

永磁辅助同步磁阻电机交直流电感参数分析

肖勇^{1,2}, 陈彬^{1,2}, 李霞^{1,2}, 史进飞^{1,2}, 王杜², 李莹²

(1. 广东省高速节能电机系统企业重点实验室, 广东珠海 519070;

2. 珠海格力电器股份有限公司, 广东珠海 519070)

摘要: 永磁辅助同步磁阻电机良好的运行特性与电机的电感参数密切相关, 在电磁方案设计阶段需要对电感参数进行准确计算。介绍了等效交直流法、静态场法、瞬态场法和冻结磁导率法计算交直流电感参数的原理, 并采用上述四种方法进行了电机交直流电感参数的仿真计算。进行样机试制, 并采用伏安法测试了样机电感参数, 将仿真结果与测试结果进行对比, 以验证各方法的准确性。结果表明, 冻结磁导率法仿真得到的交直流电感参数与实测结果的误差在 3% 以内, 采用冻结磁导率法的计算结果更为准确。

关键词: 永磁辅助同步磁阻电机; 交直流电感; 冻结磁导率法; 伏安法

中图分类号: TM 351; TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)06-0089-06

doi: 10.12177/emca.2021.029

Analysis of Inductance Parameters for PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors

XIAO Yong^{1,2}, CHEN Bin^{1,2}, LI Xia^{1,2}, SHI Jinfei^{1,2}, WANG Du², LI Ying²

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of High-Speed and Energy Conservation Motor System, Zhuhai 519070, China;

2. Gree Electric Appliances, Inc. of Zhuhai, Zhuhai 519070, China)

Abstract: The good operation characteristics of permanent magnet (PM) assisted synchronous reluctance motors are closely related to the inductance parameters, so it is necessary to accurately calculate the inductance parameters in the electromagnetic design. The principles of the equivalent $d-q$ axis method, static field method, transient field method and frozen permeability method are introduced, and the $d-q$ axis inductance parameters are calculated. The inductance parameters of the prototype are tested by voltammetry experiment. The simulation results are compared with the test results to verify the accuracy of the methods. It is shown that the difference between the simulation results of frozen permeability method and the test results is within 3% and the frozen permeability method is more accurate among the four methods analyzed.

Key words: permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor; $d-q$ axis inductance parameters; frozen permeability method; voltammetry

0 引言

永磁辅助同步磁阻电机^[1-2]在转子内放置永磁体, 电机的交直流磁路不对称, 由此产生的磁阻

转矩能否得到充分的利用, 与电机的交直流电感参数密切相关。因此, 在电机设计初期, 通过仿真手段精确计算电机的交直流电感参数具有重要意义。

收稿日期: 2021-02-18; 收到修改稿日期: 2021-04-14

作者简介: 肖勇(1985—), 男, 高级工程师, 研究方向为永磁同步电机和同步磁阻电机。

陈彬(1986—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机、磁性轴承及其控制。

李霞(1992—), 女, 硕士, 研究方向为自启动永磁电机和磁阻电机。

目前,相关文献对永磁电机交直流电感参数的计算和仿真方法进行了多方面研究。文献[3]在瞬态场中采用增量法计算得到了电机交直流电感随电角度的变化曲线。文献[4-5]利用可计及电枢磁动势所产生的谐波漏感的绕组函数法量化分析了分数槽集中绕组永磁同步电机电感参数。文献[6]为减小有限元计算工作量,采用在特定转子位置下计算电枢绕组交直流电感的方法。文献[7-8]采用静态场法分析了交直流电感随交直流电流的变化规律。文献[9]采用解析法通过公式推导分析了双绕组永磁同步电机不同嵌线方式对电感的影响。文献[10]采用集中参数法研究了饱和对永磁同步电机交轴电感的影响。文献[11]在非线性 $B-H$ 数学模型的基础上,提出一种新的集总参数法,以评估内置式永磁同步电机的非线性磁行为。文献[12]在不同工况下采用保存相对磁导率不变的方法来计算交直流自感及其交叉耦合电感参数。

