

高压变频器试验用同步发电机组的设计特点^{*}

王伟光^{1,2,3}

- (1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 哈尔滨电气动力装备有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150040;
3. 黑龙江省核主泵工程技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 介绍了高压变频器试验用同步发电机组电磁设计和结构设计等方面的特点, 基于二维时域有限元法对该同步发电机组两个电机的谐波分布、气隙磁场时间分布、起动过程中阻尼环电密时间分布等电磁特性进行计算和分析。通过同步发电机机组样机型式试验验证了设计方案的可行性, 为该类高压同步发电机组在高压变频器领域进一步应用奠定基础。

关键词: 高压变频器; 同步发电机; 电磁设计; 电磁弹射

中图分类号: TM 921.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)07-0007-06

Design Feature of Synchronous Generator Set for High Voltage Frequency Conversion Test^{*}

WANG Weiguang^{1,2,3}

- (1. College of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. Harbin Electric Power Equipment Company Limited, Harbin 150040, China;
3. Engineering Research Center of RCP Heilongjiang Province, Harbin 150040, China)

Abstract: The characteristics of electromagnetic design and structural design of synchronous generator for high voltage frequency converter were introduced. Based on the two-dimensional time-domain finite element method, the electromagnetic characteristics of the two electrical machinery, such as harmonic distribution, air gap magnetic field time distribution, and the starting process of the damping ring, were calculated and analyzed. The feasibility of the design scheme was verified by the analysis of the motor type test of the synchronous generator, which laid the foundation for the further application of this kind of high voltage synchronous generator set in the field of high voltage frequency converter.

Key words: high voltage frequency converter; synchronous generator; electromagnetic design; electromagnetic launcher

0 引 言

电磁弹射用电力变换系统、高压变频器等设备进行型式试验时, 需要电动机-发电机系统验证可靠性^[1-5]。

大功率高压变频器一般都采用定制模式, 由

输入输出、整流、中间直流、滤波、逆变和控制六大部分构成^[6]; 需对其进行出厂型式试验, 通过模拟等效负载来考核变频器的动态响应、温升、抗干扰及可靠性^[7]。

传统有三种考核方式: 阻感系统、感抗系统和电动机-直流发电机系统。阻感系统由三相电感

^{*} 基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX06002002-21)

作者简介: 王伟光(1981—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为核电站大型电机设计。

与电阻 Y 接构成,感抗系统由三相纯电感 Y 接构成;前者可对静态性能考核,后者侧重动态性能考核。这两种系统易搭建、成本低,但变频器无法达到额定工作状态下的电流值。变频器的整流部分工作在工频,损耗及发热量较小;而逆变部分相对频率较高,因此其主要元件 IGBT、IGCT 的损耗及发热量相对较大。通过电动机-直流发电机系统,使变频器工作在额定电流状态下,可以较全面地考核逆变部分发热元件的性能,降低高压变频器相关部件热损伤的运行风险^[8-10]。

直流发电机可以将电能通过直流母线回馈至电动机变频器侧,变频器的负载大小可以采用其调节励磁电流来实现。由于直流电压在过低的工况下,逆变很难成功^[11-16],所以变频器的模拟温升试验对于矢量变频器零转速或者较低转速的试验是不适合的。在 GB/T 12668.4—2004《调速电气传动系统》标准中温升试验要求在最大负载下,以最低转速、基本转速、最大转速进行温升试验;对于电机负载而言,最低转速时达到最大转矩,此时变频器工作在最大电流状态^[17-18]。因此,需要开发一类可以在较低频率及转速试验用的同步发电机组,可互为电动机、发电机,降低试验系统复杂性。

新型同步发电机组全载试验系统由两台同容量不同电压等级的同步电机通过联轴器串联构成,任意一台作为电动机,则另一台作为发电机。此系统可以同时进行两个电压等级的高压变频器型式试验,也可以通过直流母线实现能量回馈,确保了电能的循环利用,对新型高压变频器拓扑结构提供了有效验证手段^[19-20]。

