

组合励磁稀土永磁同步发电机和 旋转整流器无刷交流发电机的比较^{*}

窦一平¹, 陈海镇²

(1. 南京师范大学电气与电子工程学院, 南京, 210042)

(2. 南京航空航天大学, 南京, 210016)

[摘要] 分析了飞机上恒速恒频和变速恒频两种电源系统的特点, 以及电源对所采用的交流发电机的技术要求, 经过具体的样机实例计算, 定量比较了组合励磁发电机(简称 HEPMSG)和旋转整流器式无刷交流发电机(简称 EESG)的各项技术指标, 得出组合励磁发电机在恒速恒频电源系统中应用具有较好前景的结论, 对于将稀土永磁发电机应用于飞机电源系统提供了理论依据。

[关键词] 无刷电机; 稀土永磁; 同步发电机

[中图分类号] TM 34; TM 351; [文献标识码] A; [文章编号] 1008-1925(2001)01-0030-06

0 引言

飞机电源系统由主电源、辅助电源、应急电源和二次电源等构成。

现代飞机主电源是直接或间接由航空发动机传动的发电机组成的发电系统, 主要有低压直流电源、恒频交流电源和混合电源三种, 恒频交流电源有恒速恒频(Constant Speed Constant Frequency, CSCF)交流电源和变速恒频(Variable Speed Constant Frequency, VSCF)交流电源两种。高压直流电源、高频环节交流电源是待发展和完善的两种电源。

目前, 在恒频交流电源系统中, 已广泛采用由电励磁主发电机、交流励磁机、永磁副励磁机和旋转整流器组成的三级无刷交流同步发电机。自20世纪50年代发明以来, 这种旋转整流器式无刷交流发电机得到了不断发展和完善。具体表现在:

(1) 电机高速化 CSCF 电源中发电机转速从 6 000 r/min 增加到 12 000 或 24 000 r/min, VSCF 或 HVDC 电源中发电机最高转速达到 30 000 r/min 左右。

(2) 高导磁材料的应用 采用铁钴钒软磁材料(如 1J22 材料), 饱和磁感应强度达 2.4 T, 电机的磁负荷大幅提高。

(3) 新型绝缘材料的使用 如聚酰亚胺绝缘薄膜复合材料, 使发电机可以和油直接接触, 可以在高温下工作。

(4) 冷却方式的改进 采用了喷油冷却方式, 由于油的热容量大, 且冷却油与发热部分直接接触, 冷却效果好, 因此提高了绕组的电流密度。

以上措施都提高了飞机无刷交流发电机的功率重量比和可靠性。这种发电机存在的主要

* 收稿日期: 2000-10-20

基金项目: 中国航空工业总公司科技预研资助

作者简介: 窦一平, 1964-, 南京航空航天大学在读博士, 南京师范大学电气与电子工程学院副教授, 主要从事特种电机方面的研究。

不足是结构复杂、存在旋转整流器、可靠性较低。稀土永磁同步发电机具有损耗低、效率高、结构简单等一系列优点, 但由于其磁场不能调节, 造成发电机电压调节困难, 故限制了这类发电机的广泛应用。

本文提出的采用组合励磁稀土永磁发电机的方案, 能解决调压问题, 这种发电机具有永磁发电机的特点, 即效率高、结构简单。应用于飞机电源系统以及地面移动电源领域可望具有较好的前景。

1 组合励磁永磁同步发电机在 CSCF 电源系统中应用的分析

1.1 CSCF 电源无刷发电机的特点

恒速恒频(Constant Speed Constant Frequency, CSCF)电源系统中, 飞机发动机经恒速传动装置传动交流发电机, 发电机输出恒定频率的 400 Hz 三相正弦交流电。由于 CSCF 电源的发电机直接面向负载, 其电机主要有以下的结构特点:

(1) 主发电机的转速和极对数受电压频率的制约, 飞机电源的频率为 400 Hz, 由转速和极对数的关系, 有 $n_p = 24\ 000$ 。发电机转速从 6 000 r/min 增加到 12 000 r/min 时, 电机体积重量显著降低, 但从 12 000 r/min 到 24 000 r/min 时, 由于电机结构参数的制约, 有效材料体积重量变化不大。

(2) 为改善输出电压波形, 电机电枢绕组利用率低, 消除 3 和 3 的倍数次谐波, 电枢绕组采用 120 相带绕组或 60 相带 2/3 短距绕组, 这种绕组的绕组因数低, 从而绕组的利用率低。

(3) 负载功率因数即发电机的功率因数变化范围宽, 通常为 0.95(超前) ~ 0.75(滞后)。为了保持发电机的输出电压不变, 低功率因数时要求较大的励磁磁势, 励磁电流受励磁绕组电密的限制, 励磁绕组要求较大的空间, 电机的体积大。

以上的因素限制了 CSCF 电源无刷交流发电机的功率/重量比的进一步提高。

1.2 组合励磁发电机和 CSCF 电源无刷发电机的比较

组合励磁稀土永磁同步发电机由于无需励磁功率消耗, 并且由于永久磁钢的存在, 使其固有电压变化率较小, 调节电压变化的电励磁功率也较小, 所以和同容量的 CSCF 电源无刷发电机比较, 有效率高的优势。组合励磁稀土永磁同步发电机的定子结构和电励磁发电机相同, 电磁参数的选择可以和电励磁发电机相近。转子的结构简单, 工艺上的也无特别的困难。故可考虑将这种电机应用于飞机电源系统。

下面通过具体的样机实例计算对比, 进一步说明组合励磁稀土永磁同步发电机应用于飞机电源系统的可行性。利用文献[1]介绍的稀土永磁同步发电机设计计算程序, 设计计算了三台应用于 CSCF 电源系统的组合励磁稀土永磁同步发电机, 为了和现有的 CSCF 电源系统用的电励磁式三级无刷交流同步发电机比较, 组合励磁发电机(Hybrid excitation permanent magnet synchronous generator HEPMSG)的电磁负荷、定子冲片材料及绕组选择和电励磁无刷发电机(Electrical excitation synchronous generator EESG)的相同, 永磁主发电机选择径向式转子结构。样机的额定容量分别为 16.5 kVA、60 kVA 和 66 kVA, 额定功率因数为 0.75。

计算结果和样机的体积、有效材料重量、效率和固有电压变化率的数据对比见表 1: HEPMSG 电机和 EESG 电机的比较

1.2.1 数据计算说明

(1) 体积的数据是计算了电机的主要尺寸, 即 D^2l 。D 为发电机的电枢内径, l 为电枢铁芯

长. 其中电励磁无刷同步发电机的主要尺寸分 3 部分: 主发电机、励磁机和副励磁机. 组合励磁同步发电机分两部分: 主发电机和辅助励磁部分.

(2) 重量的数据是计算了主发电机的有效材料重量, 即: 主发电机铁重、主发电机铜重和主发电机磁钢重量.

(3) 相对差的数据计算为(EESG 数据-HEPMSG 数据) / EESG 数据.

表 1 HEPMSG 电机和 EESG 电机的比较

容量/ (kVA)	体积/ (10 ⁻³ m ³)	重量/kg	效率/ %	电压变化率/ %	
16.5	EESG	1.575	9.65	91.7	13.48
	HEPM	1.206	11.51	94.0	10.74
	相对差	23.4%	- 19.3%	- 2.51%	20.3%
60	EESG	1.322	13.65	91.4	16.3
	HEPM	1.247	13.96	92.9	15.8
	相对差	5.67%	- 2.27%	- 1.64%	3.1%
66	EESG	1.743	8.71	89.9	12
	HEPM	1.676	9.73	92.4	8.1
	相对差	3.84%	- 11.71%	- 2.78%	32.5%

1. 2. 2 数据比较

(1) 三种容量电机的体积数据表明: 组合励磁同步发电机的体积比同容量的电励磁发电机体积要小, 主要原因是电励磁发电机为三级, 单是主发电机部分, HEPMSG 电机的体积要大于 EESG 电机. 但由于 EESG 电机有励磁机和副励磁机, 而 HEPMSG 电机只有辅助励磁部分, 故总体积方面 HEPMSG 电机要占优.