本文以一台 6.8 kW 永磁辅助同步磁阻电机为研究对象,采用等效交直轴法、静态场法、瞬态场法和冻结磁导率法进行了电机交直流电感参数的仿真计算;试制样机,并采用伏安法测试了电机电感参数,将仿真结果和实验结果进行对比,验证了各仿真方法的准确性。

1 电机模型

以一台 6.8 kW 的永磁辅助同步磁阻电机为研究对象,样机的有限元分析模型如图 1 所示。电机主要设计参数如表 1 所示。

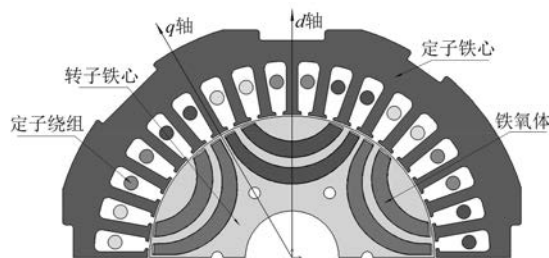


图 1 电机模型

2 等效交直轴法

2.1 等效交直轴法的原理

等效交直轴法是将电机的运行状态分解为等

表 1 电机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子槽数	36	轴向长度/mm	90
极对数	3	定子外径/mm	161
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 600	转子内径/mm	31.5
永磁体材料	JPM-6B	气隙长度/mm	0.6
额定电流/A	15	绕组匝数	34

效直轴状态和等效交轴状态两种状态。等效直轴状态即定子磁场方向与转子磁场方向相同,此时直轴电感的计算公式为

$$L_d = \frac{\psi_d - \psi_f}{i_d} \tag{1}$$

定子磁场方向与转子磁场方向垂直时即为等效交轴状态,此时交轴电感的计算公式为

$$L_q = \frac{\psi_q}{i_q} \tag{2}$$

式中: L_d, L_q 为直轴和交轴电感; ψ_d, ψ_q 为直轴和交轴磁链; i_d, i_q 为直轴和交轴电流; ψ_f 为永磁体磁链。

2.2 等效交直轴法的计算结果

采用等效交直轴法计算得到的不同电流下的交直流电感如图 2 所示。额定电流下电机磁力线和磁密分布如图 3 所示。额定电流 15 A 时, $L_d = 3.48$ mH, $L_q = 10.85$ mH。

随着电流的增大,电机饱和程度增加。由图 2 可知,交直流电感值均随电流增大而减小,其中直轴电感从 3.56 mH 降至 3.45 mH,下降幅度为 3.15%;交轴电感从 15.96 mH 降至 8.74 mH,下降幅度为 45.22%。交轴电感的变化幅度大于直轴电感,交轴电感对电机的饱和更加敏感。

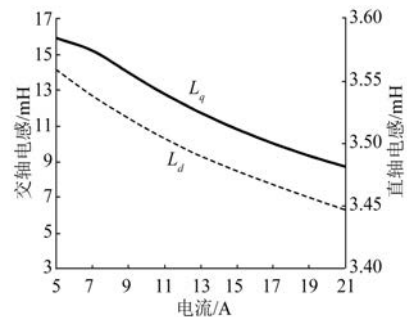


图 2 等效交直轴法电感计算结果

采用等效交直轴法求得的交直流电感是在弱

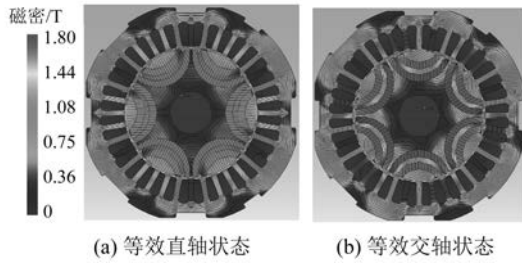


图3 额定电流下电机磁力线和磁密分布

磁角度为 90° 或 270° 以及 180° 状态下, 绕组只有交轴磁场分量或直轴磁场分量, 未考虑交直流电流的交叉耦合作用对电感的影响。

3 静态场法

3.1 静态场法的原理

三相 ABC 坐标系下, 电机的电感矩阵由三相绕组的自感及三相绕组之间的互感构成^[13], 即:

