

电机电磁计算中的各种磁导率

Permeability in the Electromagnetic Calculation of Electric Machines

许善椿 李金香 孙玉田

(哈尔滨大电机研究所)

Xu Shanchun Li Jinxiang Sun Yutian

(Harbin Institute of Large Electrical Machinery)

摘要 本文讨论电机中铁磁材料的各种不同的磁导率。介绍了典型的凸极同步电机转子材料增量磁导率的测量结果,并给出了电机定、转子铁心典型材料的各种磁导率。文章最后还给出了应用不同磁导率计算变频器供电的同步电机运算电感的实例。

关键词 铁磁材料 磁导率 电磁计算机

Abstract This paper discusses various permeabilities of ferromagnetic materials used in electric machines. The measurements of the incremental permeability of a typical rotor material of salient-pole synchronous machines are introduced, and various permeabilities for the stator and rotor of the machine are presented. As an example, the operational inductance of a synchronous machine supplied by a cycloconverter is determined by the method described in the paper.

Keywords ferromagnetic material permeability electromagnetic calculation

1 前言

铁磁材料是各类电机中普遍应用的主要材料。铁磁材料的特性对电机的性能有很大影响。为了正确计算各种电机的电磁特性和参数,必须对电机中应用的铁磁材料进行正确的模拟。

铁磁体的导磁性能与其中磁畴各种不同的磁化状态有关。从人们熟知的铁磁材料的磁滞回线可知,铁磁材料的磁化过程具有非线性、时滞性和不可逆性,并且是各向异性的。其中尤其是非线性特征——即饱和特征,对于各种电机的性能和行为更有很大关系。各种电机的参数的饱和值与不饱和值往往差别很大,不同饱和情况下的电机性能可能会有质的差别。

工程需要解决各类电机的电磁问题中铁磁材料的磁化状态是各不相同的。因而铁磁材料的导磁特性也不同,所以我们应该采用各种相应的磁导率。例如,直流电机空载磁路的计算,异步电机的滑差运行,变频器供电的电磁损耗,汽轮发电机转子负序损耗以及发电机小信号扰动等问题,都应考虑特定的磁导率。

文献[1、2]介绍过大型汽轮发电机转子材料增量磁导率的测定,及其在计算汽轮发电机小信号频率参数中应用。文献[3]研究过凸极同步电机转子材料的各种磁导率。文献[4~6]讨论了有效磁导率的概念及其应用。本文试图在现有文献工作的基础上,综合研究各种电机电磁问题适用的不同磁导率,并指明选用的原则,最后举例说明研究内容的实际应用效果。

2 几种常用的磁导率

在分析电机的电磁问题时,通常涉及到的有下列几种磁导率:

(1) 基本磁导率 μ

基本磁导率也被称作稳态磁导率,平均磁导率或直流磁导率。

在铁磁材料磁化过程中,磁通密度 B 不仅与磁场强度 H 有关,而且与磁化的方向(即 $\frac{\partial H}{\partial t}$ 的符号)有

关。当 H 周期地变化时形成磁滞回线,不同磁滞回线的顶点的连线就是工程上常用的基本磁化曲线。它是

铁磁材料的基本属性。而基本磁导率 μ 就是基本磁化曲线上各点 B 与 H 之比值： $\mu = \frac{B}{H}$ 。

电机内直流磁场（或称恒定磁场）适用材料的基本磁导率。工程上正弦磁场问题通常也近似地应用基本磁导率。

(2) 微分磁导率 μ_d

它是基本磁化曲线上各点的斜率：

$$\mu_d = \frac{dB}{dH} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

微分磁导率是一种动态磁导率，它适用于分析稳态时变场中存在的增量磁场。

经过简单的推导，可以等到下列微分磁导率 μ_d 与基本磁导率 μ 之间的关系：

$$\mu_d = \mu + H \frac{\partial \mu}{\partial H}$$

应用微分磁导率概念，可以说明工作点沿磁化曲线变化时，激励信号增量引起的响应变化的急剧程度。

(3) 增量磁导率 μ_{inc}

在直流磁场和交流磁场同时作用下，铁磁材料的磁化过程比较复杂。

如果在一个直流偏置磁场的基础上，作用一个小信号交变磁场时，铁磁材料的磁状态将不沿磁化曲线变化，而以原工作点为中心，形成一个增量环（即局部磁滞回线）。这个增量环的弦的斜率即被定义为增量磁导率（图1）：

