

# 组合励磁永磁同步发电机 辅助电励磁部分的设计方法

窦一平

(南京师范大学电气与电子工程学院, 南京, 210042)

[摘要] 组合励磁稀土永磁同步发电机是一种能解决永磁发电机电压调节问题的新型发电机. 这种发电机由两部分组成, 主发电机部分和一般的永磁发电机相同, 而辅助调节电压的部分类似于电励磁发电机. 两部分共有一套电枢绕组. 文章讨论了这种发电机辅助电励磁部分的基本结构和设计方法, 建立了数学计算模型并研制了样机进行实验分析, 得出了有益的结论.

[关键词] 同步发电机; 组合励磁; 稀土永磁

[中图分类号] TM 341; TM 351; [文献标识码] B; [文章编号] 1008-1925(2001)02-0012-06

## 0 引言

组合励磁稀土永磁同步发电机是一种能解决永磁发电机电压调节问题的新型发电机, 这种发电机可以看成是由两部分组成: 主要部分和一般的永磁发电机相同, 称为主发电机部分; 而辅助调节电压的部分类似于电励磁发电机, 称为辅助电励磁部分. 两部分共有一套电枢绕组, 主发电机部分承担主要的能量输出任务, 电压调节所需要的磁场变化部分由辅助电励磁部分的电励磁绕组来实现.

这种组合励磁稀土永磁同步发电机具有以下特点:

- (1) 能实现无刷化, 免维护;
- (2) 辅助电励磁部分的损耗小, 具有永磁发电机的高效率特点;
- (3) 磁场调节方便, 解决了永磁发电机电压调节难的问题.

主发电机部分的设计计算和一般的永磁发电机基本相同, 本文将介绍辅助电励磁部分的设计方法.

## 1 基本结构

本文研究的组合励磁稀土永磁同步发电机的结构简图如图 1、图 2 所示, 图 1 为轴向剖面图, 图 2 为径向剖面图.

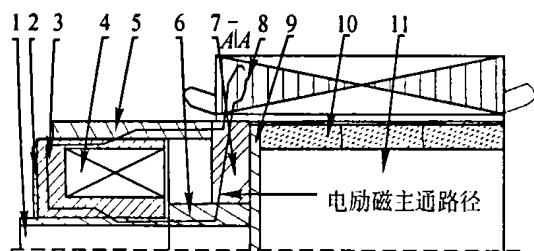
组合励磁稀土永磁同步发电机的电枢绕组感应电势含有两部分, 分别由永磁磁场和电励磁磁场感应产生, 相应的励磁磁势分别为: 主发电机部分是永久磁钢产生的磁势, 调节电压所需的辅助磁场靠辅助电励磁绕组产生的磁势来建立. 两部分磁势基本上单独地作用于各自的

\* 收稿日期: 2001-01-16

基金项目: 江苏省教育厅自然科学基金项目资助(2000DQY0002SJ1)

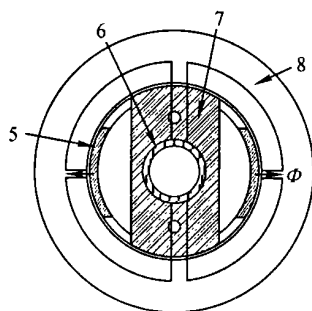
作者简介: 窦一平, 1964-, 南京师范大学电气与电子工程学院副教授, 硕士. 现在南京航空航天大学攻读电气工程博士学位, 研究方向为特种电机.