(2) 三种容量电机的重量数据表明: 主发电机部分 EESG 电机的有效材料重量要小于 HEPMSG 电机, 由于两种电机的定子冲片尺寸相同, 而 HEPMSG 电机的铁芯长度都略大于 EESG 电机; HEPMSG 电机多一个磁钢重量, 而 EESG 电机多转子励磁绕组铜重. 总有效材料重量比较, EESG 电机占优, 但考虑到 EESG 电机尚有励磁机和副励磁机, 故电机总重量上, 两种电机大体相当. 由于缺乏 EESG 电机励磁机和副励磁机的详细数据, 故本文没有作定量比较.

(3) 三种容量电机的效率数据表明: HEPMSG 电机的效率要高于 EESG 电机, 原因是 HEPMSG 电机没有励磁损耗, 计算表明三种容量的 EESG 电机的励磁功率占总损耗的比例依次为 35.5%、21.7%和 23.3%, 平均达到 26.83%. 而 HEPMSG 电机的电励磁部分最大励磁功率三种容量分别为 4.21%、1.22%和 0.61%.

(4) 三种容量电机的固有电压变化率数据表明: HEPMSG 电机的固有电压变化率要比 EESG 电机小, 这主要是由于永磁电机的磁钢使直轴电枢反应电抗降低, 从而使电压变化率减小的缘故.

1. 2. 3 数据比较的结论

(1) 在 CSCF 电源系统中采用组合励磁稀土永磁同步发电机, 其体积重量和电励磁无刷同步发电机大体相当.

(2) 在效率和电压变化率两项性能指标上, 组合励磁稀土永磁同步发电机有一定的优势.

(3) 由于组合励磁稀土永磁同步发电机没有电励磁无刷同步发电机中的旋转整流器和转

子绕组, 其可靠性较高.

(4) 由于组合励磁稀土永磁同步发电机采用了价格较高的稀土材料, 而其它部分和电励磁电机大体相当, 故其成本相对要高些, 但对于飞机上使用的电机, 价格往往不是决定的因数.

综上所述, 组合励磁稀土永磁同步发电机应用于 CSCF 电源系统应该有较好的前景.

2 组合励磁发电机在 VSCF 电源系统中应用的分析

2.1 VSCF 电源无刷发电机的特点

高压直流(High Voltage Direct Current, HVDC)电源系统中, 无刷交流发电机由发动机直接传动, 输出变频交流电能, 经整流滤波后得到 270 V 高压直流电, 直接向用电设备供电. 若该直流电再经电子变换器变换成 400 Hz 的恒频交流电, 则构成变速恒频(Variable Speed Constant Frequency, VSCF)电源, 该电源系统中的无刷交流发电机是经二极管整流后供电给负载的, 故其主发电机有以下的特点:

(1) 发电机输出电压的频率自由, 电机转速及极对数可以优选, 航空发动机变速工作时, 最高转速和最低转速之比可达到 2, 目前最高转速已达到 30 000 r/min 左右, 转速高则电机的体积小, 但转速的进一步提高受到材料机械强度的限制. 在高转速的基础上, 选用大极对数 p , 则电机的工作频率高, 每极磁通小, 电机定子、转子铁磁部分截面积小, 从而电机的体积小重量轻. 极对数的选择要考虑工艺上励磁绕组安放的方便, 因为极对数的增加将使磁极间空间减小.