1 设计特点

同步发电机组在电磁及结构设计时,应充分考虑变频器的工作特点,即负载特性、电源特性和温升。

负载特性是考核变频器电机负载的转矩特性,与电机速度成正比例负载特性,与电机速度平方成反比例负载特性,阶梯仿真等用户自定义负载特性。

电源特性是考核变频器电机负载的波形特性,变频器输出电压不平衡度、输出电压变化率(dU/dt),负载电机的绝缘、共模电压限制及谐波

含量约束。

温升是考核变频器达到工作电流时的稳定温度差,逆变部分的主要元件 IGBT 或 IGCT 最大结温约 150 ℃,若超过则变频器的逆变过程会失败。

10 000 V 试验电机以另一台 6 000 V 电机为负载,试验电机为电动机状态,负载电机为发电机状态,两电机采用刚性法兰相连接,组成一套试验机组。做 6 000 V 变频器试验时,6 000 V 电机为试验电动机,10 000 V 电机为负载发电机,发电机组连接方式如图 1 所示。

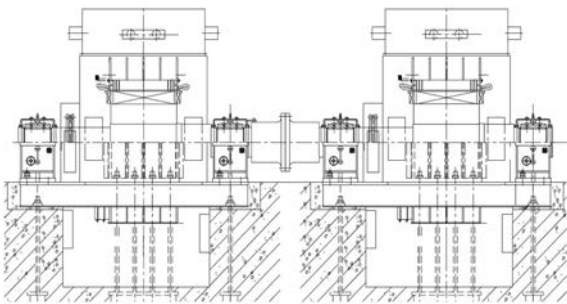


图 1 高压变频器试验用同步发电机组

同步发电机组的两个电机均为凸极同步电机,可以互为牵引,两者电气性能参数如表 1 所示。

表 1 同步发电机组电气性能参数

参数	TBP3500-12/2800	TBP3500-12/2800
额定功率/kW	3 500	3 500
额定电压/V	6 000	10 000
额定电流/A	352	211
功率因数	1.0	1.0
频率/Hz	6	6
转速/(r·min ⁻¹)	60	60
极数	12	12
相数	3	3
绝缘等级(定/转)	F/F	F/F

2 电磁设计

为简化分析,对两个同步电机做如下假定^[21]:

- (1) 把问题作为二维磁场问题来处理。
- (2) 不计磁饱和率,主极铁心取磁极钢板在磁化曲线线性部分时的磁导率。
- (3) 计算直轴和交轴电枢磁场时,电枢磁势

用电枢表面的正旋电流片来代替。对于直轴电枢磁势,电流片的电密为式(1),对于交轴电枢磁势,电流片的电密为式(2)。

$$J = J_m \sin(x) \quad (1)$$

$$J = J_m \cos(x) \quad (2)$$

式中: J_m ——电流密度幅值;

x ——电枢表面各点至主极中心线的距离。

(4) 电枢表面为光滑,不计曲率的影响。

(5) 在极弧范围内,气隙用式(3)表达。

$$\delta(x) = \delta + (\delta_{\max} - \delta) \left(\frac{2x}{\alpha\tau} \right)^2 \quad (3)$$

式中: δ ——最小气隙;

$\delta_{\max}$ ——极弧下的最大气隙;

α ——极弧系数;

τ ——极距。

2.1 基本方程

在整个求解域内,向量磁位 A 满足二维泊松方程:

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu_0 J \quad (4)$$

式中: J ——电流密度,在非截流区, $J=0$ 。

2.2 二维求解域剖分

同步发电机组由两个电机构成。这两个电机采用同样的定转子冲片,同样的绕组接线和节距。因此采用同一个求解域。剖分单元区域如图2所示。

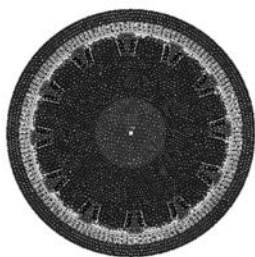


图2 电机单元剖分

2.3 二维稳态磁场分析

6 kV 发电机磁力线和磁密分布如图3所示, 10 kV 发电机磁力线和磁密分布如图4所示, 10 kV 发电机2倍过载7 000 kW时磁力线和磁密分布如图5所示。由图3~图5可见,当电机功率均为3 500 kW时,6 kV和10 kV两个工况下,定转子磁密分布基本一致;当10 kV下2倍过载时,转子齿、定子齿均出现局部饱和的情况,旋转方向

