

561—566

25兆瓦旋转磁通压缩脉冲发电机的实验研究

李格¹, 王勇¹, 刘保华², 潘垣²,
秦文汀², 张延标², 陈强², 黄河²

(1. 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 合肥 230029; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要:给出 25 兆瓦被动旋转磁通压缩脉冲发电机的电磁设计, 对电枢绕组的工艺实现、发电机的静态和空载特性进行了实验, 还解释了实验中出现的励磁减速现象, 并给出了解决问题的方法. 这一研究为短路实验和驱动电磁轨道炮连发实验打下基础.

关键词:25 兆瓦被动旋转磁通压缩脉冲发电机; 电磁设计; 静态和空载特性 实验研究

中图分类号:TM359.9 **文献标识码:**A

1 引言

旋转磁通压缩脉冲发电机脉宽涵盖的区域从 $20\mu\text{s}$ 至 10ms , 近三个数量级. 它将惯性储能、机电能量转换与脉冲整形三者融为一体, 具有较高的储能密度与功率密度, 在脉冲功率技术领域被称为“单元件的多用途电源”. 它的优良的性能使其在廉价电磁电热推进系统和脉冲功率技术等相关军事项目应用中占有重要的地位.

被动旋转磁通压缩脉冲发电机 (Passively Compensated Pulsed Alternator) 是其中一类, 如图 1. 其基本思想是利用磁通压缩原理^[1,2], 在交流发电机励磁绕组和气隙电枢绕组之间安装了一个均匀的、与励磁绕组保持相对静止的非磁性导电补偿圆筒, 当电枢绕组放电时, 在补偿圆筒中感应产生涡流将电枢磁通压缩于补偿圆筒与电枢绕组之间的气隙中, 使电机运行时保持恒定的极低内电感, 以提高脉冲发电机的功率密度.

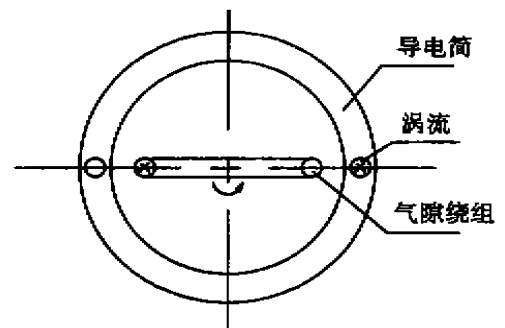


图1 被动补偿脉冲发电机的原理图

Fig.1 Theory of the passive compensator

收稿日期:1999-07-13

基金项目:国家 85 电磁发射项目(兵字 080 号)

作者简介:李格,男,1966 年生,博士,副研

为验证被动磁通压缩原理并用之于发展我国的电磁发射、电热发射与脉冲功率技术,我们发展了异于国外同行,可以克服电流趋肤效应的迭片式电枢结构用以取代国内工艺难以做出的长方形截面铜编织线.另外还在气隙电枢绕组的电感计算^[3]、导电筒涡流损耗^[4]的理论研究、受力分析与计算等理论研究基础上,进行了气隙电枢绕组粘接工艺放电实验研究^[5],以验证理论计算和制造工艺的可行性,此后完成了 25MW 被动旋转磁通压缩脉冲发电机的电磁设计、制造、静态实验、空载特性实验、短路实验和驱动电磁轨道炮的连发实验^[5].

本文在分析了此类被动式脉冲发电机基本原理基础上,在工程精度允许的范围内,给出从简化模型出发推导的设计公式,实验研究了电机的运行特性.根据脉冲发电机的设计参数对实验中励磁减速现象用涡流损耗原理进行解释,给出解决该问题的重复脉冲励磁方法、本文为发电机短路实验和驱动电磁轨道炮连发实验打下基础.

2 电机物理设计

精确的电机分析与设计必须把电机的时变电磁场计算、瞬态机械应力计算与热力学计算三者结合起来.为了计算这类脉冲发电机随位置而变化的特性,必须以电机初始位置为起点发展一套有限元电磁暂态程序.程序中要考虑到电机的相对运动,只有这样才能精确计算任一时刻电机电感和任一点电机的受力,然而这种方法的计算量相当大.

