

海上平台进口发电机转子匝间短路的诊断及国产化

孙霖², 刘全恩², 张凤山¹, 李毅¹, 罗峰¹, 左军¹, 王大安¹

(1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452;

2. 中海油能源发展股份有限公司 油建渤海装备分公司, 天津 300452)

摘要:为解决海上采油平台大型进口发电机组主要部件损坏后出现的严重故障,对其进行国产化翻新意义重大。概括了海上油气平台进口主发电机转子匝间短路的表现形式和诊断方法,初步探讨了发电机转子新线圈的选择和绕制等国产化步骤,阐述了使用新转子后发电机的动平衡调整过程,明显降低了发电机运行振动。研究表明,该研究为深入实施进口发电机国产化奠定了基础。

关键词:进口发电机;匝间短路;转子国产化;动平衡

中图分类号: TM921.41

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)10-1287-04

Field examining and repairing for rotor's short circuit and localization of generator on oil-gas platform

SUN Lin², LIU Quan-en², ZHANG Feng-shan¹, LI Yi¹, LUO Feng¹, ZUO Jun¹, WANG Da-an¹

(1. CNOOC Ltd., Tianjin 300452, China; 2. Bohai Equipment & Technique Services

Division, Field Construction Engineering Co., Tianjin 300452, China)

Abstract: For resolving the serious failure due to the damage of main parts in the large imported generating units on the offshore oil platform, the localization refurbishment of the parts is significant. The form and diagnostic method of turn-to-turn short circuit on the imported main generator rotor of the offshore oil gas platform were generalized, the localization steps of the choice and winding for generator rotor new coil were explored preliminary, the generator dynamic balance adjustment process was illustrated after using the new rotor, and the generators running vibrations was obviously decreased. The results show that the research lays a foundation for the deep implementation of imported generator localization.

Key words: import generator; short circuit on rotor; localization of rotor; trim balancing

0 引言

海上石油钻探是一项高难度、高风险、高投入的高新技术产业。这种油田行业野外作业的大型设备的动力来源以及平台成员的生活用电都依靠主发电机组提供,可以说发电机是为海上平台提供电力的“心脏”,其可靠运行是平台安全、持续生产的基础。但随着海上油田运行时间的不断延长,很多大型发电机组都面临着长期服役后出现可靠性降低、故障率升高、使用风险增加的难题。

渤海某油田于 2010 年 12 月对一台累计运行时间超过 10 万小时的发电机组进行了在线检修,成功诊断

其转子匝间短路并对其进行了国产化翻新,笔者在此就实施检修的经验谈谈一些认识和体会。

1 海上油气平台主发电机转子匝间短路的表现形式及诊断方法

1.1 发电机组的主要构成

本次检修的发电机组服役已超过 10 年,其运行小时数超过 100 000 h。自 2005 年 2 月起出现高振动。其主要表现形式为励磁端高振动,该振动空载时比较稳定,但振动幅值随着有效负载的增加而明显增加,有功功率越大,振动越大,无功功率越大,振动越大。励

收稿日期:2011-04-02

作者简介:孙霖(1982-),男,黑龙江佳木斯人,主要从事轻型透平相关技术方面的工作. E-mail:Sunlin2@cnooc.com.cn

磁端振动幅值(轴振动位移峰-峰值最大达到 72 μm)明显高于驱动端(42 μm)。其轴承座振动速度有效值(RMS)最大达到 7.58 mm/s。其具体检测情况如下:

(1)该发电机组由燃气轮机、齿轮箱和发电机组成(如图 1 所示),三部分分别用地脚螺栓紧固在公用机撬中。燃气轮机为轴流式双轴燃气轮机,压缩机轴转速 10 780 r/min,输出轴转速 9 500 r/min,发电机转速 1 500 r/min。

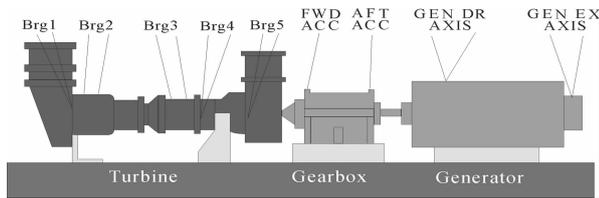
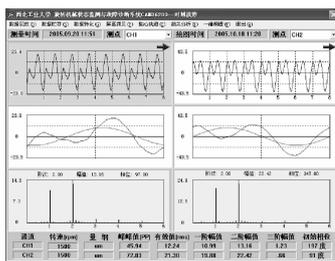
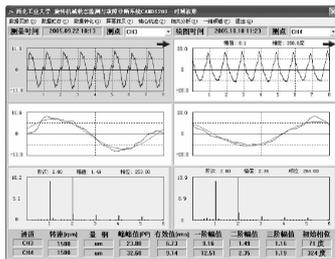


