

一种新型混合励磁爪极同步发电机结构及特性研究

赵朝会^{1,2}, 郭环球¹, 杨 宁¹, 严仰光²

(1.上海电机学院,上海 200240; 2.南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室,江苏 南京 210016)

摘要 针对电励磁爪极电机功率密度低、永磁爪极电机磁场调节困难的问题,研究了一种新型的混合励磁爪极同步发电机.根据电机学原理,利用磁路的计算方法和三维有限元分析计算方法对该电机进行仿真计算,探讨其空载特性和调节特性,分析比较了该电机与电励磁爪极电机和永磁爪极电机的性能差异.研究表明:(a)相对于电励磁爪极电机,该电机实现了励磁电流的双向控制;相对于永磁爪极电机该电机使得输出电压可调.(b)在更宽的负载范围内实现了保持输出电压恒定.

关键词 爪极;发电机;功率密度;气隙磁密

中图分类号:TM303 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2007)03-0338-04

普通的电励磁爪极发电机因其制造成本低、调节性能好而被广泛应用,但由于它存在励磁绕组、电刷和滑环,使得输出特性差、故障率较高、效率偏低、噪声较大.永磁爪极发电机虽然结构简单,运行可靠,功率质量比和效率较高,但电机磁场的调节较为困难^[1-2].

混合励磁爪极电机采用了永磁励磁和电励磁相结合的励磁方式,兼有永磁发电机和电励磁发电机的优点,可以解决永磁发电机磁场不可调节的缺点,通过电励磁的调节,以实现发电机在转速及负载变化范围内满足输出恒定电压的技术要求,因此具有广阔的发展前景^[3-4].较之传统的电励磁爪极发电机,混合励磁爪极发电机具有效率高、电机低速性能好、集线圈励磁的电压调节性能和高功率密度等优点,近几年引起人们广泛的关注.文献[5]提出了一种具有混合励磁结构的爪极电机的原理和模型(图1),采用经典的等效磁网络法并结合有限元计算给出了电机的电感等相关结果;文献[6]利用支持向量机和遗传算法讨论了图1所示爪极电机的建模过程和参数优化;文献[7]用三维等效磁网络方法研究了图1所示电机的负载特性;文献[8]用场路结合方法计算了图1所示电机的效率.图1中,电机的永磁体置于爪极之间,主要是为了增加电机的主磁通和减少爪极间的漏磁.

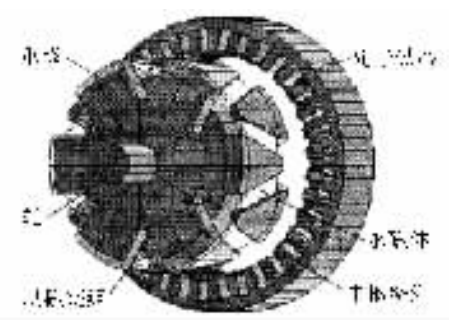


图1 混合励磁爪极同步电机
Fig.1 Hybrid excitation claw-pole synchronous machine

爪极电机由于其结构和磁路复杂、不规则,又是典型的三维磁场,所以对于这种新型电机的研究尚缺乏理论上的系统分析.本文提出了一种新型的混合励磁爪极同步电机,利用磁路计算和有限元计算方法,采用Ansoft公司的RMxprt软件和三维场的分析软件,研究了这种新型电机的空载特性、调节特性等,并与电励磁爪极发电机、永磁爪极发电机进行了对比分析,得出了一些实用的结论.

