

DOI: 10.7652/xjtuxb201907022

舰船主变流机组火花试验分析

蒋超利, 吴旭升, 高崑, 冯国利, 孙盼

(海军工程大学电气工程学院, 430033, 武汉)

摘要: 针对某舰船主变流机组火花偏大导致的输出功率和转矩不足问题,研究了火花偏大对机组运行特性的影响。通过等效电路模型构建了机组同步电机、直流电机的数学模型及同步电机和直流电机的机械耦合方程,建立了主变流机组数学模型,仿真试验表明,主变流机组模型在额定工况下对机组转速和端电压幅值的控制效果较好。通过分析直流电机电枢电流换向过程,明确了主变流机组火花的产生机理。将 Cassie 电弧近似为火花数学模型,并将其串联至机组直流电机电枢回路中,实现了机组火花偏大的虚拟注入,仿真试验结果表明:在相同负载条件下,火花偏大会使电枢电流下降、纹波系数增加。对一台 4 kW 主变流机组原型样机进行了试验,结果表明:随着机组负载的增大,无论是否存在火花偏大问题,直流电机电枢电流纹波系数都会减小;在同等负载条件下,火花偏大时直流电机电枢电流的纹波系数比正常工况下的纹波系数大;Cassie 电弧模型正确且有效。该研究可为机组火花偏大的在线监测及故障诊断提供一种参考。

关键词: 主变流机组;火花;Cassie 电弧模型;纹波系数;故障诊断

中图分类号: TM306 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)07-0160-08

Spark Test Analysis for Ship Main Converter Unit

JIANG Chaoli, WU Xusheng, GAO Wei, Feng Guoli, SUN Pan

(College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient output power and torque caused by the large spark of a ship main converter unit, the influence of large spark on the operating characteristics of the unit was studied. The mathematical model of synchronous motor and direct current (DC) motor and the mechanical coupling equation of synchronous motor and DC motor were constructed by the equivalent circuit model, and the mathematical model of main converter unit was established. The simulation experiment showed that the main converter unit model had better control effect on the unit speed and terminal voltage amplitude under rated conditions. By analyzing the commutation process of the DC motor armature current, the mechanism of spark generation in the main converter unit was clarified. Approximating the Cassie arc as a spark mathematical model, it was connected in series to the armature circuit of the DC motor to realize the virtual injection of large sparks. The simulation result showed that under the same load conditions, the spark bias assembly caused the armature current to drop and ripple factor to increase. The test results of a prototype of a 4 kW main converter unit showed that with the load of the unit increased, the armature current ripple coefficient of the DC motor decreased regardless

收稿日期: 2018-10-16。 作者简介: 蒋超利(1993—),男,实验员;吴旭升(通信作者),男,教授。 基金项目: 湖北省自然科学基金创新群体资助项目(2018CFA008)。

网络出版时间: 2019-03-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190325.2116.002.html>

of whether there was a problem of large sparks. Under the same load condition, the ripple coefficient of the armature current of the DC motor was larger than that of the normal operating condition when the spark was too large, so the correctness and effectiveness of the Cassie arc model was verified. This study can provide a reference for on-line monitoring and fault diagnosis of large sparks in the main converter unit.

Keywords: main converter unit; spark; Cassie arc model; ripple coefficient; fault diagnosis

主变流机组是舰船上重要的交直流应急供电设备,对舰船的性能和安全有着举足轻重的影响。调查发现,某舰于 2015 年和 2017 年分别出现了由机组直流电机火花偏大导致的输出功率和转矩不足现象,甚至是转子烧毁等问题,对该舰的日常战备训练和安全运行造成了一定的影响,也对如何在线连续监测机组换向火花提出了新的要求。

主变流机组主要由直流电机和同步电机串联组成,通过控制系统调节直流电机和同步电机的运行状态。通常情况下,机组由直流电机启动,当直流电机转速达到额定转速时,同步电机并网运行。在正常工况下,同步电机从电网获取电能,拖动直流电机旋转,使直流电机处于发电状态,一方面给全舰部分直流负载供电,一方面给蓄电池组充电;在应急工况下,由蓄电池组向直流电机供电,带动同步电机旋转发电,保障全舰所有应急安全设备的用电需求。