磁路, 形成各自的气隙磁场。



1-转轴 2-非导磁隔板 3-励磁绕组支架  
4-励磁绕组 5-水平磁极 6-导磁轴套 7-垂直磁极  
8-定子铁芯 9-隔板板 10-磁钢 11-转子铁芯

图1 组合励磁稀土永磁发电机的结构简图



5-水平磁极 6-导磁轴套 7-垂直磁极 8-定子铁芯

图2 电励磁部分径向剖面图 A-A

主发电机的定子结构和传统的电励磁发电机定子结构相同, 转子结构和普通的永磁同步发电机结构相同。

辅助电励磁部分的主要部件为图 1、图 2 中的部件 2 ~ 7, 其中核心部件为部件 3 励磁绕组支架、部件 4 励磁绕组、部件 5 水平磁极和部件 7 垂直磁极。

支架的内圆筒通过气隙和转子轴配合, 支架底部通过非导磁隔板固定在定子端盖上, 支架外圆筒通过气隙和水平磁极配合, 励磁绕组则安放在内外圆筒之间的空间里。支架材料为导磁材料, 如 10 号钢, 支架的作用是构成电励磁的一部分磁路和固定励磁绕组, 励磁绕组材料为普通的电磁线。励磁绕组电源来自主发电机电枢绕组, 经过电压调节电路, 使励磁绕组中的电流随主发电机端电压的改变而变化, 达到调节电励磁磁场的大小和方向的作用。

图 1、图 2 中的部件 5 水平磁极和部件 7 垂直磁极是电励磁磁路的一部分, 构成辅助电励磁部分的磁极, 两种磁极都通过一块非导磁的连接板与主发电机转子固定在一起。

辅助电励磁部分的主磁通路径包含轴向磁路和径向磁路两部分, 如图 1、图 2 中主磁通路径示意如下:

励磁绕组内圆筒(轴向) 励磁绕组底部(径向) 励磁绕组外圆筒(轴向) 气隙(径向)  
水平磁极(轴向) 气隙(径向) 定子铁芯齿部(径向) 定子铁芯轭部(径向) 定子铁芯齿部  
(径向) 气隙(径向) 垂直磁极(径向) 导磁轴套(轴向) 气隙(径向) 励磁绕组内圆筒。

通过以上的安排, 实现了辅助电励磁部分的无刷化。

## 2 基本工作原理

组合励磁稀土永磁同步发电机的定子绕组可以看成由两部分组成: 一部分是主发电机定子绕组; 一部分是辅助电励磁定子绕组。根据上面介绍的结构安排, 两部分定子绕组产生的感应电动势没有相差, 在数量上是代数相加的关系, 即定子绕组的感应电势为主发电机部分和辅助电励磁部分定子感应电势之和。

稀土永磁同步发电机外特性反映了输出端电压和负载电流的关系, 根据文献<sup>[2]</sup>对稀土永磁同步发电机外特性研究可知: 发电机端电压  $U$  随着负载电流  $I$  的增加而下降, 随负载电流  $I$  的减小而增加; 不同的发电机定子绕组感应电势, 外特性基本上是一族平行的曲线, 空载感应电势增加, 则外特性曲线抬高; 空载感应电势减小, 则外特性曲线下移。如图 3 所示。

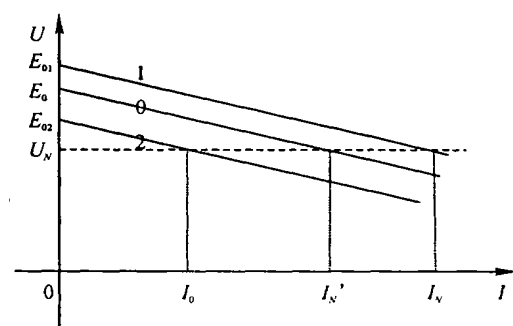


图 3 电压调节原理示意图

因此要保持发电机端电压的恒定,可以在负载电流变化时,调节辅助电励磁部分的磁场,改变辅助电励磁部分定子绕组的感应电势,使定子绕组总感应电势改变,来改变外特性,进而达到稳定端电压的目的。