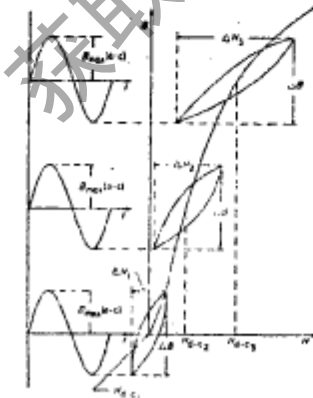


图1 干扰信号与增量环

$$\mu_{inc} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

增量磁导率与偏置磁场强度 H 及交变磁密增量 ΔB 有关，如图3所示：

$$\mu_{inc} = \mu_{inc}(H, \Delta B)$$

如小信号交变场 ΔB 足够小， μ_{inc} 的极限值称为无限小信号增量磁导率：

$$\mu_{inc}^{(H)} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

简称微增磁导率或增量磁导率。有的文献还称之为可逆磁导率或回复磁导率。

当偏置磁场很高时，微增磁导率趋向与微分磁导率一致。

(4) 有效磁导率 μ_e

稳态时变场情况，磁密 B 和磁场强度 H 均周期地变化，所以对应的磁导率也周期性改变，而且在交变磁场中，铁磁体形成动态磁滞回线和交流磁化曲线。所以严格地说，不适用基本磁化曲线。

并且，由于铁磁材料磁化过程的非线性，当磁密正弦变化时，磁场强度的变化曲线呈尖顶状；而当磁场强度正弦变化时，磁密变化曲线为平顶波。因此，当用向量形式求解正弦时变磁场问题时，通常根据一个周期内磁能密度的平均值相等的概念来定义有效磁导率 μ_e ，即

$$\frac{1}{T} \int_0^T \frac{HB}{2} dt = \frac{1}{4} \mu_e H_m^2 = \frac{1}{4} \frac{B_m^2}{\mu_e} = \text{const}$$