$$L_d = \frac{2}{3} \left\{ \left[\cos\theta L_{AA} + \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) L_{BA} + \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) L_{CA} \right] \cos\theta + \right. \\ \left[\cos\theta L_{AB} + \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) L_{BB} + \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) L_{CB} \right] \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ \left. \left[\cos\theta L_{AC} + \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) L_{BC} + \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) L_{CC} \right] \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right\} \quad (7)$$

$$L_q = \frac{2}{3} \left\{ \left[-\sin\theta L_{AA} - \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) L_{BA} - \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) L_{CA} \right] (-\sin\theta) + \right. \\ \left[-\sin\theta L_{AB} - \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) L_{BB} - \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) L_{CB} \right] \left[-\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] + \\ \left. \left[-\sin\theta L_{AC} - \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) L_{BC} - \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) L_{CC} \right] \left[-\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \right\} \quad (8)$$

式中: θ 为直轴与 A 相绕组轴线之间的夹角。

3.2 静态场法的计算结果

采用静态场法计算得到的电机交直流电感参数如图 4 所示。由图 4 可知, 随着电流角的增大, 直轴电感减小, 交轴电感增大。在额定电流 15 A 下, 交直流电感的平均值 $L_d = 4.70$ mH, $L_q = 14.46$ mH。

固定电流角, 分析在只加载直轴电流和只加载交轴电流情况下, 交直流电感变化情况。只加载直轴电流时(电流角为 180°), 随着电流的增大, 直轴电感从 4.84 mH 降至 3.99 mH, 下降幅度为 17.56%; 交轴电感从 16.71 mH 降至 15.93 mH,

$$L = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} \end{bmatrix} \quad (3)$$

要得到交直流电感参数的计算公式, 需将三相 ABC 坐标系下的电感矩阵变换到 dq 坐标系下, 变换公式可由定子三相磁链的 $3s-2r$ 变换得出:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = C_{3s/2r} L C_{3s/2r}^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $C_{3s/2r}$ 为三相坐标到旋转正交坐标变换矩阵。

又因为在 dq 坐标系下有:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

所以有:

$$\begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} = C_{3s/2r} L C_{3s/2r}^{-1} \quad (6)$$

由式(6)可得直交轴电感的计算公式为

下降幅度为 4.70%。可以发现, 直轴电流的变化对直轴电感的影响更大。

只加载交轴电流时(电流角为 90°), 随着电流的增大, 直轴电感从 5.98 mH 降至 5.46 mH, 下降幅度为 8.62%; 交轴电感从 16.2 mH 降至 9.47 mH, 下降幅度为 41.55%。可以发现, 交轴电流的变化对交轴电感的影响更大。

4 瞬态场法

4.1 瞬态场法的原理

三相电流从 ABC 坐标到 dq 坐标的转换公式为

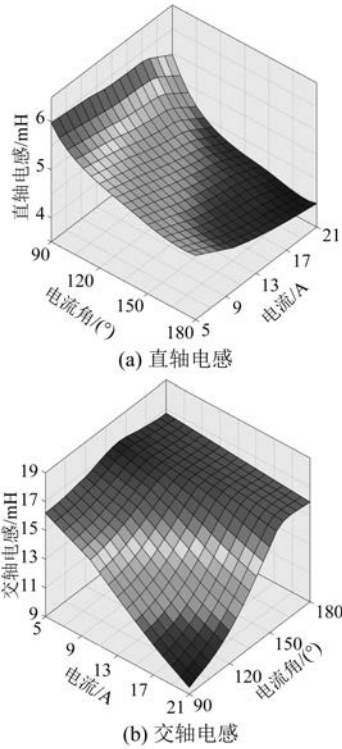


图4 静态场法电感计算结果

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = C_{3s/2r} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (9)$$