如图 3,  $I_N$  为额定电流,  $U_N$  为额定电压, 辅助电励磁部分励磁电流为零时, 发电机外特性为图中曲线 0, 过点  $(I_N, U_N)$ , 空载感应电势为  $E_0$ ; 当负载电流增加到  $I_N$  时, 端电压要下降, 此时正向增加辅助电励磁部分的励磁电流, 使定子感应电势增加为  $E_{01}$ , 外特性抬高, 曲线 1 过  $(I_N, U_N)$ ; 当负载电流减小到  $I_0$  时, 端电压要增加, 此时辅助电励磁部分的励磁电流反向, 使定子感应电势减小为  $E_{02}$ , 外特性下移为曲线 2, 曲线过  $(I_0, U_N)$ ; 这样通过调节辅助电励磁部分励磁电流的大小和方向, 就能使发电机保持端电压不变。

3 辅助电励磁部分的技术要求

定义辅助电励磁部分的空载特性为辅发空载电势  $E_{0e}$  与辅助电励磁部分励磁电流  $I_f$  的函数:

$$E_{0e} = f(I_f) \tag{1}$$

组合励磁同步发电机对辅助电励磁部分的要求是能根据负载电流的变化产生附加的空载感应电势, 以改变发电机的外特性, 使发电机端电压保持不变; 为了控制上的方便, 调节变量之间的关系要线性化. 考虑到辅发空载感应电势的大小取决于励磁磁势的大小, 因此在设计电励磁部分时要注意以下两点:

- (1) 电励磁部分的电压调节要满足最大电流变化范围的要求, 即提供的最大空载感应电势应根据主发电机外特性的固有电压变化率和调节电流范围来确定;
- (2) 为了满足线性调节的要求, 电励磁部分的空载特性在调节范围内应为线性.

假设在辅助电励磁电流为 0 时, 主发电机外特性上以额定电压  $U_N$  为基值, 在电流调节范围内的最大电压变化值为  $\Delta U_{max}$ , 即

$$\Delta U_{max} = E_{0m} - U_N \tag{2}$$

式中  $E_{0m}$  为主发电机部分空载感应电势, 则辅助电励磁部分的最大设计空载感应电势值  $E_{0em}$  取为:

$$E_{0em} = \lambda \Delta U_{max} \tag{3}$$

其中系数  $\lambda$  为裕量系数, 取 1.1 ~ 1.5 之间, 作用是考虑到可能的计算误差, 并使电励磁部分的空载特性在调节范围内为线性, 保证线性调节。

4 辅助电励磁部分主要尺寸的确定

辅助电励磁部分的尺寸大体分为两部分, 一部分为径向尺寸, 一部分为轴向尺寸. 径向尺寸的确定主要根据主发电机部分的径向尺寸来定, 而轴向部分的尺寸则根据需要的励磁磁势来确定。

要使电励磁部分的空载特性为线性, 确定尺寸时, 可以先假设相应部分的磁密大小, 再根

据主磁通大小计算出有关尺寸. 初步尺寸取得以后, 要进行磁路计算, 计算出空载特性, 空载特性符合要求, 设计结束.

假设电励磁部分磁极的外径为  $D_w$ ; 磁极的轴向长度为  $L_{ad}$ . 定义电励磁部分的主要尺寸为  $D_w^2 L_{ad}$ . 则电励磁部分设计的主要任务便是确定出主要尺寸.

#### 4.1 磁极外径的确定

选择好垂直磁极外径  $D_w$  与电枢内径  $D$  之间的气隙值  $\delta_i$  便可以确定  $D_w$  值:

$$D_w = D - 2\delta_i \quad (4)$$

$\delta_i$  值影响到励磁磁势的大小和空载特性的饱和,  $\delta_i$  值大, 则有利于空载特性的线性程度; 但  $\delta_i$  值大, 励磁磁势增加, 电励磁部分的体积将增加. 实际取值还要考虑到工艺要求.

#### 4.2 磁极长度的确定

确定了辅助电励磁部分的最大设计空载感应电势值  $E_{0em}$  (V), 就可以确定电励磁部分磁极的轴向长度.