2.1 电机内感的计算

利用电磁计算的直观图解法,计入导线内感、气隙漏感、端部漏感等几部分,积分出 p 个绕组并联后的电机电感 L 为^[3]

$$L = \frac{\mu_0 N^2 \cdot l}{p} \cdot \left(1 + \frac{l_E}{l}\right) \left[\frac{1}{2} - \frac{b}{\alpha \cdot r} + \left(\frac{b}{\alpha \cdot r}\right)^2 \ln \left| \frac{\alpha + \frac{b}{r}}{\frac{b}{r}} \right| + \ln \left| \frac{\frac{\pi r + \frac{b}{r}}{p r + \frac{b}{r}}}{\alpha + \frac{b}{r}} \right| \right] + \frac{\mu_0 N(l + l_E)}{4\pi p} \quad (1)$$

这里, N 为一个电枢绕组的匝数, l 和 l_E 分别为电机气隙绕组的有效长度和端部长度, b 为导线厚, r 为气隙处半径, p 为电机极数, 2α 为每极电枢绕组所占弧度.

2.2 电机气隙绕组放电时的力学计算

一个气隙绕组的电流为 I 时,线圈的磁场储能为

$$W_m = \frac{1}{2} (pL) \cdot I^2$$

由虚位移原理,可求绕组受切向剪力:

$$F = \frac{\partial W_m}{\partial (r\alpha)}$$

$$= \frac{I^2}{2r} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left\{ \left(\mu_0 N^2 \cdot l \right) \cdot \left(1 + \frac{l_E}{l} \right) \left[\frac{1}{2} - \frac{b}{\alpha \cdot r} + \left(\frac{b}{\alpha \cdot r} \right)^2 \ln \left| \frac{\alpha + \frac{b}{r}}{\frac{b}{r}} \right| + \ln \left| \frac{\frac{\pi r + \frac{b}{r}}{p r + \frac{b}{r}}}{\alpha + \frac{b}{r}} \right| \right] \right\}$$

$$\Rightarrow F = \frac{I^2}{2} \mu_0 N^2 \cdot l \cdot \left(1 + \frac{l_E}{l}\right) \left[\frac{2b - ar}{(\alpha \cdot r)^2} - \frac{b^2}{2(\alpha \cdot r)^3} \ln \left| \frac{\alpha + \frac{b}{r}}{\frac{b}{r}} \right| \right]$$

单位粘接的线圈面积 S 所受剪切力为

$$P_s = \frac{F}{S} = \frac{I^2}{2S} \mu_0 N^2 \cdot l \cdot \left(1 + \frac{l_E}{l}\right) \left[\frac{2b - ar}{(\alpha \cdot r)^2} - \frac{b^2}{2(\alpha \cdot r)^3} \ln \left| \frac{\alpha + \frac{b}{r}}{\frac{b}{r}} \right| \right] \quad (2)$$

2.3 负载下铝筒绝热温度升高计算

假设电机放电时转速不下降,连发8个电脉冲时的涡流损耗能量全部注入铝筒,可使铝筒绝热温升^[4]:

$$\Delta t = \frac{8PT}{cm} = \frac{8Tl}{cm} \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \cdot \frac{(pNI)^2}{\pi Df} \quad (3)$$

这里,8为一次连发电脉冲个数, $T = 1.9 \text{ ms}$ 为电脉冲周期, $c = 0.211 \times 4.2 \times 1000 = 886 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, $m = 19.54 \text{ kg}$ 分别为铝筒比热和质量,代入(3)以最苛刻的运行条件和相关参数,放电电流 $I = 52000 \text{ A}$, $\omega = 900(4298 \text{ rpm})$, $l = 0.59 \text{ m}$, $f = 0.72$, $p = 4$, $N = 5$, $D = 0.302 \text{ m}$, $\sigma = 3.82 \times 10^7 / (\Omega \cdot \text{m})$ 进行数值计算,得: $\Delta t = 11.3^\circ\text{C}$ 。

2.4 电机电磁设计结果

由以上设计公式(1)~(3),参考[6]进行电机的磁路设计^[4],设计计算得出被动旋转磁通压缩脉冲发电机的定子和转子主要参数如下:

转子主要参数

外直径:0.298m;有效长度:500mm;重量:270kg;
 转动惯量:2.0kg·m²;储能:0.2MJ(4298rpm);励磁电流:600A;
 励磁绕组匝数:36匝/极;总励磁磁势:86.4kA;铁芯最高磁密:2.5T;
 励磁绕组电感:11.2mH;励磁绕组电阻:140mΩ;励磁绕组时间常数:80ms;
 励磁功率:40kW;单边磁拉力(1mm偏心):56kg;铝筒最高温升:11.3℃