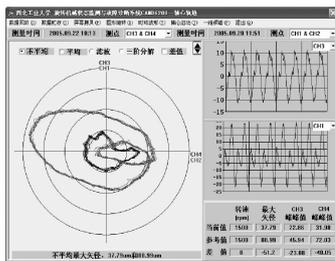
图 1 发电机组简图



(a) 带负荷时的时域波形和频谱(负荷=7500 kW, 转速=1 500 r/min)



(b) 无负荷时的时域波形和频谱(负荷=0, 转速=1 500 r/min)



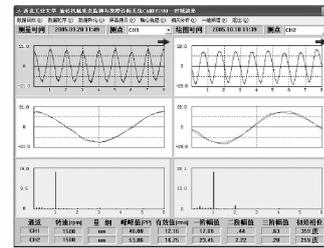
(c) 带负荷和无负荷时轴心轨迹与轴心运动(实线: 负荷=0; 虚线: 负荷=7 500 kW)

图 2 励磁端的测试结果

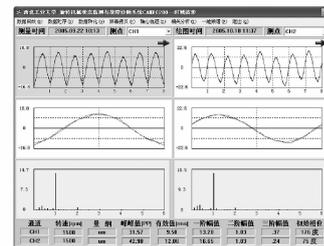
(2)发电机为美国 Ideal Electric Company 的产品(发电机参数如表 1 所示)。直流励磁机直接安置在发电机的自由端,为悬臂结构。

表 1 发电机参数

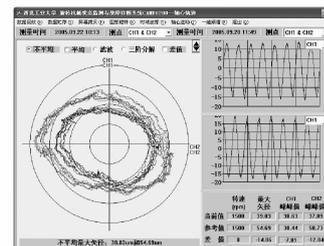
生产 厂家	型号	转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	功率/ kW	相数	电压 /V	轴承 类型	联轴器 形式
Ideal Electric Company		1 500	11 500	3	6 300	圆瓦	膜片



(a) 带负荷时的时域波形和频谱(负荷=7500 kW, 转速=1 500 r/min)



(b) 无负荷时的时域波形和频谱(负荷=0, 转速=1 500 r/min)



(c) 带负荷和无负荷时轴心轨迹与轴心运动(实线: 负荷=0; 虚线: 负荷=7 500 kW)

图 3 驱动端的测量结果

1.2 振动检测及频谱分析

本研究利用 CAMD-6200 型旋转机械状态监测与故障诊断系统对机器的振动信号进行分析^[1-2]:

(1)对励磁端的测试结果,如图 2 所示;

(2)对驱动端的测量结果,如图 3 所示。

根据上述的测试结果可见,机组的振动与负荷密切相关^[3]。一般而论,这是较为普遍的规律。但发电机负载运行时励磁端振动明显超标,且发电机励磁端的 2 倍频振动分量在带负荷时很显著,两个测点分别为 13.16 μm 和 22.42 μm ,均超过 1 倍频分量。无负荷后则分别降为 1.49 μm 和 2.35 μm 。但发电机驱动端的振动中 2 倍频分量很小,且随负荷变化不变化。特别值得注意的是,不论驱动端,还是励磁端,1 倍频相位差不随负荷发生变化。这一规律可能会排除不对中的可能性。

同时可见,在带负荷时,励磁端的 2 倍频振动分量以正进动为主。另外,考虑到对励磁端壳体轴向振动速度的测量结果,可以认为,励磁端的 2 倍频振动是由励磁电流所产生的。

1.3 对转子的电气检查

1.3.1 主转子直流电阻

测试方法:使用 QJ44 双臂电桥,将每一组线圈之

间的连线绝缘剥开,表笔接到每一组线圈两端的引出端,进行每一组线圈的直流电阻测量。测量值如下:

4组分别测量直流电阻:

第1组线圈:0.393 5 Ω ;

第2组线圈:0.393 0 Ω ;

第3组线圈:0.392 0 Ω (该组电阻较小,说明内部存在短路);

第4组线圈:0.396 5 Ω 。

总电阻值 1.575 0 Ω 。

1.3.2 主转子交流压降

测量方法:将4组线圈串联起来,从主转子的两根引出线处,通220 V交流电源,用万用表分别测量每一组线圈的分压,其检测值应该是各族线圈分压相等。实际测量值如下:

第1组线圈:57.7 V;

第2组线圈:50.9 V(该组压降较低,内部线圈短路);

