

# 组合励磁稀土永磁同步发电机的空载特性计算模型<sup>\*</sup>

窦一平<sup>1</sup>, 陈海镇<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学电气与电子工程学院, 210042, 南京; 2. 南京航空航天大学, 210016, 南京)

[摘要] 用传统的磁路分析方法, 建立了组合励磁稀土永磁同步发电机空载特性的计算模型, 并用适合工程科学计算的 MATLAB 高级语言编制了计算程序, 分析了组合励磁稀土永磁同步发电机的漏磁对空载特性的影响, 并对一台 1.5kVA 的样机作了实测, 计算和实测数据的比较表明, 所用的计算模型能满足工程计算的精度要求。

[关键词] 组合励磁, 稀土永磁, 同步发电机, 磁路计算

[中图分类号] TM351; [文献标识码] B; [文章编号] 1672-1292(2002)03-0001-06

## 1 概述

组合励磁稀土永磁同步发电机是一种同时具有永磁发电机和电励磁发电机特点的新型发电机, 它既具有永磁发电机无刷、效率高、结构简单和可靠性高等优点, 又具有电励磁发电机电压调节方便的优点, 文献[1]阐述了这种发电机的基本结构和基本原理。本文将采用传统的磁路分析方法, 建立起组合励磁稀土永磁同步发电机空载特性的计算模型, 并将计算数据和样机实测的结果进行比较, 验证所用计算模型的正确性, 为进一步研究这种发电机的设计方法打下基础。

## 2 磁路计算模型

组合励磁稀土永磁同步发电机的基本结构请参见文献[1], 这种发电机的定子结构和传统的电励磁发电机定子结构相同, 转子可以看成由两部分组成, 一部分称为主发电机, 其转子结构和普通的永磁同步发电机结构相同; 另一部分称为电励磁辅助发电机部分。

分析表明, 主发电机部分和辅助发电机部分存在轴向的漏磁。正向励磁时, 主辅两部分相邻的磁极为同极性, 由于磁场同性相斥的缘故, 轴向漏磁的影响较小; 反向励磁时, 主辅两部分相邻的磁极为异性, 磁场异性相吸, 轴向漏磁的影响较大, 结果会使正负励磁对应的空载感应电动势出现不对称的现象。本文将找出不对称的原因, 建立起相应的数学分析模型, 对漏磁的影响进行研究。

### 2.1 漏磁导的计算

组合励磁稀土永磁同步发电机的漏磁导有 3 部分: 主辅发电机之间的轴向漏磁导、辅助电励磁部分漏磁导和主发电机部分漏磁导。

#### 2.1.1 轴向漏磁导

主辅发电机之间的轴向漏磁导如图 1 所示, 它包括两部分, 其一是对应相邻磁极间漏磁  $\Phi_{\sigma}$  的气隙漏磁导  $G_{\sigma\delta}$ ; 其二是对应相邻转子轴部分漏磁  $\Phi_{\sigma z}$  的轴漏磁导  $G_{\sigma z}$ 。根据磁导的定义, 有

$$G_{\sigma\delta} = k_{\sigma 1} \mu_0 \frac{A_{\sigma\delta}}{\delta_g} \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2002-06-03。

基金项目: ①中国航空工业总公司科技预研项目, 机载电机特殊技术。②江苏省教育厅自然科学基金项目 2000DQY0002SJ1。

作者简介: 窦一平, 1964-, 南京师范大学电气与电子工程学院副教授, 南京航空航天大学博士研究生, 研究方向为特种电机。

$$G_{o2} = k_{o2} \mu_k \frac{A_{o2}}{\delta_g} \quad (2)$$

式中,  $A_{o2}$ 、 $A_{o1}$  分别为气隙漏磁导和轴漏磁导的计算面积;  $\delta_g$  为主辅发电机部分的隔磁板厚度;  $\mu_k$  为导磁轴的磁导率;  $k_{o1}$ 、 $k_{o2}$  为漏磁计算系数, 是考虑未计及的漏磁及其它误差而引入的, 本文在 1.01 ~ 1.05 范围取值。样机轴的材料是 45 号钢, 虽然导磁性能差, 但其磁导率仍比真空磁导率大得多, 这部分的漏磁导  $G_{o2}$  要远远大于气隙漏磁导  $G_{o1}$ 。

## 2. 1. 2 辅助电励磁部分的漏磁导

辅助电励磁部分的漏磁导主要有 3 个:

### (1) 磁极侧面的漏磁导 $G_{o1}$

如图 2 所示, 这部分磁导对应辅助电励磁水平磁极和垂直磁极侧面漏磁通  $\Phi_{o1}$ , 磁导  $G_{o1}$  的计算公式如下:

$$G_{o1} = \mu_0 \frac{A_{o1}}{l_{o1}} \quad (3)$$

式中,  $A_{o1}$  为侧面计算面积;  $l_{o1}$  为平均漏磁计算长度。

### (2) 水平磁极圆筒部分和垂直磁极轴向端面的漏磁导 $G_{o2}$

如图 2 所示, 这部分磁导对应辅助电励磁水平磁极圆筒部分和垂直磁极轴向端面漏磁通  $\Phi_{o2}$ , 磁导  $G_{o2}$  的计算公式如下:

$$G_{o2} = \mu_0 \frac{A_{o2}}{l_{o2}} \quad (4)$$

式中,  $A_{o2}$  为端面计算面积;  $l_{o2}$  为两部分轴向端面的间隙长度。

### (3) 励磁绕组支架的漏磁

励磁绕组支架的漏磁较复杂, 是三维磁场, 图 3 为其中的一个部分, 本文采用估算的方法来处理, 如公式 (5), 其中  $K_o$  为经验系数, 取 1.05 ~ 1.3,  $p$  为极对数。

辅助电励磁部分总的漏磁导  $G_o$  为:

$$G_o = p \times (2G_{o1} + G_{o2}) \times K_o \quad (5)$$

主发电机部分的漏磁导计算公式和一般的稀土永磁同步发电机相同, 请参见文献 [2]、[3] 书中有关章节。

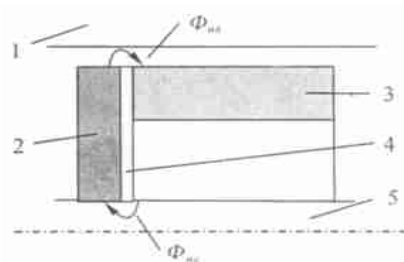
## 2. 2 等效磁路模型图及计算方法

### 2. 2. 1 等效磁路

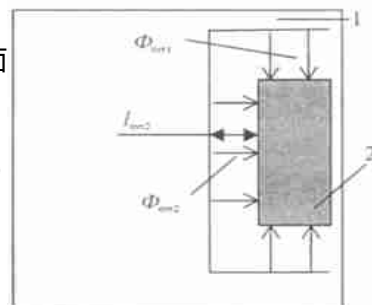
考虑了轴向漏磁, 主辅发电机部分在磁路上就有关联了, 图 4 是整个组合励磁发电机的等效磁路模型图。

图中, 下标 e 表示电励磁部分, 下标 m 表示主发电机部分。  $G_{oe}$  为辅助电励磁部分的漏磁导;  $G_{el}$  为辅助电励磁电枢部分主磁路的等效磁导;  $G_{e2}$  为辅助电励磁磁极、励磁绕组支架等部分主磁路的等效磁导;  $G_{m0}$  为磁钢等效内磁导;  $G_{mo}$  为主发电机部分等效漏磁导;  $G_{ml}$  为主发电机电枢部分主磁路的等效磁导;  $G_{oe}$  为等效轴向气隙漏磁导;  $G_{oz}$  为等效轴漏磁导;  $F_e$  为电励磁等效磁势;  $F_m$  为磁钢等效磁势。当主辅发电机的相邻磁极为异极性时, 轴向漏磁路径为:

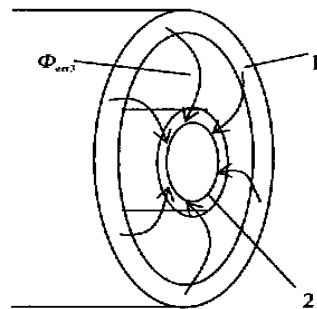
辅发电机 N 极 → 轴向气隙漏磁导 → 主发电机 S 极 (分两路)



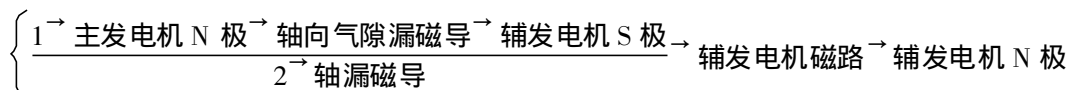
1. 定子铁心, 2. 电励磁磁极  
3. 磁钢, 4. 隔磁板, 5. 轴  
图 1 轴向漏磁示意图



1. 水平磁极, 2. 垂直磁极  
图 2 水平磁极和垂直磁极间的漏磁



1. 外圆筒, 2. 内圆筒  
图 3 电励磁绕组支架漏磁示意图



## 2.2.2 等效磁路模型的计算方法

图 4 的磁路模型是非线性的, 传统的解法是先建立磁路的节点方程, 然后用非线性方程组的迭代方法来求解, 这种方法的迭代收敛性往往不好掌握. 本文提出一种磁路端口特性法来求解图 4 的磁路模型, 这种方法避免了一般非线性迭代过程中迭代数据没有规律, 容易发散的缺点, 实际应用效果比较好.