当磁场强度正弦变化时：

$$H(t) = H_m \sin \alpha t$$

$$\text{则 } B(t) = \mu(t) H_m \sin \alpha t$$

可得有效磁导率：

$$\mu_e(H) = \frac{8}{T} \int_0^T \mu(t) \sin^2 \alpha t dt$$

当磁密正弦变化时：

$$B(t) = B_m \sin \alpha t$$

$$\text{则 } H(t) = \frac{B_m}{\mu(t)} \sin \alpha t$$

可得有效磁导率

$$\mu_e(B) = \frac{T}{8 \int_0^T \sin^2 \omega t \mu(t) dt}$$

交流电机开路状态磁场和短路状态磁场分别相当于正弦磁密磁场和正弦磁场强度磁场，所以应分别选用相应的有效磁导率。

在实际工程问题应用中，有效磁导率常采用下列一些简化近似公式计算^[6]：

$$\mu_e = \frac{B_{1m}}{H_{1m}}$$

或
$$\mu_e = \frac{1}{T} \int_0^T \mu(t) dt$$

或
$$\mu_e \left[\frac{2}{T} \int_0^T \mu^2(t) dt \right]^{1/2}$$

图 5 给出了交流电机典型的定子铁心材料的有效磁导率。

3 增量磁导率的测定

上面提到的各种磁导率，除了增量磁导率外，均可由铁磁材料的基本磁导率算得。这里给出凸极同步电机转子铁心材料的增量磁导率的测定方法和结果。

(1) 试样及测量回路

采用的环形试样如图 2 所示。试样断面的等效宽度与试样平均半径之比为 $\frac{1}{8}$ ，因此试样中磁场的均匀度可控制在 0.5% 以内。

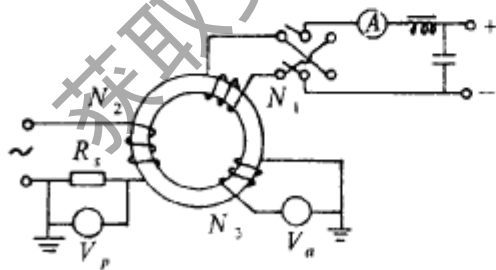


图 2 测量增量磁导率的线路图

试样上设置三个测量线圈。线圈 N_1 用来设置直流偏置磁场。线圈 N_2 用以产生磁场强度增量 ΔH ，线圈 N_3 用来测量磁密增量 ΔB 。

为考虑磁路饱和的影响，用标准电阻-峰值电压表

法测量电流对应的 ΔH ，用平均值电压表测量磁密增量 ΔB ，以得到 ΔH 和 ΔB 的幅值。

(2) 增量磁导率测量步骤：

(a) 试样去磁

(b) 在一个固定直流偏置磁场下，进行下列测量步骤：

(i) 给定一个增量磁密 ΔB ；

(ii) 读取相应的增量场强 ΔH ；

(iii) 计算增量磁导率 $\mu_{inc} = \frac{\Delta B}{\Delta H}$ ；

(iv) 逐次减小 ΔB ，对各 ΔB 值，重复(i)~(iii)，即可得关系曲线 $\mu_{inc}(\Delta B)$ 。

(c) 调节直流偏置磁场，重复(b)中各步骤可得一曲线 $\mu_{inc}(\Delta B, H)$ ，如图 3 所示。

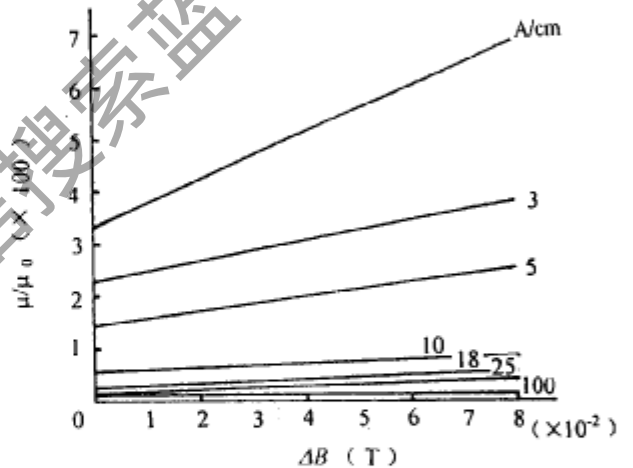


图 3 不同偏置场强下的增量磁导率曲线

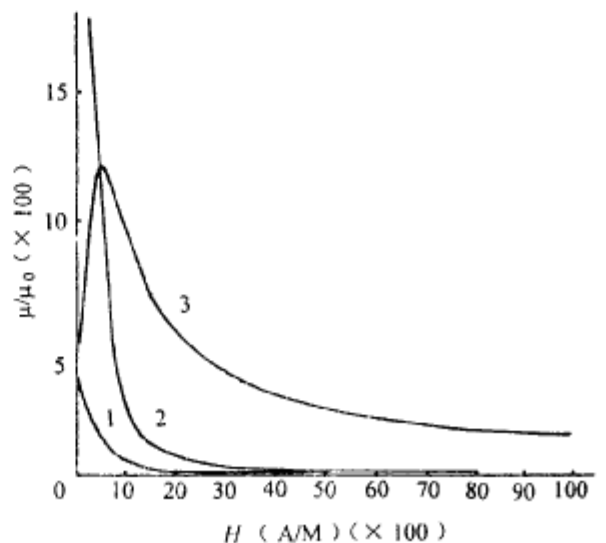


图 4 凸极电机转子典型材料的磁导率

1. 增量磁导率 2. 微分磁导率 3. 基本磁导率

(d)读取 $\Delta B \rightarrow 0$ 时,不同直流偏置下各曲线上的 μ_{inc} ,即可得到一根微增量磁导率曲线,如图4。为了适合工程设计的习惯,这里采用 ΔH 作为横坐标。

(3) 测量结果与讨论

对大型凸极同步电机转子磁极材料的增量磁导率进行了详细测量,结果如图4,从图中可以看出以下几点:

(a)当增量场强 ΔH 在小信号范围内变化时,增量磁导率 μ_{inc} 随增量场强 ΔH 线性增加。

(b)随着直流偏置磁场的增大,曲线 $\mu_{inc}(\Delta B)$ 渐趋平坦。即在高饱和区,小信号增量磁导率 μ_{inc} 与 ΔB 关系不大;并且 μ_{inc} 趋近于材料的微分磁导率 μ_d 。