转子齿前端磁饱和情况比非过载时6 kV和10 kV均严重的多。

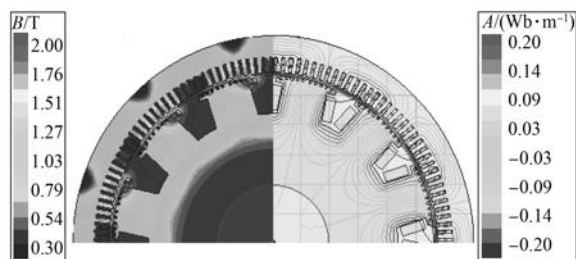


图3 6 kV 磁力线、磁密云图

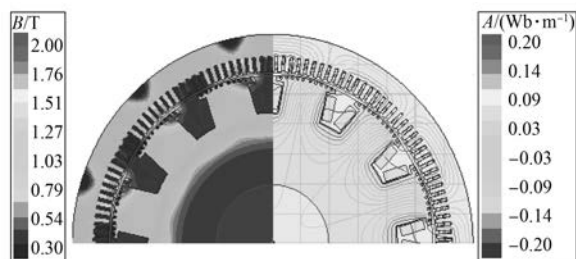


图4 10 kV 磁力线、磁密云图

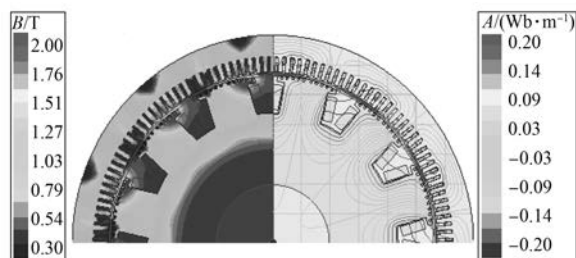


图5 10 kV 2倍过载磁力线、磁密云图

2.4 二维时域磁场分析

基于二维时域有限元法^[21],对同步发电机组的气隙磁密进行磁场分析,得出随时间和旋转角度气隙磁密三维分布,并进行了傅里叶分解^[22-26],得到各次谐波。

6 kV 发电机磁力线和磁密分布如图6所示, 10 kV 发电机磁力线和磁密分布如图7所示, 10 kV 发电机2倍过载7 000 kW时磁力线和磁密分布如图8所示。由图6~图8可见,当电机功率均为3 500 kW时,6 kV和10 kV两个工况下,气隙磁密分布基本一致,各次谐波基本一致;当10 kV下2倍过载时,气隙磁场幅值有所提高,气隙波形变差,经谐波分解高次谐波幅值有所提高,