该公式对三相磁链也同样适用。

在瞬态场下,给三相绕组施加电流激励源,可计算得到电机的三相磁链值,经式(9)变换至dq坐标后得到电机的交直轴磁链和交直轴电流,按式(1)和式(2)可计算得到电机的交直轴电感值。

4.2 瞬态场法的计算结果

图5所示为瞬态场法计算得到的额定电流下电机交直轴电感结果。由图5可知,随着转子位置角的变化,交直轴电感均呈现周期性变化,其中直轴电感最大值为3.48 mH,最小值为3.25 mH,变化幅度为6.66%,取平均值为3.35 mH;交轴电感最大值为10.96 mH,最小值为10.62 mH,变化幅度为3.12%,取平均值为10.79 mH。不同电流下计算得到的交直轴电感值如表2所示。

5 冻结磁导率法

5.1 冻结磁导率法的原理

永磁辅助同步磁阻电机运行时,电机内存在

由绕组产生的电枢磁场和永磁体产生的永磁磁场。传统磁链模型忽略了交直轴磁路间的交叉耦合作用与磁路饱和作用,认为交直轴磁场正交。为计及磁链交叉耦合作用和磁路饱和作用,永磁辅助同步磁阻电机的交直轴磁链可以表示为:

$$\begin{cases} \psi_d = \psi_{d_PM} + \psi_d(i) \\ \psi_q = \psi_{q_PM} + \psi_q(i) \end{cases} \quad (10)$$

式中: ψ_{d_PM} 、 ψ_{q_PM} 、 $\psi_d(i)$ 、 $\psi_q(i)$ 分别为永磁体和电枢电流产生的交直轴磁链。

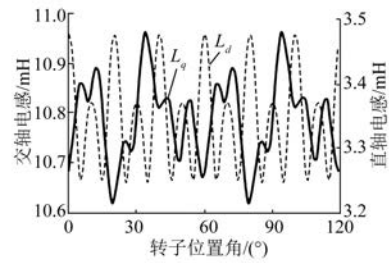


图5 瞬态场法电感计算结果

表2 不同电流下交直轴电感计算结果

电流/A	L_d /mH	L_q /mH
10.0	3.38	13.30
12.5	3.36	11.96
15.0	3.35	10.79
17.5	3.34	9.78

根据式(10)可计算得到电机的交直轴电感,计算公式为

$$\begin{cases} \psi_d(i) = \psi_d - \psi_{d_PM} = L_{dd}i_d + L_{dq}i_q \\ \psi_q(i) = \psi_q - \psi_{q_PM} = L_{qd}i_d + L_{qq}i_q \end{cases} \quad (11)$$

式中: L_{dd} 、 L_{qq} 、 i_d 、 i_q 分别为交直轴自感和电流; L_{dq} 为交直轴互感。

根据式(11)计算电感参数考虑了交直轴磁路间的交叉耦合作用和磁路饱和作用,该方法需采用冻结磁导率技术^[14-15]进行仿真。冻结磁导率技术的原理如图6所示,具体为:首先仿真负载磁场(A点)得到负载时的磁导率 μ_{all} ,并且将该值存储在各个单元的数据中;然后利用该磁导率分别分析只有永磁体激励的磁场B(FP, PM)(D点)和只有电流激励的磁场B(FP, i)(E点),计算得到单独激励源下的磁链,进而计算得到交直轴电感。