(c)比较大型凸极同步电机转子材料的三种磁导率(图4)可见:

在低饱和区,增量磁导率数值远小于基本磁导率和微分磁导率。即在小信号增量磁场激励下,材料对应的磁导率较小,磁化困难。

在低饱和区,增量磁导率数值远小于基本磁导率和微分磁导率。即在小信号增量磁场激励下,材料对应的磁导率较小,磁化困难。

在高饱和区,增量磁导率逐渐趋近于微分磁导率,但始终远小于材料的基本磁导率。

4 应用实例

在交-交变频器供电的调速凸极电机中,由于变频电源非正弦供电的影响,存在一定的谐波磁场。这些谐波磁场可以看成小信号增量场,通过分析电机磁场特性可知,它们对电机定子和转子磁场的影响是不同的。

在定子区,原有的磁场是交变的。小信号增量磁场的影响,可考虑为对原磁场进行调制。如果增量场的幅值很小,频率甚低,合成磁场可看作仍沿基本磁化曲线变化。这样,增量磁场的影响,可用相应的微分磁导率来考虑。

在转子区,原来稳态磁密是直流的。小信号增量磁场将在直流偏置场的运行点上形成局部磁滞回线,所以,这时转子材料的磁特性应用增量磁导率来考虑小信号增量场的影响。

作为实例,计算了一台变频器供电的2500kW同步电机的小信号运算电感。由于小信号谐波磁场的幅值通常远小于基波磁场,因而电机的饱和度主要由基波磁场决定。在基波磁场激励(偏置磁场)的基础上,

再确定相应的微分磁导率和增量磁导率。

采用二维线性交变场分析了谐波磁场,定、转子区分别应用微分磁导率和增量磁导率。通过磁链计算,求出不同频率下小信号运算电感。计算结果与传统方法算得的结果作了对比(图6)。可见,在低频区,

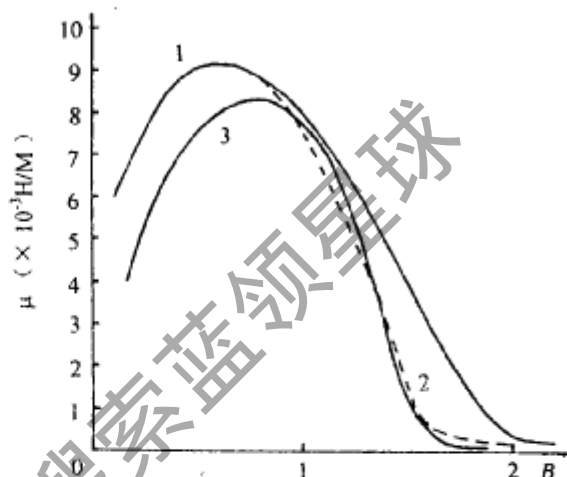
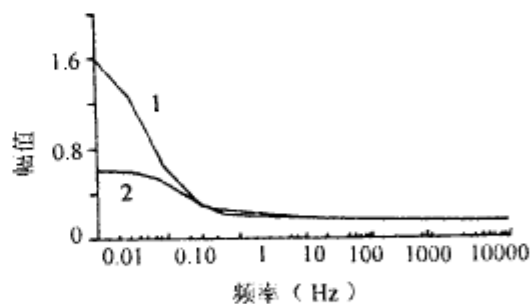