目前,关于主变流机组的研究主要包括:文献[1]对主变流机组的动态性能进行了深入研究,分析了机组在并网、突加突卸负载和短路工况下的运行特性;文献[2-3]对机组中交流电机的励磁控制系统进行了研究,分析了机组状态切换及并网运行时励磁电流的变化特性,为机组同步电机励磁系统的设计提供了一定的参考;文献[4]建立了机组的数学模型,并根据数学模型仿真研究了机组在启动、并网和状态切换时的运行特点,但该模型直接将电机发电状态等效为电流源和导纳的并联,将电机电动状态等效为负载,难以对直流电机电枢电流、同步电机端电压等进行定量分析,与实际结果存在一定的误差。关于舰船主变流机组的火花偏大问题,目前尚未见到相关研究,而关于单独直流电机进行火花检测的研究则相对较多,主要包括:①对换向火花的光谱图像进行处理并提取火花图像特征参数,根据火花特征参数判断电机火花等级,但该方法对测试精度要求较高,火花特征参数不易确定^[5];②采用光电倍增管测定火花发光能量,但该方法需要拆开电机,不适用于对电火花的连续监测^[6];③用巅值伏特计测定火花的电压幅值,将电压的大小和火花等级对应起

来,但该方法容易受到外界环境因素的干扰,难以保证电压检测精度^[7]。

虚拟故障注入技术是一种灵活性较高的方法,相对于硬件故障注入技术,具有故障注入范围广、无需昂贵的附加硬件设备、不会对硬件造成任何损坏以及便于进行数据回收等优势。从上文可以看出,目前采用虚拟故障技术对主变流机组火花偏大的研究较少。因此,本文在前人的研究基础上,建立主变流机组数学模型,并根据数学模型搭建机组的仿真模型,通过引入 Cassie 电弧模型实现机组火花偏大的虚拟注入,通过仿真和试验研究了火花偏大对机组运行特性的影响,结果表明,火花偏大会使直流电机电枢电流下降、纹波系数增大。本文研究可为机组火花偏大的检测提供一种思路和参考。

1 主变流机组数学模型

主变流机组由直流电机、同步电机及其控制系统组成,如图 1 所示。主变流机组数学模型包括三部分,分别是直流电机数学模型、同步电机数学模型以及直流电机和同步电机的机械耦合方程^[8]。直流电机具有两套励磁绕组,它们分别是:固定励磁绕组,当发生掉磁故障时,可以有效防止电机因转速过大而发生飞车事故,提高机组运行的安全性能;控制励磁绕组,通过调节控制励磁电流的大小控制直流电机转速恒定,进而调节同步电机三相电压频率稳定。同步电机为普通三相电机,采用无刷励磁系统,省去了电刷、滑环等接触装置,提高了机组的可靠性和稳定性。由于三相同步电机数学模型较为简单,本文不再赘述,而是主要说明直流电机数学模型以

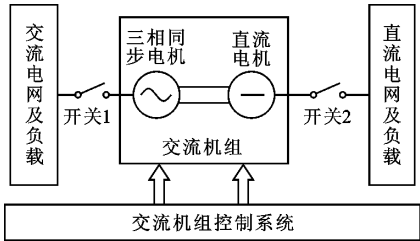


图 1 主变流机组总体结构图

及直流电机与同步电机的机械耦合方程。

1.1 直流电机数学模型

构建直流电机的等效电路模型,如图2所示。由图2可得直流电机电压方程为

$$\left. \begin{aligned} U_d &= E_a + I_a R_a \\ U_f &= U_d = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} + M_{fk} \frac{dI_k}{dt} \\ U_k &= R_k I_k + L_k \frac{dI_k}{dt} + M_{fk} \frac{dI_f}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: U_d 为直流电机的端电压; E_a 为反电动势; I_a 为电枢电流; R_a 为电枢电阻; U_f 为固定励磁绕组励磁电压; R_f 为固定励磁绕组励磁电阻; I_f 为固定励磁绕组励磁电流; L_f 为固定励磁绕组励磁电感; t 为时间; M_{fk} 为直流电机固定励磁绕组和控制励磁绕组之间的互感; I_k 为控制励磁绕组励磁电流; U_k 为控制励磁绕组励磁电压; R_k 为控制励磁绕组励磁电阻; L_k 为控制励磁绕组励磁电感。

