

混合励磁永磁发电机电抗参数研究

宁 杰¹, 王晓宇¹, 贾建国¹, 王惠军²

(1. 沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110870;

2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 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、直轴电抗参数的计算方法。利用该方法计算了 1 台 7.5 kW、1 500 r/min 的混合励磁永磁发电机的交轴电抗和直轴电抗, 利用试验测试电抗参数对计算结果进行了验证。结果显示, 所提混合励磁永磁同步发电机交、直轴电抗参数计算方法计算精度较高, 为混合励磁永磁同步发电机结构参数和电抗参数的合理设计提供了帮助。

关键词: 混合励磁; 永磁电机; 发电机; 电抗参数

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)06-0072-04

Research on Reactance Parameters of Hybrid Excitation Permanent Magnet Generator

NING Jie¹, WANG Xiaoyu¹, JIA Jianguo¹, WANG Huijun²

(1. National Engineering Research Center for Rare-Earth Permanent Magnetic Machines,

Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Institute of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A calculation method of reactance parameters for the hybrid excitation permanent magnet generator was proposed. A hybrid excitation permanent magnet synchronous generator rated at 7.5 kW and 1 500 r/min was verified by the experimental results. It showed that the calculated results were in good accordance with the measured results, and it could be a great help to the designing of the hybrid excitation permanent magnet synchronous generator.

Key words: hybrid excitation; permanent magnet electric machine; generator; reactance parameters

0 引 言

在电网发电系统中, 电励磁同步发电机凭借其优良的磁场调节能力, 得到了广泛应用。但是电刷和集电环的存在致使绕线式电励磁发电机的可靠性较低, 限制了电励磁发电机在恶劣环境下的应用^[1-2]。相比之下永磁发电机采用永磁体励磁, 省去了励磁电流引起的损耗。永磁发电机的效率和功率因数均高于电励磁发电机, 因而在小型发电领域得到了较为广泛的关注^[3-4]。但是当原动机转速的变化导致发电机电压发生改变时, 永磁发电机难以通过调节气隙磁场来调节输出电压, 无法保证发电机输出稳定数值的电压。这在

一定程度上阻碍了永磁发电机的发展和应用^[5-6]。因此开发一种可以综合绕线式电励磁发电机和永磁发电机优点的发电机(如混合励磁永磁发电机), 具有重要的意义。

混合励磁结构的发电机固有电压调整率高, 引起电励磁调节压力大, 大幅调节磁场时发电机温升增大, 永磁体可靠性大幅降低。因此需针对混合励磁发电机电压调整率的影响因素, 研究转子结构对交、直轴电抗的影响规律, 合理设计混合励磁永磁发电机电抗参数, 保证发电机的可靠运行。本文对混合励磁永磁发电机交、直轴电抗参数的计算方法进行了研究, 利用试验测试结果对电抗参数计算结果进行了验证, 为混合励磁永磁

作者简介: 宁 杰(1980—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为特种电机及其控制。

发电机的合理设计提供参考。

1 混合励磁永磁发电机电抗参数计算

在计算混合励磁永磁发电机电抗参数时,利用有限元方法对混合励磁永磁发电机磁场进行求解,得出多种运行状态下发电机的磁密波形。利用傅里叶对所得磁密波形中的谐波成分进行分析,根据电枢反应计算式分别对混合励磁永磁发电机交、直轴电抗参数进行分析。具体分析步骤如下。

(1) 建立有限元分析模型,对模型进行剖分,利用有限元分析时需将电机的直轴位置设置为起始位置,并且使其磁密波形沿磁极轴线对称。

(2) 利用傅里叶函数对有限元分析得到的磁密波形进行分解,得出基波与各次谐波。各次谐波表示为 $B_{\nu m} \cos(\nu p \theta)$, 其中 $B_{\nu m}$ 为 ν 次谐波的磁密幅值, νp 为 ν 次谐波的极对数, θ 为机械角度。

