

基于同步电机电抗参数定义式的仿真计算方法^{*}

李保来, 李硕婷

(中船重工电机科技股份有限公司, 山西 太原 030027)

摘要: 从同步电机各种稳态和瞬态电抗参数的定义、各种电抗参数与电机内部各绕组和磁路结构之间的电磁关系出发, 提出了一种基于电抗参数定义式的仿真计算方法, 给出了详细的仿真计算步骤。通过算例与样机实测结果的对比, 表明仿真计算结果与实测值非常吻合, 从而验证了所提计算方法的有效性和准确性。

关键词: 同步电机; 电抗参数; 电磁仿真; 电机设计

中图分类号: TM 303 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)05-0025-05

Simulation Calculation Method Based on Definition of Synchronous Motor Reactance Parameters^{*}

LI Baolai, LI Shuting

(CSIC Motor Technology Co., Ltd., Taiyuan 030027, China)

Abstract: Based on the definitions of various steady-state and transient reactance parameters of synchronous motor, as well as the electromagnetic relationship between various reactance parameters and the windings, the magnetic circuit structure of the motor, a simulation calculation method based on the definition formulas of reactance parameters was proposed. The detailed simulation calculation steps were given. By comparing the calculated results with the measured results of the prototype, it was shown that the simulation results were in good agreement with the measured values, thus the validity and accuracy of the calculation method were verified.

Key words: synchronous motor; reactance parameter; electromagnetic simulation; motor design

0 引言

电机的参数包括绕组的电阻参数和电抗参数。电阻参数主要取决于构成电路的材料和结构特性。由于电路的材料和结构比较简单, 且材料的导电特性通常是线性的, 电路结构也是固定的, 因此电阻参数计算较为容易。电抗参数则既与电路的特性有关又与磁路的特性有关, 并且随着转子的旋转, 磁路结构也在不断变化。磁路结构复杂, 构成磁路的材料和结构种类较多, 受齿槽、气隙的影响, 加之铁心的导磁特性等非线性因素, 使得电抗参数的准确计算变得极其复杂。电机电抗参数的计算方法通常有两种: (1) 基于路的算法; (2) 基于场的算法。基于路的算法是早期计算机

辅助设计技术尚不普及时普遍采用的方法, 优点是物理概念清晰、计算量小、计算速度快, 通常采用手算或简单的路算程序即可得到结果^[1-2], 但缺点是计算精度不够高。基于场的仿真计算方法是随着计算机辅助设计技术的飞速发展而发展起来的方法, 随着各种专业电磁仿真计算机软件功能的日益强大, 使得基于电磁场仿真的电机参数和性能计算校核变得非常快捷和精确, 有些仿真软件甚至将某些电机参数计算设计成了专用的插件或子程序, 给电机设计、参数优化带来极大方便, 成为目前电机设计最为常用的手段之一。文献[3]计算了不考虑交叉饱和的电机电抗。文献[4]用暂态有限元方法计算了考虑交叉饱和的内置式电动机的电抗参数。文献[5-6]提出用冻结磁导率

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0905502)

作者简介: 李保来(1964—), 男, 研究员, 研究方向为电机电磁理论与设计、船舶电气、风力发电系统及电气传动系统研发。

李硕婷(1991—), 女, 助理工程师, 研究方向为电磁场仿真计算及电机设计。

方法计算考虑交叉饱和的电抗参数。文献[7-10]提出了用有限元计算交直轴同步电抗的方法。文献[11]针对混合励磁永磁同步发电机的特殊磁路结构,介绍了一种用以计算交直轴电抗参数的方法。上述基于场算法的文献,多以软件操作步骤为主,对各种电抗参数物理概念和软件算法表述较少,计算过程不够直观,因某些设置和软件操作问题导致的错误难以查错和纠错。

本文从电抗参数的基本物理概念出发,提出基于电抗参数定义式的电磁仿真计算方法。由于在仿真过程中,材料的属性和电路结构可以人为设置,所提仿真计算方法可以比实测更加方便,所得结果更加符合各参数的定义。