1 新型混合励磁爪极同步发电机的结构及参数

新型混合励磁爪极电机的结构如图2所示.定子铁心上嵌有多相电枢绕组,其极数和转子极数相同.转子上装有特殊的爪形磁极和环形励磁绕组,在两块爪形磁极中间放置一块圆柱形永磁体,电励磁和永磁两种磁势源串联.空载时,一对极下的主磁通由两部分组成:(a)励磁绕组通电后所建立的磁场由一个爪极经气隙和电枢至另一个爪极而闭合,从而在爪极圆柱表面上形成N,S间隔的极性,此为励磁电流产生的主磁通;(b)永

磁体产生的主磁通. 负载时,定子三相电流产生旋转磁动势,气隙磁场是由永磁体、励磁绕组中的励磁电流和定子绕组中的三相交流电流共同产生. 爪形磁极结构有利于在转子直径较小的情况下安排较多的磁极.

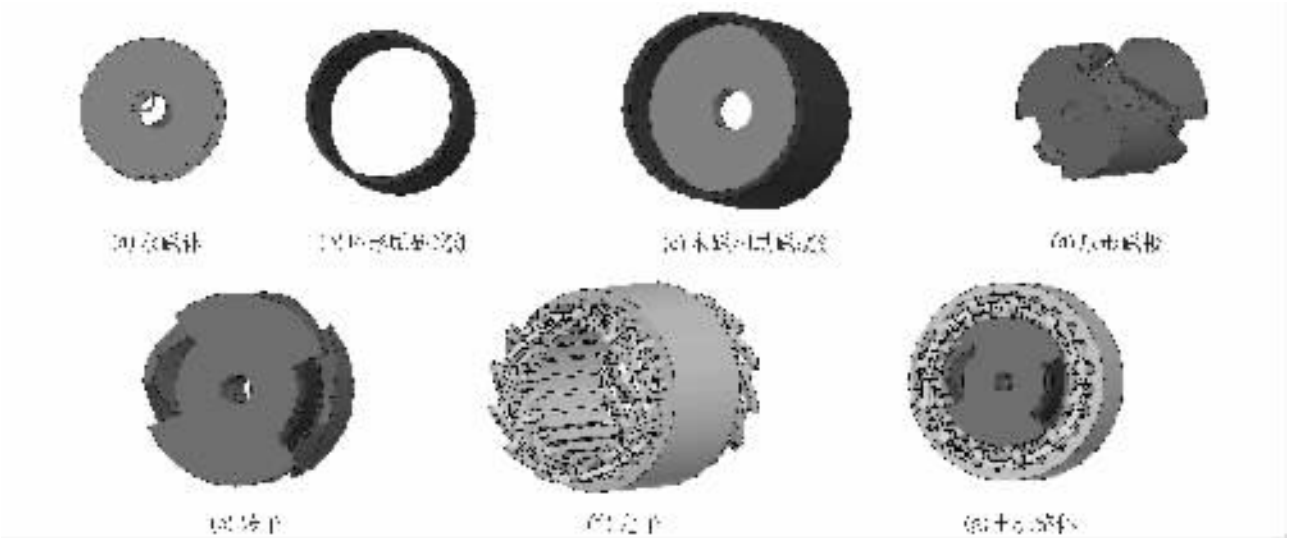


图 2 新型混合励磁爪极同步电机

Fig.2 A new type hybrid excitation claw-pole synchronous machine

电机的结构参数见表 1,其中定子叠片材料为 M19-24G,叠片系数为 0.95,槽为梨形槽,线径为 0.38 mm. 转子铁心的材料为 GBA3. 励磁绕组的匝数为 110 匝,每个导体的并绕根数为 3,励磁绕组的线径为 0.42 mm 电机中永磁体的长度为 10 mm,材料是 xg 196/96.

表 1 新型混合励磁爪极电机的结构参数

Table 1 Structure parameters of a new type hybrid excitation claw-pole machine

槽数/ 个	定子 外径/ mm	定子 内径/ mm	电枢 长度/ mm	每槽 导体 数/个	并联 支路 数/个	并绕 根数/ 根	节距	气隙/ mm	极对 数/ 对	转轴 直径/ mm	轭部 直径/ mm	槽深/ mm	极尖 厚度/ mm	极根 厚度/ mm	极尖 极弧 系数	极根 极弧 系数	磁极 长度/ mm	转子 长度/ mm	极靴 厚度/ mm
24	120	80	65	200	1	1	整距	0.6	2	12	50	14	4	12	0.2	1.2	65	80	12

2 电机的磁场分布

采用三维有限元计算时,要考虑到由于永磁体的加入,使电机一对极下求解区域内的磁场有偏斜,因此求解区域要取整个电机区域. 这样做虽然使计算工作量明显增大,但计算场域的边界条件则相对简单,除端部外,均为一类边界.