(3) 将气隙中任何一个剖分单元 j 的磁密分析结果利用最小二乘法进行展开可得:

$$B_{1m} \cos(p\theta_j) + B_{3m} \cos(3p\theta_j) + \dots + B_{\nu m} \cos(\nu p \theta_j) = B_j \quad (1)$$

式中: θ ——机械角度;

$B_{\nu m}$ —— ν 次谐波的磁密幅值;

νp —— ν 次谐波的极对数。

则对于有限元分析中混合励磁永磁发电机气隙中包含的 n 个剖分单元:

$$\begin{aligned} B_{1m} \cos(p\theta_1) + B_{3m} \cos(3p\theta_1) + \dots + B_{\nu m} \cos(\nu p \theta_1) &= B_1 \\ B_{1m} \cos(p\theta_2) + B_{3m} \cos(3p\theta_2) + \dots + B_{\nu m} \cos(\nu p \theta_2) &= B_2 \\ B_{1m} \cos(p\theta_3) + B_{3m} \cos(3p\theta_3) + \dots + B_{\nu m} \cos(\nu p \theta_3) &= B_3 \\ B_{1m} \cos(p\theta_n) + B_{3m} \cos(3p\theta_n) + \dots + B_{\nu m} \cos(\nu p \theta_n) &= B_n \end{aligned} \quad (2)$$

利用矩阵形式可将式(2)表示为

$$\mathbf{A} \mathbf{B}_m = \mathbf{B} \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos(p\theta_1) & \cos(3p\theta_1) & \dots & \cos(\nu p \theta_1) \\ \cos(p\theta_2) & \cos(3p\theta_2) & \dots & \cos(\nu p \theta_2) \\ \cos(p\theta_3) & \cos(3p\theta_3) & \dots & \cos(\nu p \theta_3) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \cos(p\theta_n) & \cos(3p\theta_n) & \dots & \cos(\nu p \theta_n) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} B_{1m} \\ B_{3m} \\ B_{5m} \\ \vdots \\ B_{\nu m} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_3 \\ B_5 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据最小二乘法由式(3)和式(4)可得:

$$\mathbf{B}_m = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (5)$$

根据傅里叶分析得出的每极基波磁密幅值,可计算得出交、直轴电枢反应电动势 E , 进而利用 $X = E/I$ 计算得出交、直轴电枢反应电抗, 其中, I 为相应的交、直轴电枢电流。按不考虑永磁体和考虑永磁体两种情况分别对永磁发电机的电抗参数进行研究。

1.1 不考虑永磁体影响

当不考虑永磁体影响时,永磁发电机的直轴电枢反应电抗 X_{ad} 和交轴电枢反应电抗 X_{aq} 可以按电励磁发电机电抗参数的计算方法进行分析。

在定子绕组中通入直轴电流 I_d , 使定子三相绕组产生的磁场轴线与 d 轴重合, 求出此时由于定子绕组 d 轴电流单独作用时产生的磁场, 计算得出直轴电枢反应反电动势, 从而计算得到直轴电枢反应电抗为

$$X_{ad} = \frac{E_{ad}}{I_d} = \sqrt{2} \pi f N k_w \varphi_{ad} / I_d \quad (6)$$

式中: X_{ad} —— d 轴电枢反应电抗;

E_{ad} —— d 轴电枢反应反电动势;

I_d —— d 轴电流;

N ——绕组匝数;

k_w ——绕组系数;

φ_{ad} —— d 轴电枢反应磁通。

通入交轴电流 I_q , 得到 q 轴电流单独作用时磁场分布, 计算得出交轴电枢反应反电动势, 从而计算得到交轴电枢反应电抗为

$$X_{aq} = \frac{E_{aq}}{I_q} = \sqrt{2} \pi f N k_w \varphi_{aq} / I_q \quad (7)$$

式中: X_{aq} —— q 轴电枢反应电抗;

E_{aq} —— q 轴电枢反应反电动势;

I_q —— q 轴电流;

f ——频率;