定子主要参数

定子外径:462mm;定子内径:315mm;铁芯长度:570mm;
 电枢绕组导体数:5根/极;每根导体股数:1×5mm²,16根;电枢绕组电感:4.04μH;
 电枢绕组电阻:0.39mΩ;空载电压:250V(4298rpm);短路电流:68.365kA(4298rpm);
 峰值功率:17.1MW;电枢切向应力:0.153kg/mm²;定子轭最大磁密:1.01T

该设计为节省实验成本,铁芯套用我国现有工业尺寸,转子铁芯最高磁密高达2.5T,转子旋转时,转子上的直流励磁在定子轭上产生最大交流变化磁密为1.01T,这将有相当一部分励磁磁通渗透进定子外铁壳,产生涡流损耗,导致转子转速明显下降。

3 被动旋转磁通压缩脉冲发电机的实验

3.1 电枢绕组粘接强度模拟实验

物体的粘结强度是由多种因素决定的,例如粘结剂、粘接表面的处理工艺、粘接时压力等.为了真实地模拟电枢绕组导体的受力状况,考验导体的粘接强度,我们利用一单匝线圈粘在一平面铁板上,其表面处理工艺和压力基本上与实际情况相同,用电容器对其放电,使单匝线圈两条边在电流作用下,相互排斥产生的切向应力远大于实际电枢绕组所遭受的切向应力.实验结果表明在放电电流为 105kA 时,导体上承受切向力为 1.98T.这时导体粘结表面切向应力为 $0.83\text{kg}/\text{mm}^2$,采用自力-4 环氧树脂粘结没有破坏,此值已远大于实际电枢绕组所遭受的剪切应力 $0.15\text{kg}/\text{mm}^2$,有大约 5.5 倍的安全系数,可以弥补实际绕组大面积粘结可能造成的粘结强度下降.

3.2 电机的动平衡实验和转子应力测试

电机转子加工好以后,首先在动平衡实验机上进行静平衡和动平衡调试及轴系临界转速的测定.整个电机安装好以后又在现场对整个系统进行了动平衡调试和转子危险截面的应力测试.

测试结果:动平衡调试结果达到国标 2.5 级;轴系临界转速 20000 rpm;转子最大应力 110MPa(不包括放电应力);电机轴承轴向振动峰峰值 $< 5\mu$;电机轴承径向振动峰峰值 $< 5\mu$;地基振动峰峰值 $< 1\mu$;这一测试结果表明电机轴系刚度、电机加工和装配精度都是比较高的.

3.3 电机绕组参数的静态测试实验

电机研制完成后,我们用电桥对电机内电感、电阻进行了精确测试.电机定、转子绕组的电感和电阻用电感电桥进行测量的结果如下:

定子电枢绕组:

转子装上之前,电感 $6.33\mu\text{H}$;转子装上以后,电感 $4.05\mu\text{H}$;定子电阻 $< 1\text{m}\Omega$,由(1)式计算电感 $4.04\mu\text{H}$,与设计计算吻合相当好.

转子励磁绕组:

电感 10.2mH ,励磁设计计算为 11.2mH ,吻合很好;电阻 $116\text{m}\Omega$.

3.4 电机空载特性测试

电机完成其绕组参数的静态测试后,我们逐渐增加脉冲发电机的转速 n 和励磁电压 V_f 与电流 I_f ,测量脉冲发电机空载输出电压 U ,测试结果如表 1 所示,根据测试结果绘制的励

表 1 脉冲发电机空载输出电压测试

Tab.1 The measured load-free output voltage of the compulsator

n/rpm	1842	1842	1842	1842	1842	1842	3070	3070	3070	4280
V_f/V	10	20	30	40	50	60	70	80	90	90
I_f/A	75	150	230	310	385	460	520	600	700	700
U/V	24.5	45.5	60	73.5	87.5	98	175	178.5	182	253

磁曲线如图 2 所示.从图 2 看出,在转速 $n = 1842\text{rpm}$ 时,空载输出电压随励磁电压 V_f 线性增加;转速增加到 $n = 3070\text{rpm}$ 时,设计计算空载输出电压点重合在所测量的空载输出电压曲线上,表 2 为设计值与实验值在转速 $n = 3070\text{rpm}$ 的对照表.从表 2 可看出,电机磁路设

计与实验吻合相当好.图 2 所示方型点为转速增加到 $n = 3070\text{rpm}$ 时,励磁电流 $I_f = 600\text{A}$ 的工作点.