采用该方法进行仿真时,因为可以灵活设置绕组材料的属性,可把阻尼绕组电阻率设置为无穷大(空气)或设置为零(超导体),所以可以严格按照各电抗参数的定义条件进行建模计算。

1 电抗参数的定义

1.1 线圈自感和互感

电机是基于电磁感应等一系列电磁理论来实现机电能量转换的装置,这就决定了电机的构成离不开线圈。线圈通电后存在电感,线圈的电感与通电角频率的乘积即为线圈的电抗。因此,电抗参数的计算实质上是线圈各种电感的计算。

1.1.1 自感

单个线圈通以电流会产生磁场(磁链) ϕ ,如图1所示。单个线圈通电后产生磁链的能力称为线圈的自感。线圈通以单位电流产生的磁链为该线圈的自感值 L ,即:

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (1)$$

式中: L ——自感;

ϕ ——通电后线圈产生的磁链;

I ——线圈中所通的电流。

线圈的自感既与电路参数有关,又与磁路参数有关:

$$L = N^2 \Lambda \quad (2)$$

式中: N ——线圈匝数;

Λ ——磁路的磁导。

$$\Lambda = \mu \frac{S}{l} \quad (3)$$

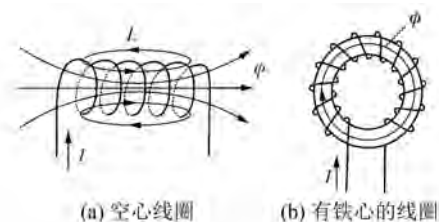


图1 线圈的自感

式中: μ ——磁路材料的磁导率;

S ——磁路的截面积;

l ——磁路长度。

1.1.2 互感

当多个线圈共用一个磁路时,除了每个线圈存在自感以外,各线圈之间还存在互感 M ,如图2所示。

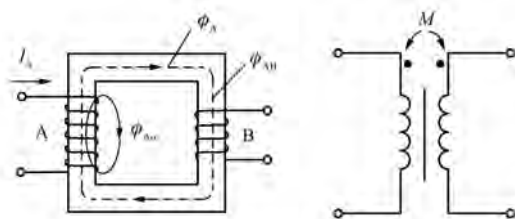


图2 线圈的互感

由于两线圈所处的位置相对固定,所以两线圈的互感可逆,即:

$$L_{AB} = L_{BA} = \frac{\phi_{AB}}{I_A} = \frac{\phi_{BA}}{I_B} = M \quad (4)$$

同样,互感的大小除了与两个线圈的匝数有关,还与两线圈的相对位置及共用磁路的磁导有关。

1.2 电机绕组的电感

1.2.1 转子均匀时绕组的电感

交流电机的电枢上布有三相对称绕组如图3所示。当转子是一个各向对称的均匀转子(如异步

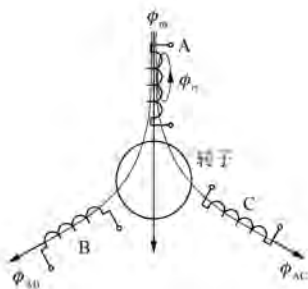


图3 电机绕组的电感

电机转子和隐极同步电机转子)时,各相绕组的磁路磁导与转子位置无关,因此在忽略铁心饱和的情况下,各相绕组的自感和互感均为常数,即:

$$L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = \frac{\phi_m + \phi_\sigma}{I} = \frac{\phi_m}{I} + \frac{\phi_\sigma}{I} = L_m + L_\sigma \quad (5)$$

互感为

$$L_{AB} = L_{BC} = L_{CA} = -\frac{\phi_m \cos 60^\circ}{I} = -\frac{1}{2}L_m \quad (6)$$

定义 L_m 为各相绕组的主电感。

1.2.2 非对称转子时绕组的电感

当转子各向磁导不对称时,如凸极同步电机或内嵌式永磁电机转子,因为直轴和交轴磁路磁导不同,绕组磁路的磁导与转子位置有关,所以各相绕组的自感和互感就为转子位置的函数,如图4所示。