(2) 主发电机绕组因数大, 电枢绕组利用率高, 由于主发电机的负载是三相整流桥, 线电压整流, 电枢绕组 Y 形接法, 线电压不含 3 及 3 的倍数次谐波, 因而绕组可采用 60 相带绕组, 从而提高绕组的利用率.

(3) 主发电机的功率因数高, 为减小直流电压的纹波, 三相桥式全波整流电路后接大电容滤波. 电机的功率因数与负载本身性质无关, 取决于电机的换相电抗及等效直流电阻, 加载后, 整流桥工作在换相模式, 功率因数接近 0.95. 功率因数高, 电机的励磁安匝就小.

2.2 组合励磁发电机在 VSCF 电源中应用时的设计特点

组合励磁稀土永磁同步发电机应用于 VSCF 电源系统, 转速变化大, 一般 $n_{\max}/n_{\min} = 2$, 电励磁部分除了要调节负载变化引起的电压变化, 还要增加调节因转速变化带来的电压变化.

假设发电机外特性为线性曲线, 额定转速 n_N 时, 电励磁部分随负载变化的最大电压调节量为 ΔU_0 , 则有:

$$\Delta U_0 = E_0 - U_N \quad (1)$$

运行中最大转速 n_{\max} 时, 由于电枢感应电势和转速成正比, 需要电励磁部分调节的电压变化量为 ΔU :

$$\Delta U = \frac{n_{\max}}{n_N} E_0 - U_N \quad (2)$$

如果电励磁部分为线性磁路, 则电压调节量和转速与励磁磁势的乘积成正比, 假设额定转速 n_N 和最大转速 n_{\max} 时对应的最大励磁磁势分别为 F_N 和 F_{\max} , 则有:

$$\Delta U / \Delta U_0 = n_{\max} F_{\max} / n_N F_N = \left[\frac{n_{\max}}{n_N} E_0 - U_N \right] / (E_0 - U_N) \quad (3)$$

两种转速时的磁势之比为:

$$F_{\max}/F_N = \left[E_0 - \frac{n_N}{n_{\max}}U_N \right] / (E_0 - U_N) \tag{4}$$

从(4)式可以看出,转速增加时,电励磁部分的励磁磁势将要增加. 同样以 66 kVA 的样机为例, 19 600 r/min 时 E_0 为 140.3 V, $U_N = 130$ V, 将有关数据带入式(4), 计算后有: $F_{\max} = 3.92F_N$, 即励磁磁势增加到近额定转速时的 4 倍.

对电励磁部分的影响是:

(1) 如果电励磁部分的结构尺寸是按额定转速时设计的, 则转速增加时, 电励磁部分磁路将饱和.

以 66 kVA 样机的设计数据为例, 额定转速 19 600 r/min 时要求的最大电压调节量为 15 V, 电励磁部分的空载励磁特性如图 1 所示, 曲线呈线性, 当转速为 25 500 r/min 时, 要求的最大电压调节量为 53 V, 电励磁部分的空载励磁特性如图 2 所示, 当励磁电流大于 1 A 时, 磁路呈饱和状态, 而此时的电压调节量仅 15 V, 电励磁部分几乎无法调到 53 V.