φ_{aq} —— q 轴电枢反应磁通。

1.2 考虑永磁体影响

当考虑永磁体励磁磁场影响时, 求出永磁体单独作用所产生的磁场, 计算得出此时的空载反电动势 E_0 , 在定子绕组中通入直轴电流 I_d , 计算得出二者共同作用时产生的反电动势 E_d , 从而计算得到直轴电枢反应电抗为

$$X_{ad} = \frac{|E_0 - E_d|}{I_d} \quad (8)$$

式中: E_0 ——空载反电动势。

将定子绕组通入交轴电流 I_q , 计算得出由交轴电枢反应磁通作用产生的电动势 E_q , 从而计算得到交轴电枢反应电抗为

$$X_{aq} = \frac{E_q}{I_q} \quad (9)$$

综上所述, 在分析混合励磁永磁发电机电抗参数时, 其直轴磁路上既有永磁体又有铁磁极, 直轴电抗可分为两部分进行计算: 永磁体部分按照永磁发电机电抗参数计算方法进行计算, 铁磁极部分按照电励磁电机的电抗参数计算方法进行计算。最后将二者计算结果相加, 即可得到总的直轴电抗。

2 电抗参数试验验证

永磁发电机电抗的测量可以归结为对电感参数的测量。当定子绕组中通入电流 I 时, 磁路内产生的磁链为 Ψ , 由此可得出绕组电感为

$$L = \frac{\psi}{I} \quad (10)$$

式中: L ——绕组电感;

ψ ——磁路内产生的磁链;

I ——定子绕组中通入电流。

在测试永磁电机绕组磁链时, 将绕组电感通过电阻进行短路, 并对电阻两端电压进行积分, 从而得出绕组中的磁链为

$$\Psi = \int_0^\infty u dt = \int_0^\infty Ri dt \quad (11)$$

由此可计算得出绕组电感参数:

$$L = \left(\int_0^\infty u dt \right) / I_0 \quad (12)$$

式中: u ——回路中电阻上的电压值;

I_0 ——电流初始值。

将电感的测量转化为对电压的积分, 即利用电压积分法测试电机电感的原理, 如图 1 所示。

在测量前, 将开关 S 闭合, 通过调节 R_2 、 R_3 和

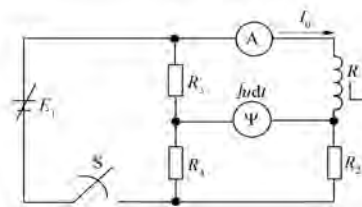


图 1 测量电感原理图

R_4 使电桥平衡, 此时积分器读数为零, 满足:

$$\frac{R}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (13)$$

式中: R ——电感自身的电阻。

将开关断开, 电桥形成一个直流衰减回路, 利用电压积分器对电桥两端的直流衰减电压进行积分, 得到读数磁链 Ψ 。此时 Ψ 满足:

$$\int_0^\infty i(R + R_2 + R_3 + R_4) dt = LI_0 \quad (14)$$

由此可得电感参数:

$$L = \frac{(R + R_2 + R_3 + R_4) \Psi}{(R_2 + R_4) I_0} \quad (15)$$

图 2 所示为测量永磁同步电机交、直轴参数时的电枢绕组连接图。

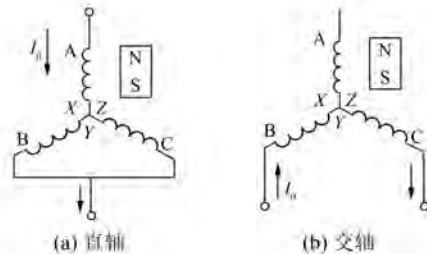


图 2 测量交、直轴参数电枢连接法

在测量直轴电抗时可用图 2 (a) 替代图 1 中的电感 L , 转子直轴对准电枢绕组合成磁动势轴线方向且固定。此时直轴电抗参数可表示为

$$X_d = \frac{2\omega_1 L}{3} \quad (16)$$

式中: ω_1 ——电角频率。

测量交轴电抗时, 利用图 2 (b) 中的连接方法, 将 B、C 两相绕组串联代替图 1 中电感 L , 转子直轴对准电枢绕组合成磁动势轴线方向且固定。交轴电抗参数可表示为