图5 交流电机定子典型材料的磁导率

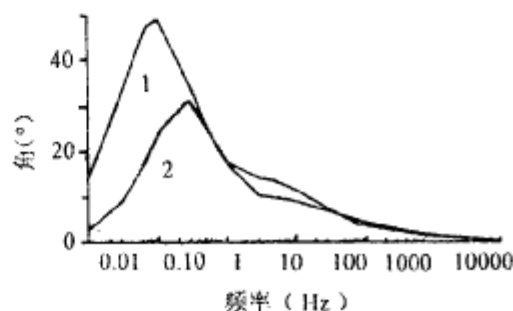
1.有效磁导率, $H(t) = H_m \sin \alpha t$

2.有效磁导率, $B(t) = H_m \sin \alpha t$

3.基本磁导率



(a) 运算电感模



(b) 运算电感幅角

图6 直轴小信号运算电感曲线

1 利用基本磁导率计算 2 利用本文磁导率计算

特别当 $f < 1\text{Hz}$ 时, 差别甚大, 即采用常规传统方法计算变频同步电机小信号运算电感包含较大误差。

5 结论

本文讨论了电机电磁计算中各种磁导率的概念与选用原则。各种电机在不同运行状态下存在的磁场差别很大, 因此应该相应地选用不同的磁导率。

对于恒定磁场问题可应用材料的基本磁导率。如在恒定磁场基础上叠加有小信号干扰磁场, 则应该采用增量磁导率。而且, 一般说是个非线性问题。但是, 如果干扰信号足够小, 可当作线性问题处理。

对于稳态正弦交变磁场, 严格说, 应该采用有效磁导率, 如果在它的基础上叠加小信号干扰, 则应采用微分磁导率进行分析。

参考文献

- 1 Minnich S H.Incremental permeabilities for transient analysis of large turbine generators by th FEM. 1981,Vol52.
- 2 Minnich S Het al.Operational inductances of turbine generators by FEM. IEEE,1983,Vol PAS-102.
- 3 孙玉田. 电磁场计算中的磁导率. 哈尔滨电工学院学报,1992 (4)
- 4 Damerdash N A et-al. Solution of nonlinear eddy current and loss problems in the solid rotor of large

turbogenerator using FE approach.IEEE Power Engineering Society Winter Meeting ,1978

- 5 李觉民, 郭立炜. 常用铁磁材料的有效磁导率和磁阻率及其解析表达式, 哈尔滨电工学院学报,1988 (4)
- 6 Luomi J.On the use of effective reluctivities in magnetic analysis of induction motors fed from a sinusoidal voltage source, Proceedings of ICEM ' 86:706-709

收稿日期:1997.06.28

许善春 (Xu Shanchun)



生于1937年6月。1961年毕业于浙江大学电机系, 1965年浙江大学研究生院毕业。1982年~1984年在美国 Carnegie - Mellon 大学电机与计算机工程系从事博士后研究。现任中国电机工程学会发电机专委会委员, 中国电工技术学会理论电工专委会委员, 国际电磁场计算会议联络办公室委员。一直从事大型电机的研究与开发工作。教授级高级工程师。

联系地址: 哈尔滨大电机研究所电机室
邮政编码: 150040

新系列的空冷汽轮发电机

哈尔滨电机有限责任公司自 1992 年开始研制的容量为 30 ~ 100MW 级新系列空冷汽轮发电机, 已有 1 台 60MW 机组于 1997 年 2 月在乌鲁木齐石化自备电厂顺利投入运行, 该公司目前正在制造用于包头天骄电厂的 100MW 电机。该公司已接受 10 × 60MW 及 2 × 100MW 电机的国内订货。

发电机的主要技术特点:

30 ~ 60MW 电机定子制作采用国际先进的 VPI 真空整浸技术, 提高了定子线圈的绝缘强度和散热能力, 目前正在开发 100MW 级电机定子的整浸技术;

定子绕组采用特殊的不完全换位, 与传统的罗贝尔换位方式比较, 附加铜耗减少 40% ~ 50%;

定子线圈主绝缘薄, 10.5kV 及 13.8kV 级的主绝缘单边厚度分别为 2.65mm 和 3.5mm, 与 ABB 公司相

同电压等级的主绝缘厚度 2.47mm 及 3.37mm 很接近;

转子采用副槽径向风路冷却系统, 以离心力来产生附加压头, 充分利用转子的自通风效应;

在两端端盖与转轴之间的静动配合处, 采用高压空气密封结构, 密封效果很好;

利用先进的计算程序, 对机座、转子轴系结构及护环在计算机上都进行严谨的数值分析计算, 证明这些部件设计合理, 安全可靠。

100MW 电机的铁心与机座之间采用立式弹簧隔板, 隔振效果良好, 明显降低噪声级。

哈电公司所开发的空冷汽轮发电机系列, 为我国今后研制容量 100MW 级以上的该类电机开辟了广阔的前景。

(董洪元)