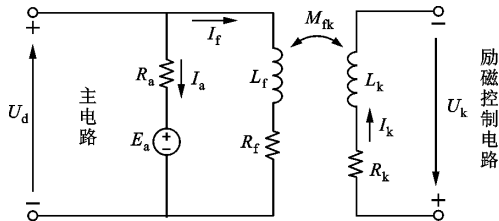


图2 直流电机的等效电路模型

根据直流电机的基本方程,可得反电动势为

$$E_a = K_e \phi \omega_m \quad (2)$$

$$\phi = k_1 I_f + k_2 I_k \quad (3)$$

式中: K_e 为反电动势常数; ϕ 为励磁磁通; ω_m 为机械转速; k_1 为固定励磁绕组励磁系数; k_2 为控制励磁绕组励磁系数。

同理,转矩方程为

$$\frac{1}{p} J \frac{d\omega_m}{dt} = T_z - T_s - B\omega_m \quad (4)$$

$$T_z = \frac{E_a I_a}{\omega_m} \quad (5)$$

式中: p 为极对数; J 为转动惯量; T_z 为直流电机电磁转矩; T_s 为同步电机电磁转矩。

1.2 直流电机与同步电机的机械耦合方程

直流电机拖动同步电机共轴旋转,转速相同,可以将同步电机看作是直流电机的机械负载,直流电机和同步电机转矩满足方程

$$T_z - T_s = \frac{G}{375} \frac{dn}{dt} \quad (6)$$

式中: G 为机组旋转部分的飞轮转矩; n 为机组转速。

2 主变流机组仿真研究

根据第1节的数学模型,可以建立主变流机组的仿真模型^[9-10],机组整体仿真框图如图3所示。

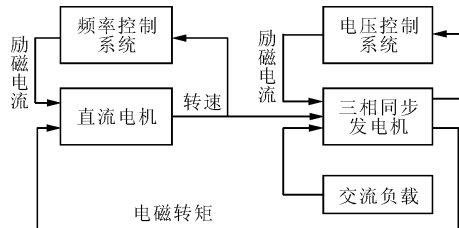
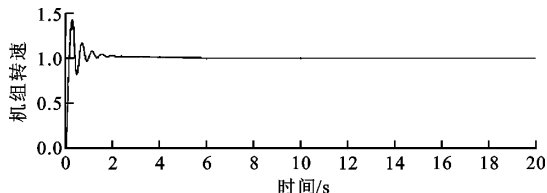


图3 机组总体仿真框图

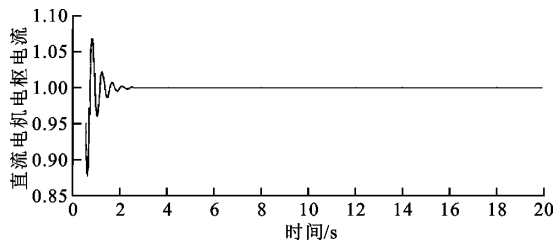
从图3可以看出,直流电机拖动同步电机共轴旋转,通过控制直流电机转速可以保持同步电机电压电流的频率稳定,通过控制同步电机的励磁电流可以保持端电压幅值的稳定。同步电机向交流负载供电,同时作为直流电机的负载。

当机组处于正常工况、同步电机接额定负载时,对机组运行状态进行仿真。设定仿真时间为20s,仿真结果采用归一化表示,得到机组转速、直流电机电枢电流、同步电机三相电流及同步电机端电压的波形,如图4所示。

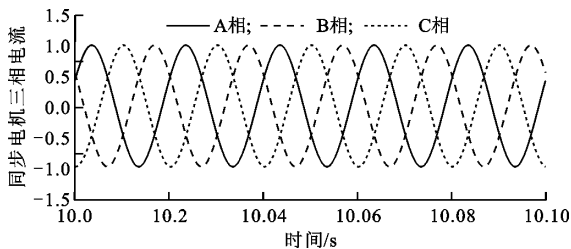
由图4可以看出,机组转速、直流电机电枢电



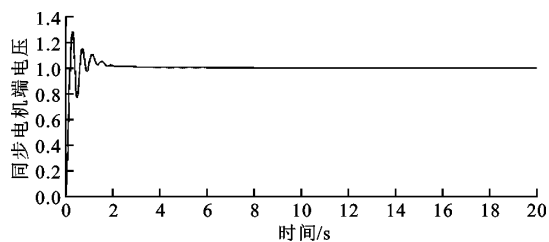
(a) 机组转速



(b) 直流电机电枢电流



(c) 同步电机三相电流



(d)同步电机端电压

图 4 额定工况下机组运行状态的仿真波形图

流、同步电机三相电流、同步电机端电压在经过大约 2 s 的波动后,均达到额定值 1 并保持稳定,可见仿真模型对机组转速和电压幅值的控制效果较好,并且仿真结果与理论分析及实际情况基本一致,验证了所建模型的正确性。

3 火花偏大机理及仿真研究

3.1 电磁火花的产生机理分析

直流电机运行时,随着电枢的旋转,组成电枢绕组的元件会不断从一条支路离开并进入相邻的支路,期间元件会被电刷短路,元件中电流改变方向的过程称为换向过程,如图 5 所示。

