 U 绕组中心轴线的定子磁场与永磁体共同作用产生的磁通密度分布如图 11 所示。

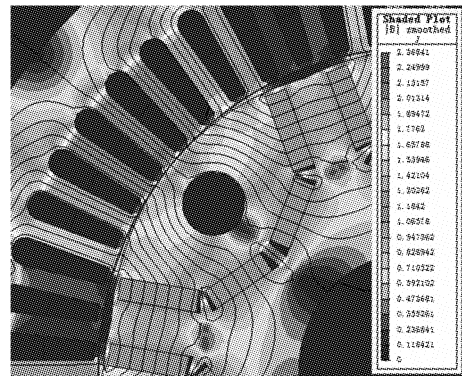


图 11 直轴 I_d 与永磁体共同作用磁场分布

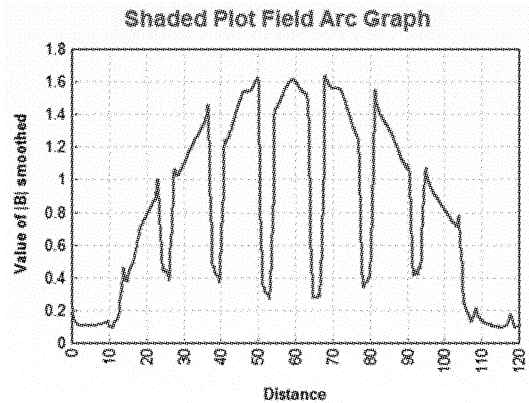


图 12 直轴 I_d 与永磁体共同作用气隙磁密波形

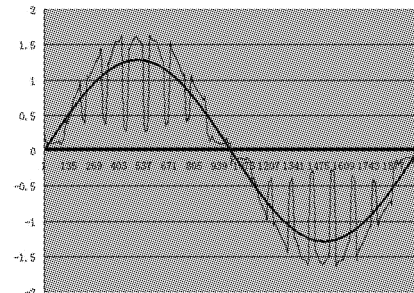


图 13 直轴基波与气隙磁密比较

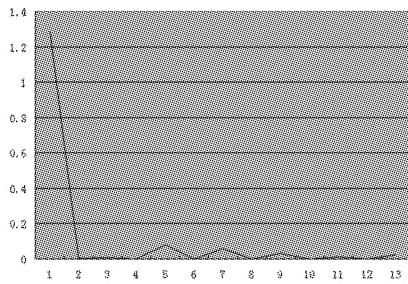


图 14 气隙磁场傅里叶分解

通过对磁通密度傅里叶分解求出基波,如图 13 所示,基波及谐波含量如图 14 所示,由于基波是正弦波,通过公式计算 Φ_o 、 Φ_d ,进而计算直轴电抗。

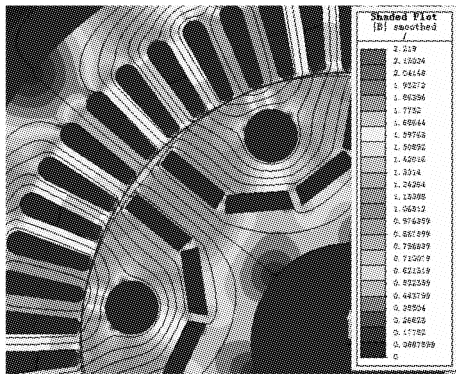


图 15 交轴气隙磁密波形交轴磁场分布

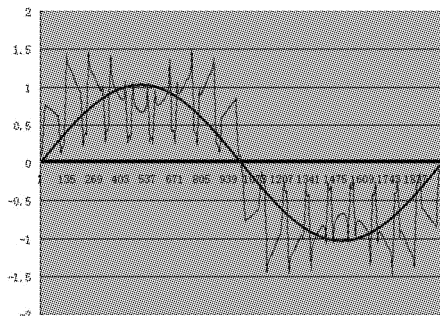


图 16 交轴直轴基波与气隙磁密比较

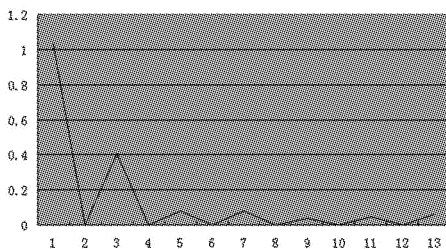


图 17 交轴气隙磁场谐波分解

通过对交轴气隙磁通密度傅里叶分解求出基波,如图 16 所示,由于基波是正弦波,通过公式计算

Φ_o 、 Φ_d ,进而计算交轴电抗。在用有限元计算交轴电感,虽然交轴和直轴分别计算,但是在计算交轴时,直轴是存在的,所以已经考虑交直轴的互相影响,在计算直轴时同理。

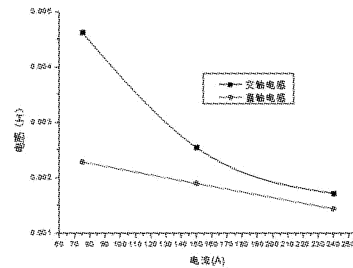


图 18 不同电流直轴交轴计算结果

5 “功角特性”有限元计算方法

与异步电机不同,变频永磁同步电机中的功角特性直接影响电机转矩的输出,通过公式计算只能粗略的估计电机的最大转矩等,通过电磁场有限元方法将能准确计算电机负载下的气隙磁密、电磁转矩的输出。

功角特性的计算从本质上是力和转矩的计算,旋转电动机的基本功能就是为负载提供力矩或称为驱动力。准确计算变频永磁同步电机功角特性就能掌握电机的力能输出能力。

从基础物理中,已经熟悉电流和磁场的相互作用会产生力。概括而论,当通有电流的导体置于磁场中,该导体将受到力的作用,力矢量和磁通密度矢量呈右手螺旋法则。

用有限元工具计算功角特性比较简单,和齿槽转矩一样,只不过定位转矩计算时定子电流为零,而功角特性计算时定子绕组中有电流,如图 19 所示。图中基本反映了电机的功角特性,不同于解析法提供的功角特性,此功角特性不仅反应出了功角和力的关系,同时,它还把纹波转矩也反应了出来。通过去掉曲线中的脉动,剩下的基波就是功角特性。功角特性计算结果不仅提供了出力情况,并且可以准确计算功角零点。

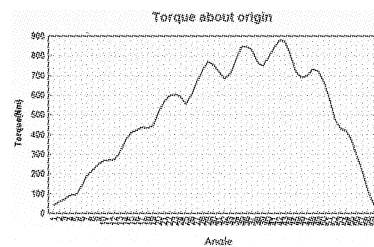


图 19 功角特性

6 总结

通过有限元方法的充分应用,可以计算变频永磁同步电机的关键电磁参数,为产品研发提供技术支撑。

参考文献

- [1]唐任远等.现代永磁同步电机理论与设计.北京:机械工业出版社,2002.