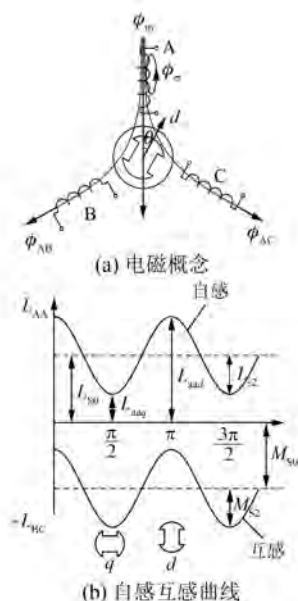


图4 凸极同步电机的电感

由图4可见,当转子直轴正对A相绕组轴线时,A相绕组自感最大,为 L_{aad} ,同时BC相绕组的互感绝对值最小,实际值为负值;转子交轴对齐A相绕组轴线时,A相绕组自感最小,为 L_{aaq} ,同时BC相绕组互感的绝对值最大。随着转子位置的不同,自感和互感分别以恒值 L_{s0} 和 M_{s0} 为中心呈二倍频余弦波动,各相绕组的自感和互感分别为^[12]

$$\begin{cases} L_{AA} = L_{s0} + L_{s2} \cos 2\theta \\ L_{BB} = L_{s0} + L_{s2} \cos 2(\theta - 120^\circ) \\ L_{CC} = L_{s0} + L_{s2} \cos 2(\theta + 120^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} L_{AB} = L_{BA} = -M_{s0} + M_{s2} \cos 2(\theta + 120^\circ) \\ L_{BC} = L_{CB} = -M_{s0} + M_{s2} \cos 2\theta \\ L_{AC} = L_{CA} = -M_{s0} + M_{s2} \cos 2(\theta - 120^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

其中: $L_{s0} = L_\sigma + \frac{1}{2}(L_{aad} + L_{aaq})$; $L_{s2} = \frac{1}{2}(L_{aad} - L_{aaq})$; M_{s0}

$= M_\sigma + \frac{1}{4}(L_{aad} + L_{aaq})$; $M_{s2} = \frac{1}{2}(L_{aad} - L_{aaq})$ 。 L_σ 、 M_σ 分

别为漏自感和漏互感; L_{aad} 、 L_{aaq} 分别表示直轴和交轴对齐A相轴线时,A相绕组的电枢反应电感。

1.2.3 直轴和交轴电感

以上讨论的是在定子 abc 坐标系下各相绕组的自感和互感,其物理意义较为直观,各电感值就是实际绕组的电感值。由于这些电感值均与转子位置有关,所以当转子旋转时这些参数成为时变参数,给电机性能分析带来极大不便。为了简化分析,通常采用双反应理论,通过 Park 坐标变换^[11]将实际绕组的电抗参数变换为 dq 坐标系下的参数,这样所有参数就变成了恒定值。变换后 dq 坐标系下的参数为

$$\begin{cases} L_d = L_\sigma + M_\sigma + \frac{3}{2}L_{aad} = L_\sigma + M_\sigma + L_{ad} \\ L_q = L_\sigma + M_\sigma + \frac{3}{2}L_{aaq} = L_\sigma + M_\sigma + L_{aq} \end{cases} \quad (9)$$

经过以上变换,绕组的电感参数大为简化,但物理意义被弱化。为了便于后续仿真计算的理解,将 dq 坐标系下电抗参数的定义和物理意义阐述如下。

(1) 直轴电感 L_d 。定义:当转子 d 轴对齐某相绕组轴线,且阻尼绕组与励磁绕组均为开路时,该相绕组所表现出的电感即为直轴电感 L_d 。

(2) 交轴电感 L_q 。定义:当转子 q 轴对齐某相绕组轴线,且阻尼绕组开路时,该相绕组所表现出的电感为交轴电感 L_q 。

考虑到原来三相绕组间存在互感,一相绕组通电时,另外两相中同样会存在电流,而其他相的电流也会对该相绕组产生互感作用,因此需要把一相绕组的主电感(电枢反应电感 L_{aad})放大 1.5 倍才能达到完全等效,即在计算交直流电感时,应该考虑“三相系统”的概念。