计算采用三维电磁场软件 Maxwell3D. 图 3 示出了整个电机的网格剖分情况;图 4 显示了永磁磁钢的充磁方向;图 5 反映了电机爪形磁极的三维磁通分布. 磁通走向概括如下:永磁磁钢和励磁绕组产生的轴向磁通经转子磁轭到达爪极,由于爪极的特殊作用,使轴向磁通转换为径向磁通,然后流经气隙、定子齿、定子轭到达另一个极,再经过另一个极下的定子齿、气隙和爪极回到转子磁轭,形成一个磁通回路. 当励磁绕组中励磁电流产生的磁场方向和永磁磁钢的磁化方向相同时,电机中的气隙磁场增大;反之电机的气隙磁场减小. 因此通过调节励磁电流的大小和方向就可以调节气隙磁场,方便地控制输出电压.

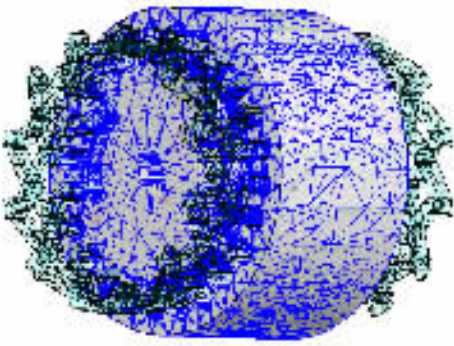


图 3 电机的网格剖分

Fig.3 Mesh generation of the machine

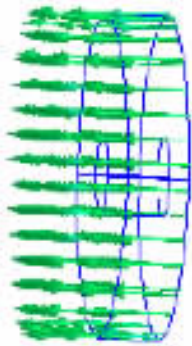


图 4 永磁磁钢的充磁方向

Fig.4 Direction of magnet recharge of PM

图 6 是电机的磁密云图,可以看出,在径向方向,极根处的磁密较大(转子发亮区域),有可能进入饱和 在轴向方向,定子磁轭中两爪极之间的区域磁密较大(定子发亮区域). 因此设计混合励磁爪极发电机时,应充分考虑磁密较大的这些区域,不能使之进入饱和状态.

3 混合励磁爪极发电机的特性研究

利用 Ansoft 公司的 RMxpirt 软件对混合励磁爪极发电机的特性进行了计算分析,由于爪极同步发电机转子磁极的极弧系数是沿轴向变化的,沿 N 极逐渐变小的方向,S 极的极弧系数逐渐增大 同理,沿 S 极逐渐变小的方向,N 极的极弧系数逐渐变大. 因此在计算气隙磁场的波形时,对转子的每个截面都要通过许克变换求解气隙磁场的波形,然后用积分的方式求解绕组的感应电势.

为了观察混合励磁爪极发电机的特性,计算分析了表 1 参数下电励磁爪极电机(不考虑磁钢)、永磁爪极电机(不考虑励磁绕组)的性能,并与混合励磁爪极电机进行了对比.

3.1 空载特性

爪极电机的空载特性是指在一定的转速条件下,空载端电压(空载时即相电势 E_0)随励磁电流 I_f 变化的关系,即

$$E_0 = f(I_f) \tag{1}$$

在 $n = 1\,500\text{ r/min}$ 的情况下,永磁爪极电机的空载端电压为 130 V,电励磁爪极电机和混合励磁爪极电机的空载特性曲线如图 7 所示.