第3组线圈:13.5 V(该组压降过低,内部线圈短路明显);

第4组线圈:59.0 V。

该机各线圈的直流电阻相对值较大,各线圈交流压降相对值过大,是由于在第3组线圈中发生了比较严重的匝间短路。经过机组对中、定子检查、振动探测回路等其他检查无误后,基本可以断定转子匝间短路是该发电机振动高的主因。

2 进口发电机转子国产化翻新

确定发电机转子出现严重的匝间短路后,对转子进行大修翻新势在必行。由于海上油气生产对电力的需求非常急迫,同时考虑到其他经济因素,最终选择对匝间短路的转子进行国产化翻新。而由于国外发电厂家的导线外形、绝缘种类、绕线方式等方面与国内有较大的差别,因此在发电机转子的国产化翻新过程中,必须考虑对该转子进行国产化改造,使其既满足原有的性能参数,又适应国内的发电机检修资源。

2.1 导线及绝缘种类的变更

原有发电机转子采用SBQB-23/155单玻璃丝包漆包方铜线。该导线绝缘存在以下问题:①导线是方形6.45 mm×6.50 mm, $b/a < 1.4$ 时,国内做不了,而且绕线较大;②漆包方铜线四角的绝缘薄弱;③漆层容易出现针孔与气泡,影响绝缘;④由于单玻璃丝包太薄,很多地方容易漏缝或脱落,防护效果差;⑤有效绝缘厚度仅0.12 mm,击穿电压10 a 1 800 V,已不能满

足海上油气生产对稳定性和安全性的需要。

在新导线的选择上,根据国家标准^[1]要求,改用5.10 mm×8.15 mm导线, $S = 40.706$ 与原导线的40.689截面积基本一致,同时新导线 $b/a = 1.598$ 符合国家标准要求,绕线也较小。导线用MYFB-22.5/200聚酰亚胺—氟树脂复合薄膜绕包烧接线。绝缘结构0.037 5 mm,复合薄膜2/3迭包一层;绝缘厚度0.225 mm;4 a弯曲系数高于原有的10 a;标称击穿电压4 a 6 000 V高于原有的10 a 1 800 V;耐热200级高于原有的180级。由此可见,在新绝缘导线的选择和变更上,各项主要指标均优于原有导线。

2.2 新线圈匝数及层数的选择和计算

旧线圈共4极,每极275匝。其中:满匝数11层,每层23匝, $11 \times 23 = 253$ 匝;减匝数1层,每层22匝, $253 + 22 = 275$ 匝。线圈尺寸:内部宽度292 mm,长度1 285 mm,厚度163 mm;外部宽度455 mm,长度1 475 mm,厚度163 mm。

因为新导线改用扁线,新线圈需减少每层匝数,增加层数。初步计划每层匝数19匝,层数计算: $275/19 = 14.47$ 层。实际绕法:1~13层:19匝;14层:15匝;15层:13匝;共计275匝。新线圈总宽度 $(5.10 + 0.23 + 0.11) \times 15 = 81.60$ mm;较旧线圈81.50 mm增加0.10 mm。新线圈总厚度 $(8.15 + 0.23 + 0.20) \times 19 = 163.02$ mm;与旧线圈163.0 mm一致。

3 转子翻新后的现场动平衡调试

3.1 许用不平衡度的计算

根据相关国家标准^[5]要求,按照转子半直径、重量与转速计算允许的不平衡重量。本次翻新的转子放平衡块位置半径365 mm,重量8 500 kg,转速1 500 r/min。许用不平衡度:

$$e_{per} = 2.5 \times 1\,000 / (2 \times 3.1416 \times 1\,500 / 60) = 15.90 \text{ (}\mu\text{m)}$$

3.2 最大许用振动幅值及不平衡量

本研究参照相关技术文献^[6-7],对于同步转速1 500 r/min的电机的单位许用不平衡度,一般电机40 μm ,要求振动较小的小型电机20 μm ,则:

$$U_{per} \leq m \times e_{per} = 8\,500 \times 15.00 = 127\,500 \text{ g} \cdot \text{mm}$$

允许的残余不平衡量:

$$\text{前端: } g = 63\,750 / 2 \times 365 = 174.6 \text{ g};$$

$$\text{后端: } g = 63\,750 / 2 \times 365 = 174.6 \text{ g}。$$

3.3 现场动平衡调整

驱动端增加平衡块:0°: 1 500 g 135°:270 g;