电励磁部分的每极主磁通  $\Phi_{ad}$  (Wb) 为:

$$\Phi_{ad} = \frac{E_{0em}}{4.44 K_{w1} f_N W} \quad (5)$$

其中:  $K_{w1}$  为基波绕组系数, 和主发电机电枢绕组相同;  $f_N$  为额定频率, 单位(Hz);  $W$  为绕组每相串联匝数.

电励磁部分磁极的轴向长度  $L_{ad}$  (mm) 为:

$$L_{ad} = \frac{\Phi_{ad}}{\alpha \tau B_{\delta i}} \times 10^6 \quad (6)$$

其中:  $\alpha$  为极弧系数, 和主发电机磁极相同;  $\tau$  为极距, 单位(mm);  $B_{\delta i}$  为气隙磁密, 单位(T).

#### 4.3 其它尺寸的确定

电励磁部分其它尺寸的确定, 将根据电励磁部分的每极主磁通  $\Phi_{ad}$  和初步假设的磁密值来确定, 这里不一一介绍了.

### 5 辅助电励磁部分的磁路计算

有了初步的结构尺寸, 就可以进行辅助电励磁部分的磁路计算了, 磁路计算的目的是计算电励磁部分的空载特性:  $E_{0e} = f(I_f)$ , 考虑到主发电机部分电势, 组合励磁发电机总的空载感应电势  $E_0$  和电励磁绕组电流  $I_f$  的关系为:

$$E_0 = f(I_f) \quad (7)$$

其中:

$$E_0 = E_{0e} + E_{0m} \quad (8)$$

辅助电励磁部分的主磁通路径包含轴向磁路和径向磁路两部分, 如图 1、图 2 中主磁通路径所示.

辅助电励磁部分的磁路计算方法和一般的电励磁电机磁路计算基本相同, 即给一个空载电压然后求出励磁绕组的总励磁磁势. 磁路各部分的计算公式介绍略, 请参阅有关文献.

电励磁部分设计计算的程序流程图见图 4.

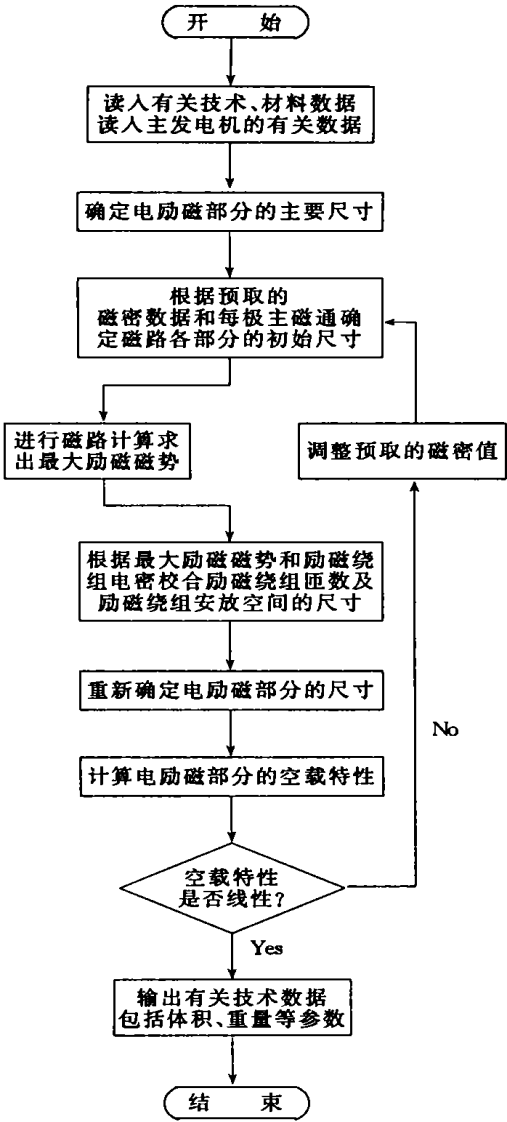


图 4 电励磁部分设计计算程序流程简图

## 6 电励磁部分空载特性的实验对比

本文用特别适合工程科学计算的高级程序语言 MATLAB 编制了组合励磁稀土永磁同步发电机设计计算的程序,并对一台 1.5kVA 的组合励磁稀土永磁同步发电机进行了校核计算,该样机额定电压 230V,电励磁电流为零时的空载感应电势为 265V,辅助电励磁部分能调节的最大空载感应电势为 287V。