发电质量下降。

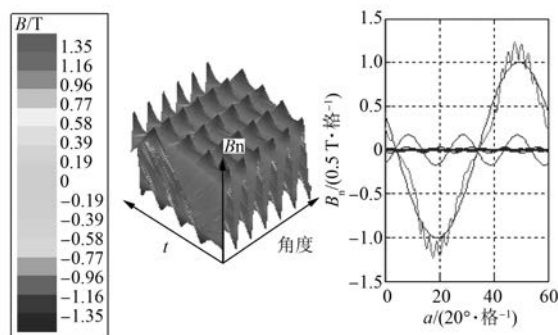


图6 6 kV 气隙磁场及谐波分解

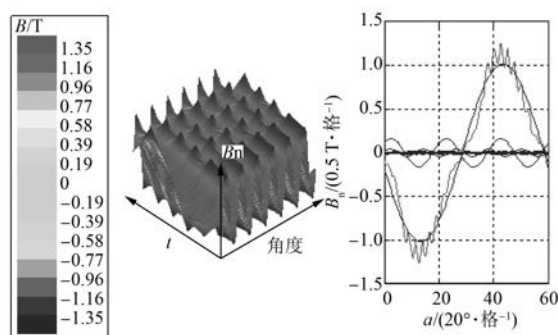


图7 10 kV 气隙磁场及谐波分解

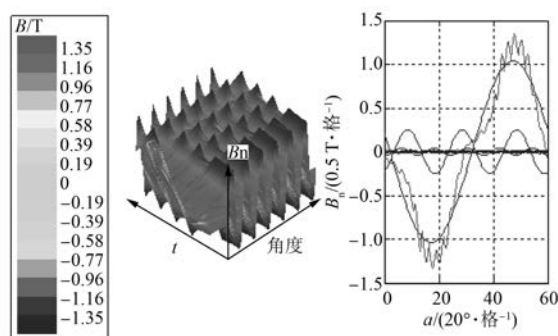


图8 10 kV 2倍过载气隙磁场及谐波分解

图9为三种工况气隙磁密FFT分解图,由图9对比可知10 kV 2倍过载谐波含量较高。

2.5 定子接线分析

根据选定的定子槽数和转子磁极,分析定子绕组在不同节距下,定子齿谐波的分布,如图10所示。

图10为节距域齿谐波关系图,根据图10,可知节距为9的方案定子齿谐波最小,进而确定了两个发电机的绕组接线,如图11所示。

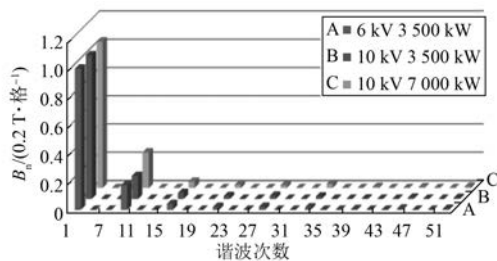


图9 三种工况气隙磁密FFT分解图

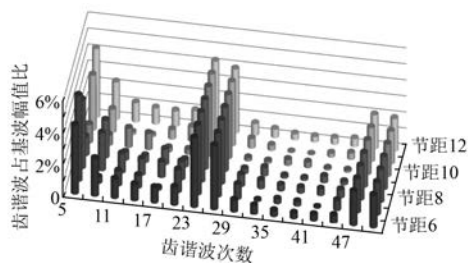


图10 节距域齿谐波关系图

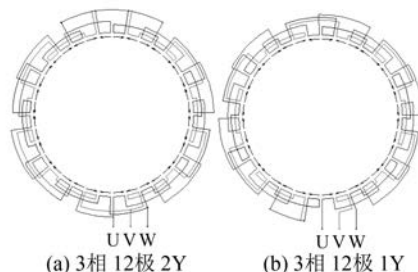


图11 发电机组绕组接线图

2.6 起动过程分析

根据以上有限元分析,进一步得出了,同步发电机在3个工况下的起动过程定子三相电流,如图12所示。6 kV下3500 kW工况与10 kV下7000 kW的起动电流基本一致,10 kV下3500 kW的起动电流较小。

在起动过程中,转子阻尼环将有较大的电流冲击,有必要通过有限元法,分析其冲击电流的幅值和持续时间。三种工况起动时阻尼环电密振荡如图13所示。由图13可见10 kV下2倍过载时,阻尼环电密最大值约为15 A/mm²,6 kV下3500 kW阻尼环电密最大值约为10 A/mm²,10 kV下3500 kW阻尼环电密最大值约为9 A/mm²。三种工况下,阻尼环电流均在约0.6 s完成振荡,即同步发电机转子与定子旋转磁场同