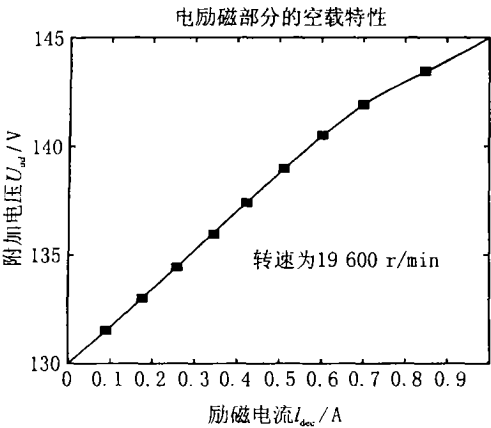


图 1 调节量为 15 V 时的励磁特性

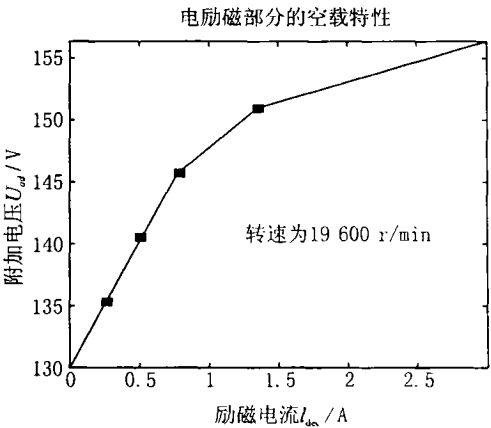


图 2 电压调节量增加时的励磁特性

(2) 要求励磁特性为线性, 则电励磁部分必须按最大的电压调节量来设计, 这样一方面电励磁部分的体积将大大增加. 另一方面由于本样机电励磁磁路结构的限制, 当要求电励磁部分的电压调节量达到一定值时, 要求水平圆筒磁极和电励磁支架的内径同时增加, 这样摆放电励磁绕组的窗口沿径向的高度将减小到不合理的数据.

同样以 66 kVA 的样机为例, 当电压调节量分别为 11% U_N 、23% U_N 和 30% U_N 时的体积 V_{DLC} 和要求的窗口沿径向的高度 H_{JX} 如表 2.

表 2 不同电压调节量时的体积和励磁绕组窗口高度比较

电压调节量 ΔU / V	励磁部分体积 V_{DLC} / (10^5 mm^3)	窗口高度 H_{JX} / mm
11% U_N	3. 03	32. 4
23% U_N	7. 31	14. 6
30% U_N	12. 2	4. 1

从表 2 中看出当电压调节量达到 30% U_N 时, 电励磁部分的体积增加到额定转速时的 4 倍, 且此时的窗口沿径向的高度仅为 4. 1 mm, 而当转速达到 25 500 r/min 的最高速时, 要求的电压调节量将达到 40% U_N , 此时将无法设计出线性的励磁调节特性.

3 结论

根据前面的分析讨论, 可以得出以下的结论:

(1) 组合励磁稀土永磁同步发电机应用于 CSCF 电源系统有较好的前景, 这种电机在同样容量和同样体积的情况下, 其效率和电压变化率要优于电励磁式发电机, 可靠性也较高.

(2) 由于在 VSCF 电源系统中, 转速变化范围大, 要求电励磁部分的电压调节量大, 造成电励磁部分的体积大大增加, 以及电励磁部分的结构尺寸不合理, 所以这种结构的组合励磁发电机在 VSCF 电源系统中的应用不合适. 要使永磁发电机应用于 VSCF 电源系统, 尚需要对电机的结构形式作进一步研究.

[参考文献]

- [1] 窦一平, 陈海镇. 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, (4)
- [2] 李钟明, 刘卫国, 等. 稀土永磁电机[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
- [3] 唐任远. 现代永磁电机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997
- [4] 孙昌志. 钕铁硼永磁电机[M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 1996
- [5] 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, (3)

Comparison between Hybrid Excitation Permanent Magnet Synchronous Generator and Brushless Synchronous Generator with Rotating Rectifier

Dou Yiping¹, Chen Haizhen²

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

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

Abstract: The characteristics of the aeronautic electrical source, with constant speed constant frequency, CSCF, or variable speed constant frequency, VSCF, are analyzed in this paper. The technical requirements for the synchronous generator applied in an airplane have been discussed. After the calculation and the design of some hybrid excitation permanent magnet synchronous generators, and according to the specific technical data, the generator was compared with the brushless synchronous generator with rotating rectifier. The result of the comparison shows that the application of the hybrid excitation permanent magnet synchronous generator to aeronautics is promising. The conclusion is helpful to the application of the permanent magnet synchronous generator to aeroplanes.

Key words: brushless electric machine; rare earth permanent magnet; synchronous generator

[责任编辑: 刘健]