$$X_q = \frac{\omega_1 L}{2} \quad (17)$$

为了提高电抗参数的测试精度, 使永磁电机

磁路饱和程度与电机实际运行工况一致,需要将直流量折算成相应的交流量。设永磁电机实际运行时直轴电流有效值为 I_d 、交轴电流有效值为 I_q , 则直轴和交轴电枢磁动势可表示为

$$F_{ad} = \frac{3\sqrt{2}KI_d}{2} \tag{18}$$

$$F_{aq} = \frac{3\sqrt{2}KI_q}{2} \tag{19}$$

式中: F_{ad} ——直轴电枢反应磁动势;
 F_{aq} ——交轴电枢反应磁动势;
 K ——系数, $K=2NK_{dp1}/\pi p$;
 K_{dp1} ——基波绕组系数。

按图 2 的接线方式分别在定子绕组中通入直
流 I_0 , 等效电枢磁动势分别为

$$F_a = \frac{3KI_0}{2} \tag{20}$$

$$F_b = \frac{3\sqrt{2}KI_q}{2} \tag{21}$$

当测试直轴电抗参数时,要求 $F_{ad}=F_a$, 则

$$I_0 = \sqrt{2}I_d \tag{22}$$

当测试交轴电抗参数时,要求 $F_{aq}=F_b$, 则

$$I_0 = \frac{\sqrt{6}}{2}I_q \tag{23}$$

利用上述试验方法,对 1 台 7.5 kW、
1 500 r/min 的混合励磁永磁同步发电机(样机
定、转子结构如图 3 所示,样机具体结构参数如
表 1 所示)的交、直轴电抗进行试验,并将结果
与利用上文提出的混合励磁永磁同步电机交、
直轴电抗计算方法计算得出的结果进行对比,
如图 4 所示。

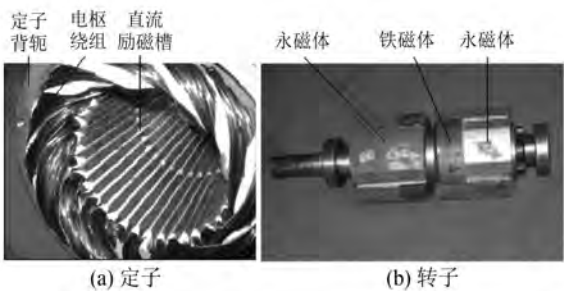


图 3 样机结构

由混合励磁永磁发电机交、直轴电抗参数的
计算值与试验值对比结果可以看出,计算值与试

表 1 样机主要结构尺寸

参数名称	参数值
定子外径/mm	175
定子内径/mm	110
定子背轭厚度/mm	12
直流励磁槽宽度/mm	13
气隙长度/mm	0.8
转子外径/mm	86.4
转子内径/mm	38
永磁体磁化方向长度/mm	11
铁磁极的轴向长度/mm	35
永磁体的轴向长度/mm	112
永磁体的极弧系数	0.81
铁磁极的极弧系数	0.974

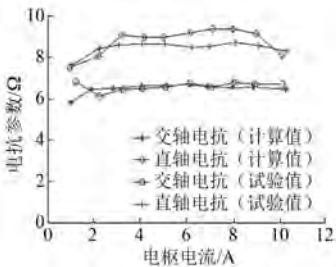


图 4 电抗参数的计算值与试验值对比

验值十分接近,其中交轴电抗计算误差平均值为
9.8%,直轴电抗计算误差平均值为 4.7%,从而验
证了本文提出的混合励磁永磁发电机电抗参数计
算方法的有效性。此外,从交轴、直轴电抗参数变
化趋势可以看出,不同于常规永磁发电机,混合励
磁永磁发电机的反凸极率较大,是因为混合励磁
永磁发电机直轴存在铁磁极,相比于交轴气隙,直
轴的磁导率更大,导致交轴、直轴磁路不对称。