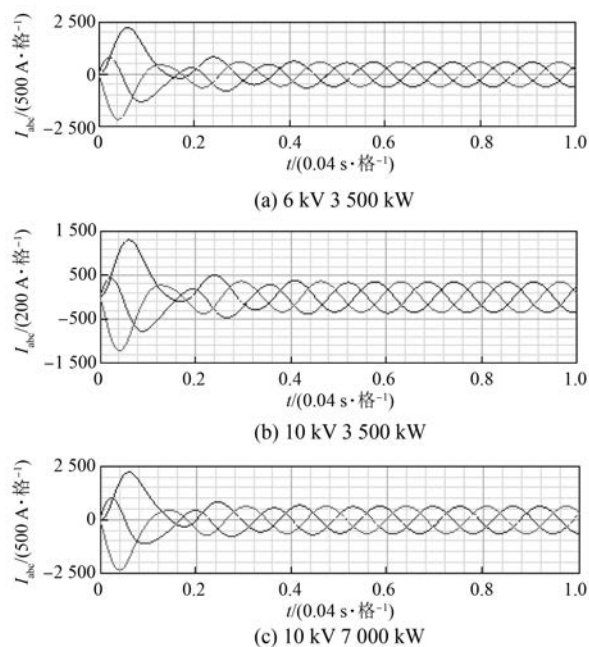


图 12 同步发电机起动过程定子三相电流图

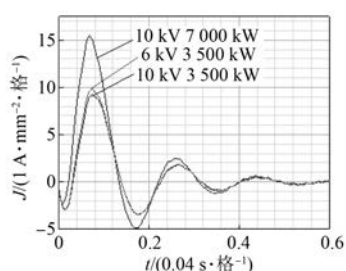


图 13 阻尼环电密振荡时间分布图

步, 阻尼环无法感应出电流, 此时阻尼环电密为 0。

在起动过程中, 得出阻尼环与磁链之间的变动关系, 如图 14 所示。10 kV 下 2 倍过载时, 达到相同阻尼环电密所需要磁链变化区域最大, 6 kV 下 3 500 kW 阻尼环所需要磁链变化区域局中, 10 kV 下 3 500 kW 阻尼环所需要磁链变化区域最小, 10 kV 下 7 000 kW 时磁通最大。

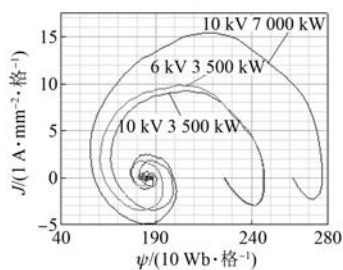


图 14 阻尼环电密与磁链关系图

3 结构设计

同步发电机为卧式结构, 电机的中心高为 900 mm。两电机非传动端轴端均设置码盘。每台电机带 2 个球面座式滑动轴承和 1 个底板。配有高压油顶起和润滑油站, 电源引出线位于机座下部。

定子铁心采用直槽结构, 铁心的径向通风沟宽为 7 mm。定子线圈为双层叠绕组, 1 路 Y 接和 2 路 Y 接。定子接线采用铜环结构, 6 根引出线, 绕组内埋设 9 支三线制铂热电阻温度计 Pt100, 用来检测定子线圈和铁心温度, 进风口设 2 支铂热电阻, 出风口设 1 支。

主轴采用锻钢 C55E+N。磁极线圈带有散热匝。阻尼绕组采用全阻尼系统, 阻尼环之间采用 Ω 形连接片的软连接结构, 并在磁极之间装有元宝形撑块。匝间绝缘采用 2 层 0.13 mm 厚上胶 Nomex 纸, 在线圈的上、下表面和内侧对地主绝缘均使用 Nomex 纸固化成型。磁极线圈套入铁心后, 用浸胶涤纶毡和环氧玻璃布板将端部和其他所有缝隙塞满, 加热固化后使线圈、铁心及上、下托板成为一体。集电环采用装配式结构, 集电环的材料为不锈钢。

电机传动端和非传动端均使用 $\Phi 600$ mm 座式球面轴承, 轴承在轴瓦的底部开有高压注油孔, 通过高压油管路可以始终向轴承内注入高压油, 以便提高电动机的动态特性。每个轴承装有一个电接点压力式温度计和一个双支铂热电阻温度计 (Pt100), 可以在控制室内和现场监测轴承的运行温度。

电动机装有大外罩将定子罩住。集电环装配设有与机座外罩连接的防护罩, 连接处用轴封板密封。

电动机的通风方式为密闭循环强迫通风, 电机本体不装风扇, 依靠外装风机构成循环回路。冷却空气由定子上部两侧进风口进入电机内部, 热空气从定子中部出风口排出, 然后经水-空冷却器冷却后再进入电机内。