我们把图 4 的磁路按辅助励磁部分和主发电机部分切开, 即以图 4 中节点 1 和节点 0 为界分成两部分, 如图 5 和图 6 所示, 分别求出两部分的端口特性曲线:

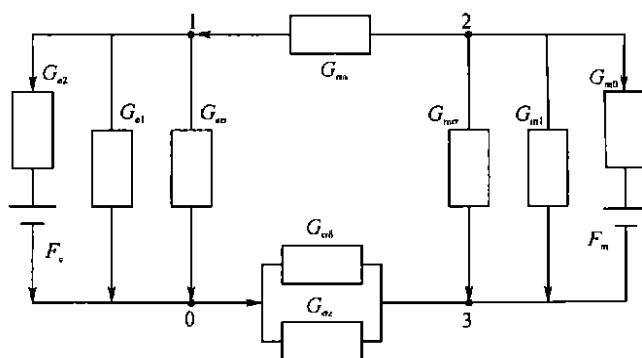


图 4 磁路计算模型

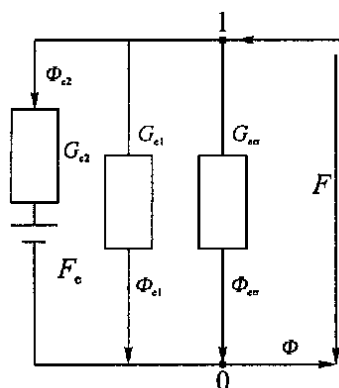


图 5 电励磁部分端口特性计算模型

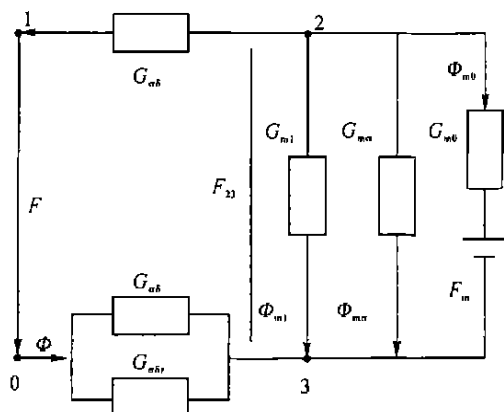


图 6 主发电机部分端口特性计算模型

$$\Phi = f(F) \quad (6)$$

式中,  $\Phi$  为端口磁通, 即轴向每极磁通;  $F$  为端口磁压降. 有了两端口特性曲线后, 再求出两端口特性曲线的交点, 即是图 4 模型的解.

图 4 中每条非线性磁路磁压降与磁通的关系曲线按一般磁路计算的方法进行, 即给定一个磁通值  $\Phi$ , 计算磁路各部分的磁位降, 各部分磁位降的和便是支路磁压降的大小.

图 5 电励磁部分端口特性的计算步骤如下:

- (1) 磁路计算, 求出主磁路电枢部分的特性  $\Phi_{e1} = f_{e1}(F)$ ;
- (2) 求出漏磁路的特性  $\Phi_{e0} = F \times G_{e0}$ ;
- (3) 求出主磁路磁极和励磁支架等部分的特性  $\Phi_{e2} = f_{e2}(F)$ ;
- (4) 求出端口特性.

$$\Phi = \Phi_{e0} + \Phi_{e1} + \Phi_{e2} = F \times G_{e0} + f_{e1}(F) + f_{e2}(F) = f_e(F).$$

图 6 主发电机部分端口特性的计算步骤如下:

- (1) 磁路计算, 求出主磁路电枢部分的特性  $\Phi_{m1} = f_{m1}(F_{23})$ ; 其中  $F_{23}$  为节点 2 和节点 3 的磁位降;
- (2) 求出漏磁路特性  $\Phi_{m0} = F_{23} \times G_{m0}$ ,

(3) 求出磁钢等效磁势支路的特性  $\Phi_{m0} = (F_{23} - F_m) \times G_{m0}$ ;

(4) 求出端口特性:

根据图 6 有:  $F_{23} = F + \Phi(G_{\alpha} + \Phi(G_{\alpha n} + G_{\alpha}))$  和  $\Phi = -(\Phi_{m1} + \Phi_{m0} + \Phi_{m0} = -[f_{m1}(F) + F_{23} \times G_{m0} + (F_{23} - F_m) \times G_{m0})$

将上面两式消去  $F_{23}$  就可以得到主发电机部分的端口特性  $\Phi = f_m(F)$ .