由图 7 可知,在电励磁爪极电机的空载特性中,励磁电流是单向控制的,只能施加正向励磁电流,且随着励磁电流的增加空载端电压增加,当励磁电流大于 6 A 时,电机进入饱和状态. 而混合励磁爪极电机中,励磁电流可以双向控制,励磁电流为 0 时,空载端电压为 130

V 励磁电流为 20 A 时,空载端电压约为 160 V 励磁电流为 - 20 A 时,空载端电压为 80 V.

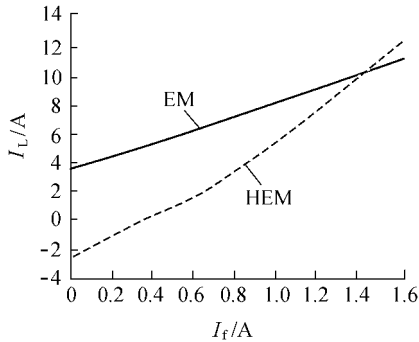


图 8 爪极电机的调节特性
Fig.8 Regulation characteristics of claw-pole machine

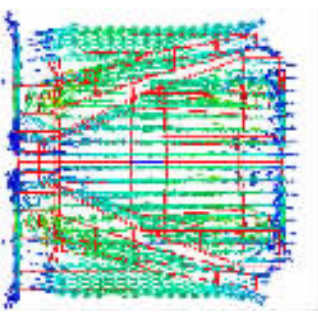


图 5 爪极的三维磁通分布
Fig.5 Three-dimensional flux distribution of claw-pole

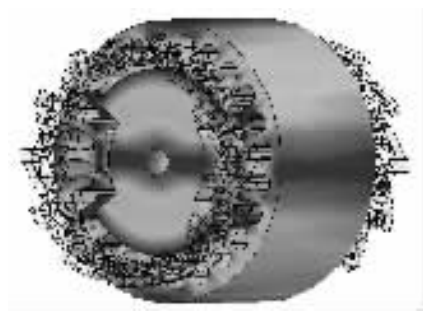


图 6 电机的磁密云图
Fig.6 Flux density nephogram of machine

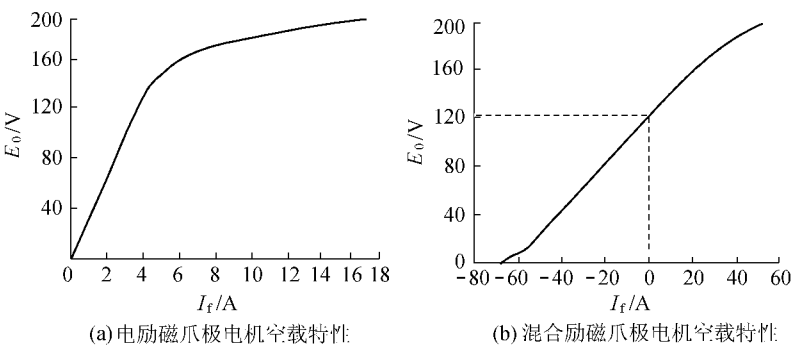


图 7 空载特性曲线
Fig.7 No-load characteristic curve

因此,混合励磁爪极电机与电励磁爪极电机相比,实现了励磁电流的双向控制;与永磁爪极电机相比实现了输出电压的可调.

3.2 调节特性

在电压和转速维持不变的情况下,负载电流 I_L 和励磁电流 I_f 之间的关系称为调节特性. 即

$$I_L = f(I_f) \tag{2}$$

在 $n = 1\,500\text{ r/min}$ 、电压 $U = 115\text{ V}$ 的情况下,电励磁爪极电机和混合励磁爪极电机的调节特性如图 8 所示.

由图 8 可知,当负载电流增大时,要维持端电压 115 V 不变,则励磁电流要相应增加. 在相同的负载范围内,图 2 所示电机(图 8 中虚线)比电励磁爪极电机(图 8 中实线)和图 1 所示电机的励磁电流增加

更多,原因是图 2 所示电机中两种磁势源是串联的缘故.