1.2.4 直轴和交轴瞬态电感

在分析同步电机瞬态性能时,需用到瞬态参数。由于转子直轴上布置有励磁绕组,交直轴上均布置有阻尼绕组,在电机瞬态过程中,这些绕组中均会有电流,与定子绕组产生互感作用,使得瞬态时磁路结构发生变化,电感参数也会随之变化。

(1) 直轴和交轴超瞬变电感。定义:将阻尼绕组和励磁绕组均看作超导体,转子 d 轴对齐某相绕组轴线时,该相绕组所表现出的电感为直轴超瞬变电感 L'_d ;转子 q 轴对齐某相绕组轴线时,该相绕组所表现出的电感值为交轴超瞬变电感 L''_q 。

把励磁绕组和阻尼绕组均看作超导体绕组,那么在瞬态时这些超导绕组中的电流会产生阻止磁通穿越超平绕组的作用,这样电枢绕组产生的磁通会被排挤到漏磁路中,磁导急剧减小,因此交直轴超瞬变电感会比稳态交直轴电感 L_d 、 L_q 小许多。

(2) 直轴瞬变电感。定义:在阻尼绕组开路,只将励磁绕组看作超导绕组,且转子 d 轴对齐某相绕组轴线时,该相绕组所表现出的电感为直轴瞬变电感 L'_d 。

当只有直轴励磁绕组为超导、阻尼绕组开路时,磁通可以穿越阻尼绕组却无法穿越励磁绕组,因此直轴瞬变电感 L'_d 会小于稳态电感 L_d 但大于超瞬变电感 L''_d 。由于转子 q 轴上没有励磁绕组,因此在阻尼绕组开路且转子 q 轴对齐某相绕组轴线时,该相绕组的电感值与稳态 q 轴电感值相同,故不存在交轴瞬变电感。

上述各电感乘以电角频率即为相应的电抗。

2 电励磁同步电机电抗的仿真计算

了解了同步电机各种交直轴电感的定义和物理意义,就可以从各电感的定义出发,采用电磁场有限元软件进行仿真计算。

2.1 交直轴电抗 X_d 、 X_q 的计算

直轴电抗计算步骤如下。

- (1) 按实际电机尺寸建立几何模型。
- (2) 设置转子励磁绕组和阻尼绕组的电阻为无穷大(即二者均开路)。

(3) 使转子 d 轴与 A 相轴线对齐。

(4) 转速设置为零,使转子保持静止,按图 5 任一方式施加交流电流激励。若按图 5(a) 施加激励,则计算电机内磁场分布如图 6 所示。若按

图 5(b) 施加激励,则三相电流激励应为

$$\begin{cases} I_A = I_m \cos \omega t \\ I_B = -0.5 I_m \cos \omega t \\ I_C = -0.5 I_m \cos \omega t \end{cases} \quad (10)$$

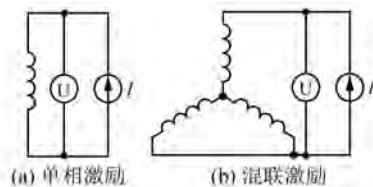


图 5 施加激励



图 6 A 相通电产生的 d 轴磁场

(5) 仿真计算出电压有效值 U 。

(6) 结果处理。若按图 5(a) 施加单相激励,则 $X_d = 1.5U/I$;若按图 5(b) 施加激励,则 $X_d = U/I$ 。需要指出的是单相激励时由于后处理也将漏抗同时放大了 1.5 倍,会引起一定的误差,但由于漏抗远小于主电抗,因此误差不大,工程上精度足够。如果精确计算,则需要先将漏抗与主电抗分离,详细方法不再赘述,推荐图 5(b) 施加混联激励。