表 2 设计值与实验值的对照表
Tab.2 The measured Value vs. the design value

	设计值	实验值
n/rpm	3070	3070
I_f/A	600	600
U/V	178.5	179.1

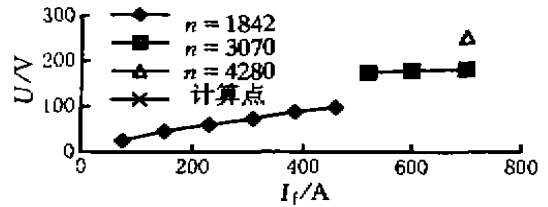


图 2 被动旋转磁通压缩脉冲发电机的空载励磁曲线

Fig.2 Load-free Output Voltage of the compulsator vs. its exciting current and speed

3.5 电机短路电流的推算

根据所测定的电机参数,在转速 $n = 3070\text{rpm}$ 时,空载电压 $U = 253\text{V}$ 和内阻 $R_i = 0.39\text{m}\Omega$, 内感 $L_i = 4.05\mu\text{H}$, 最大短路电流 $I = \frac{U}{\sqrt{R_i^2 + (\omega L_i)^2}} = 68\text{kA}$, 可以满足驱动电磁炮进行连发实验.

4 结论

(1) 电机绕组电感电阻测试结果与设计值基本相符,说明设计计算方法是正确的.尤其所给的定子电枢绕组电感的解析设计计算公式具有相当精确度,比之于国外的三维场算法,具有简明、物理意义直观明确等特点.

(2) 空载特性与设计值吻合相当好,说明磁路计算是正确的.

(3) 电机的气隙电枢绕组利用迭片的电枢结构来代替国内难以做到的长方形截面铜编织线,可以在一定程度上有效地消除电流的趋肤效应.

(4) 在 25MW 电机实验时发现,当转子直流励磁加上时,转子转速明显下降,此后转子直流励磁改为重复脉冲励磁,即需要发电机电枢绕组发脉冲时加励磁,发后去励磁.这样解决了加转子励磁转子转速下降这一问题.从涡流损耗这一角度看,这是在旋转的转子上加直流励磁时,在定子铁壳与临近的金属构件产生的涡流损耗所致,定子极最大磁密为 1.01T,会有相当一部分励磁磁通渗透进定子外铁壳,产生涡流损耗.

(5) 电机基本上达到了设计参数,重复脉冲励磁方法解决了实验中出现直流励磁减速这一问题,实验空载电压最大可达到 253V,最大短路电流 68kA,可以克服炮弹与电磁轨道的摩擦力,驱动电磁轨道炮进行连发实验.

参 考 文 献

- [1] Pratap S B, Driga M D. Compensation in pulsed alternators[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(1):372~377.
- [2] Spann M L, Pratap S B, Werst M D, Walls W A, Fulcher C W. Compulsator research at The University of Texas at Austin-An Overview[J]. IEEE

- Transactions on Magnetics, 1989, 25(1):529.
- [3] 李格. 被动补偿脉冲发电机气隙绕组电感的解析计算[J]. 核聚变与等离子体物理, 2000, 20(2):125 - 128.
- [4] 李格. 补偿电机研究[D]. 合肥:中国科学院等离子体物理所, 1990.
- [5] 李格. 旋转磁通压缩脉冲发电机的理论与实验研究[D]. 合肥:中国科学院等离子体物理所, 1993.
- [6] 陈世坤主编. 电机设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.

Design and Experiments of the 25MW Passive Compulsator

LI Ge¹, WANG Yong¹, LIU Bao-hua², PAN Yuan²,
QIN Wen-ding², Zhang Yan-biao², Chen Qiang², Huang He²

(1. National Synchrotron Radiation Laboratory of USTC, Hefe 230029, China)

(2. Institute of Plasma Physics, The Chinese Sciences Academy, Hefei 230031, China)

Abstract: This paper presents the design and experiments of a 25MW passively compensated pulsed Alternator (compulsator) for repetitive electromagnetic launchers. The design is based on the analysis solutions to the loss of eddy current in the shield, the inductance and the stress of the airgap armature coils, which are checked respectively by the static measurement to the inductance of the airgap coils and the load-free characters of the fabricated machines.

Key words: 25MW passive compulsator; electromagnetic design; measurement of the airgap armature coils; load-free characters of the machine