3.3 性能参数的对比

在电机相数、极数、频率、结构尺寸(表 1)相同并保持电机有相同的励磁电流、负载电流的情况下,计算了电励磁爪极电机、永磁爪极电机和混合励磁爪极电机的一些性能参数,如表 2 所示.由表 2 可知,混合励磁爪极电机的功率密度比相对较高.

表 2 电机性能参数对比

Table 2 Contrast of performance parameters				
电机类型	气隙磁密/T	P/kW	U/V	W/kg
电励磁爪极电机	0.26	0.55	115.0	5.28
永磁爪极电机	0.30	0.55	115.0	5.25
混合励磁爪极电机	0.31	0.65	135.5	5.25

4 结 论

- a. 提出了一种新型的混合励磁爪极同步发电机的结构,三维有限元仿真及计算结果验证了该电机结构的合理性.
- b. 从空载特性可知,混合励磁爪极同步发电机相对于电励磁爪极发电机实现了励磁电流的双向控制;相对于永磁爪极发电机实现了输出电压的可调节性;从调节特性可知,混合励磁爪极同步发电机能在更宽的负载电流范围内实现输出电压的恒定.
- c. 根据磁路法的计算结果,在相数、极对数、转速相同、结构参数相同的情况下,当励磁电流相等时,与电励磁爪极电机相比,混合励磁爪极同步发电机具有更高的气隙磁密和功率密度.

参考文献:

[1] 张伟雄,张敬华,郑婵君.基于磁网络模型爪极电机气隙磁场的研究[J].微特电机,2000(6):10-13.
[2] 王刚,许贤泽.爪极结构参数对汽车电机间隙的影响[J].机械,2001,28(3):4-5.
[3] 赵朝会,秦海鸿,严仰光.混合励磁同步电机的发展现状及应用前景[J].电机与控制学报,2006,10(2):113-117.
[4] 赵朝会,秦海鸿,姬少龙,等.并列结构混合励磁同步型发电机结构和特性研究[J].河南农业大学学报,2006,40(4):406-409.
[5] 王群京,陈军,姜卫东,等.一种新型混合励磁爪极发电机的建模和计算[J].中国电机工程学报,2003,23(2):67-70.
[6] 王群京,鲍晓华,倪有源,等.基于支持向量机和遗传算法的爪极发电机建模及参数优化[J].电工技术学报,2006,21(4):57-61.
[7] 王群京,倪有源,张学,等.基于三维等效磁网络法计算混合励磁爪极发电机的负载特性[J].电工技术学报,2006,21(6):96-100.
[8] 王群京,倪有源,朱卫国,等.新型汽车用爪极发电机系统效率计算[J].系统仿真学报,2006,18(6):1609-1611.

Structure and characteristic study on a new type of hybrid excitation claw-pole synchronous machine

ZHAO Chao-hui^{1,2}, GUO Huan-qiu¹, YANG Ning¹, YAN Yang-guang²

(1. Shanghai Dianji University, Shanghai 200240, China ;

2. Aero-Power Sci-Tech Center, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract In consideration of low power density of electric excitation claw-pole synchronous machine (EECSM) and some difficulties in magnetic field regulation of permanent magnet claw-pole synchronous machine (PMCSM), a new type of hybrid excitation claw-pole synchronous machine (HECSM) was studied. According to electrical machine theory, the calculation method for magnetic circuit and 3D finite element method were used for simulative calculation of the machine, and its no-load characteristics and regulation behavior of the machine were discussed. The comparison of the performance of HECSM with those of EECSM and PMCSM shows that HECSM realizes two-direction control of excitation current and makes the output voltage adjustable, and that the output voltage is kept constant in a wide load range.

Key words claw-pole ; generator, power density ; air-gap flux density