对于交轴电抗,与上述步骤相同,只是步骤(3)变为将转子 q 轴与 A 相绕组轴线对齐即可,其余步骤不变。

2.2 超瞬变电抗的计算

步骤与第 2.1 节相同,只是步骤(2)变为:设置转子励磁绕组和阻尼绕组电阻均为零,即超导体短路。此处注意,为了计算时使求解结果容易收敛,电流激励的频率不宜过大,工频即可。其余步骤不变,所得电抗即为交直轴超同步电抗 X''_q 、 X''_d 。图 7 所示为励磁绕组和阻尼绕组为超导体时的磁力线分布情况。

由图 7 可见,磁通未穿越励磁绕组和阻尼绕组,被挤到漏磁路上,因此 X''_q 、 X''_d 较小。

2.3 瞬变电抗的计算

步骤与第 2.1 节相同,只是步骤(2)变为:设置阻尼绕组开路,只将阻尼绕组材料设置为超导体短

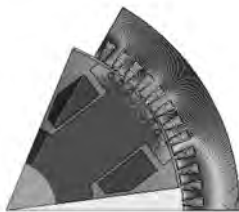


图7 励磁绕组和阻尼绕组为超导体时磁力线分布情况

路,则得到直轴瞬变电抗 X'_d 。图8所示为阻尼绕组开路、励磁绕组超导体短路时的磁力线分布情况,可见磁通只穿越了阻尼绕组,但未穿越励磁绕组。



图8 阻尼绕组开路、励磁绕组超导体短路时磁力线分布情况

3 永磁同步电机电抗仿真计算方法

永磁电机由于永磁体在磁路中建立了偏置磁场,如果在此偏置磁场下定子再施加交流电流激励,则定子电流在半个周期内所产生的磁场与永磁磁场方向相同,二者相加会使磁路严重饱和;而在另半个周期内定子电流产生的磁场与永磁磁场方向相反,二者相减会减弱磁场的饱和程度。即定子电流在正负半个周期内表现出的电抗值不同,使得电压产生严重畸变,因此再采用第2.1节所述的方法计算电抗会导致严重的误差。为此,对永磁电机进行直轴电抗计算时,应按如下步骤进行:

- (1) 按实际电机尺寸建立几何模型。
 - (2) 设置永磁体为空气(即永磁体不充磁)。
 - (3) 使转子 d 轴与 A 相轴线对齐。
 - (4) 转速设置为零,使转子保持静止,按图5任一方式施加交流电流激励。
 - (5) 仿真计算出电压有效值 U 。
 - (6) 用第2.1节步骤(6)进行结果处理。
- 对于交轴电抗,与上述步骤相同,只是步骤(3)变为将转子 q 轴与 A 相绕组轴线对齐即可,其余步骤不变。

需要特别指出的是,上述方法得到的交直轴

电抗为视在电抗值(亦称割线电抗或稳态电抗)。如果要计算永磁电机的增量电抗(或称切线电抗),则应在步骤(2)为永磁体充磁,且在步骤(4)施加电流激励时尽量施加一个较小的激励电流(以在后续步骤得到适宜的电压为宜),即可得增量电感和电抗值。

4 计算示例

以1台电励磁同步电机为例,将计算所得的各电抗参数与实测值对比。

电机基本参数如下:额定容量为310 kVA;额定电压为400 V;额定转速为1 000 r/min;极数为6;频率为50 Hz;功率因数为0.8。

电机设计参数如下:定子外径为55 cm;定子内径为39 cm;铁心长为42 cm;气隙为0.13 cm;定子槽数为72;每相串联匝数为20。

按第2.1节所述步骤所建模型如图6所示。按图5(b)方式施加激励电流 $i = 141 \sin(100 \pi t)$ A,分别仿真求得电机各参数,并与实测值对比,如表1所示。