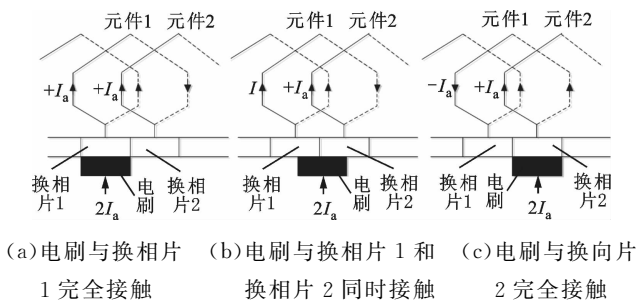


图 5 直流电机换向过程示意图

为了便于理解,对直流电机换向过程进行了简化,仅以单叠绕组中元件 1 中电流的变化来说明换向的具体过程。假设电刷的宽度与换相片的宽度相等,电枢绕组从右向左运动,根据相对运动原则,可以看作是电刷从左向右运动。图 5a 是电刷与换相片 1 完全接触的情况,此时流过元件 1 中的电流为顺时针方向,记为 $+I_a$ 。图 5b 是电刷与换相片 1 和换相片 2 同时接触的情况,此时元件 1 被短路,元件 1 中的电流记为换向电流 I ,当元件 1 中的感应电动势为 0 时, I 为 0,当元件 1 中的感应电动势不为 0 时, I 不为 0。根据楞次定律可知, I 的方向与换向前元件 1 中的电流保持一致,对换向过程有一定的阻碍作用。图 5c 是电刷与换相片 2 完全接触时的情况,此时元件 1 中的电流方向变为逆时针方向,记

为 $-I_a$ 。从换向开始到换向结束所用的时间称为换向周期,一般情况下换向周期很小,只有几毫秒,但换向过程的好坏直接影响到直流电机的工作性能,当换向不良时,在电刷和换相片之间会产生电火花。火花较小时,对直流电机的运行特性影响不大,但火花偏大时,会烧坏电刷或换相片,使电机不能正常工作,严重时在正负电刷之间会形成很长的电弧,导致环火故障,烧坏电枢绕组。

根据产生换向火花的原因,可以将火花分为电磁性火花和机械性火花两大类,其中又以电磁性火花为主。直流电机在换向过程中,组成电枢绕组的元件中的电流方向会改变。在一个换向周期内,由于换向元件中的电流由 I_a 变为 $-I_a$,将会在元件内部产生自感电动势。另外,由于在实际直流电机中,同一个换相片会与多个元件相连,因此元件之间会产生互感电动势,自感电动势和互感电动势的矢量和称为电抗电动势,根据楞次定律可知,电抗电动势对直流电机的换向过程起阻碍作用。

此外,当直流电机空载时,励磁磁动势单独作用产生的气隙磁通密度为一平顶波,且关于磁极轴线上下对称,此时电刷所在位置对应的磁通密度为零。当直流电机接负载时,流入电枢绕组的电流会感应出一个磁通,该磁通会导致气隙磁通的空间分布发生畸变,这个过程称为电枢反应。由于电枢反应,气隙磁通密度为零的空间几何位置会发生偏移,使电刷处的磁通密度不为零。当换向元件与电刷接触时,会切割磁感线感应出旋转电动势,同理,该旋转电动势总是对直流电机的换向过程起阻碍作用。

电抗电动势和电枢反应电动势越大,对电流换向的阻碍就越大,换向结束时,元件中剩余的附加电流也就越大。换向元件与电刷空间分离时,元件中储存的能量会以弧光放电的形式释放出来,因而在电刷和换向器之间产生火花放电现象。

根据以上分析,可以将机组直流电机电刷和换相片之间的火花看成是电弧,该电弧串联在直流电机电枢回路中,在火花不大时,这部分电弧主要起到串联分压的作用。由于直流电机存在多个电刷和换相片,且转速较快,电刷的宽度较窄,因而两电弧之间的时间间隔较短,即电弧周期较小。该结论为后续多个周期电弧的仿真研究提供了思路。

3.2 Cassie 电弧模型

目前,常用的电弧模型主要有物理模型和黑盒模型。物理模型可以比较精确地揭示电弧内部物理过程,但需要考虑电场、磁场、热场等物理场的耦合

关系,求解时间较长且求解过程非常复杂,在一定程度上限制了物理模型的使用范围^[11]。黑盒模型不考虑电弧内部复杂的物理过程,将电弧视为一个由时间变量及电弧参数表示的电路元件,反映出电弧电压、电弧电流、电弧电导等参数之间的相互关系,因其计算和使用较为简单,多采用黑盒模型进行定性研究^[12-14]。

Cassie 从宏观的角度研究了电弧的外特性,于 1993 年提出了 Cassie 黑盒电弧模型,该模型基于以下假设^[15]:

(1) 电弧具有圆柱形的气体通道,其截面温度分布均匀;

(2) 电弧通道具有明确的界限,在界限以外的气体电导率很小;

(3) 电弧的温度在时间和空间上保持不变;

(4) 不考虑从电极区域散出的能量,电弧等离子体能量和能量散出速度与弧柱横截面的变化成正比。

基于以上假设,Cassie 电弧模型的数学表示式为

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau_c} \left(\frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right) \quad (7)$$

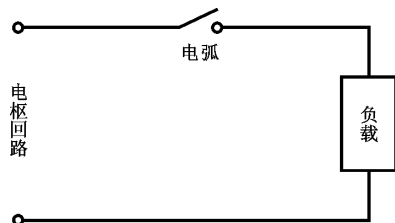
$$u = \frac{I_{arc}}{g} \quad (8)$$

式中: g 为单位长度电弧的电导; τ_c 为时间常数; u 为电弧电压; U_c 为电弧电压梯度; I_{arc} 为电弧电流。

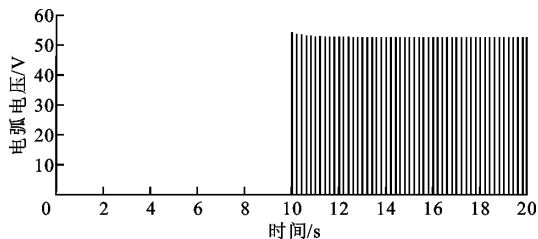
3.3 火花偏大仿真研究

根据第 3.1 节对直流电机电磁火花机理及第 3.2 节对 Cassie 电弧模型的分析,可以将 Cassie 电弧模型近似为火花数学模型,通过将 Cassie 电弧模型串联至直流电机电枢回路中,实现机组火花偏大的虚拟注入,仿真研究火花偏大对机组运行特性的影响并与正常工况下机组的运行特性进行对比。由于 Cassie 电弧模型一次只能产生一个电弧^[16-20],且持续时间极短,与实际机组直流电机存在的火花偏大不一致,因此本文对 Cassie 电弧模型做了一定改进,使其可以输出多个周期性电弧电压,以便于研究分析多个连续周期电弧对机组运行特性的影响。串联型电弧示意图及多个连续周期电弧电压波形如图 6 所示。

在三相同步电机分别带 20% 负载、半载和满载 3 种工况下,仿真研究多个连续周期性电弧对机组运行特性的影响。设定在 10 s 时刻起弧,电弧周期为 0.2 s,仿真时间为 20 s,分别采集直流电机电枢电流波形并对其进行归一化,结果如图 7 所示。