解方程组  $\begin{cases} \Phi = f_e(F) \\ \Phi = f_m(F) \end{cases}$ , 求出两个端口特性曲线的交点, 即是图 4 磁路模型的解  $(\Phi, F)$ , 各条支路的磁位和磁通值也就可以求出来了.

### 3 空载特性

我们定义组合励磁永磁同步发电机的空载特性为: 保持发电机的转速不变, 且电枢绕组开路(空载)时的电励磁绕组电流  $I_f$  与发电机每相端电压  $U_0$  的函数. 即

$$U_0 = f(I_f) \quad (7)$$

其中:  $U_0 = E_0 = E_{0m} + E_{0e}$ .

组合励磁永磁发电机空载特性的本质是反映辅助电励磁部分的空载感应电势  $E_{0e}$  与电励磁绕组电流  $I_f$  之间的关系, 由于主发电机部分是永磁发电机, 实际测量时无法将主发电机部分的空载感应电势  $E_{0m}$  与  $E_{0e}$  分开, 所以  $U_0$  是两部分的感应电势之和, 但不同的励磁电流只影响辅助电励磁部分的空载感应电势  $E_{0e}$  的大小, 空载感应电势  $E_{0m}$  在转速一定时基本上不受  $I_f$  的影响, 为常数.

为了保证发电机端电压的线性调节, 要求空载特性为线性, 考虑到电压调节时, 励磁电流的双向调节, 在发电机要求的电压调节范围内, 电励磁电流  $I_f$  与感应电势  $E_{0e}$  的关系应该为线性, 线性范围的最大励磁电流是电励磁部分设计的重要参数.

对不同的电励磁磁势  $F_f$ , 解图 4 的磁路模型, 得到相应的气隙磁通值, 便可以求出组合励磁发电机的空载特性.

辅助电励磁部分的空载感应电动势  $E_{e0}$  为:

$$E_{e0} = 4.44fNk_{w1}\Phi_{e1} \quad (8)$$

式中,  $f$  为频率;  $N$  为每相电枢绕组串联匝数;  $k_{w1}$  为绕组系数;  $\Phi_{e1}$  为电励磁部分的每极气隙磁通值.

主发电机部分的空载感应电动势  $E_{m0}$  为:

$$E_{m0} = 4.44fNk_{w1}\Phi_{m1} \quad (9)$$

式中,  $\Phi_{m1}$  为主发电机部分的每极气隙磁通值.

总的空载感应电动势  $E_0$  为:

$$E_0 = E_{e0} + E_{m0} \quad (10)$$

### 4 计算与实测的比较

本文按上述的磁路计算模型, 用 MATLAB 语言编制了计算程序, 对一台 1.5kVA 样机进行了计算, 并将计算结果和实验数据作了比较. 该样机的主要技术和结构参数如表 1 所示, 计算结果和实测数据如表 2 所示, 表中相对误差  $v\%$  为:

$$v\% = \frac{|E_{0\text{计算}} - E_{0\text{实测}}|}{E_{0\text{实测}}} \times 100 \quad (11)$$

表 1 1.5kVA 组合励磁同步发电机样机的主要技术和结构参数

容量/ kVA	1.5	电压/ V	230
功率因数	0.8	转速/ (r/min)	1500
极对数	2	定子齿数	24
电枢外径/ mm	167	电枢内径/ mm	104
每元件匝数	33	电枢导体线径/ mm	0.71
极弧系数	0.686	气隙长度/ mm	1.9
磁极宽度	52.4	主发电机铁心长度/ mm	106
磁钢 B <sub>r</sub> /T	1.07	磁钢 H <sub>c</sub> /(A/m)	8.276e+ 5
辅助电励磁部分数据			
电枢长/ mm	16	绕组支架外径/ mm	90
支架轴向总长度/ mm	53	绕组支架内径/ mm	82.8
水平磁极总长度/ mm	82	绕组支架内部长度/ mm	41.2
水平磁极内径/ mm	91	支架内圆筒外径/ mm	43.9
水平磁极外径/ mm	102.3	支架内圆筒内径/ mm	28.1