4 试验研究

同步发电机组安装在某高压变频器试验中心, 进行多项验收试验。机组实物布置如图 15

所示。



图 15 型式试验机组实物布置

两个同步发电机型式试验数值对比如表 2 所示,其中,等效负载温升试验仅做 6 kV 下 3 500 kW 工况。

表 2 同步发电机组型式试验数值对比表

参数	TBP3500-12/2800	TBP3500-12/2800
额定功率/kW	3 500	3 500
额定电压/V	6 000	10 000
励磁电流(空载)/A	295	319
励磁电流(短路)/A	330	320.5
定子直流电阻 U/ Ω	0.287 8	0.729 0
定子直流电阻 V/ Ω	0.287 5	0.730 0
定子直流电阻 W/ Ω	0.287 0	0.730 0
转子直流电阻/ Ω	0.233 7	0.232 7
定子对地绝缘电阻/M Ω	2 000	1 000
转子对地绝缘电阻/M Ω	500	150
定子耐压试验/V	13 000	21 000
转子耐压试验/V	1 500	1 500
匝间耐压试验 3 min/V	7 800	13 000
定子绕组温升/K	55.6	
转子绕组温升/K	89.8	
试验环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	25.1	27.9

技术规格书要求定子绕组温升不大于 105 K,定子铁心温升不大于 100 K,转子绕组温升不大于 110 K,其余要求执行国家标准 GB 755,从型式试验结果可知,设计参数符合技术要求,方案还有一定的安全余量。

5 结 语

通过以上研究及测试,分析后得出如下结论:

(1) 相比电动机-直流发电机,高压变频器试验用同步发电机组结构简单紧凑,系统可靠性

较高。

(2) 选择合理的槽配合、定子接线方式,可以较好抑制发电机的齿谐波,提高发电波形质量。

(3) 同步发电机设计时,应关注起动过程阻尼环电密冲击幅值,防止阻尼环过热损坏。本方案同步电机起动冲击过程持续时间为 0.6 s。

(4) 同步发电机组,应优先选择同样槽数、转子极数和相同的中心高,两个电机采用同一套冲片及定、转子部套模具,降低成本和维护复杂度。

(5) 高压大容量变频器用同步发电机组等效负载温升试验满足技术要求,为冲击工况留有安全余量。

【参 考 文 献】

[1] 徐颖,王春岩,丁雅丽,等.一种可变电电压等级恒功率输出的变流器实现方法[J].变频器世界,2011(8): 90-94.

[2] 苏子舟,张涛,张博,等.导弹电磁弹射技术综述[J].飞航导弹,2016(8): 28-32.

[3] 马伟明.舰船综合电力系统中的机电能量转换技术[J].电气工程学报,2015,10(4): 3-10.

[4] 纪锋,付立军,王公宝,等.舰船综合电力系统飞轮储能控制器设计[J].中国电机工程学报,2015,35(12): 2952-2959.

[5] 李小民,李会来,向红军,等.飞机电磁弹射系统发展及其关键技术[J].装甲兵工程学院学报,2014(4): 1-7.

[6] 李亚军,刘海全,徐开亚.高压大功率变频器研发探究[J].低碳世界,2016(28): 95-96.

[7] 刘斌,张登山,STEPHAN B,等.西门子新一代多功能型模块化多电平高压变频器[J].电气传动,2016,46(4): 22-25.

[8] 王永鑫.中高压变频器冷却方案比较和选型分析[J].电气传动自动化,2015(3): 47-51.

[9] 蔡定国,杨祥江,唐金权.高压变频器用水冷移相变压器水力计算研究[J].变压器,2016(9): 5-7.

[10] 冯芬,胡清.级联型高压变频器的散热器优化设计策略[J].电力电子技术,2016,50(8): 86-88+93.

[11] 胡志涛,李兴鹤.级联型高压变频器输出电压观测器研究与实现[J].电源学报,2016,14(5): 137-144.

[12] 王书秀,吴振兴,孙乐,等.一种能量回馈的高压变频器失电跨越控制策略[J].电气传动,2016,46(8): 11-15.

(下转第 25 页)