表1 仿真计算值与实测值对比

参数名称	X_d	X_q	X'_d	X''_d	X''_q
仿真计算值/ Ω	1.60	0.91	0.077	0.045	0.051
实测值/ Ω	1.61	0.93	0.079	0.046	0.052
相对误差/%	0.62	2.15	2.53	2.17	1.92

由表1可见,仿真值与实测值吻合,最大误差不超过2.53%。除了仿真计算和测试本身存在误差外,由于该算例是在二维场下进行的仿真,端部漏抗是根据同系列产品的端部漏抗经验值直接给定的,给定的准确度也是造成二者误差的原因之一。

5 结 语

本文在同步电机各种电抗参数的定义和物理意义基础上,提出了各种电抗参数的电磁场仿真计算方法。经仿真算例与产品实测值对比,验证了该方法的正确性和计算的准确性。

【参考文献】

- [1] 黄国治,傅丰礼.中小型旋转电机设计手册[M].2版.北京:中国电力出版社,2007.

(下转第57页)

的正弦度。

【参考文献】

- [1] 代攀. 永磁同步电机电流环谐波抑制技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [2] 唐任远. 现代永磁电机: 理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 111-123.
- [3] GARCIA-CERRADA A, PINZON-ARDILA O, FELIU-BATTLLE V, et al. Application of a repetitive controller for a three-phase active power filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(1): 237.
- [4] 周娟, 秦静, 王子绩, 等. 内置重复控制器无差拍控制在有源滤波器中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 233.
- [5] 蒋美娜, 马晓春, 孙占龙, 等. 重复控制下指定次谐波电流控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 133.
- [6] 张海洋, 许海平, 方程, 等. 基于比例积分-准谐振控制器的直驱式永磁同步电机转矩脉动抑制方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 41.
- [7] 李毅拓, 陆海峰, 瞿文龙, 等. 基于谐振调节器的永磁同步电机电流谐波抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 423.
- [8] 廖勇, 甄帅, 刘刃, 等. 用谐波注入抑制永磁同步电机转矩脉动[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 119.
- [9] 韩维敏, 罗湘运, 李世军. 基于前馈补偿的永磁同步电机谐波抑制方法[J]. 控制工程, 2016, 23(2): 284.
- [10] 刘刚, 张强, 毛琨. 基于电压注入的高速永磁电机谐波电流抑制方法[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(7): 8.
- [11] LIU G, CHEN B, WANG K, et al. Selective current harmonic suppression for high-speed PMSM based on high-precision harmonic detection method[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, doi: 10.1109/TII.2018.2873652.
- [12] 王臻. 永磁同步电动机矢量控制系统指定次谐波分析与抑制研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [13] 李水祥, 胡啸宇, 王茜. 基于改进电流平均值法的谐波检测技术研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2016, 50(4): 510.

收稿日期: 2018-12-18

(上接第 29 页)

- [2] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [3] 张宝强. 基于有限元方法的永磁同步电机等效电路参数计算[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008.
- [4] 王艾萌, 魏亮, 李和明. 考虑磁路交叉饱和的内置式永磁同步电动机调速控制[J]. 微特电机, 2010, 38(3): 42.
- [5] 诸自强, 褚文强. 冻结磁导率先进技术及其在高性能电机研发中的应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 13.
- [6] 李亚洲. 永磁同步电机电抗参数的研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [7] 肖玉坤, 戴正文, 邹琳, 等. 永磁电机交、直流电感特性有限元分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(9): 1196.
- [8] 陆海斌, 胡粤华, 杨蒙蒙. 永磁同步电机交直轴同步电抗参数仿真[J]. 汽车电器, 2017(9): 33.
- [9] 符荣. 电动客车永磁同步电机设计与参数研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
- [10] GIERAS J F. Permanent magnet motor technology design and applications[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [11] 宁杰, 王晓宇, 贾建国, 等. 混合励磁永磁发电机电抗参数研究[J]. 电机与控制应用, 2008, 45(6): 72.
- [12] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

收稿日期: 2019-02-20