5.2 冻结磁导率法的计算结果

图7所示为不同电流下电机相对磁导率云

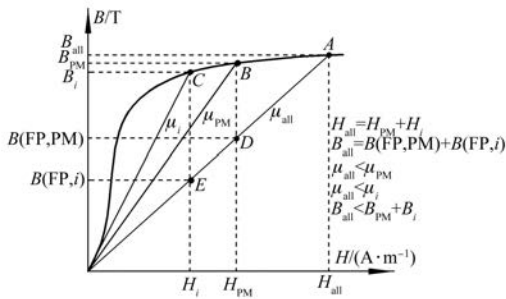


图6 冻结磁导率技术原理

图,可见电机饱和程度受电流的影响比较大,尤其在定子上更为明显。图8所示为冻结磁导率法计算得到的不同电流下的交直流电感。随着电流的增大,受电机饱和程度影响,交直流电感随转子位置角的波动幅度增大。额定电流下的交直流电感值 $L_d = 3.78 \text{ mH}$, $L_q = 10.48 \text{ mH}$ 。

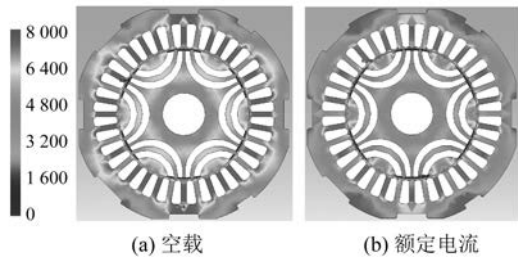


图7 不同电流下电机相对磁导率云图

6 试验对比

试制样机并采用伏安法测试了样机电感参数。图9所示为样机定转子组件。将等效交直流法、静态场法、瞬态场法和冻结磁导率法的计算结

果与实测结果进行对比,误差如表3所示,其中冻结磁导率法计算结果与实测结果的误差最小,且电机饱和程度越高误差越小,采用冻结磁导率法的计算结果更为准确。

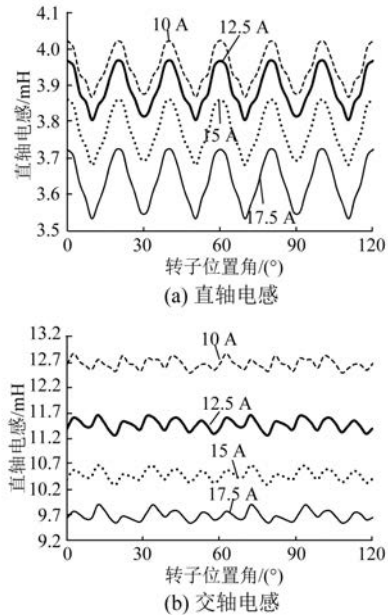


图8 冻结磁导率法电感计算结果

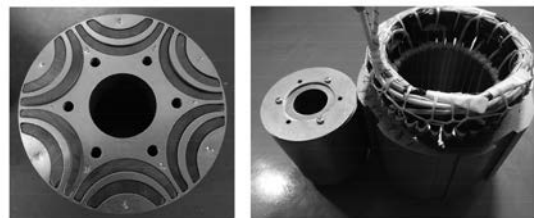


图9 样机定转子组件

表3 交直流电感计算结果对比

电流/A	电感/mH	实测值	等效交直流法		静态场法		瞬态场法		冻结磁导率法	
			值	误差/%	值	误差/%	值	误差/%	值	误差/%
10.0	L_d	3.84	3.51	-8.59	4.90	27.68	3.38	-11.98	3.95	2.86
	L_q	12.39	13.40	8.15	15.91	28.39	13.30	7.34	12.66	2.19
12.5	L_d	3.80	3.49	-8.16	4.79	25.97	3.36	-11.58	3.89	2.43
	L_q	11.38	12.01	5.54	15.20	33.59	11.96	5.10	11.47	0.83
15.0	L_d	3.73	3.48	-6.70	4.70	26.11	3.35	-10.19	3.78	1.28
	L_q	10.47	10.05	-4.01	14.46	38.15	10.79	3.06	10.48	0.07
17.5	L_d	3.64	3.47	-4.67	4.62	27.03	3.34	-8.24	3.64	-0.07
	L_q	9.68	9.87	1.96	13.72	41.75	9.78	1.03	9.682	0.02