表 2 1.5kVA 组合励磁样机空载特性计算和实测数据比较

$I_f$ / A	实测 $E_0$ / V	计及轴向漏磁 $E_0$ / V	相对误差 $\gamma$ / %	不计轴向漏磁 $E_0$ / V	相对误差 $\gamma$ / %
- 1.00	252.67	250.98	0.67	239.93	5.04
- 0.80	253.00	252.17	0.33	240.85	4.80
- 0.60	254.67	253.01	0.65	242.25	4.88
- 0.40	256.67	254.18	0.97	244.13	4.88
- 0.20	260.33	256.77	1.37	248.54	4.53
0.00	265.00	267.36	0.89	263.00	0.75
0.20	278.67	278.83	0.06	277.46	0.43
0.40	281.67	281.86	0.07	281.87	0.07
0.60	284.00	283.10	0.32	283.75	0.09
0.80	284.67	283.93	0.26	285.15	0.17
1.00	286.00	284.67	0.46	286.07	0.02

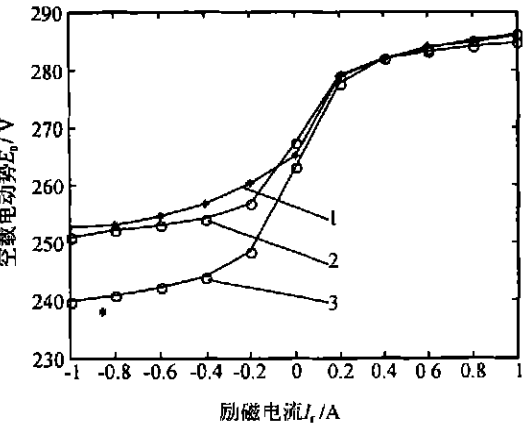
样机的空载特性曲线如图 7 所示. 以下对计算和实验数据作一些分析:

(1) 表 2 所示, 计及轴向漏磁模型计算的最大相对误差为 1.37%; 不计轴向漏磁的最大相对误差为 5.04%; 从图 7 中可以看出, 计及轴向漏磁的计算曲线在正负励磁时都和实测曲线相吻合, 说明本文介绍的计及轴向漏磁的磁路计算模型可以满足工程计算精度要求; 而不计轴向漏磁, 即认为正负励磁时电励磁部分空载特性对称, 计算曲线在反向励磁时和实测曲线相差较大.

(2) 计算和实测表明, 原样机对电励磁部分, 励磁电流在- 0.2~ + 0.2A 之间时, 空载特性是线性的, 感应电动势变化范围为- 10.4~ + 12.9V. 当励磁电流大于 0.2A 时, 由于磁路饱和, 励磁电流变化时, 空载感应电动势变化很小, 也就是当励磁电流大于 0.2A 时, 将不能起到调节发电机端电压的作用. 计算和分析发现, 磁路饱和主要是由于电励磁部分的主磁路上有导磁性能较差的 45 号磁钢造成的.

5 小结

本文用传统的磁路分析方法, 建立了组合励磁稀土永磁同步发电机空载特性的数学模型, 经样机实



1. 实测, 2. 计及轴向漏磁, 3. 不计轴向漏磁  
图 7 空载特性计算和实测的比较

测和计算数据的比较,该模型能满足工程精度要求,为组合励磁稀土永磁同步发电机的设计打下了基础。

### [参考文献]

- [1] 窦一平,陈海镇,严仰光. 组合励磁稀土永磁同步发电机的基本原理和设计方法[J]. 中小型电机, 2001, 28(4): 20~24.
- [2] 李钟明,刘卫国,刘景林等. 稀土永磁电机[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999, 7.
- [3] 唐任远. 现代永磁电机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [4] 窦一平,陈海镇. 稀土永磁同步发电机外特性的向量法分析[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(3): 312~317.
- [5] 窦一平,陈海镇,严仰光. 稀土永磁同步发电机结构参数对外特性的影响[J]. 中小型电机, 2000, 27(4): 45~47.

## The No-load Characteristic Calculation Model of the Hybrid Excitation Rare Earth Permanent Magnet Synchronous Generator

Dou Yiping<sup>1</sup>, Chen Haizhen<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing Normal University, 210042, Nanjing, PRC;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016, Nanjing, PRC)

**Abstract** By means of the classical method of the magnetic circuit analysis, the no-load characteristic calculation model of the hybrid excitation rare earth permanent magnet synchronous generator (simplified as HESG) is established. The relevant program in an advanced program language MATLAB has been brought forward and used in this paper. The effect of the leakage flux on the no-load characteristic of the HESG has also been analyzed. A 1.5kVA prototype of this new generator has been tested and calculated. The comparison of the no-load characteristic data shows that the calculation model can meet the requirement for the engineering precision.

**Key words:** hybrid excitation, rare earth permanent magnet, synchronous generator, magnetic circuit calculation

[责任编辑: 刘健]