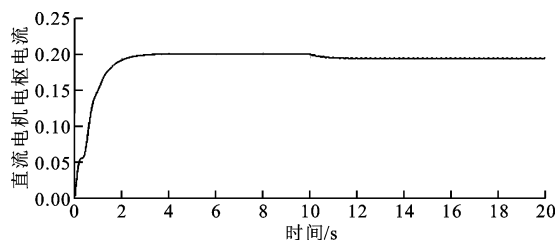


(a) 串联型电弧

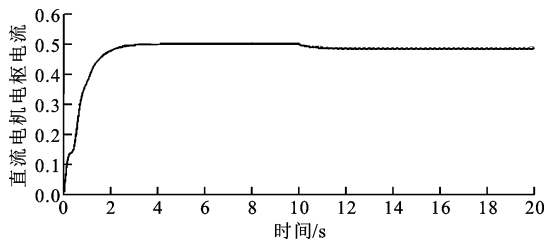


(b) 电弧电压

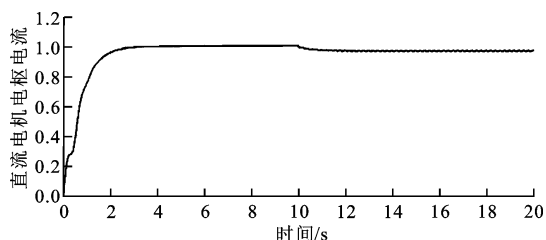
图 6 电弧示意图



(a) 20% 负载



(b) 半载

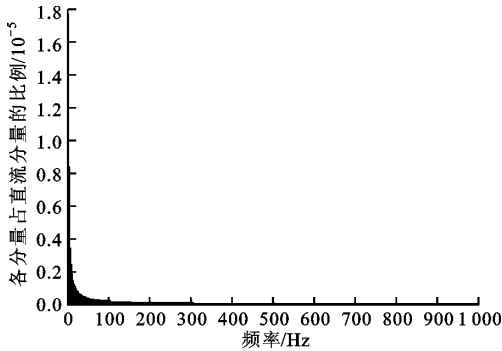


(c) 满载

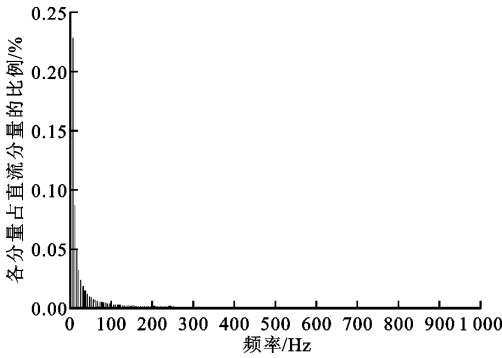
图 7 不同负载下周期性火花偏大时的仿真直流电机电枢电流

从图 7 可以看出:无论同步电机带 20% 负载、半载还是满载,在机组直流电机正常工作时(0~10 s),电枢电流均比较平滑,当机组同步电机发生火花偏大后(10~20 s),电枢电流有下降趋势且开始波动。

当同步电机带满载时,直流电机可能会处于正常工作或火花偏大工况。分别对这两种工况下的直流电机电枢电流进行傅里叶变换,分析纹波系数。选取 50 个周期的基准数据,设置基准频率为 50 Hz、最大频率为 1 kHz、计算起始时刻分别为 8 s 和 14 s,变换结果如图 8 所示。



(a)直流电机正常工作



(b)直流电机火花偏大

图 8 不同工况下直流电机电枢电流的傅里叶变换结果

分析图 8 可知:在正常工况下,直流分量平均值为 1,纹波系数为 0,这与软件本身的理想特性有关;在火花偏大工况下,直流分量平均值为 96.75%,纹波系数为 0.23%。因此,可以初步确定火花偏大会使直流电机电枢电流纹波系数增大。

4 火花偏大试验研究

4.1 试验硬件组成

由于试验条件所限,火花偏大试验在一台 4 kW 主变流机组原型样机上进行。该样机由一台直流电机和一台三相同步电机组成,主要通过调节机组直流电机电刷的位置,使直流电机产生火花偏大现象。在样机上进行试验,一方面可以验证仿真电弧模型的正确性,另一方面可以为机组火花检测提供参考。试验总体硬件平台如图 9 所示。样机部分参数如表 1 所示。

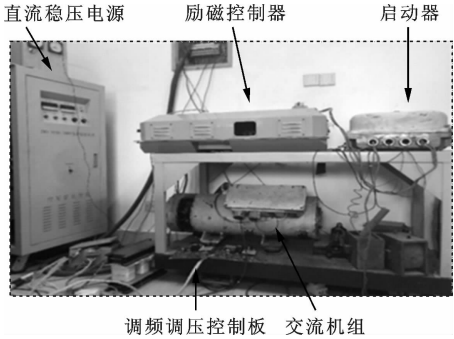


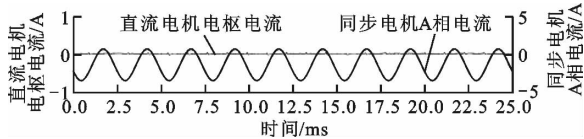
图 9 总体试验平台

表 1 4 kW 主变流机组部分参数

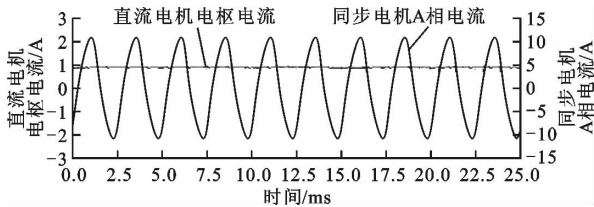
机组 部件	额定参数	数值	机组 部件	额定参数	数值
直流 电机	电压/V	240	交流 电机	电压/V	230
	电流/A	16.7		电流/A	15
	功率/kW	4		功率/kW	3.45

4.2 试验结果及分析

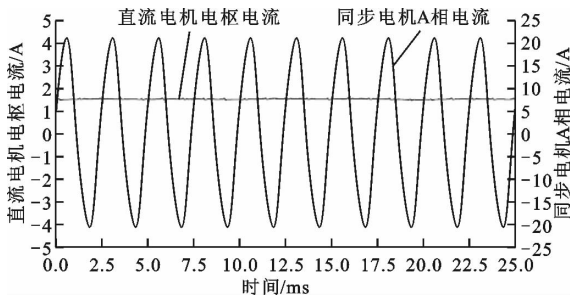
为便于观察火花大小,在整个试验过程中保持室内黑暗。分别在直流电机正常工作及发生火花偏大现象时,同步电机带 20% 负载、半载和满载共 6 种工况下,采集直流电机电枢电流和同步电机 A 相电流波形,结果如图 10 所示。