3 结 语

本文提出了一种用以计算交、直轴电抗参数
的计算方法。利用该方法计算了 1 台 7.5 kW、
1 500 r/min 的混合励磁永磁同步发电机的交
轴、直轴电抗参数,试验测试对计算结果进行了
验证。结果显示,交轴电抗计算误差平均值为
9.8%,直轴电抗计算误差平均值为 4.7%,从而
验证了本文提出的混合励磁永磁发电机电抗参
数计算方法的有效性,利用该方法可以为混合
励磁永磁同步发电机结构参数和电抗参数的合
理设计提供帮助。

(下转第 116 页)

一个目标转矩值,使被试电机静止状态自行加载直至转矩稳定。

4. 4. 4 记录数据

- ① 响应时间-转速响应时间。启动圆周位置、目标转速、每个起始点的转速-时间曲线。
- ② 响应时间-转矩响应时间。启动圆周位置、目标转矩、每个起始点的转矩-时间曲线。

4. 4. 5 结果判定

- ① 响应时间-转速响应时间。分析每个起始点的转速-时间曲线,得出该点的响应时间。取 5 次试验中时间最长的点作为该目标转速下的转速时间响应时间。
- ② 响应时间-转矩响应时间。分析每个起始点的转矩-时间曲线,得出该点的响应时间。取 5 次试验中时间最长的点作为该目标转矩下的转矩时间响应时间。

以下表格是本中心为某新能源汽车电机企业生产的永磁同步电机驱动系统进行的转矩响应时间测试数据,从测试数据可以反映该电机在达到同一目标转速 (500 r/min)、同一目标转矩 (90 N·m),5 次不同的起始点情况下,每次的响应时间。从表 7 中可以看出,最大的响应时间为 798 ms,最小的响应时间为 689 ms。

5 结 语

电动汽车作为一种区别于依赖传统石油提供动能的普通汽车,使用电能作为其驱动能源的现

表 7 转矩控制精度

序号	转速/ (r/min)	目标转矩/ (N·m)	响应 时间/ms	最大响应 时间/ms
1	500	90	789	
2	500	90	689	
3	500	90	798	798
4	500	90	713	
5	500	90	708	

代交通工具,对解决日趋严重的资源危机与环境污染问题起到了重要作用。我国政府非常重视电动汽车的研发创新,出台了相关发展规划,提供了良好的政策环境,支持鼓励与引导电动汽车的发展。电机作为新能源汽车电驱动系统的核心部件将成为未来的研究热点。新能源汽车驱动电机的发展将是整个新能源汽车产业发展的重中之重,新能源汽车驱动电机的评价对电机行业的发展有着广泛和重要的引领意义,希望本文研究的对新能源驱动电机评价有关的测试和分析能对行业的发展和进步起到一个抛砖引玉的作用。

【参 考 文 献】

[1] 电动汽车用驱动电机系统 第 1 部分:技术条件: GB/T 18488.1—2015[S].
[2] 电动汽车用驱动电机系统 第 2 部分:试验方法: GB/T 18488.2—2015[S].

收稿日期: 2018 -03 -14

(上接第 75 页)

【参 考 文 献】

[1] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.
[2] 全国稀土永磁电机协作网.积极开发和大力推广稀土永磁电机[C]//第六届全国永磁电机学术交流会,吉林,1998: 1-7.
[3] RAHMAN M A, ZHOU P. Advances in permanent magnet electrical machines: a review[C]//CICEM' 95, Hangzhou,1995: 366-373.

[4] 李声晋,陈法善.航空用稀土永磁电机的发展[C]//1994 年全国永磁电机学术交流会议论文集,北京,1994: 9-12.
[5] 田忠元,李钟明.稀土永磁电机航空航天应用现状及发展[C]//第六届全国永磁电机学术交流会,吉林,1998: 14-19.
[6] 陈俊峰. 永磁电机[M].北京:机械工业出版社,1982.

收稿日期: 2017 -11 -08