励磁端增加平衡块:225°:350 g。

表 2 动平衡调整后数据

负载情况	驱动端 X	驱动端 Y	励磁端 X	励磁端 Y
/kW	/μm	/μm	/μm	/μm
空载	16.5	16.5	10.5	10.5
2 000	21.7	21.7	12.3	12.3
3 000	22.2	22.2	14.2	14.2
6 000	23	23	17.6	17.6
7 000	23.5	23.5	17.9	17.9
7 500	23.5	23.5	17.9	17.9

动平衡调整后数据如表 2 所示。

从动平衡调整后的振动数据来看,原本负载振动很高的励磁端的振动数据非常优异,通过不同的测振仪器在现场(机撬内)实测的振动数据非常相近,说明本次进口发电机匝间短路转子国产化翻新的实际效果非常好。

4 结束语

海洋油气平台使用的船用发电机是由众多零部件组成的复杂系统,超期运转后,其运行状态与使用环境和维护保养密切相关。目前国内的船用发电机制造和维护水平与国外先进水平相比还存在较大差距,国外厂商技术服务收费高昂、周期过长,造成目前进口发电机的故障诊断和解决都存在较大的难度。

通过本次进口发电机转子匝间短路的故障诊断和国产化翻新,已经初步摸索出了一套发电机常见故障诊断方法和解决措施,为进口发电机等大型设备的国

产化改造升级积累了宝贵的技术数据和经验。目前,正通过开展更多的发电机在线检修和国产化改造升级项目不断地掌握并完善相关检修数据和经验。

对于海上平台发电机组,其可靠性要求较高,只有做好运行管理、维护保养,结合各种在线检修技术,提高诊断精度,做好常规检查,是确保机组安全运行的必要手段。

参考文献(References):

- [1] 胡宇达,邱家俊.大型汽轮发电机端部绕组整体结构的电磁振动[J].中国电机工程学报,2003,23(7):93-98.
- [2] 汤蕴蓼.电机内的电磁场[M].2版.北京:科学出版社,1998.
- [3] RICHARD S, DUCREUX J P, FOGGIA A. A Three Dimensional Finite Element Analysis of the Magnetic Field in the end Region of a Synchronous Generator[C]. IEEE Electric Machines and Drives Conference Record,1997.
- [4] 国家标准化工作委员会.GB/T 15548-1995 中国标准书号[S].北京:中国标准出版社,1995.
- [5] 国家标准化工作委员会.GB9239-88 中国标准书号[S].北京:中国标准出版社,1988.
- [6] 游善良,沈良伟,刘公直,等.电机工程手册[M].北京:机械工业出版社,1996.
- [7] NONA S T,SUNDARARAJAN P. Significance of considering nonlinear effects in predicting the dynamic behaviour of rotating machinery[J]. *Journal of Vibration and Control*, 1995,1(4):431-458.

[编辑:张翔]

(上接第 1283 页)

为实现最大功率跟踪,本研究在传统的扰动观察法的基础上构造了自适应占空比干扰观察法:通过减少控制循环,减小了最大功率跟踪器的设计复杂度;并在算法中加入步长自动在线调整器,根据反馈情况实时改变跟踪步长,以较快的速度和较小的误差跟踪系统的最大功率点,提高了系统的快速性和稳定性。基于 Matlab/Simulink 软件的仿真结果也验证了此理论的可行性。

参考文献(References):

- [1] 赵争鸣,刘建政,孙晓瑛,等.太阳能光伏发电及其应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [2] 赵庚申,王庆章.最大功率跟踪控制在光伏系统中的应用[J].光电子·激光,2003,14(8):813-816.
- [3] LIU X, LOPES L A C. An improved Perturbation and Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Arrays[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004:2005-2010.

- [4] 禹华军,潘俊民.光伏电池输出特性与最大功率跟踪的仿真分析[J].计算机仿真,2005,22(6):248-252.
- [5] 稽保健,赵剑锋.DC/DC变换器数字控制方法研究[J].电力电子技术,2010,4(4):29-30.
- [6] KOUTROULISAL E. Development of a microcontroller based photovoltaic maximum power point tracking control system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2001,16(1):46-54.
- [7] 崔岩,蔡炳煌,李大勇,等.太阳能光伏系统 MPPT 控制算法的对比研究[J].太阳能学报,2006,6(6):535-539.
- [8] 张超,何湘宁.短路电流结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中的应用[J].中国电机工程学报,2006,26(20):98-102.
- [9] 邱望标,陈苏恒,彭秀英,等.基于 ARM 与 MC/OS-II 的太阳跟踪系统研究与实现[J].机械,2009,36(8):29-32.
- [10] 杨欢军,姜清海,陈峰,等.基于阳光自动跟踪控制的光伏阵列设计及应用[J].机电工程技术,2010,39(4):41-43.

[编辑:张翔]