(a)直流电机正常工作时同步电机带 20% 负载



(b)直流电机正常工作时同步电机带半载



(c)直流电机正常工作时同步电机带满载

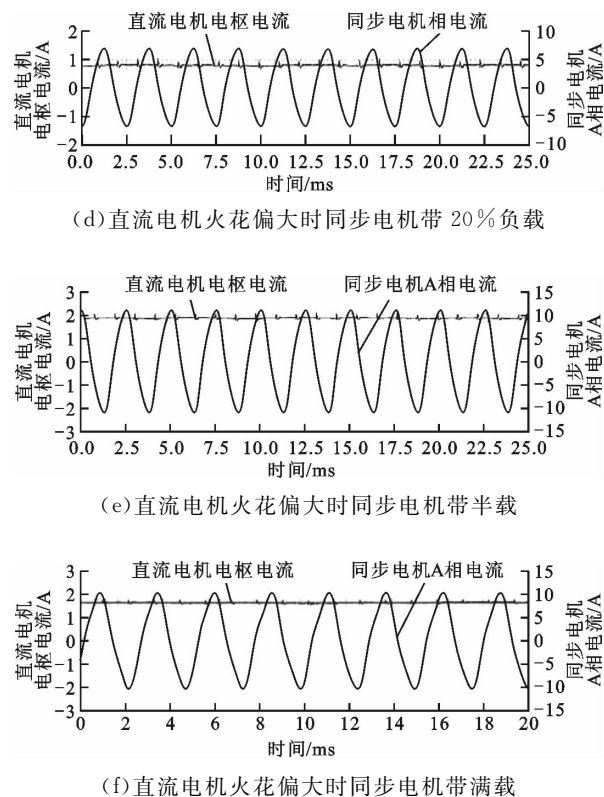


图 10 直流电机电枢电流和同步电机 A 相电流试验波形

综合观察和分析图 10a~f, 可以得出: 在正常工作下, 直流电机电枢电流波形较为平直; 火花偏大时, 直流电机电枢电流存在微小的周期性小脉动; 由于样机功率较小且机组直流电机和同步电机为机械耦合, 火花偏大对同步电机交流电流的影响不大。

分别对 6 组试验中直流电机电枢电流进行傅里叶变换, 并计算电枢电流的纹波系数, 结果如表 2 所示。

表 2 直流电机电枢电流的纹波系数

负载情况	工况	负载电流/A	纹波系数/%
20%负载	正常工作	2.8	4.44
	火花偏大		5.52
半载	正常工作	7.5	2.18
	火花偏大		2.46
满载	正常工作	14.8	1.43
	火花偏大		1.71

分析表 2 可以看出: 对于纵向对比, 无论是否存在火花偏大, 随着同步电机负载的增加, 直流电机电枢电流纹波系数逐渐减小, 这与负载的稳定性有一定的关系; 对于横向对比, 在同等负载条件下, 火花偏大时直流电机电枢电流纹波系数比正常工作工况下的纹波系数大, 与第 3 节的仿真结果基本保持一

致, 也验证了火花偏大发生后, 直流电机电枢电流纹波系数会增加的结论。

5 结 论

针对当前舰船主变流机组存在的火花偏大现象, 本文重点研究分析了机组直流电机的数学模型并进行了仿真试验, 仿真结果与理论分析及实际情况基本保持一致, 验证了所建模型的正确性。通过引入 Cassie 电弧模型, 并将该模型串联至机组直流电机电枢回路中, 实现了火花偏大的虚拟注入, 研究了火花偏大对机组直流电机电枢电流纹波系数的影响, 仿真结果表明, 火花偏大会使直流电机电枢电流下降、纹波系数增加, 与负载大小无关。在一台 4 kW 主变流机组原型样机上进行试验验证, 通过调节直流电机刷架的位置, 使直流电机发生电磁性火花偏大, 研究火花偏大对直流电机电枢电流的影响, 试验结果表明: 无论是否存在火花偏大, 随着机组负载的增加, 直流电机电枢电流纹波系数减小; 在同等负载条件下, 火花偏大时直流电机电枢电流的纹波系数比正常工况下的纹波系数大; 试验结果与仿真结果一致, 仿真模型正确且有效。本文研究可为机组火花偏大的在线监测及故障诊断提供参考。

参考文献:

[1] 赵慧元. 核潜艇主变流机组动态性能分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 1999: 25-28.

[2] 徐正喜, 孙瑜. 变流机组交流电机励磁系统控制研究 [J]. 舰船工程, 2003, 25(5): 40-43.