该样机电励磁部分空载特性的计算结果和样机实验的数据如图 5 所示,从图中可以看出,计算结果基本上和实验结果吻合,表明本文所用的计算模型能满足工程计算要求。但从图中看出样机的电压调节率较小,当电励磁电流大于 0.5A 时,电励磁部分出现饱和现象,经过对样机的计算分析后发现,造成饱和的原因主要有以下两点:

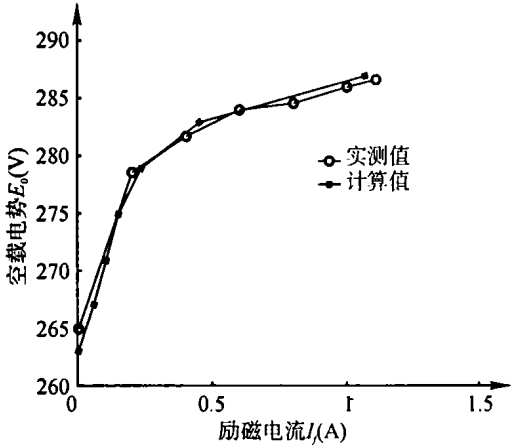


图 5 1.5kVA 样机电励磁部分的空载特性

- (1) 由于图 1 中电励磁的部件 6 导磁轴套采用了导磁率很低的 45 号钢,这部分磁路容易饱和;
- (2) 图 1 中电励磁的部件 9 即电励磁部分和主发电机部分之间的隔磁板较薄,造成电励磁部分与主发电机之间的漏磁较大,产生附加感应电势的有效磁势相应减小。

## 7 结束语

组合励磁永磁发电机的设计特点是主发电机部分和辅助电励磁部分可以分开进行设计,其中主发电机部分的设计和一般的电励磁发电机基本相同,辅助电励磁部分的设计要满足主发电机部分的技术要求,其空载特性应保证为线性,设计的难点是电压调节范围,在结构方面尚需要进行进一步的研究。

组合励磁永磁发电机较好地解决了永磁发电机调压困难的问题, 综合了永磁发电机和电励磁发电机的优点, 因为磁场主要由磁铁建立, 励磁绕组只起调压作用, 故励磁电流比电励磁发电机小得多, 因此励磁损耗小.

组合励磁永磁发电机在我国尚属新开发项目, 是很有发展前途的一种发电机类型, 在国民经济中具有推广应用的价值.

[ 参考文献]

- [ 1] 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
- [ 2] 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
- [ 3] Nagayama. Study on new excitation schemes for brushless synchronous machines[J]. Nat Cof IEE. 1994, 863

## Design of the Auxiliary Part of the Hybrid Excitation Rare Earth Permanent Magnet Synchronous Generator

Dou Yiping

(Electric and Electron Engineering College, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, PRC)

**Abstract:** Hybrid Excitation Rare Earth Permanent Magnet Synchronous Generator, (HEPMSG) which can regulate the PM generator's output voltage, is a new type generator. The main part of this hybrid excited generator is the same as the permanent magnet generator, the auxiliary part is analogous to the electrical magnetic generator. Both parts share one armature and the function of the auxiliary electrical magnetic part is to regulate the HEPMSG's output voltage with small excitation input.

The new generator's construction, basic principles, and the design method of the auxiliary electrical magnetic part are discussed in this paper. The mathematical model for this new generator was established, and a sample generator was developed for experimented analysis. A very promising conclusion was drawn from the above analysis and testing.

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

[ 责任编辑: 严海琳]