7 结 语

本文以一台 6.8 kW 的永磁辅助同步磁阻电机为研究对象,针对交直轴电感参数的仿真方法——等效交直轴法、静态场法、瞬态场法、冻结磁导率法,进行了原理介绍和结果对比,结论如下:

(1) 静态场法的计算结果与实测结果误差较大(25%以上),该方法不可取。

(2) 等效交直轴法和瞬态场法的误差较静态场法小,且随着电流的增大,误差呈减小趋势;对比等效交直轴法和瞬态场法,采用等效交直轴法计算直轴电感的误差相对较小,采用瞬态场法计算交轴电感的误差相对较小。

(3) 冻结磁导率法计算结果与实测结果的误差最小且均在 3% 以内。采用冻结磁导率法计算交直轴电感参数更为可靠,且该方法更适合电机饱和程度较高时的电感计算。

【参 考 文 献】

- [1] 张健,吴友华,姚丙雷,等. 应用于新能源电动汽车的永磁辅助同步磁阻电机设计[J]. 电机与控制应用,2016,43(1): 77.
- [2] 唐小春,于冰,许时杰,等. 新能源汽车用永磁辅助同步磁阻电机噪声及续航优化研究[J]. 电机与控制应用,2020,47(1): 91.
- [3] 卢肇义,张文敏,张经纬,等. 内置式永磁同步电机电磁性能及电感仿真分析[J]. 船电技术,2020,40(3): 52.
- [4] 王璐,许雪峰. 分数槽集中绕组表贴式永磁同步电机电感参数研究[J]. 微特电机,2020,48(12): 19.
- [5] 佟文明,吴胜男,安忠良. 基于绕组函数法的分数槽集中绕组永磁同步电机电感参数研究[J]. 电工技术学报,2015,30(13): 150.
- [6] 张涵,谢宝昌,丁恒明,等. 永磁同步电动机转子优化设计与研究[J]. 微特电机,2015,43(2): 25.
- [7] 王聪,关新,谭骏,等. 永磁同步电机弱磁性能参数的有限元分析[J]. 电气技术,2015(7): 16.
- [8] 肖玉坤,戴正文,邹琳,等. 永磁电机交、直轴电感特性有限元分析[J]. 合肥工业大学学报,2018,41(9): 1196.
- [9] 王永艳,杨素香,单鹏飞,等. 嵌线方式对双绕组永磁同步电机电感的影响分析[J]. 微特电机,2020,48(6): 25.
- [10] LE A T, BUI D H, PHUNG A T. Saturable q -axis magnetizing inductance calculation of line start-permanent magnet synchronous motors using lumped parameter mode [C] // IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2016: 364.
- [11] GURLEYEN H, PALAVICINO P C, MESE E, et al. D -and q -axis inductance calculation of IPMSM using approximate analytical model [C] // IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2017: 211.
- [12] 石有计. 内置式永磁同步电动机电感参数计算分析[J]. 微特电机,2014,42(4): 4.
- [13] 陈丽香,潘敬涛,苏宁. 新能源汽车用永磁电机转子结构分析[J]. 电机与控制应用,2019,46(2): 114.
- [14] 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(英文)[J]. 电工技术学报,2016,31(20): 13.
- [15] 孙涛,代颖,刘皖秋,等. 考虑交叉耦合时电动汽车用内置式永磁同步电机交直轴电感计算[J]. 电机与控制应用,2020,47(3): 87.

扫码关注
《电机与控制应用》
微信公众号