XU Zhengxi, SUN Yu. Study on control method of exciting system of AC generator in converter set [J]. Ship Engineering, 2003, 25(5): 40-43.

[3] 贺慧英, 沈建清, 李红江. 变流机组在交直流混合供电系统中的仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(8): 1828-1882.

HE Huiying, SHENG Jianqing, LI Hongjiang. Study on simulation of converter unit in AC&DC supply system [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(8): 1828-1882.

[4] 陈立志, 高崑. 船用中频变流机组感应子发电机模型的研究与应用 [J]. 船电技术, 2011, 31(12): 28-31.

CHEN Lizhi, GAO Wei. Research and application of marine intermediate frequency converter model [J]. Marine Electric, 2011, 31(12): 28-31.

[5] 孔凡让, 刘志刚, 王建平, 等. 图像处理在直流电机换向火花图像监测中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 53-57.

- KONG Fanrang, LIU Zhigang, WANG Jianping, et al. Image processing applying in DC motor commutation spark image-monitoring method [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 53-57.
- [6] 高海波, 程涛, 周长征, 等. 直流电机换向火花的检测与调整 [J]. 四川兵工学报, 2013, 34(9): 109-111.
- GAO Haibo, CHENG Tao, ZHOU Changzheng, et al. Basic studies for the detection and adjustment of DC motor commutation spark [J]. Journal of Sichuan Armed Forces, 2013, 34(9): 109-111.
- [7] 刘志刚, 孔凡让, 王秒, 等. 直流电机换向火花的自动分级 [J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 32(6): 696-701.
- LIU Zhigang, KONG Fanrang, WANG Miao, et al. Auto classification of DC-electromotor sparks [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2002, 32(6): 696-701.
- [8] LIM S W, KHAN U A, LEE J G, et al. Simulation analysis of DC arc in circuit breaker applying with conventional black box arc model [C] // Proceedings of 2015 3rd International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 332-336.
- [9] 曹建波, 曹秉刚, 王斌, 等. 电动车用无刷直流电机无位置传感器控制研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(5): 597-601.
- CAO Jianbo, CAO Binggang, WANG Bin, et al. Position sensorless control for brushless DC motor of electric vehicle [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(5): 597-601.
- [10] 林海, 严卫生, 李宏. 无刷直流电机驱动控制容错方案研究 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(2): 53-57.
- LIN Hai, YAN Weisheng, LI Hong. Inverter fault tolerant operation of brushless DC motor drives [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(2): 53-57.
- [11] HAGINOMORI E, KOSHIDUKA T, ARAI J, et al. Black box arc modeling [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Ltd., 2016: 383-388.
- [12] SINCERO G C R, CROS J, VIAROUGE P. Arc models for simulation of brush motor commutations [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 1518-1521.
- [13] BOEHM M, SURVE A C, TATIKONDA S, et al. SystemML: declarative machine learning on spark [J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2011, 9(13): 231-242.
- [14] 顾万里, 胡云峰, 张森, 等. 有刷直流电机自适应滑模控制器设计与试验 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(9): 112-117.
- GU Wanli, HU Yunfeng, ZHANG Sen, et al. Design and experiments on the adaptive sliding mode controller of brushed DC motor: assessment [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(9): 112-117.
- [15] 肖翼洋. 基于 Cassie 电弧模型的直流塑壳断路器建模及其短路分断特性研究 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2008: 10-12.
- [16] LU S, HE Q, ZHAO J. Bearing fault diagnosis of a permanent magnet synchronous motor via a fast and online order analysis method in an embedded system [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 113: 36-49.
- [17] MATSUDA T, SUZUKI Y. Relation between brush contact voltage and no-spark zone of DC-machine [J]. Electrical Engineering in Japan, 1981, 101(5): 93-100.
- [18] 刘晓明, 徐叶飞, 刘婷, 等. 基于电流信号短时过零率的电弧故障检测 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 125-133.
- LIU Xiaoming, XU Yefei, LIU Ting, et al. The arc fault detection based on the current signal short time zero crossing rate [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 125-133.
- [19] 刘艳丽, 郭凤仪, 王智勇, 等. 基于信息熵的串联型故障电弧频谱特征研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 488-495.
- LIU Yanli, GUO Fengyi, WANG Zhiyong, et al. Research on the spectral characteristics of series arc fault based on information entropy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 488-495.
- [20] 缪希仁, 郭银婷, 唐金城, 等. 负载端电弧故障电压检测与形态小波辨识 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 237-244.
- MIAO Xiren, GUO Yinting, TANG Jincheng, et al. Load side arc fault voltage detection and identification with morphological wavelet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 237-244.

(编辑 陶晴)